



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA
INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE
VITRIFICACIÓN EX SITU”**

Realizado por:

KARINA JAQUELINE SIMBAÑA FARINANGO

Director del proyecto:

Dr. Lino Arisqueta Herranz, PhD.

Como requisito para la obtención del título de:

MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

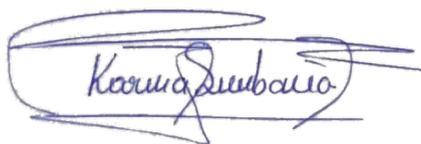
Quito, 8 de marzo de 2021

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, KARINA JAQUELINE SIMBAÑA FARINANGO, con cédula de identidad # 172110894-0, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



KARINA JAQUELINE SIMBAÑA FARINANGO

C.I. 172110894-0

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA
INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE
VITRIFICACIÓN EX SITU”**

Realizado por:

KARINA JAQUELINE SIMBAÑA FARINANGO

como Requisito para la Obtención del Título de:

MAGÍSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

Dr. LINO ARISQUETA HERRANZ, PhD.

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

KATTY VERÓNICA CORAL CARRILLO, M. Sc.

RODOLFO JEFFERSON RUBIO AGUIAR, M. Sc.

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



**KATTY VERÓNICA
CORAL CARRILLO, M. Sc.**



**RODOLFO JEFFERSON
RUBIO AGUIAR, M. Sc.**

Quito, 8 de marzo de 2021

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

DEDICATORIA

Dedicado a mis hijos: Damián, Fernando y Valentina y mi esposo Diego por todo el apoyo y paciencia para alcanzar esta meta. A mi mami Zoila por su ayuda constante y a mi papi Alberto que ahora es un ángel por darme sus consejos de seguir adelante para superarme profesionalmente y ser una persona de bien. A mis hermanos Alex y Mishell, y sobrinas por estar unidos en estos difíciles momentos para mi familia y que de alguna manera me apoyaron para alcanzar esta meta.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Internacional SEK por la apertura y facilidades para la ejecución de este trabajo de investigación. A mi tutor PhD. Lino Arisqueta por su acompañamiento en el desarrollo de este trabajo, a mis lectores de tesis MSc. Jefferson Rubio y en especial a la MSc. Katty Coral por sus valiosos conocimientos y aportes durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Centro de Estudios Aplicados en Química de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador-Quito, CESAQ-PUCE, por su apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

08/03/2021 10:00

Para someter a: To be submitted:

“INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU”

Karina Simbaña-Farinango^{1,2}, Katty Coral², Jefferson Rubio², Lino Arisqueta²

¹ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Centro de Estudios Aplicados en Química, Quito, Ecuador. Email: kjsimbanaf@puce.edu.ec

²Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador.
Email: kjsimbana.mga@uisek.edu.ec
Email: katty.coral@uisek.edu.ec
Email: Jefferson.rubio@uisek.edu.ec
Email: lino.arisqueta@uisek.edu.ec

AUTOR DE RESPONSABILIDAD PRINCIPAL: Karina Simbaña-Farinango

AUTOR DE CORRESPONDENCIA: Lino Arisqueta, PhD.

AUTOR APORTANTE DE RESPONSABILIDAD UNO: Katty Coral, MSc.

Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales. Quito, Ecuador

AUTOR APORTANTE DE RESPONSABILIDAD DOS: Jefferson Rubio MSc.

Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales. Quito, Ecuador

Título corto o Runningtitle: Inertización de metales tóxicos de un lodo peligroso mediante vitrificación.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

RESUMEN

En la industria metalmecánica la generación de residuos sólidos es el principal problema medioambiental. Estos residuos son considerados desechos peligrosos porque representan un riesgo para la salud humana debido a la presencia de metales tóxicos; y riesgo al ambiente por la contaminación del suelo, agua y aire. Por esta razón se aplicó el proceso de inertización mediante la vitrificación. Esta investigación inició con la toma de muestra del lodo de los procesos de galvanizado en la industria metalmecánica, Procesadora VYMSA. Posteriormente se realizó la caracterización del lodo mediante el ensayo vía residuo, el lodo presentó un pH de 10.8 y una humedad de 78.69%.; se analizaron los metales Cd, Ni, Pb, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Hg, Co, Cr y Ag. La concentración de los metales se comparó con los límites máximos permisibles (LMP) para extracción de metales pesados en bases seca de la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales (NT005); el Ni, Cr y Zn estuvieron fuera del LMP; el Cu, Cr, Mn, Fe y Zn estuvieron fuera del rango lineal de determinación, y el Hg y Ag estuvieron por debajo del límite de cuantificación del método. Posteriormente se realizó la caracterización del lodo mediante el ensayo vía Lixiviado aplicando la metodología EPA 1311: Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad, para el proceso de lixiviación se utilizó el fluido extractante #2, y se recogió el extracto TCLP para analizar los metales pesados antes mencionados. La concentración de los metales no superó los LMP en el Extracto PEC para constituyentes inorgánicos de la NT005. Sin embargo, al realizar la comparación con los LMP de la Tabla 9: Límite de descarga a un cuerpo de agua dulce del Acuerdo Ministerial 097 A; el Cu, Pb, Cd, Mn y Zn, superaron estos LMP.

En base a estos resultados, para evitar la contaminación de causas de agua dulce por la lixiviación de los metales pesados presentes, se realizaron 26 pruebas de inertización-vitrificación del lodo, llegando a las condiciones ideales de vitrificación: temperatura máxima 1063°C, tiempo de temperatura máxima 1 hora, velocidad de calentamiento 60°C/hora, tiempo de enfriamiento 10 horas, vitrificante vidrio molido y equipo utilizado horno para vidrio. Estas condiciones permitieron la obtención de las muestras de lodo vitrificado de la prueba P22 (70% lodo/30% vidrio molido) a la P26 (30% de lodo/70% de vidrio molido), y dependiendo del porcentaje de lodo y vidrio molido las muestras presentaron un brillo homogéneo y liso. Para comprobar la eficiencia del proceso de vitrificación se aplicó la metodología EPA 1311 a las muestras vitrificadas (P22 a la P26) y se calculó el porcentaje de inertización. El porcentaje de inertización del Cu, Fe, Zn, Ni, Pb y As, incrementó al aumentar el porcentaje de vitrificante hasta llegar al 100%, mientras que, para el Cd, Hg, Se, Mn, Co y Cr se obtuvo 100% de inertización para las distintas pruebas. El punto de interés de este estudio fue hallar el menor porcentaje de vitrificante que proporciona resultados ambientalmente aceptables según la normativa.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

En ese sentido, la muestra P24 (50% lodo y 50% vitrificante) mostró resultados óptimos, y al comparar las concentraciones de los metales con los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce del Acuerdo Ministerial 097 A, estos cumplen con la normativa. El Pb no se puede evaluar debido a que el límite de cuantificación del método (0.3mg/l) es superior al LMP establecido en la norma (0.2 mg/L).

El proceso de vitrificación aplicado permitió que el lodo de la industria metalmecánica, se estabilice y se transforme a una sustancia no tóxica, con la obtención de un material de “vidrio”, pudiendo tener aplicaciones como “materia prima secundaria” en materiales de construcción y bisutería. Abriendo así las puertas a una economía circular debido a que se da una nueva vida al residuo reincorporándolo al ciclo de producción, aprovechando un recurso y reutilizando un residuo que por sus propiedades no podía volver a la naturaleza sin causar daños medioambientales al terminar su vida útil.

Palabras clave: contaminación, economía circular, inertización, lodo, metalmecánica, vitrificación.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

ABSTRACT

In the metal-mechanical industry, the generation of solid waste is the main environmental problem. These wastes are considered hazardous wastes because they represent a risk to human health due to the presence of toxic metals; and a risk to the environment due to soil, water and air contamination. For this reason, the inertization process was applied by vitrification. This research began with the sampling of the sludge from the galvanizing processes in the metal-mechanic industry, Procesadora VYMSA. Subsequently, the sludge was characterized by means of a residue test; the sludge had a pH of 10.8 and a humidity of 78.69%; the metals Cd, Ni, Pb, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Hg, Co, Cr and Ag were analyzed. The concentration of the metals was compared with the maximum permissible limits (MPL) for extraction of heavy metals in dry bases of the Technical Standard for Hazardous and Special Wastes (NT005); Ni, Cr and Zn were outside the MPL; Cu, Cr, Mn, Fe and Zn were outside the linear range of determination, and Hg and Ag were below the method's limit of quantification. Subsequently, the characterization of the sludge was performed by means of the Leachate test applying the EPA 1311 methodology: Toxicity Characteristic Leaching Procedure, for the leaching process, the extractant fluid #2 was used, and the TCLP extract was collected to analyze the heavy metals mentioned above. The concentration of the metals did not exceed the MPLs in the PEC Extract for inorganic constituents of NT005. However, when compared to the MPLs in Table 9: Discharge limit to a freshwater body of the Ministerial Agreement 097 A; Cu, Pb, Cd, Mn and Zn, exceeded these MPLs.

Based on these results, in order to avoid contamination of freshwater sources by leaching of the heavy metals present, 26 sludge inertization-vitrification tests were carried out, reaching the ideal vitrification conditions: maximum temperature 1063°C, maximum temperature time 1 hour, heating rate 60°C/hour, cooling time 10 hours, vitrifying ground glass and equipment used glass furnace. These conditions allowed obtaining the vitrified sludge samples from test P22 (70% sludge/30% ground glass) to P26 (30% sludge/70% ground glass), and depending on the percentage of sludge and ground glass, the samples presented a homogeneous and smooth luster. To check the efficiency of the vitrification process, the EPA 1311 methodology was applied to the vitrified samples (P22 to P26) and the percentage of inertization was calculated. The percentage of inertization of Cu, Fe, Zn, Ni, Pb and As increased with increasing vitrification percentage until reaching 100%, while for Cd, Hg, Se, Mn, Co and Cr 100% inertization was obtained for the different tests. The point of interest of this study was to find the lowest percentage of vitrificant that provides environmentally acceptable results according to the regulations. In this sense, sample P24 (50% sludge and 50% vitrificant) showed optimal results, and when comparing the concentrations of the metals with the discharge limits for a freshwater body of Ministerial Agreement 097 A, these comply with the regulations. Pb cannot be evaluated because

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

the method's quantification limit (0.3 mg/L) is higher than the MPL established in the standard (0.2 mg/L).

The vitrification process applied allowed the sludge from the metal-mechanical industry to be stabilized and transformed into a non-toxic substance, obtaining a "glass" material that can be used as a "secondary raw material" in construction materials and costume jewelry. Thus opening the doors to a circular economy because a new life is given to the waste by reincorporating it into the production cycle, taking advantage of a resource and reusing a waste that, due to its properties, could not return to nature without causing environmental damage at the end of its useful life.

Keywords: pollution, circular economy, inertization, sludge, metalworking, vitrification

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la industria metalmeccánica es uno de los pilares fundamentales para el desarrollo económico y social de los países. Este sector fabrica una amplia gama de productos, siendo su insumo básico el metal y las aleaciones de hierro. La fabricación de éstos depende de la situación económica del país (Quezada et al., 2015).

En Ecuador este sector es muy importante para la economía y el crecimiento industrial, ya que supone más del 10% dentro de la industria ecuatoriana con la fabricación de ángulos, perfiles; fabricación de barras, varillas y secciones sólidas de hierro y acero laminadas en caliente; fabricación de conductores eléctricos; condensadores electrónicos y microprocesadores; fabricación de artículos de alambre; así como tanques y recipientes a presión. Por todo esto, la industria metalmeccánica tiene relación con el área de hidrocarburos, minería, farmacéutica, alimentos, telecomunicaciones, agroindustria, empresas productoras, industriales, de servicios, etc. (FLASCO-MIPRO, 2010; Goitia, 2018).

En la industria metalmeccánica ecuatoriana aún persiste el trabajo artesanal, a pesar de los avances tecnológicos existentes, lo cual provoca que el medio ambiente sea contaminado por ruido, desechos sólidos no peligrosos y emisiones de gases, descargas líquidas a efluentes y desechos sólidos peligrosos (FLASCO-MIPRO, 2010). Los principales problemas ambientales generados por esta industria son la explotación desmedida de los recursos y la generación de residuos sólidos regresados al entorno natural de manera directa e indirecta, y por transformaciones físicas, químicas y biológicas ingresan a la cadena trófica y causan daños a la salud ser humano (Quezada et al., 2015).

Los residuos sólidos de esta industria son considerados residuos o desechos tóxicos y peligrosos ya que son materiales sólidos, pastosos, líquidos, contenidos en recipientes, que son el resultado de un proceso de producción, transformación, utilización, o consumo, y contienen sustancias con características corrosivas, reactivas, tóxicas, inflamables, biológico-infecciosas y/o radioactivas, los cuales representen un riesgo para la salud humana y el ambiente (Coral & Oviedo, 2019) debido a la presencia de metales pesados.

Los residuos sólidos de esta industria están constituidos por virutas metálicas, lodos de tratamiento de agua, arenas de descarte, y de acuerdo al proceso de fabricación y al tratamiento que se le realice a la superficie metálica también se generan lodos, objeto de estudio, que contienen metales pesados como: zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cromo (Cr), plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As), mercurio (Hg), entre otros, debido a que hacen uso de químicos que los contienen (Builes, 2010; Comisión Ambiental Metropolitana, 1997; Pedraza, 2010).

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Los metales pesados son aquellos con alta densidad, masa y peso atómico, y son tóxicos en bajas concentraciones. Algunos de estos elementos son: aluminio (Al), bario (Ba), berilio (Be), cobalto (Co), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cromo (Cr), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), selenio (Se), vanadio (Va), oro (Au) y zinc (Zn). De acuerdo a la contaminación que provocan se los conoce también como “elementos traza” (Galán & Romero, 2008; Londoño-Franco et al., 2016).

Los metales pesados no pueden ser degradados o destruidos, y al entrar en contacto con el ambiente provocan contaminación al suelo, agua y aire. Las principales rutas en las que los metales pesados se incorporan al sistema aire-suelo-sedimento-agua son el transporte por aire (atmósfera) y agua (fluvial). Estos pueden ser disueltos por agentes físicos y químicos y ser lixiviados, permitiendo el ingreso a la cadena trófica, debido a que al incorporarse al sistema acuático y usar como riego en la agricultura, estos metales son incorporados a los alimentos y al consumirlos por el ser humano, provocan problemas en de salud (Londoño-Franco et al., 2016; López & Pérez, 2018).

No obstante, es importante considerar que muchos de estos metales pesados son micronutrientes, es decir que los seres vivos requieren pequeñas cantidades para varias funciones biológicas. Sin embargo, la excesiva concentración de éstos puede alterar los procesos fisiológicos en el organismo y pueden llegar a ser tóxicos (Molina, 2014). La toxicidad de los metales pesados no se debe solo a sus características químicas, sino a las concentraciones en las que pueden presentarse, y más al tipo de compuesto o metabolito que forman (Londoño-Franco et al., 2016).

Debido a su naturaleza no biodegradable y a su persistencia en la naturaleza, los metales pesados son acumulados en los órganos vitales del cuerpo humano, porque son bioacumulables. Algunos de estos metales son biomagnificables, es decir, la concentración de estos contaminantes se incrementan al pasar a un nivel trófico superior en la cadena trófica (Castañeda et al., 2013; Molina et al., 2012).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA-US) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) indican que los metales: As, Cd, Hg y Pb son potencialmente tóxicos en bajas concentraciones (Molina et al., 2012; López & Pérez, 2018)., y menciona que la severidad de los signos, síntomas y alteraciones en el organismo se relacionan con las cantidades, el tiempo de exposición y con la vía de entrada de estos metales (Londoño-Franco et al., 2016): El Cd provoca anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos, cáncer de próstata y pulmón, edema pulmonar, gastroenteritis, fallo renal, y efectos teratogénicos y congénitos (Coral & Oviedo, 2019; Londoño-Franco et al., 2016); el

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

As provoca parálisis de los miembros inferiores, trastornos gástricos e intestinales, causa lesiones en la piel y lesiones vasculares en sistema nervioso e hígado, cáncer de piel y pulmón, neuropatía periférica, anemia y leucopenia (Coral & Oviedo, 2019; Londoño-Franco et al., 2016); el Hg como metil-mercurio, se absorbe un 90 % por el tracto intestinal, este provoca alteraciones del sistema nervioso, respiratorio, irritación de la piel y ojos, alteraciones en el sistema reproductivo, mutaciones genéticas, delirios y alucinaciones (Caiza & Inmaculada Valverde, 2018; Centro Nacional de Información Biotecnológica, 2020; Coral & Oviedo, 2019); el Pb provoca retraso del desarrollo mental e intelectual de los niños, causa hipertensión y enfermedades cardiovasculares en adultos (Centro Nacional de Información Biotecnológica, 2020). Interfiere en la función del calcio, inhibe la síntesis de hemoglobina y causa daño neurológico (Londoño-Franco et al., 2016); y el Cu por ingestión puede producir necrosis hepática y muerte, lesiones hepáticas en niños, además puede generar anemia hipocrómica, provoca diarreas, cambios de coloración del pelo o de lana, ataxia neonatal, alteración del crecimiento, infertilidad temporal e insuficiencia cardiaca (Londoño-Franco et al., 2016)

Debido a los problemas ambientales y de salud que causan estos residuos tóxicos por el contenido de metales pesados, el Ecuador ha establecido políticas de regulación, acuerdos ministeriales y ordenanzas, para controlar el desarrollo de actividades y procesos en los que se generen residuos especiales o peligrosos en las empresas, siendo más estrictas, particularmente con los metales pesados existentes en los desechos sólidos industriales (Gordón & Coral, 2020). De acuerdo a lo establecido en el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA), las entidades de control y regularización, son los responsables de verificar el cumplimiento de las normas de calidad ambiental y el régimen de permisos y licencias sobre actividades potencialmente contaminantes. Estas normas rigen para toda organización que realice proyectos dentro del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), y que genere impactos o riesgos ambientales, el incumplimiento de estas provocaría la suspensión y/o revocatoria de los permisos ambientales de las empresas (Gordón & Coral, 2020).

Este estudio hace referencia a la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales (NT005) y al Acuerdo Ministerial 097 A, Tabla 9: Límite de descarga a un cuerpo de agua dulce. La NT005 es aplicable a todos los establecimientos públicos o privados que generan desechos peligrosos y especiales, y a los gestores ambientales involucrados en su gestión. Esta norma tiene por objetivo establecer métodos y procedimientos que deben aplicarse para determinar las características de los desechos especiales o peligrosos, en base a los límites máximos permisibles establecidos (Secretaría de Ambiente del DMQ, 2016).

El acuerdo ministerial 097 Aguas, tiene como objetivo preservar y controlar la contaminación

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

ambiental, en lo relativo al recurso agua. Para ello, se establecen los límites permisibles de concentración de contaminantes en los efluentes líquidos que proviene de establecimientos industriales, comerciales y de servicios públicos o privados, vertidos al sistema de alcantarillado y cauces de aguas.

En referencia a las normativas mencionadas, las empresas públicas y privadas han implementado procedimientos para realizar una adecuada gestión de desechos. De esta manera se reduce la contaminación causada por la generación de residuos especiales o peligrosos dentro de sus procesos de fabricación, debido a las malas prácticas de la disposición final de los residuos peligrosos, ya que son considerados peligrosos por su elevada toxicidad y potencial generador de impactos al suelo y acuíferos (Coral & Oviedo, 2019).

En virtud a lo mencionado, la procesadora VYMSA, una empresa líder en el sector metalmecánica, ha mejorado sus procesos de fabricación, implementado tecnología, sustituido maquinaria con equipos de última generación, incorporado productos y procesos amigables con el medio ambiente, con el objetivo de reducir la problemática ambiental (Ramírez & Zapata, 2018). Por su parte, esta empresa se dedica al diseño y fabricación de piezas, partes y mecanismos para electrodomésticos, productos de línea blanca y productos de sujeción de vidrios arquitectónicos. La fabricación de estos productos conlleva varias etapas que son: desengrasado, decapado, fluxado, recubrimiento, lavado y enfriado.

Este estudio se enfocó en el proceso de recubrimiento o revestimiento de protección. Este proceso es utilizado para proteger de la corrosión a las partes y piezas metálicas, mediante un tratamiento electroquímico, cubriendo las superficies con metales (Procesadora VYMSA, 2020). La procesadora VYMSA cuenta con tres tipos de recubrimiento: galvanizado, cromado y pintura electrostática; *Galvanizado*: consiste en la inmersión de piezas de acero en zinc fundido para protegerlas de la corrosión y potenciar su fortaleza mecánica a los golpes y a la abrasión (Flórez & Ruiz, 2020), y evitar la corrosión en los metales ferrosos expuesto a diferentes tipos de ambientes agresivos (Asociación Nacional de Empresarios de Colombia, 2013; Erazo & Sánchez, 2013); *Pintura electrostática*: también conocido como pintura en polvo. En este proceso las partículas de polvo de la pintura se cargan eléctricamente mientras el producto a pintar está conectado a tierra, y como resultado se produce una atracción electrostática que permite al producto adherirle una película de polvo suficiente para recubrir toda su superficie (Coiras, 2006; Gordón & Coral, 2020); *Cromado*: este proceso se basa en la electrólisis, por medio del cual se deposita una fina capa de cromo metálico sobre objetos metálicos. Este recubrimiento es extensivamente usado en la industria para proteger metales de la corrosión (Coiras, 2006; Zinc Ltda., 2020).

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Cada proceso genera diferentes cantidades de lodos peligrosos, los mismos que son direccionados a un contenedor intermedio a granel de plástico denominado IBC (Intermediate Bulk Container), que se encuentra conectado a un sistema de recolección de aguas residuales provenientes del área de galvanizado (Gordón & Coral, 2020). Actualmente, estos lodos peligrosos son almacenado o enviados con gestores calificados para su posterior incineración, en la cual se presentan dos problemas ambientales potenciales: la liberación de metales tóxicos a la atmósfera y la concentración de metales en las cenizas que se llevan al vertedero. Por esta razón, se planteó la posibilidad de inertizar estos residuos peligrosos mediante la técnica de Estabilización/Solidificación (E/S) por el mecanismo de vitrificación, como alternativa a los procesos anteriormente mencionados.

Las técnicas de Estabilización/Solidificación (E/S) son un tratamiento efectivo, tanto económico como técnicamente, están consideradas como la mejor tecnología disponible para el tratamiento de residuos sólidos, lodos, residuos tóxicos y peligrosos, así como a suelos y sedimentos contaminados (Pérez Clemente et al., 2016). Permiten minimizar la velocidad de migración de los contaminantes al medio ambiente y disminuye la solubilidad (lixiviabilidad) por lo cual reducen el nivel de toxicidad del residuo (Hidalgo Montesinos et al., 2010; Navarro et al., 2009).

Esta técnica se basa en la mezcla del residuo a tratar con aglomerantes (orgánicos e inorgánicos) y aditivos adecuados (materiales puzolánicos, cenizas volantes, polvo de silicatos, silicatos aluminosos, residuos de procesos de absorción de gases, etc.), y mediante un tiempo de fraguado y curado, se obtiene un producto final (Coral & Oviedo, 2019) químicamente estabilizado y físicamente modificado en una matriz sólida de baja permeabilidad y alta integridad estructural, reduciéndose así la lixiviación de sus constituyentes peligrosos, convirtiéndolos en aceptables por el medio ambiente previo a su deposición en vertederos (Pérez Clemente et al., 2016).

De acuerdo al tipo de aglomerantes y aditivos utilizados en los procesos de E/S, así como el tipo de proceso llevado a cabo, se producen diferentes mecanismos por los cuales se solidifica y estabiliza un residuo (Raqueta & Noguera, 2016), estos mecanismos incluyen: reacciones cal-puzolanas, reacciones cemento-puzolanas, microencapsulación, autocementación, precipitación, detoxificación y vitrificación.

Este trabajo se enfocó en el proceso de vitrificación, ya que es considerado el proceso más seguro para lograr la inertización de residuos de naturaleza inorgánica como metales pesados. Consiste en la transformación de una matriz sólida, mediante el calentamiento del residuo contaminado a alta temperatura, transformando a éste, en un material no cristalino o amorfo y químicamente estable

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

(Marimón et al., 2015; Navarro et al., 2009). Permite reducir la movilidad de los contaminantes inorgánicos y destruir los compuestos orgánicos por reacciones de oxidación y/o pirólisis. Esta técnica puede ser aplicada *in situ* o *ex situ*, y en cualquier caso, se trata de una tecnología cuyo objetivo fundamental es reducir la posible lixiviación de las sustancias tóxicas presentes en un residuo o un suelo contaminado (Navarro et al., 2009).

Para la aplicación *in situ*, se necesitan electrodos de corriente, que se anclan en el suelo a nivel de la superficie que queremos descontaminar. La corriente eléctrica es de alta intensidad, y las temperaturas que se alcanzan pueden llegar a los 2.000 °C. Cuando se produce la fusión, los contaminantes que contiene el suelo sufren diversas transformaciones, y los compuestos inorgánicos quedan retenidos en el interior de la masa vítrea, una vez que esta se enfría. Este método se puede utilizar también para vitrificar suelos contaminados con sustancias radioactivas (Coral & Oviedo, 2019).

En contraste, para la aplicación *ex situ*, una vez separados los elementos gruesos del residuo y añadidos los agentes vitrificantes, (materiales precursores del vidrio), el residuo se introduce en un horno a temperaturas típicas de vitrificación, las mismas que están entre 1.100-1.400°C, y se dejan enfriar hasta que la masa se fusione y toma apariencia de un sólido (Gordón & Coral, 2020; Kaifer et al., 2004). En el proceso de fusión, etapa para obtener un vidrio, al aumentar la temperatura, el calor distorsiona la red molecular hasta transformarla en una estructura reticulada al azar (estructura amorfa). A mayor temperatura algunos enlaces se rompen y es posible la inserción de metales pesados en la estructura del vidrio. La fusión y retención ocurre por la unión química de especies inorgánicas del residuo con materiales formadores de vidrio, como sílice, y la encapsulación de los componentes mediante una capa de material vítreo (Ntutumu, 2015).

La obtención del vidrio es una alternativa tecnológica de gestión de residuos que permite reducir el volumen y minimizar en los vertederos, transformándolo en un producto con aplicación industrial (García-Valles et al., 2011) para fines comerciales. Este tipo de residuos pueden ser considerados además, como “materia prima secundaria” en el área de construcción (Navarro et al., 2009; Rincón, 2017), ya que se obtendrá un vidrio, de manera que de un producto “desecho” obtenemos un nuevo material revalorizado (Coral & Oviedo, 2019; Martínez et al., 2018). Además, se obtiene un producto estable químicamente, es decir, se transforma en una sustancia no tóxica, minimizando la velocidad de migración de los contaminantes y reduce la toxicidad en el ambiente (Martínez et al., 2018).

Para evaluar la toxicidad de un residuo se realizan ensayos que determinan el riesgo tóxico potencial que el residuo representa para el medio ambiente (Coral & Oviedo, 2019). Todos los residuos deben

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

ser caracterizados por vía residuo y/o vía lixiviado, y una vez determinado su grado de toxicidad es importante que sean sometidos a sistemas de tratamiento como: incineración, solidificación, micro o macroencapsulación, inertización, para conseguir disminuir su toxicidad y determinar su mejor gestión ambiental, esto puede incluir, su aprovechamiento como material de construcción o disposición en vertederos controlados.

Se entiende por lixiviación el proceso mediante el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido (Romero & Vargas, 2009). El procedimiento de lixiviación más aplicado en la gestión de residuos es de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, Environmental Protection Agency) Método 1311: Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad (TCLP por sus siglas en inglés, Toxicity Characteristic Leaching Procedure). Es un método de extracción de muestra sólidas que se utiliza en la clasificación de residuos en productos que contienen metales (EPA, 1992). En esta investigación se utilizó para medir el nivel de solubilidad que poseen los metales pesados contenidos en los lodos de la industria metal mecánica.

La presente investigación tuvo como objetivo principal la inertización de los metales tóxicos de un lodo de la industria de metalmecánica utilizando un proceso de vitrificación *ex situ*, con el fin de proporcionar una alternativa de gestión de residuos peligrosos, con la utilización de vidrio de desecho. Esto con la finalidad de brindar una segunda opción de aprovechamiento en la construcción, dando, de esta manera, una adecuada gestión al vidrio y a los lodos de esta industria, promoviendo el manejo correcto para evitar afectaciones en el medio ambiente y en la salud humana. El problema del estudio consistió en comprobar si la vitrificación *ex situ* de lodos de la industria metalmecánica permitía alcanzar elevados porcentajes de inertización de los metales pesados contenidos en el residuo peligroso.

Los objetivos específicos fueron: caracterizar físico-químicamente el lodo de metalmecánica previamente al proceso de inertización; establecer el reactivo aglomerante, aditivos, tiempo y temperatura para obtener el producto vitrificado con el mayor porcentaje de inertización; calcular el porcentaje de inertización de las muestras de lixiviado después del proceso de inertización utilizando el procedimiento de la EPA, Método 1311: Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad “TCLP”; y, finalmente, establecer el cumplimiento de la normativa ambiental vigente comparando con los parámetros de lixiviación para causas receptores del Acuerdo Ministerial 097 A.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

2.1.1. REACTIVOS

Tabla 1. Reactivos

Nombre	Formula	Marca	Lote
pH 4 Solución buffer	-	Inorganic Venture	J2-WCS02142
pH 7 Solución buffer	-	Inorganic Venture	K2-WCS02147
pH 10 Solución buffer	-	Inorganic Venture	K2-WCS03020
MRC pH en suelo	-	ERA	D096-914
St. Arsénico 1000mg/L	As	Inorganic Venture	K2-AS654224
St. Cadmio 1000mg/L	Cd	Inorganic Venture	HC60709577
St. Cobalto 1000mg/L	Co	Inorganic Venture	K2-CO651137
St. Cobre 1000mg/L	Cu	Inorganic Venture	P2-CU679499
St. Cromo 3+ 1000mg/L	Cr3+	Inorganic Venture	J2-CR03111
St. Cromo 6+ 1000mg/L	Cr6+	Inorganic Venture	K2-CR03115
St. Hierro 1000mg/L	Fe	Inorganic Venture	HC60086281
St. Manganeso 1000mg/L	Mn	Inorganic Venture	K2-MN651112
St. Níquel 1000mg/L	Ni	Inorganic Venture	J2-NI02103
St. Plata 1000mg/L	Ag	Inorganic Venture	P2-AG682810
St. Plomo 1000mg/L	Pb	Inorganic Venture	M2-PB656988
St. Selenio 1000mg/L	Se	Inorganic Venture	J2-SE02058
St. Zinc 1000mg/L	Zn	Inorganic Venture	M2-ZN656655
St. Mercurio 10mg/L	Hg	Inorganic Venture	P2-HG680052
Permanganato de potasio	KMnO ₄	MERCK	K45517282421
Hidróxido de sodio	NaOH	PHARMCO	C18B20DRM0000SHP
Boro hidruro de sodio	NaBH ₄	LOBACHEMIE	L131441404
MRC Metales en suelos	-	ERA	D096-914
Ácido nítrico 70%	HNO ₃	FISHER CHEMICAL	164275
Ácido clorhídrico	HCl	FISHER SCIENTIFIC	193286
Ácido acético glacial p.a.	CH ₃ COOH	J.T. BAKER	A36C77
Carbonato de sodio anhidro	Na ₂ CO ₃	FISHER SCIENTIFIC	158422
Borax	Na ₂ [B ₄ O ₅ (OH) ₄]·8 H ₂ O	CASA DE LOS QUÍMICOS	
Agua destilada	H ₂ O	-	-
Vidrio molido	SiO ₂	Reciclado	

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

2.1.2. EQUIPOS

Tabla 2. Equipos

Nombre	Código	Marca	Modelo
pHmetro	CP-EL-336	HACH	Sesión 1
Micropipeta de volumen variable 20-200uL	CP-EL-390	MICROLIT	W-200
Pipeta Manual 100-1000uL	CP-EL-303	RAININ	L-1000XLS
Estufa	CP-EL-719	Memmert	UM500
Balanza analítica	CP-EL-409	Mettler Toledo	MS204-S/Z
Balanza semianalítica	CP-EL-402	BOECO	BBA51
Analizador de humedad	CP-EL-407	METTLER TOLEDO	HB43-S
Pipeta manual 1-10mL	CP-EL-314	RAININ	L-10MLXLS
Purificador de agua Direct-Pure Genie	CP-EL-501	REPHILE	GENIE 5
Bomba de vacío	CP-EL-203	BOECO	R-300
Espectrofotómetro de Absorción Atómica	CP-EL-352	PERKIN ELMER	ANALYST 400
Generador de Hidruros	CP-EL 354	Perkin Elmer	MHS15
Horno microondas	CP-EL-376	CEM	Mars 5
Agitador magnético	CP-EL-220	OVAN	MMH90E
Horno para vidrio	-	SKUTT	Automatic Kiln
Mufla		VULCAN	A-130

2.2.MÉTODOS

Las muestras de lodo fueron recolectadas en la procesadora VYMSEA, industria metalmecánica, ubicada en el Distrito Metropolitano de Quito, sector Carcelén Industrial, en las calles José Larrea OE1-178 y Francisco García.

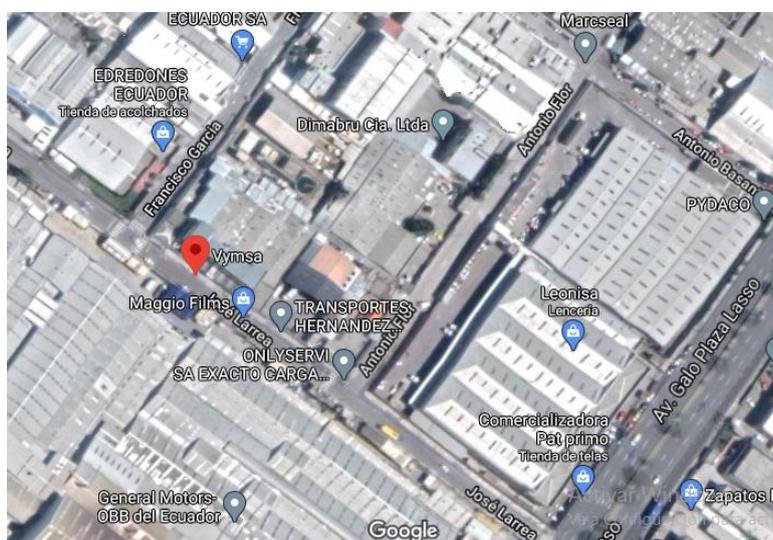


Figura 1. Ubicación de la Procesador VYMSEA

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Para la inertización de los metales pesados se requirieron una serie de procedimientos (FIG X) que abarcan la toma de muestra, caracterización del residuo: vía residuo, vía lixiviado, proceso de vitrificación y análisis de la eficiencia de la vitrificación:

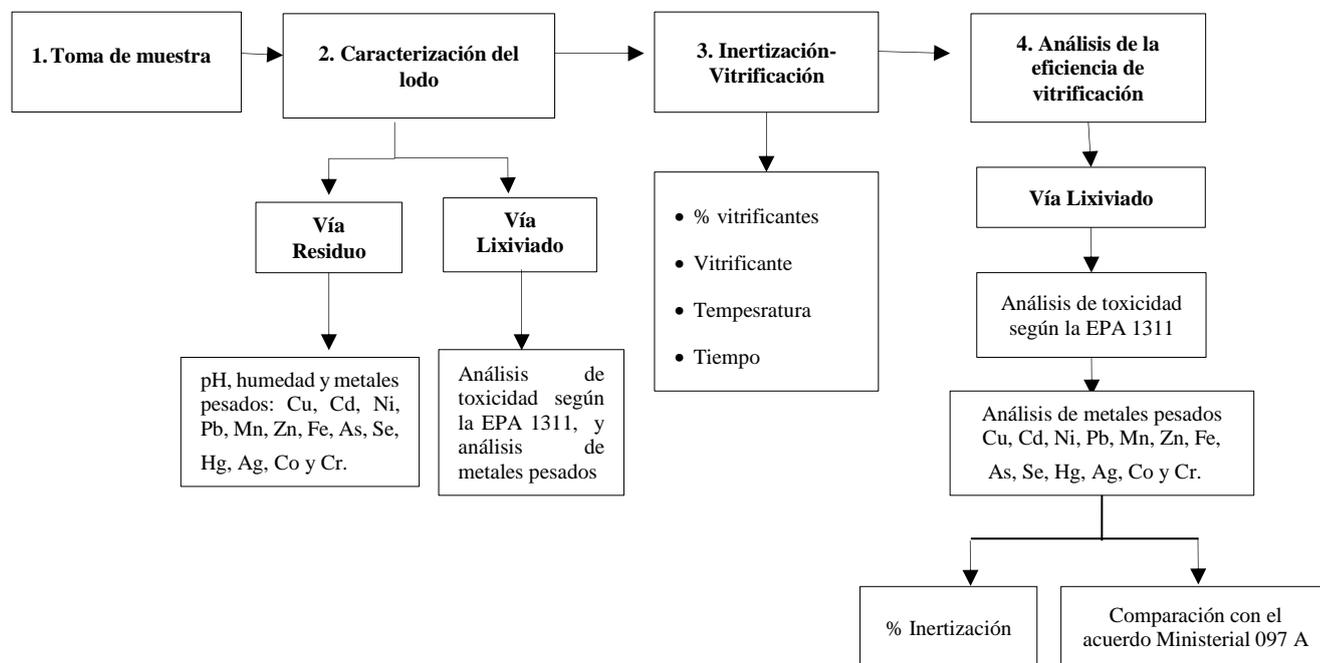


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de inertización de metales pesados

2.2.1. Toma de muestra:

Se recolectaron 5 kg de muestra de lodo del contenedor plástico IBC (Intermediate Bulk Container), perteneciente al área de almacenamiento de lodos de galvanizado de la industria metalmecánica. Esta muestra fue recolectada en una funda plástica, y posteriormente en el laboratorio, fue dividida en 2 frascos de plásticos de 2.5 L cada uno. El frasco #1 se utilizó para los análisis en el Centro de Estudios Aplicados en Química de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y el frasco #2 en la Universidad Internacional SEK.

2.2.2. Caracterización del lodo de la industria metal mecánica - Vía residuo

Previo a la caracterización, y debido a que la muestra de lodo contenía un elevado porcentaje de agua, ésta se filtró al vacío utilizando un papel filtro Whatman, de poro 45mm para eliminar el exceso de agua y se realizaron las siguientes determinaciones:

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

2.2.2.1. Determinación de pH y humedad del lodo de la industria de metalmecánica:

Una vez filtrado el lodo, se realizó la determinación de: pH y humedad, de acuerdo a los procedimientos de las Figuras 3a y 3b y en base a la metodología estándar de la EPA SW-846 Test Method 9045D: Soil and Waste pH (EPA: Method 9045D, 2004) y ASTM D4959 “Determinación del contenido de agua (humedad) del suelo por vía directa (ASTM D4959-16, 2016), además se analizó un Material de Referencia Certificado “pH in Soil”, lote: D096-914, marca ERA.

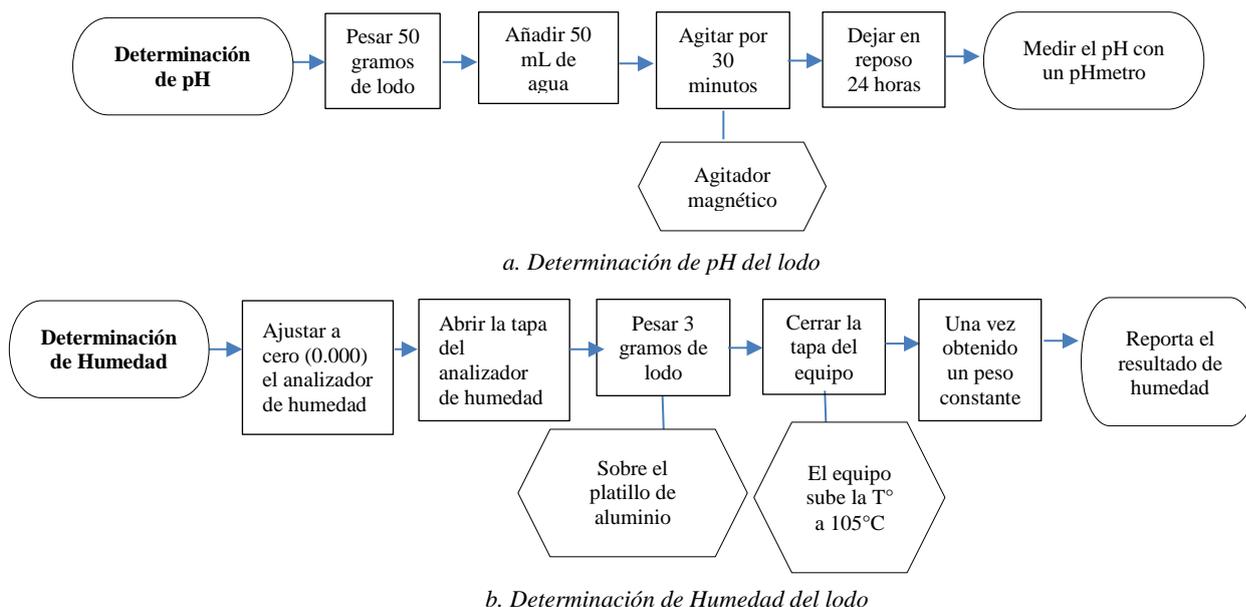


Figura 3. Métodos Estándar de pH y humedad

2.2.2.2. Determinación de metales pesados del lodo de la industria metalmecánica

La caracterización vía residuo abarca la determinación de los metales pesados presentes en el lodo de la industria metalmecánica. Este procedimiento se realizó como se indica en la figura 4, en base a la metodología estándar de digestión ácida EPA 3051: “Digestión Ácida asistida por Microondas de sedimentos, lodos, suelos y aceites con ayuda de un horno microondas marca CEM, modelo Mars 6. El análisis de los metales: Cu, Co, Cr, Cd, Mn, Ni, Pb, Zn y Fe por el método APHA-AWWA-WEF 3111 A: Metales por Espectrofotometría de Absorción Atómica de llama; los metales As y Se por el método SM 3114C: Métodos continuos de Absorción Atómica por generación de hidruros; y el Hg por SM 3112B: Metales por espectrofotometría de absorción atómica por vapor frío, con ayuda de un Espectrofotómetro de absorción atómica, marca Perkin Elmer, modelo AAnalyst 400 y un Generador de hidruros marca Perkin Elmer, modelo MHS15:

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

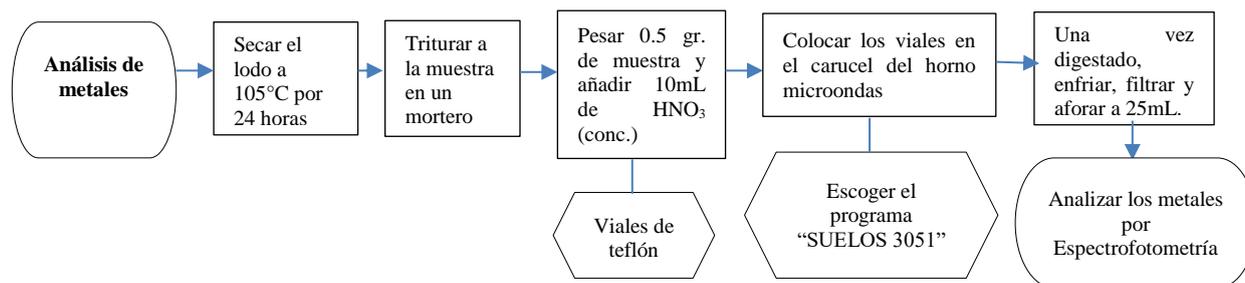


Figura 4. Caracterización vía Residuo-Análisis de metales pesados

Para el análisis de los metales se realizaron curvas de calibración utilizando estándares de concentración de 1000mg/L, marca Inorganic Ventures, todos los estándares se prepararon con agua grado tipo II, de alta calidad (resistividad $18,2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$) obtenido de un purificador de agua, marca Genie 5, modelo Rephile. Se analizó un Material de Referencia Certificado “Metals in Soil”, lote: D096-540, marca ERA y un blanco de digestión, el mismo que contenía solamente ácido nítrico concentrado.

2.2.3. Vitrificación de los lodos de la industria metalmecánica

Para realizar el proceso de vitrificación la muestra fue secada previamente a 105°C durante 24 horas y triturada con un mortero para disminuir el tamaño de partícula. Inicialmente se realizaron pruebas del tipo de recipiente que lo contenía como: crisoles, cápsulas de porcelana, tapas de los crisoles y recipientes hechos de arcilla blanca. Posteriormente se realizaron diferentes pruebas a pequeña escala, para obtener los valores de temperatura, tiempo y cantidades de aglomerantes y aditivos (vidrio molido y/o bórax) y proporción de lodo de la industria metalmecánica, mencionada en la Tabla No.3:

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Tabla 3. Pruebas de vitrificación del lodo de la industria metalmecánica con diferentes proporciones de aditivos, tiempo y temperatura

# Prueba	Tiempo de temperatura máxima (hora)	Velocidad de calentamiento para últimos 100°C (°C/hora)	Tiempo de enfriamiento (hora)	Temperatura (°C)	Vidrio molido (%)	Bórax (%)	Na ₂ CO ₃ (%)	Lodo metalmecánica (%)
1	2:00	0	21:00	900	35	35	-	30
2	2:00	0	21:00	900	30	30	-	40
3	2:00	0	21:00	900	25	25	-	50
4	2:00	0	21:00	900	20	20	-	60
5	2:00	0	21:00	900	15	15	-	70
6	2:00	0	21:00	900	40	40	-	20
7	2:00	0	21:00	900	35	35	-	30
8	2:00	0	21:00	900	70	-	-	30
9	2:00	0	21:00	900	60	-	-	40
10	2:00	0	21:00	900	50	-	-	50
11	2:00	0	21:00	900	40	-	-	60
12	2:00	0	21:00	900	30	-	-	70
13	2:00	0	21:00	900	35	-	35	30
14	2:00	0	21:00	900	30	-	30	40
15	2:00	0	21:00	900	25	-	25	50
16	2:00	0	21:00	900	20	-	20	60
17	1:00	60	10:00	1223	70	-	-	30
18	1:00	60	10:00	1223	60	-	-	40
19	1:00	60	10:00	1223	50	-	-	50
20	1:00	60	10:00	1223	40	-	-	60
21	1:00	60	10:00	1223	30	-	-	70
22	1:00	60	10:00	1063	70	-	-	30
23	1:00	60	10:00	1063	60	-	-	40
24	1:00	60	10:00	1063	50	-	-	50
25	1:00	60	10:00	1063	40	-	-	60
26	1:00	60	10:00	1063	30	-	-	70

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Las pruebas de la # 1 a la #16, fueron realizadas en una mufla de laboratorio, de acuerdo al procedimiento que se describe a continuación (Figura 5):

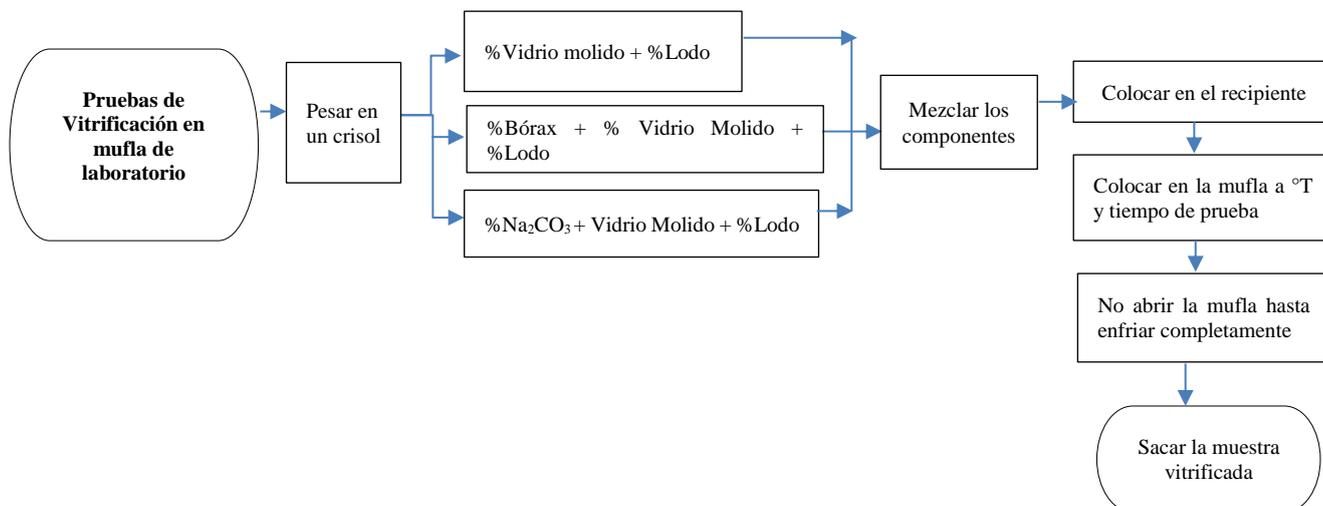


Figura 5. Pruebas de Vitrificación en mufla de laboratorio

Las pruebas de la # 17 a la #26, se realizaron en un horno para vidrio y se programó al horno en “cono 0.4” (temperatura máx.1063°C), y a “cono 6.0” (temperatura máx.1223°C) como se muestra en la figura 6.

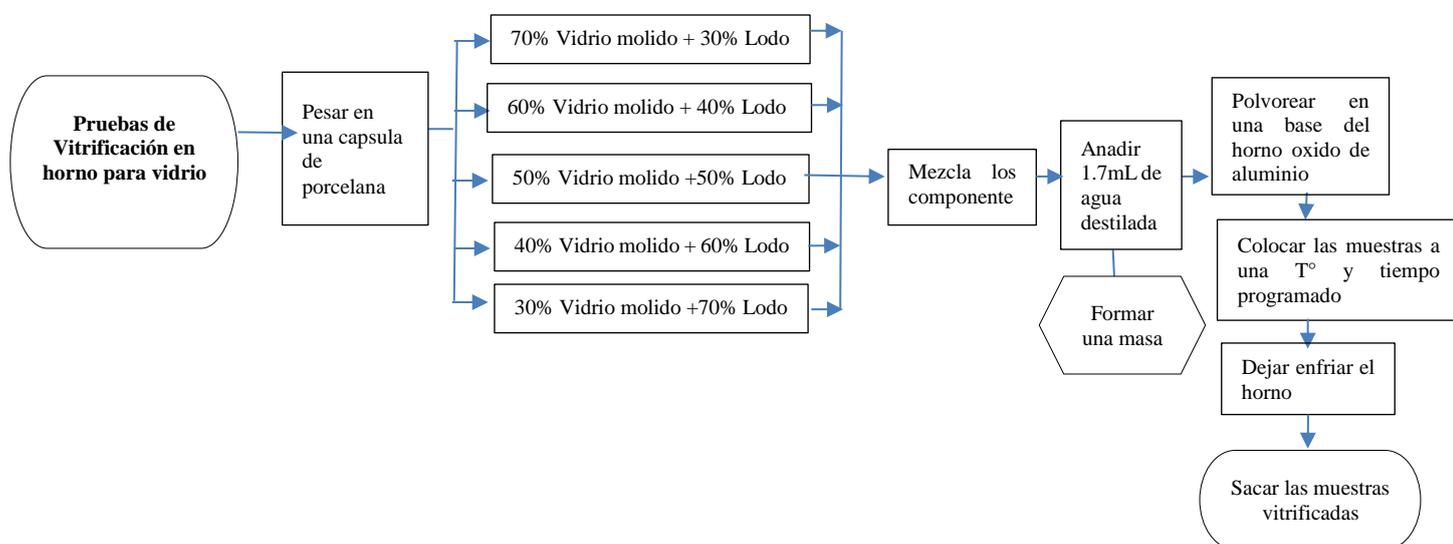


Figura 6. Pruebas de Vitrificación en horno para vidrio

2.2.4. Caracterización del lodo antes y después de la vitrificación - Vía Lixiviado

La caracterización vía lixiviado proporcionar una matriz líquida, que represente las características de lixiviado que se obtendría en un escenario real (Coral & Oviedo, 2019), en este estudio se aplicó la metodología EPA 1311: Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad (EPA, 1992).

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Como primera parte se determinó el fluido extractante a utilizar de acuerdo al procedimiento que se describe a continuación:

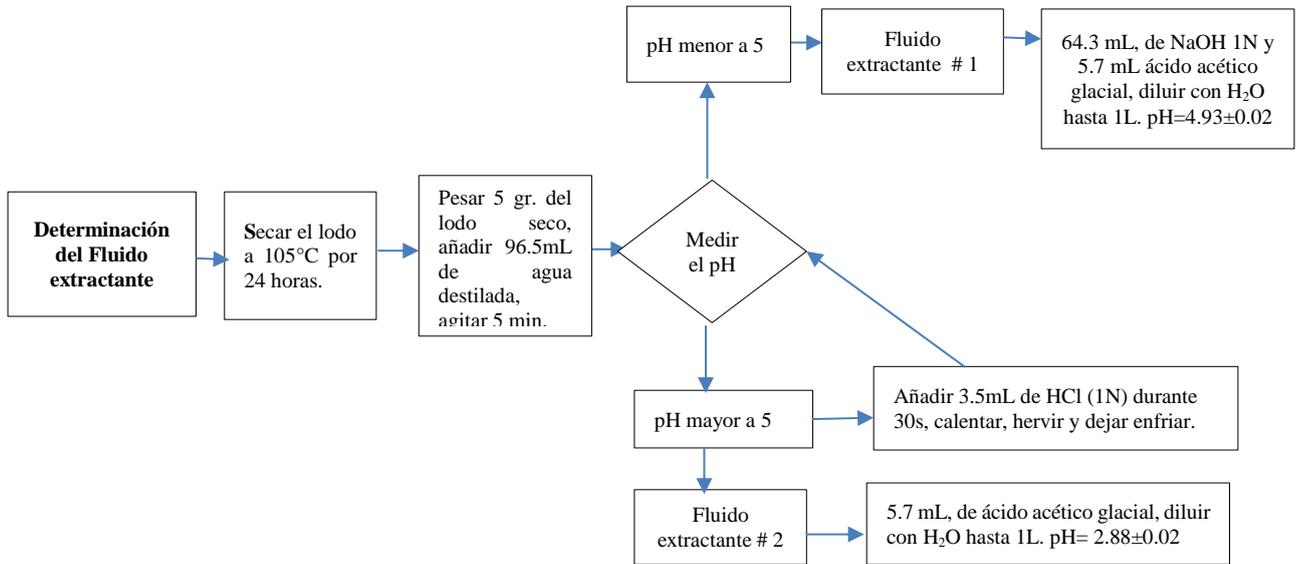


Figura 7. Determinación del Fluido Extractante

Una vez identificado el fluido extractante se procedió a realizar el ensayo de lixiviación de la muestra de lodo sin inertizar y la muestra inertizada (muestra vitrificada), de acuerdo al siguiente procedimiento y en base al método EPA, 1992:

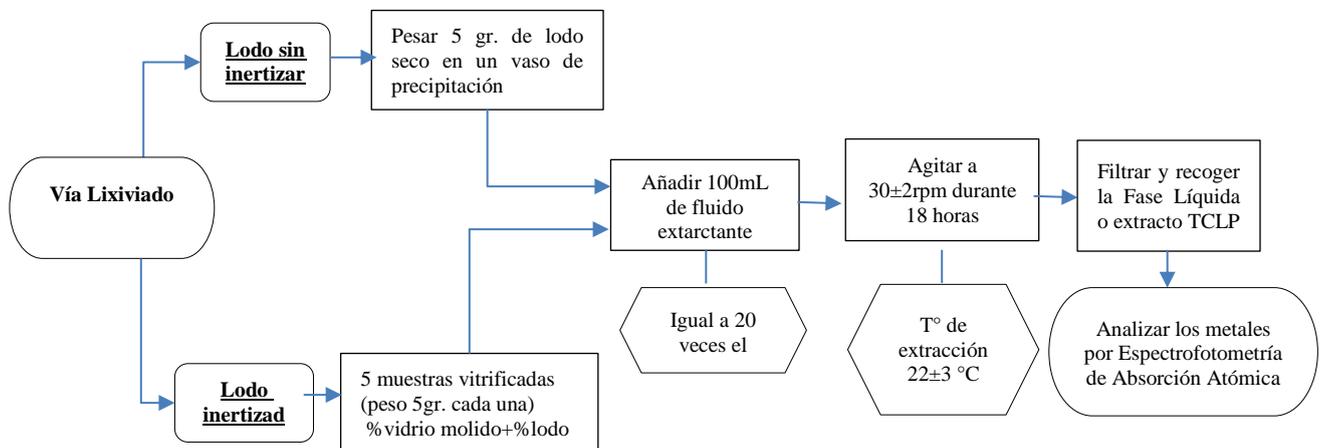


Figura 8. Caracterización vía Lixiviado antes y después de la inertización

2.2.5. Eficiencia de la técnica de vitrificación

2.2.5.1. Calculo del porcentaje de Inertización:

La eficiencia de la técnica de vitrificación se calculó mediante el porcentaje de inertización para cada uno de los metales analizados (Salguero & Coral, 2017), de acuerdo a la siguiente formula:

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Ecuación 1. Porcentaje de inertización

$$\%Inertización = \frac{C.Lx. sin inertizar - C.Lx con inertizar}{C.Lx. sin inertizar} \times 100$$

Donde:

C.Lx. sin inertizar: concentración del metal en el lixiviado sin inertizar

C.Lx. con inertizar: concentración del metal en el lixiviado después de inertizar

2.2.5.2. Indicadores de Calidad Ambiental:

En este estudio se hizo referencia al cumplimiento de las Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales (NT005) y el Acuerdo Ministerial 097 A, Tabla 9: Límite de descarga a un cuerpo de agua dulce, en base a los límites máximos permisibles establecidos en las siguientes tablas (Secretaria de Ambiente del DMQ, 2016):

Tabla 4. Límites máximos permisibles en el Extracto PEC (Prueba de Lixiviación) para constituyentes Inorgánicos (metales pesados)

No. CAS	Contaminante	Límite máximo permisible (mg/L)
7440-38-2	Arsénico	5.0
7440-39-3	Bario	100.0
7440-43-3	Cadmio	1.0
7440-47-3	Cromo	5.0
7439-97-6	Mercurio	0.2
7440-22-4	Plata	5.0
7439-92-1	Plomo	5.0
778249-2	Selenio	1.0

Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales, 2016, p. 6

Tabla 5. Límites máximos permisibles para extracción de metales pesados en bases seca (Digestión ácida)

Contaminante	Límite máximo permisible mg/Kg en base seca
Arsénico	75
Cadmio	85
Cromo	3000
Mercurio	840
Plomo	4300
Níquel	57
Zinc	420

Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales, 2016, p. 8

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Tabla 6. Límites descargas a cauce de agua dulce para constituyentes inorgánica

Contaminante	Límite máximo permisible (mg/L)
Aluminio	5.0
Arsénico	0.1
Cadmio	0.02
Cobalto	0.5
Cobre	1.0
Hierro	10.0
Manganeso	2.0
Mercurio	0.005
Níquel	2.0
Plata	0.1
Plomo	0.2
Selenio	0.1
Zinc	5.0

Acuerdo Ministerial 097 AGUAS, 2016, p. 24

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización del lodo de la industria metalmecánica- Vía residuo

Para poder analizar la eficacia del método de vitrificación en la inertización de metales (principales contaminantes del lodo), debimos caracterizar el lodo vía residuo y vía lixiviado sin inertizar para comparar estos valores con los del residuo vitrificado. La caracterización del lodo vía residuo se realizó por duplicado, siguiendo el procedimiento de la Figura 4. En primer lugar, se determinaron el % de humedad y el pH del lodo (parámetros importantes para el procedimiento de lixiviado y vitrificación), siendo éstos 78.69% y 10.80 respectivamente. Después se midió la concentración de metales en el lodo, tal y como se explica en la figura 4 del apartado 2.2.2.2. de Métodos. Las concentraciones se presentan en la figura 9. Tal y como puede observarse, tanto Ag como Hg estuvieron por debajo del límite de cuantificación del método empleado. Los demás metales Ni, Co, Pb, Cd, As y Se pudieron medirse sin problema. Los metales Cu, Cr, Mn, Fe y Zn fueron los metales más abundantes y, de hecho, su concentración estaba por encima del rango lineal de determinación del método empleado.

En la figura 10 se muestran los valores determinados, comparados con la Norma Técnica para Desechos Peligrosos y especiales, NT005 (Secretaría de Ambiente del DMQ, 2016), en referencia a los límites máximos permisibles para extracción de metales pesados (Ni, Cr, Pb, Cd, Zn, Hg y As) en base seca (digestión ácida).

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

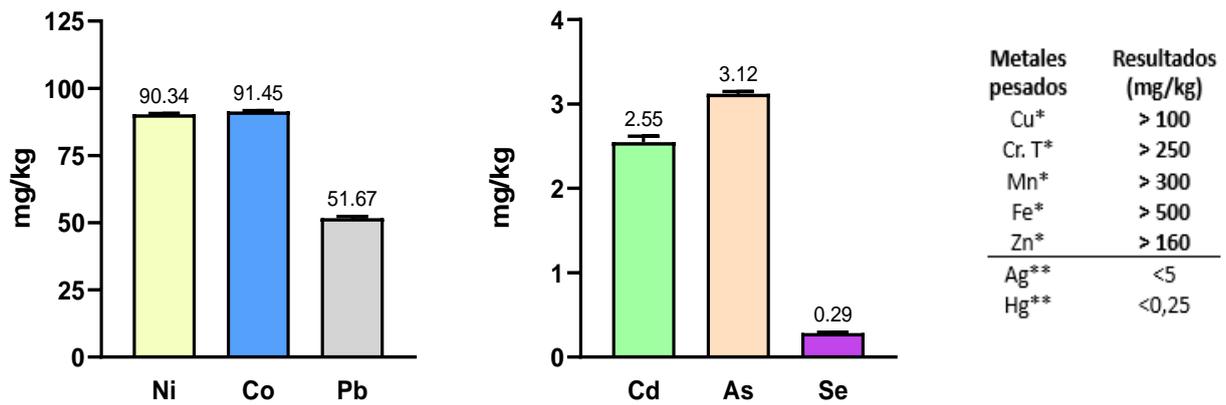


Figura 9. Concentración en mg/kg de cada metal presente en el lodo- vía Residuo. (*) Mayor al rango lineal de determinación. (**) Menor al límite de cuantificación del método de análisis.

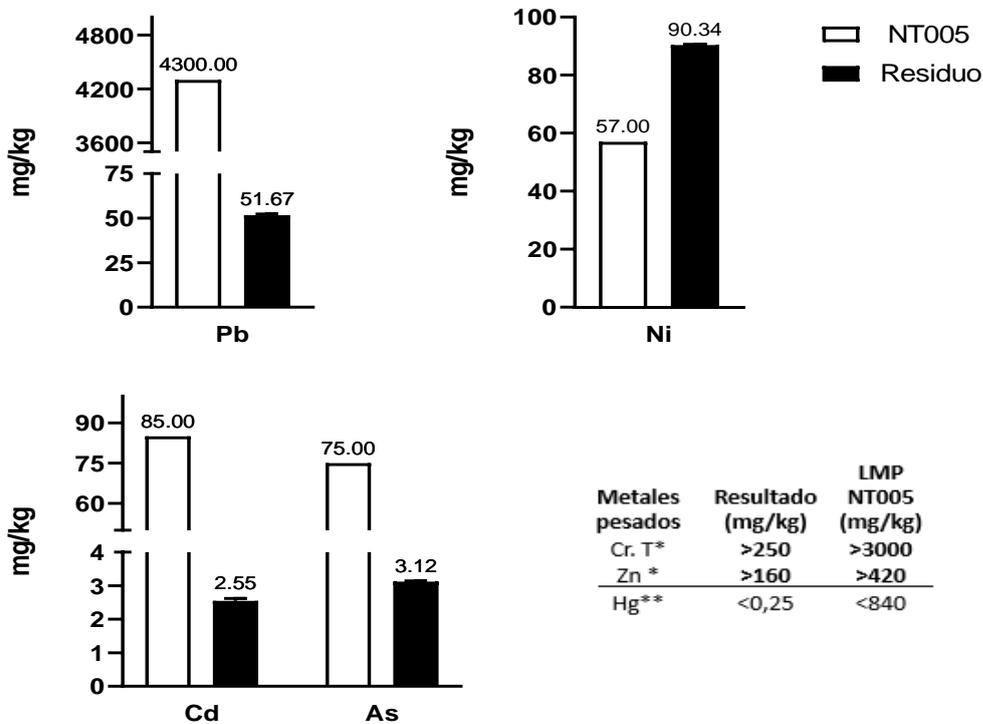


Figura 10. Concentración de cada metal en mg/kg y comparación los límites máximos permisibles para extracción de metales pesados en bases seca (Digestión ácida) de la Norma Técnica de Desechos peligrosos y especiales NT005. (*) Mayor al rango lineal de determinación y al LMP de la norma. (**) Menor al límite de cuantificación del método de determinación y al LMP de la norma.

Tal y como se puede apreciar, solo el Cr, el Zn y el Ni superaron el límite máximo permisible establecido por la norma NT005.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

3.2. Caracterización del lodo de la industria metalmecánica (sin inertizar)- Vía Lixiviado:

De acuerdo al procedimiento descrito en la figura 7 (apartado 2.2.4. de Métodos), se determinó el fluido extractante en función del pH, siendo éste el N° 2. Posteriormente se realizó el procedimiento detallado en la figura 8 para analizar la concentración de metales en el lixiviado del residuo sin vitrificar (Fig. 11). En este caso, lógicamente las concentraciones fueron menores resultando Hg, Se y Ag por debajo de límite de cuantificación del método.

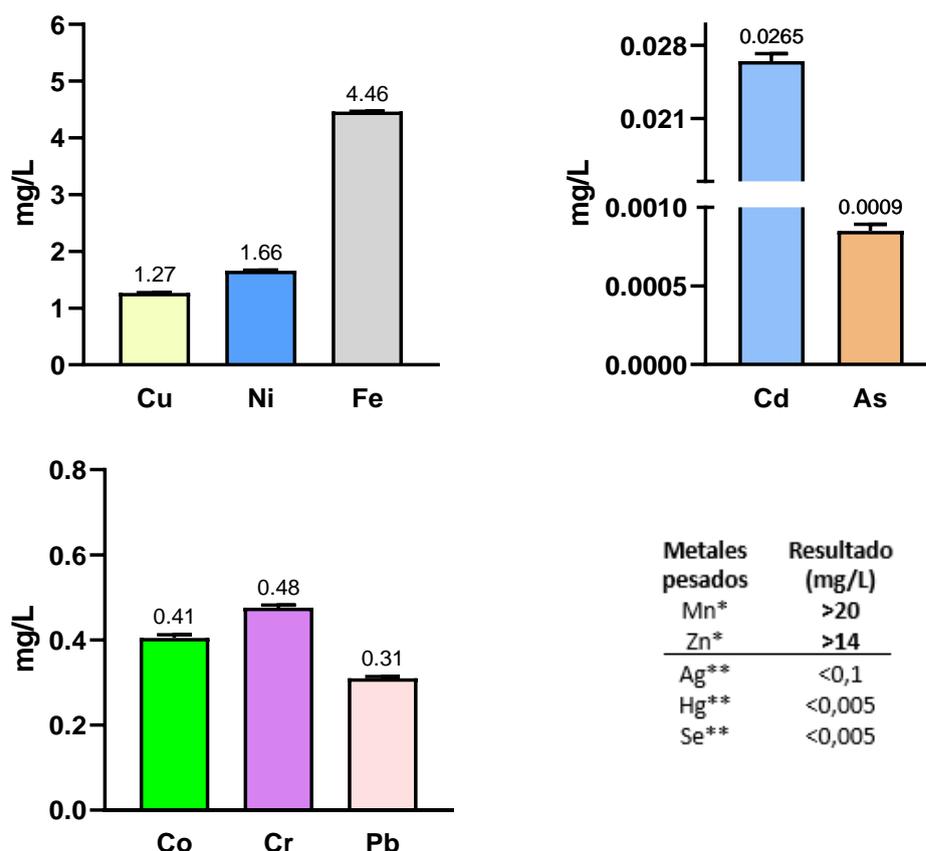


Figura 11. Concentración de cada metal en mg/L del extracto PEC, ensayo vía Lixiviado, antes del proceso de vitrificación. (*) Mayor al rango lineal de determinación. (**) Menor al límite de cuantificación del método de determinación.

En la figura 12 se presenta la comparación de la concentración de metales del lixiviado antes de la vitrificación, con la norma NT005. En el caso del lixiviado, ningún metal superó el máximo permitido.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

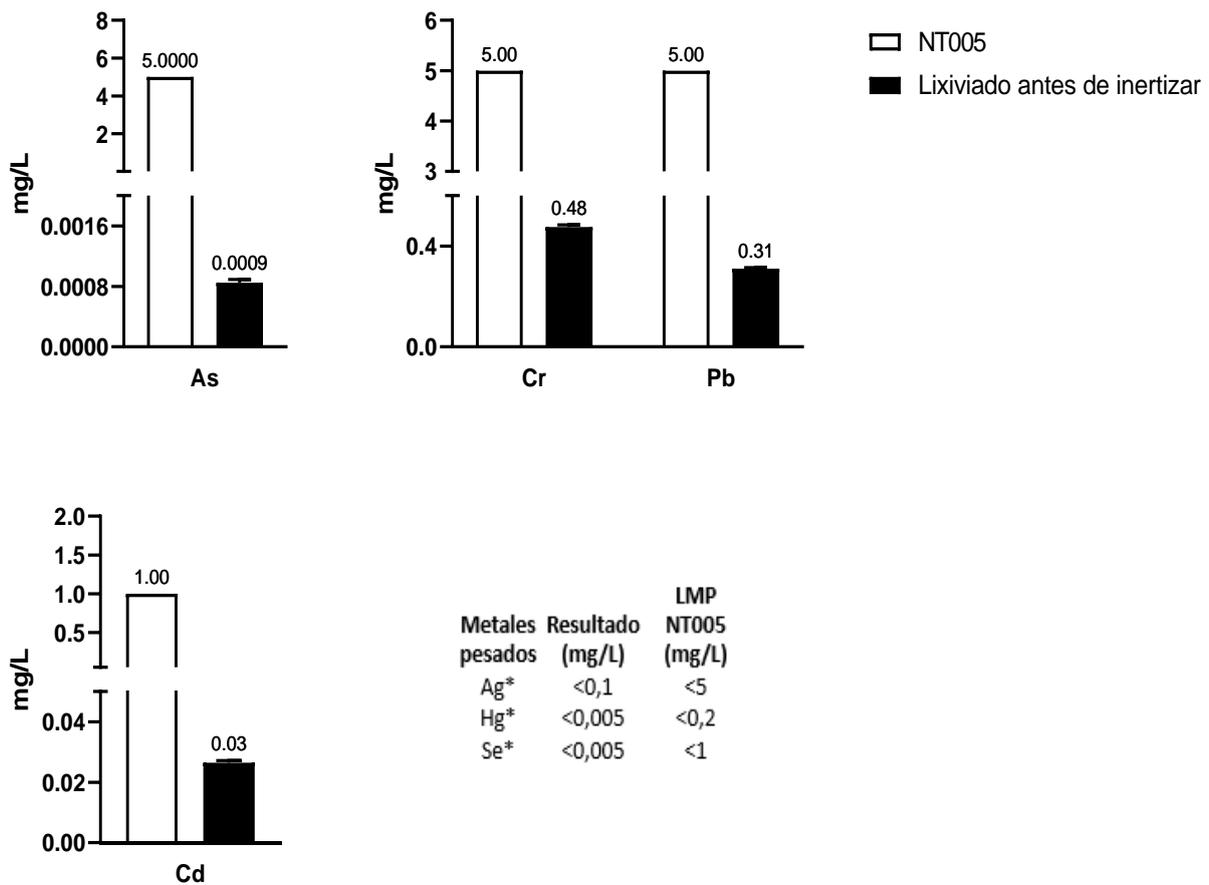


Figura 12. Comparación con el límite máximo permitido de la NT005 y la concentración promedio de cada metal en mg/L del extracto PEC, ensayo vía Lixiviado, antes del proceso de inertización. (*) Menor al límite de cuantificación del método de análisis (*) Menor al rango lineal de determinación y al LMP de la norma.

Sin embargo, también se compararon estos valores con los límites máximos permisibles del Acuerdo Ministerial 097 A Tabla 9. Límite de descarga a un cuerpo de agua dulce para constituyentes inorgánicos (metales pesados) (Fig. 13). En este caso, en el que los límites máximos permitidos son mucho menores, éstos fueron superados por el Pb, Cd y Cu. El Mn y Zn presentaron concentraciones mayores al rango lineal de determinación del método.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

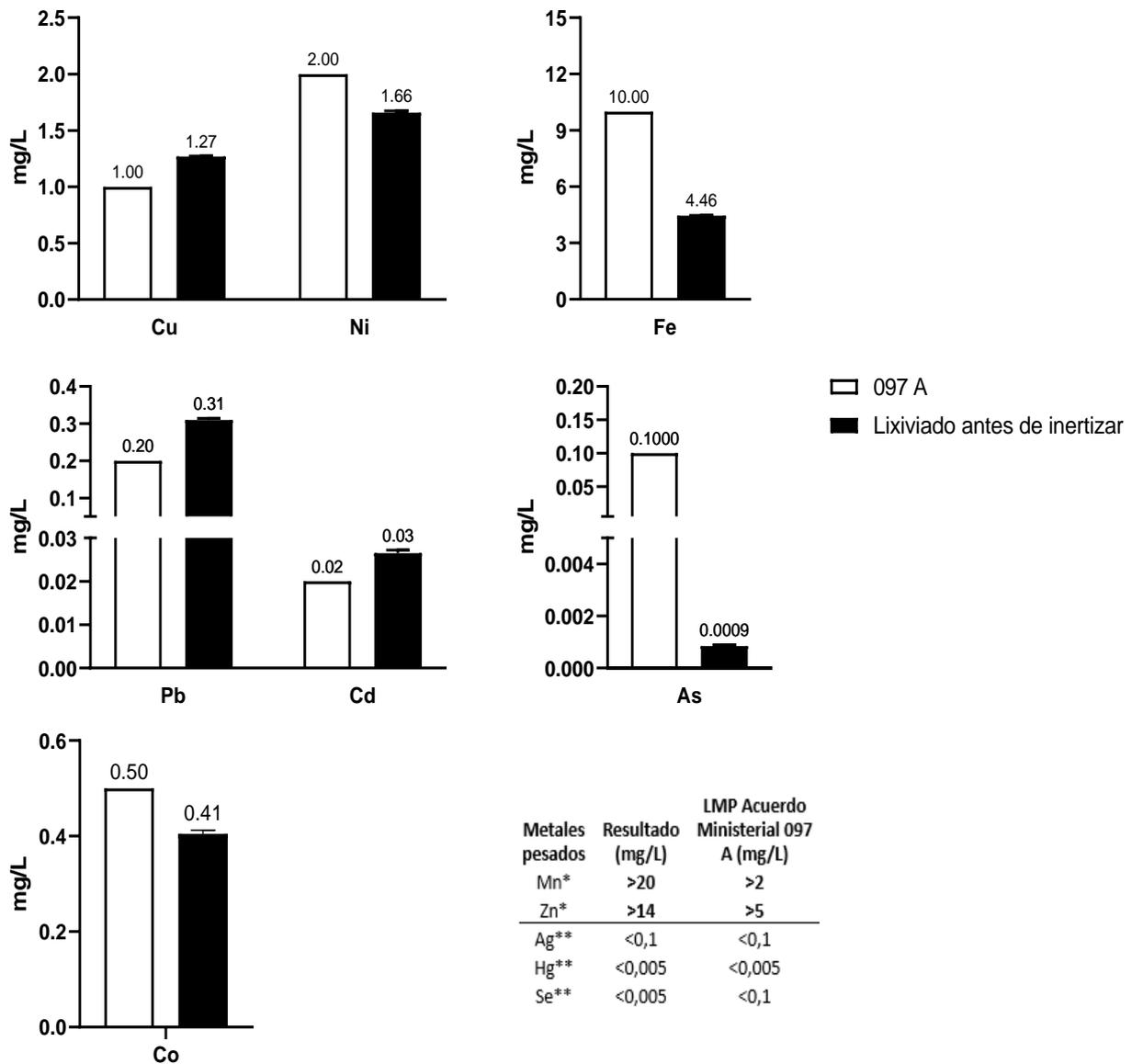


Figura 13. Comparación con el límite máximo permitido para descarga a un cuerpo de agua dulce, Acuerdo Ministerial 097 A y la concentración promedio de cada metal en mg/L del extracto PEC, ensayo vía Lixiviado, antes del proceso de inertización. (*) Mayor al rango lineal de determinación y al LMP para descarga a un cuerpo de agua dulce. (**) Menor al límite de cuantificación del método de determinación y al LMP para descarga a un cuerpo de agua dulce.

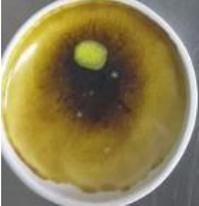
3.3. Vitrificación de los lodos de la industria metalmecánica:

Con el objetivo de obtener el mejor porcentaje de inertización, se realizaron distintas pruebas de vitrificación del lodo de la industria metalmecánica mencionadas en la Tabla 3. Inicialmente se realizaron pruebas en una mufla de laboratorio de acuerdo a la figura 5, estas pruebas no cumplieron

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

las características cualitativas: vitrificación completa, brillo homogéneo y liso como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7. Pruebas de vitrificación realizadas en la mufla de laboratorio

# Prueba	Fotografía	% Lodo/ %vitrificante	# Prueba	Fotografía	% Lodo/%vitrificante
3		50% muestra de lodo 25% vidrio molido/ 25% borax	10		50% muestra 50% vidrio molido
5		70% muestra de lodo 15% vidrio molido/ 15% borax	13		30% muestra de lodo 35% vidrio molido/ 35% Na ₂ CO ₄
6		20 % muestra 40 % vidrio molido 40% borax	14		50% muestra de lodo 25% vidrio molido/ 25% Na ₂ CO ₄
7		10 % muestra 45 % vidrio molido 45% borax	16		50% muestra de lodo 20% vidrio molido/ 20% Na ₂ CO ₄

Como se puede apreciar, las muestras vitrificadas presentaban una coloración amarillenta en su superficie, no presenta un aspecto liso, el vidrio está resquebrajado y al realizar los análisis preliminares del lixiviado de las muestras vitrificadas presentaron altas concentraciones de Cr, Fe, Zn, Mn y Cd que, por su parte, no cumplían con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua. Tabla 9. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Por lo expuesto, se procedió a realizar las pruebas de vitrificación en un horno para vidrio, llegando a las condiciones ideales de vitrificación mencionadas en la tabla 8:

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

Tabla 8. Condiciones ideales de vitrificación

Temperatura máxima (°C)	Tiempo de temperatura máxima (hora)	Velocidad de calentamiento para últimos 100°C (°C/hora)	Tiempo de enfriamiento (hora)	Equipo utilizado
1063	1:00	60	10:00	Horno para vidrio

Se siguió el procedimiento establecido en la figura 6, y se obtuvieron los resultados de la Tabla 9. donde se muestran aquellas pruebas que cumplieron las características cualitativas: vitrificación completa, brillo homogéneo y liso:

Tabla 9. Resultados de la Vitrificación del lodo de la industria Metalmecánica: % de muestra y % vitrificantes

# Prueba	Fotografía	Observaciones	MV-1 Peso LS + VM (gramos)	MV-2 Peso LS + VM (gramos)
22		70% muestra de lodo 30% vidrio molido	3.5021 1.5013	3.5020 1.5026
23		60% muestra de lodo 40% vidrio molido	3.0066 2.0055	3.0009 2.0080
24		50% muestra de lodo 50% vidrio molido	2.5057 2.5015	2.5000 2.5010
25		40% muestra de lodo 60% vidrio molido	2.0056 3.0001	2.0042 3.0061
26		30% muestra de lodo 70% vidrio molido	1.5058 3.5088	1.5074 3.5021

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

3.3.1. Eficiencia de la técnica de vitrificación:

La eficiencia de la técnica de vitrificación se calculó mediante la ecuación No.1. A continuación, se presenta, para las muestras que siguieron el procedimiento óptimo de vitrificación (Tabla 8), el efecto del porcentaje de vitrificante (desde 70% en P22 hasta 30% en P26) sobre la eficiencia de inertización. Como puede apreciarse en general, a mayor porcentaje de vitrificante, mayor eficiencia de inertización (figura 14). Sin embargo, lo que interesa para el presente trabajo es hallar el menor porcentaje de vitrificante que proporciona resultados ambientalmente aceptables según la normativa. En ese sentido, la muestra P24 (50% lodo y 50% vitrificante) mostró resultados óptimos.

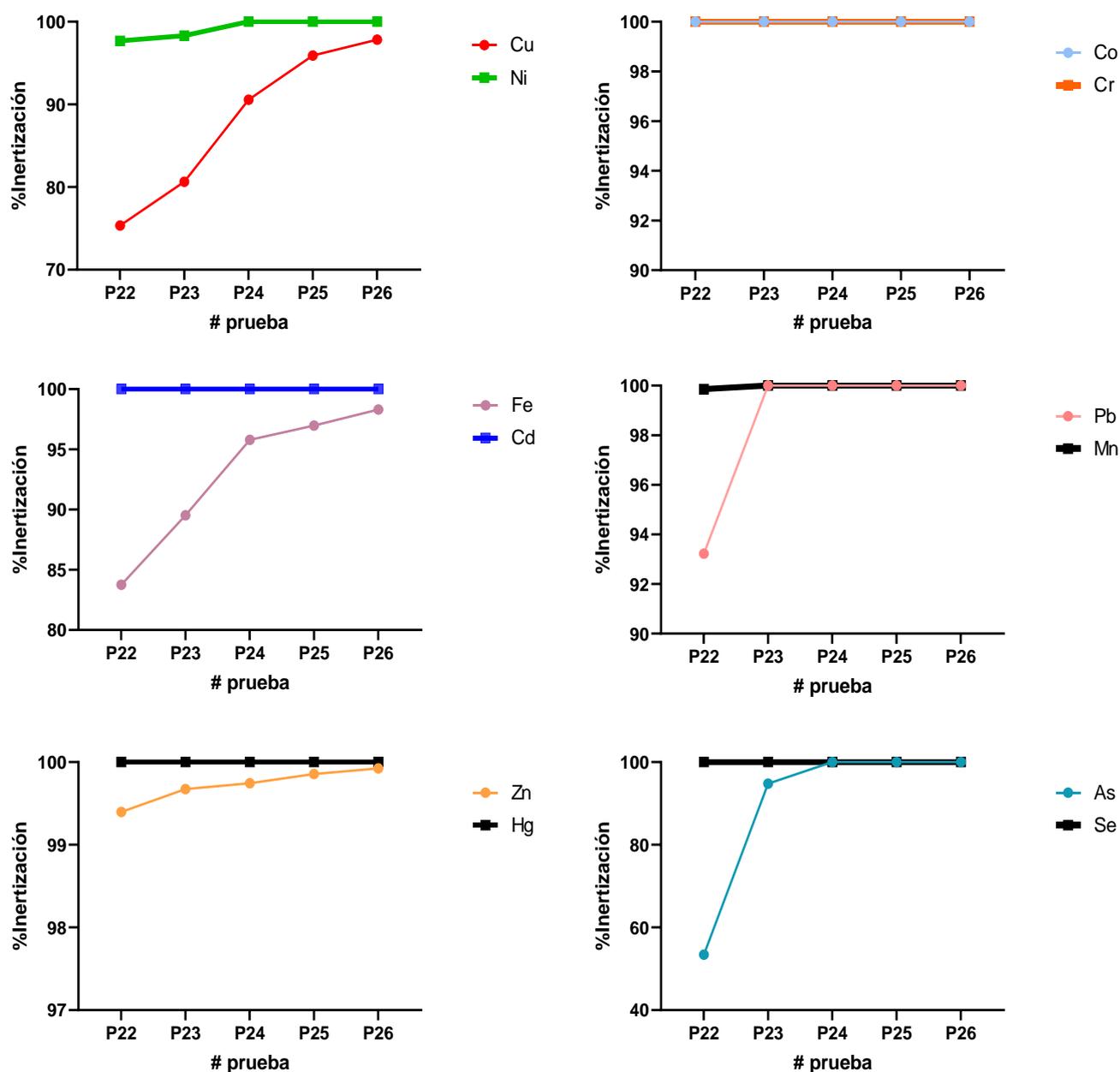


Figura 14. Porcentaje de inertización de cada metal analizado, en base a la ecuación 1.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

3.4. Caracterización del lodo de la industria metalmecánica (lodo inertizado): Vía Lixiviado

Una vez realizado el proceso de vitrificación, a cada muestra vitrificada se aplicó el procedimiento de la figura 8 para determinar de la concentración de los metales (Cd, Ni, Pb, Cu, Cd, Mn, Ag, As, Hg, Se, Zn, Co, Fe) en el lixiviado del residuo vitrificado. De acuerdo a los porcentajes de inertización, mencionado en el apartado 3.3.1., se escogió la muestra P24 y por eso en el siguiente apartado se habla de los resultados relativos al lixiviado de la misma.

La figura 15 muestra los únicos metales que pudieron ser cuantificados en este lixiviado. Lógicamente todos los metales están por debajo de los límites máximos de la NT005.

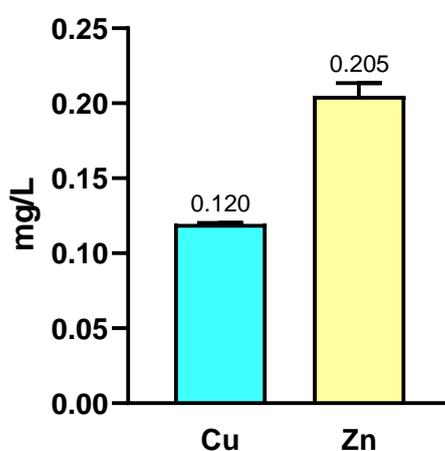


Figura 15. Concentración promedio de Cu y Zn en mg/L del Lixiviado de la muestra vitrificada 50% lodo, 50 % vidrio.

En la figura 16, se presenta la comparación de la concentración de metales en mg/L del lixiviado después de la vitrificación, con los límites máximos permisibles del Acuerdo Ministerial 097 A, Tabla 9: Límite de descarga a un cuerpo de agua dulce para constituyentes inorgánicos (metales pesados). Tal y como se puede observar, tras el proceso de vitrificación, el lixiviado cumple con esta normativa, por lo que podría ser directamente descargado a cauces de agua. Los metales que antes de la vitrificación estaban por encima (Cu, Pb, Cd, Mn y Zn), ahora están por debajo.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

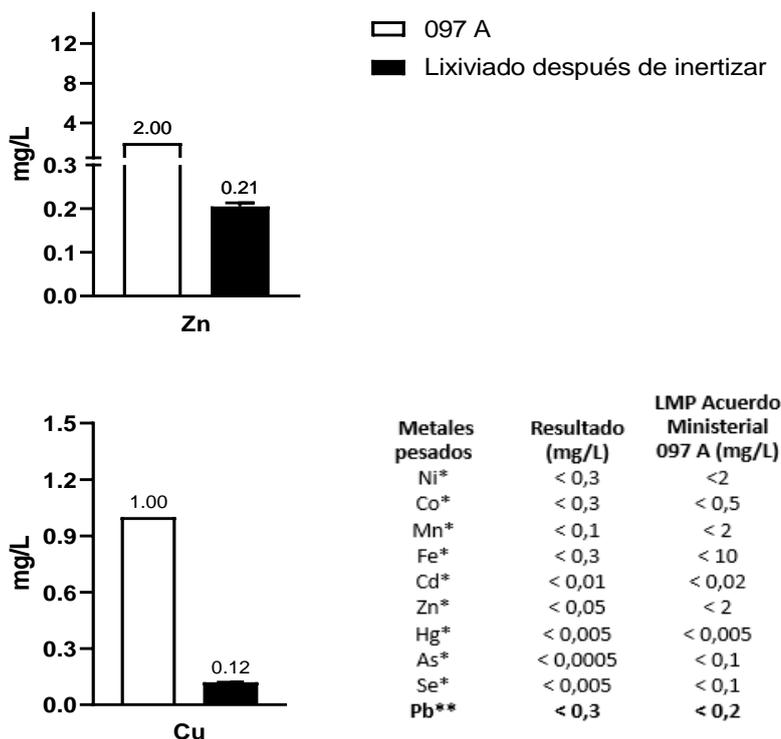


Figura 1617. Comparación con el límite máximo permitido del Acuerdo Ministerial 097 A y la concentración promedio de cada metal del extracto PEC, ensayo vía Lixiviado, después del proceso de inertización. (*) Menor al límite de cuantificación del método de análisis y menor al LMP del Acuerdo Ministerial. (**) LMP menor al límite de cuantificación del método de análisis.

Como se puede visualizar el lixiviado de la muestra P24 vitrificada presenta concentraciones por debajo del límite máximo permisible del Acuerdo Ministerial 097 A. Por su parte el Zn y el Cu, presentan bajas concentraciones, sin embargo, se encuentran por debajo del LMP.

4. DISCUSIÓN

El porcentaje de humedad promedio del lodo de la industria metalmecánica fue de 78.69%, este valor sobrepasa el rango aceptable de hasta un 70%, para la aplicación de la técnica de vitrificación directamente (Rheology, 1999), la humedad del lodo a tratar es un factor importante para la elección de una tecnología en particular (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2002), por tal razón se requirió extraer el agua antes de aplicar la técnica (Raqueta & Noguera, 2016), se secó al lodo por 24 horas, en una estufa a una temperatura de 105°C, para analizarlo como un suelo.

El pH representa el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia, en este caso de un lodo. Se midió en una escala de 4 a 10, siendo el 7 un pH neutro, de 4 a 7 un pH ácido y de 7 a 10 un pH básico o alcalino. Del pH dependen muchos procesos químicos que tienen lugar en un suelo y de su grado de

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

acidez o alcalinidad depende la disponibilidad de las sustancias que se hallen en éste.

Según Raqueta & Noguera, 2016, el pH es un criterio importante al tratar un suelo contaminado, ya que influye en el comportamiento de algunas sustancias potencialmente contaminantes. Si un suelo presenta un pH ácido, los contaminantes, se encuentran más disponibles y a menudo son más solubles. Por su parte, el pH del lodo de la industria metalmeccánica fue de 10.8 unidades de pH, es decir presenta un pH alcalino, el cual ayuda a que los contaminantes inorgánicos, especialmente metales pesados, no se solubilizan fácilmente y se encuentren contenidos (Pérez Clemente et al., 2016).

Para evaluar la toxicidad de un residuo, o caracterizar el residuo, se requiere de ensayos que determinan el riesgo tóxico potencial que representa para el medio ambiente, ya sea vía residuo o vía lixiviado. La caracterización vía residuo permite determinar su composición, este estudio se enfocó en la composición de contaminantes inorgánico, metales pesados como Cd, Ni, Pb, Cu, Mn, Ag, As, Hg, Se, Zn, Co y Fe. Para realizar la caracterización de los metales pesados presentes, a la muestra de lodo seco se digestó con ácido nítrico concentrado. Este ácido permite que los metales se solubilicen y se encuentren disponibles en una disolución ácida, logrando analizarlos por un Espectrofotómetro de absorción atómica de llama, obteniendo los resultados de la Figura 9. Para el caso del Ag y Hg se encuentran por debajo de límite de cuantificación del método, 5 y 0.25 mg/kg respectivamente. El Ni, Co, Pb, Cd, As y Se, se encuentran dentro del rango de determinación del método. El Cu, Cr, Mn, Fe y Zn sobrepasan el rango lineal de determinación, esta altas concentraciones se debe a que este lodo pertenece a un residuo tóxico proveniente de procesos de recubrimiento como galvanizado, cromado y pintura electrostática, proceso en los cuales se usan químicos tóxicos que los contienen.

Debido a la presencia de metales pesados en el lodo de estudio, se verificó el cumplimiento de la Norma Técnica para desechos peligrosos y especiales, NT005, con los límites máximos permisibles (LMP) para extracción de metales pesados en base seca por digestión ácida. En la Figura 10 se puede evidenciar que la concentración de todos los metales pesados analizados, solamente el Cr, Zn y Ni sobrepasa el LMP establecido en la normativa (3000, 420 y 57 mg/kg respectivamente), por tal razón es considerado desecho peligroso ya que no cumple todos los parámetros establecidos en la normativa. Para el caso de los metales Cu, Co, Mn, Fe, Ag y Se no se puede verificar el cumplimiento debido a que la normativa no establece un LMP para estos metales.

La caracterización del lodo antes del proceso de vitrificación, vía lixiviado, se utiliza para medir el nivel de solubilidad que poseen los metales pesados presentes en el lodo, por tal razón, se verificó el cumplimiento de la Norma Técnica para desechos peligrosos y especiales, NT005, en relación al Extracto PEC (Prueba de lixiviación). Las concentraciones de los metales Cr, Pb, Cd, Hg, As, Se y Ag cumplen con los límites máximos permisibles para constituyentes inorgánicos, es decir el extracto

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

cumple con la normativa ambiental vigente. Para los metales Cu, Ni, Co, Mn, Fe y Zn no se puede establecer cumplimiento debido a que la normativa no establece un LMP para estos metales.

Por otra parte, y considerando que este lixiviado puede ser descargado a un cuerpo de agua dulce, también se compararon los resultados con el Acuerdo Ministerial 097 A. Tal y como mostramos en la figura 13, el Cu, Pb, Cd, Zn y Mn no cumplen con el LMP establecido en la normativa, siendo los dos últimos los más abundantes. Debido al incumplimiento de los LMP, este extracto no debería ser descargado al cauce de agua ya que provocaría contaminación ambiental debido a la presencia de contaminantes tóxicos como el Pb y Cd, ya que estos metales en bajas concentraciones representan riesgo para la salud humana (López & Pérez, 2018). Esta normativa no contempla al Cr total, a pesar de ser un metal tóxico, esta establece el LMP del Cr+6, sin embargo, al realizar una digestión ácida el Cr+6 pasa de estado de oxidación y puede ser analizado como cromo total, permitiendo dar una concentración de este metal.

Este proyecto se enfocó en dar una alternativa de gestión a los residuos de la industria metalmecánica, siendo la vitrificación una metodología segura para lograr la inertización de residuos de naturaleza inorgánica como los metales pesados. Para llegar a las condiciones ideales de vitrificación se realizaron varias pruebas de temperatura, tiempo, tipo de recipiente y equipos. Se trabajó con temperaturas desde los 900°C hasta llegar a la temperatura ideal de 1063°C; según (Ntutumu, 2015) al aumentar la temperatura, el calor distorsiona la red molecular hasta transformarla en una estructura amorfa, además mayores temperaturas rompen algunos enlaces y es posible la inserción de metales pesados en la estructura del vidrio. Inicialmente se realizaron las pruebas en un horno de laboratorio a 900°C y se pudo evidenciar mediante análisis preliminares que a esta temperatura el Cr, Fe, Zn, Mn y Cd, no se lograba inertizar estos metales y las muestras vitrificadas presentaban en su superficie una coloración amarillenta, no presentaban un aspecto liso y el vidrio está resquebrajado, además no cumplía con los LMP establecidos en la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua. Tabla 9. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

No obstante, para mejorar el porcentaje de inertización se realizaron pruebas de vitrificación en un horno para vidrio, el cual consistió en la mezcla de lodo seco con el vidrio molido y la formación de una masa con agua destilada que inmediatamente fue colocada en una placa que contenía óxido de aluminio y fue llevada a un horno para vidrio a una programación en “cono 04”. Este se refiere a la programación del horno a un tiempo e incremento de temperatura gradual. En este programa, la

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

temperatura del horno sube gradualmente 100° C hasta llegar a 1063°C, temperatura ideal, en la que se mantiene por 1 hora. Transcurrido ese tiempo, la temperatura baja gradualmente y comienza el enfriamiento por 10 horas, periodo en el que no se debe abrir el horno ya que el cambio de temperatura brusco provoca resquebrajado del vidrio. Finalizado el proceso se obtuvo un “nuevo producto”, un material de vidrio que puede ser utilizado en construcción o como bisutería, abriendo así las puertas a una economía circular, debido a que se da una nueva vida al residuo reincorporándolo al ciclo de producción y reutilizando un residuo que por sus propiedades no puede volver a la naturaleza sin causar daños medioambientales al terminar su vida útil.

Para determinar el método de vitrificación y que cumpla las características cualitativas, se realizó la determinación del porcentaje de vitrificación de los trece metales analizados, correspondientes a las pruebas P22 (70% lodo; 30% vidrio molido), P23 (60% lodo; 40% vidrio molido); P24 (50% lodo; 50% vidrio molido), P25 (40% lodo; 60% vidrio molido), y P26 (30% lodo; 70% vidrio molido). Para el caso de los metales: Co, Cr, Mn, Fe, Se y Hg mediante el proceso de vitrificación en las distintas pruebas realizadas presentan el 100% de inertización. El Pb, Cu y Zn, presenta de 90 a 100% de inertización. El porcentaje de inertización inicial del Fe fue 76.4%, del Cu 64.4% y del As 33.3%, para estos metales el porcentaje de inertización ascendió hasta 100% conforme aumenta el % de vidrio molido. Para el caso específico del metal Ag, no se pudo establecer el porcentaje de inertización debido a que la concentración de la muestra no fue detectable.

Las muestras vitrificadas cumplieron los parámetros cualitativos como: brillo y vitrificación lisa y completa. Otro parámetro importante del vitrificado fue contener el mayor porcentaje de residuo, y que el porcentaje de inertización fuera superior al 90%. En la fabricación de cerámicas, la incorporación de lodos con la presencia de Zn, Fe, Cr y Pb permite la obtención de un producto cerámico de colores oscuros (Salguero & Coral, 2017) como el que se obtuvo en el presente trabajo. Estos metales sustituyen al aditivo que es preciso añadir en el proceso industrial y ayudan a que los metales queden fijados a la estructura cerámica, permitiendo que los lixiviados de la muestra vitrificada presenta valores por debajo de los límites máximo permisibles.

En base al porcentaje de inertización y las características cualitativas de vitrificación mencionadas anteriormente, se escogió a la muestra P24 (50% lodo y 50% vitrificante) debido a que presentó resultados óptimos de inertización (mayor a 90% de inertización), por tal razón, el lixiviado del vitrificado de esta muestra se comparó con el Acuerdo Ministerial 097 A, Tabla 9: Límite de

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

descarga a un cuerpo de agua dulce. Para el caso de los metales: Cd, Ni, Pb, Cr, Mn, Ag, As, Hg, Se, Zn y Co, estos se encontraron por debajo del límite de cuantificación del método en el lixiviado del residuo vitrificado, por lo cual se pudo evidenciar que la fusión y retención por la unión química de especies inorgánicas del residuo con materiales formadores de vidrio, como sílice, formaron una capa de material vítreo que ayudó a la retención absoluta de algunos metales (Cr, Zn, Ni, Mn) y la casi retención de otros (Ntutum, 2015), cumpliendo en todos los casos con lo establecido en el acuerdo Ministerial (Fig. 16). Para el caso del Pb, no pudo evaluarse su cumplimiento debido a que el límite de cuantificación del método (0.3mg/l) es superior al límite máximo permisible establecido en la norma (0.2 mg/L).

5. CONCLUSIONES

El pH, humedad y las características del lodo como su contenido de arcilla, permiten que el proceso de vitrificación realizado sea óptimo.

El vitrificado que contiene 50% de lodo y 50% de vidrio molido es el más apto para realizarlo a gran escala, debido a que estaríamos usando 100% material de desecho, ya que el lodo es un residuo reusable y el vidrio es un material reciclado. Además, es el mayor porcentaje de residuo en relación al del lodo que permite resultados óptimos.

El residuo peligroso de la industria metalmecánica puede ser considerado como “materia prima secundaria” en el área de construcción, ya que se obtuvo un vidrio, de manera que de un producto “desecho” obtenemos un nuevo material revalorizado, abriendo la puerta a elementos de economía circular.

El vitrificado obtenido en este proyecto es un producto estable químicamente, es decir se transformó en una sustancia no tóxica en referencia a los metales pesados, se logró minimizar la velocidad de migración de los contaminantes inorgánicos y reducir la toxicidad en el ambiente.

La obtención del vidrio es una alternativa tecnológica de gestión de residuos que permite reducir y minimizar el volumen en los vertederos, transformándolo en un producto con aplicación industrial para fines comerciales, ya que pueden ser fabricados bloques, joyas, estructuras o piezas diseñadas de diferente gusto.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

6. RECOMENDACIONES

El proceso de vitrificación debe ser realizado en un horno para vidrio, ya que debemos procurar que no exista un cambio de temperatura brusco.

Se recomienda realizar un estudio de la huella de carbono del proceso de vitrificación del lodo de la industria metalmeccánica y de otros procesos para optar por el proceso menos contaminante.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Internacional SEK por su apertura para la elaboración del proyecto. A Ulbio Cevallos de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Arte de la PUCE por su apoyo y conocimientos emitidos para la obtención de este producto vitrificado.

8. BIBLIOGRAFÍA

Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. (2013). *Guía práctica de galvanizado por inmersión en caliente* (p. 64).

<http://www.galvanizadocolombia.com/index.php/publicaciones?task=document.viewdoc&id=6>

Builes, S. (2010). *Tratamiento y adecuada disposición de lodos domésticos e industriales* (Vol. 9, Issue 1) [Universidad Tecnológica de Pererira]. <https://doi.org/10.1558/jsrnc.v4i1.24>

Castañeda, G., Reyes-García, V., & Domene, X. (2013). *Metales pesados liberados por las pilas en la comunidad Tsimane' de Santa María: Evaluación del riesgo potencial para la salud humana*. Universidad Autónoma de Bolivia.

Centro Nacional de Información Biotecnológica. (2020). *Pub Chem: Biblioteca Nacional de Medicina*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

Coiras, M. del pilar. (2006). *Ampliacion de una planta galvanizadora de discontinuo por inmersión en caliente* [Universidad de Cádiz].

<https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6548/32808483.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Comisión Ambiental Metropolitana. (1997). *Manual de minimización, tratamiento y Disposición. Concepto de Manejo de Residuos Peligrosos e Industriales para el Giro de la Fundición. Metalmeccánica*.

Coral, K., & Oviedo, J. (2019). *Tratamiento y Gestión de Residuos Solidos y Suelos*.

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

- EPA. (1992). Method 1311: Toxicity Characteristic leaching procedure. *EPA, July 1992*, 1–35.
- Erazo, S., & Sánchez, R. (2013). *Diseño y construcción de un sistema didáctico de galvanizado*. Universidad de El Salvador.
- FLASCO-MIPRO. (2010). *Boletín de Análisis Sectorial y de MIPYMES. Sector Metalmecánica. FLASCO- MIPRO*.
- Flórez, M. E., & Ruiz, J. L. (2020). *Recubrimientos y tratamientos superficiales: La Galvanización en caliente*. 7(2), 1–16. http://www.apta.com.es/pdf/galva_caliente.pdf
- Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales pesados. *Sociedad Española de Mineralogía*, 10, 48–60.
- García-Valles, M., Aly, M. H., El-Fadaly, E., Hafez, H. S., Nogués, J., & Martínez, S. (2011). Materiales vitrocerámicos a partir de lodos procedentes de una estación de depuración de aguas residuales urbanas (en la Ciudad de El-Sadat, Egipto). *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 50(5), 261–266. <https://doi.org/10.3989/cyv.342011>
- Goitia, L. (2018). *Sistemas de gestión en empresas metalmecánicas de Bolivia para apoyar al cumplimiento de la Agenda Patriótica Bolivia 2025* (Vol. 18).
- Gordón, D., & Coral, K. (2020). *Inertización de los lodos de Galvanizado de la procesadora VYMSA con fines de valoración* (Vol. 53, Issue 9). Universidad Internacional SEK.
- Hidalgo Montesinos, A. M., Gómez Gómezz, M., Murcia Almagro, M. D., & Lax Martínez, M. C. (2010). Análisis de diferentes técnicas de inertización de residuos peligrosos. *Conama 10 Congreso Nacional Del Medio Ambiente*.
- Kaifer, M. J., Aguilar, A., Arana, E., Balseiro, C., Torá, I., Caleyá, J. M., & Pijls, C. (2004). Guía de Tecnologías de Recuperación de Suelos Contaminados. In *Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Londoño-Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T., & Muñoz-García, F. G. (2016). Los riegos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- López, M., & Pérez, A. (2018). Pruebas de Lixiviación Como Evaluación Ambiental De Materiales. In *Secretaria De Comunicaciones Y Transportes* (Issue 515, p. 52). <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt515.pdf>
- Marimón, J., Navarro, S., Pérez, C., & Martínez, M. J. (2015). *Valoración de residuos industriales en el desarrollo de técnicas de tratamiento innovadoras en suelos contaminados de la Región de Murcia* (Issue 2) [Universidad de Murcia]. <https://doi.org/10.5897/ERR2015>

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

- Martínez, S., Nogués, J., & García, M. (2018). La vitrificación: un ejemplo de sostenibilidad ambiental. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 18.3, 352–360.
- Molina, C. (2014). *Cadena Trófica De Los Lagos Titicaca , Uru-Uru Y Heavy Metal Contamination in the Trophic Chain*. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-09/010062844.pdf
- Molina, C., Ibañez, C., & Gibon, F.-M. (2012). Proceso de biomagnificación de metales pesados en un largo hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología En Bolivia*, 47(2), 99–118.
- Navarro, A., Martínez, D., & Rodríguez, J. (2009). Vitrificación solar de lodos de flotación de la zona minera de Sierra Almagrera (Almería). *Resíduos*, 19(114), 1–9. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/6279/vitrificacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ntutumumu, P. (2015). *Desarrollo de un Proceso de Inertización de Residuos Aplicado a una Fundición de Minerales Polimetálicos de la Faja Pirítica Española*. Escuela Técnica Superior De Ingenieros De Minas Y Energía.
- Pedraza, G. (2010). *Guía para la gestión y manejo Integral de Residuos Industria Metalmeccánica*.
- Pérez Clemente, M., Fernandez, C., & Luna, Y. (2016). *Estabilización/Solidificación de metales peligrosos en matrices geopoliméricas que contienen zeolitas*. Universidad de Sevilla-Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Procesadora VYMSA. (2020). *VYMSA: Valores y metales, procesadora de acero*. <https://procesadoravymsa.com/sobre-nosotros/>
- Quezada, W., Hernández, G., & Quezada-Moreno, W. (2015). *Análisis ambiental de la industria metalmeccánica en el Ecuador, caso de la empresa ecuatoriana ATU*. 3(2), 54–67.
- Ramírez, E., & Zapata, P. (2018). Propuesta de un Sistema de Costeo por órdenes de producción para la empresa procesadora de acero valores y metales Mendizábal Garzón S.A. (Procesadora VYMSA) ubicada en la ciudad de Quito. In *Febrero 2018* (Vol. 7, Issue 2). Universidad Central del Ecuador.
- Raqueta, D., & Noguera, C. (2016). *Estudio Bibliográfico de los Criterios Base para la Selección del Método de Recuperación de un Suelo* [Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72603/ROQUETA - Estudio bibliográfico de los criterios base para la selección del método de recuperació....pdf?sequence=1>
- Rheology, E. (1999). *Tecnologías de confinamiento*.
- Rincón, B. (2017). *Sinterización y vitrificación de residuos enriquecidos en ca, li, mn y cr*

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

procedentes de procesos industriales [Universitas Miguel Hernández].

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=136334>

Romero, L., & Vargas, M. (2009). Informe final: desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización / solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 22(2), 79–90.

Salguero, K., & Coral, K. (2017). *Inertización de relaves mineros utilizando la vitrificación para su aprovechamiento en la construcción* ". Universidad Internacio nal SEK.

Secretaria de Ambiente del DMQ. (2016). *Norma técnica de desechos peligrosos y especiales (NT005)*.

Volke Sepúlveda, T., & Velasco Trejo, J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*.

Zinc Ltda. (2020). *ZINC, CUIDAMOS EL MEDIO AMBIENTE*. <https://www.zincltda.com/servicios/>

INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

9. ANEXO

ANEXO A: REGISTRO FOTOGRÁFICO

DETERMINACIÓN DE PH



DETERMINACIÓN DE HUMEDAD

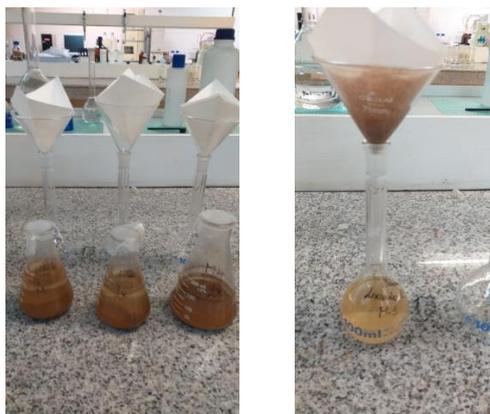


ENSAYO VÍA RESIDUO: DIGESTIÓN ÁCIDA Y ANALISIS DE METALES

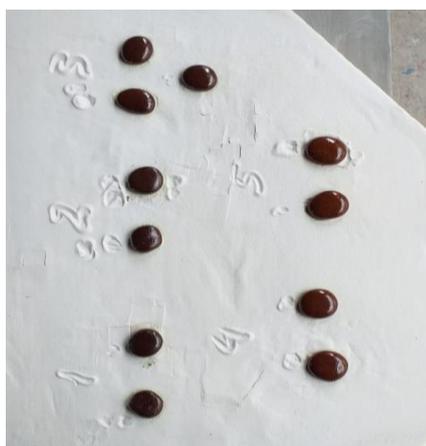
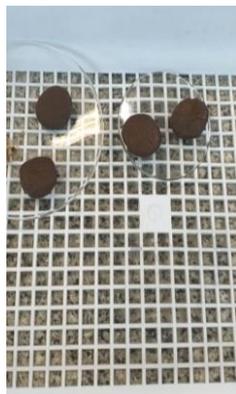


INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

ENSAYO VÍA LIXIVIADO ANTES DEL PROCESO DE VITRIFICACIÓN DEL LODO



PROCESO DE VITRIFICACIÓN DEL LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA



INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

ENSAYO VÍA LIXIVIADO DESPUÉS DEL PROCESO DE VITRIFICACIÓN DEL LODO



INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU

ANEXO B: CÁLCULOS DE LOS RESULTADOS

Resultados de pH del lodo

Muestras	Peso (gramos)	Volumen de H2O (mL)	pH (Unidades de pH)	Temperatura (°C)
M1	20,0045	20	10.83	20.8
M2	20,0102	20	10.77	20.9
MRC D096-914	20.0451	20	6.54	20

Resultados de la humedad del lodo

Muestras	Peso (gramos)	%Humedad
M1	3.065	78.9
M2	3.019	78.48

Caracterización vía residuo del lodo y cumplimiento con la NT005

Metales	(mg/kg)	LMP NT005 (mg/kg)	Cumplimiento
Cobre	760.049	NA	NA
Níquel	90.343	57	NC
Cobalto	91.446	NA	NA
Cromo total	35009.804	3000	NC
Plomo	51.667	4300	C
Manganeso	1531.863	NA	NA
Hierro	309460.784	NA	NA
Cadmio	2.549	85	C
Plata	<5	NA	NA
Zinc	59583.333	420	NC
Mercurio	0.0667	840	C
Arsénico	3.1213	75	C
Selenio	0.2860	NA	NA

Caracterización vía Lixiviado del lodo y cumplimiento con la NT005

Metales	M1 (mg/L)	M2 (mg/L)	Promedio (mg/L)	LMP -extracto PEC (prueba de lixiviación)	Cumplimiento
COBRE	1,265	1,271	1,268	NA	NA
NÍQUEL	1,669	1,647	1,658	NA	NA
COBALTO	0,400	0,410	0,405	NA	NA
CROMO TOTAL	0,482	0,470	0,476	5	C

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

PLOMO	0,307	0,313	0,310	5	C
MANGANESO	25,700	25,900	25,800	NA	NA
HIERRO	4,466	4,457	4,462	NA	NA
CADMIO	0,027	0,026	0,027	1	C
PLATA	0,000	0,000	0,000	5	C
ZINC	80,000	79,800	79,900	NA	NA
MERCURIO	0,00246	0,00245	0,002	0,2	C
ARSÉNICO	0,00082	0,00088	0,00085	5	C
SELENIO	0,00140	0,00143	0,001	1	C

Caracterización vía Lixiviado del lodo y cumplimiento con el Acuerdo Ministerial 097 A

Metales	M1 (mg/L)	M2 (mg/L)	Promedio (mg/L)	LMP (mg/L)	Cumplimiento
COBRE	1,265	1,271	1,268	1	NC
NÍQUEL	1,669	1,647	1,658	2	C
COBALTO	0,400	0,410	0,405	0,5	C
CROMO TOTAL	0,482	0,470	0,476	NA	NA
PLOMO	0,307	0,313	0,310	0,2	NC
MANGANESO	25,700	25,900	25,800	2	NC
HIERRO	4,466	4,457	4,462	10	C
CADMIO	0,027	0,026	0,027	0,02	NC
PLATA	<0.1	<0.1	<0.1	0,1	C
ZINC	80,000	79,800	79,900	5	NC
MERCURIO	0,00246	0,00245	0,0024	0,005	C
ARSÉNICO	0,00082	0,00088	0,00085	0,1	C
SELENIO	0,00140	0,00143	0,0014	0,1	C

Resultados metales pesados del lixiviado después del proceso de vitrificación

COBRE							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	0,012	0,012
St. 0.15	-	-	-	-	1	0,145	0,145
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,321	0,309
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,328	0,316
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,259	0,247
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,256	0,244
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,132	0,120
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,131	0,119
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,065	0,053

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,063	0,051
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,04	0,028
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,039	0,027
St. 0.5	-	-	-	-	1	0,535	0,535

NÍQUEL							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	0,09	0,09
St. 0.5	-	-	-	-	1	0,515	0,515
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,131	0,041
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,126	0,036
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,122	0,032
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,114	0,024
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,08	-0,010
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,083	-0,007
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,07	-0,020
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,075	-0,015
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,032	-0,058
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,037	-0,053
St.2.0					1	2,015	2,015

COBALTO							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	0,056	0,056
St. 0.8	-	-	-	-	1	0,773	0,773
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,043	-0,013
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,001	-0,055
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,001	-0,055
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,001	-0,055
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0	-0,056
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0	-0,056
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,002	-0,054
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,003	-0,053
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,043	-0,013
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,015	-0,041
St.2.5					1	2,458	2,458

CROMO TOTAL							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	0,045	0,045
St. 0.7	-	-	-	-	1	0,727	0,727

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,016	-0,029
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,02	-0,707
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,015	-0,001
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,013	-0,007
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,009	-0,006
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,008	-0,005
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,007	-0,002
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,007	-0,001
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,005	-0,002
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,006	-0,001
St.2.5					1	2,529	2,529

PLOMO							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco			-	-	1	0,084	0,084
St. 0.5			-	-	1	0,485	0,485
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,104	0,020
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,106	0,022
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,069	-0,015
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,065	-0,019
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,055	-0,029
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,052	-0,032
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,048	-0,036
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,045	-0,039
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,048	-0,036
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,05	-0,034
St.2.0					1	1,98	1,980

MANGANESO							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco			-	-	1	0,004	0,004
St. 0.2			-	-	1	0,19	0,19
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,041	0,037
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,04	0,036
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,001	-0,003
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,001	-0,003
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,001	-0,003
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,002	-0,002
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,003	-0,001
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,003	-0,001
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,002	-0,002
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,001	-0,003

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

St.0.8					1	0,76	0,760
--------	--	--	--	--	---	------	-------

HIERRO							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/kg)
Blanco	-	-	-	-	1	0,115	0,115
St. 0.8	-	-	-	-	1	0,788	0,788
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,8	0,685
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,88	0,765
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,576	0,461
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,589	0,474
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,301	0,186
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,305	0,190
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,257	0,142
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,243	0,128
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,193	0,078
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,188	0,073
St.2.0					1	2,129	2,129

CADMIO							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	0,004	0,004
St. 0.8	-	-	-	-	1	0,068	0,068
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,002	-0,002
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,001	-0,067
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,001	-0,001
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0	-0,001
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0	-0,001
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0	0,000
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0	0,000
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0	0,000
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0	0,000
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0	0,000
St.0.5					1	0,482	0,482

PLATA							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	0	0
St. 0.2	-	-	-	-	1	0,190	0,190
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,000	0,000
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,000	0,000
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,000	0,000

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,000	0,000
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,000	0,000
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,000	0,000
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,000	0,000
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,000	0,000
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,000	0,000
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,000	0,000
St.0.5					1	0,498	0,498

ZINC							
Muestra	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (mg/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	0,047	0,047
St. 0.2	-	-	-	-	1	0,213	0,213
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	0,522	0,475
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	0,535	0,488
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	0,305	0,258
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	0,310	0,263
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,258	0,211
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,246	0,199
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,174	0,127
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,150	0,103
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,115	0,068
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,100	0,053
St.0.5					1	0,525	0,525

MERCURIO							
MUESTRA	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (ng/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	10,61	10,6100
St. 30ng/L	-	-	-	-	1	33,05	33,050
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	10,54	-0,000014
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	10,65	-0,004480
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	10,53	-0,000002
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	10,52	-0,000026
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	10,59	0,000012
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	10,59	0,000014
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	10,55	-0,000008
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	10,52	-0,000014
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	10,45	-0,000020

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	10,51	-0,000002
St.30ng/L					1	31,09	31,0900

MUESTRA	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	Peso total	Aforo	FD	Lectura (ng/L)	Resultado (mg/L)
Blanco	-	-	-	-	1	1,129	1,1290
St.3ng/L	-	-	-	-	1	3,121	3,121
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	3,071	0,000388
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	3,127	0,000400
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	1,329	0,000040
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	1,371	0,000048
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	0,331	-0,000160
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	0,345	-0,000157
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	0,976	-0,000031
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	0,885	-0,000049
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	0,165	-0,000193
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	0,185	-0,000189
St.3ng/L					1	3,009	3,0090

MUESTRA	Peso lodo seco	Peso vidrio molido	PESO TOTAL	AFORO	FD	Lectura (ng/L)	Resultado (mg/L)
Blanco			-	-	1	6,411	6,4110
St.30ng/L			-	-	1	30,54	30,540
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5021	1,5013	5,0034	100	1	5,961	-0,000090
Lx-1 (70%L/30% V)	3,5020	1,5026	5,0046	100	1	5,884	-0,004931
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0066	2,0055	5,0121	100	1	5,355	-0,000121
Lx-2 (60%L/40% V)	3,0009	2,008	5,0089	100	1	5,708	-0,000035
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5057	2,5015	5,0072	100	1	4,912	-0,000089
Lx-3 (50%L/50% V)	2,5000	2,501	5,0010	100	1	5,054	-0,000131
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0056	3,0001	5,0057	100	1	5,774	0,000172
Lx-4 (40%L/60% V)	2,0042	3,0061	5,0103	100	1	5,922	0,000174
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5058	3,5088	5,0146	100	1	5,336	-0,000088
Lx-5 (30%L/70% V)	1,5074	3,5021	5,02	100	1	5,465	-0,000091
St.30ng/L					1	31,85	31,8500

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

Caracterización vía Lixiviado del lodo 50% muestra y 50% vidrio molido y cumplimiento con la NT005

METALES	Vía lixiviado sin inertizar		Vía lixiviado inertizado		LMP (mg/L)	Cumplimiento
	M1 (mg/L)	M2 (mg/L)	MV-1 (mg/L)	MV-2 (mg/L)		
COBRE	1,265	1,271	0,120	0,119	NA	NA
NÍQUEL	1,669	1,647	<0.3	<0.3	NA	NA
COBALTO	0,4	0,41	<0.3	<0.3	NA	NA
CROMO TOTAL	0,482	0,47	<0.3	<0.3	5	C
PLOMO	0,307	0,313	<0.3	<0.3	5	C
MANGANESO	25,7	25,9	<0.1	<0.1	NA	NA
HIERRO	4,466	4,4572	0,186	0,19	NA	NA
CADMIO	0,027	0,026	0	0	1	C
PLATA	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	5	C
ZINC	80	79,8	0,211	0,199	NA	NA
MERCURIO	0,002456	0,00245	<0.005	<0.005	0,2	C
ARSÉNICO	0,000817	0,000875	<0.0005	<0.0005	5	C
SELENIO	0,0013996	0,001429	<0.005	<0.005	1	C

Caracterización vía Lixiviado del lodo y cumplimiento con el Acuerdo Ministerial 097 A

METALES	Vía lixiviado sin inertizar		Vía lixiviado inertizado		LMP (mg/L)	Cumplimiento
	M1 (mg/L)	M2 (mg/L)	MV-1 (mg/L)	MV-2 (mg/L)		
COBRE	1,265	1,271	0,120	0,119	1	C
NÍQUEL	1,669	1,647	<0.3	<0.3	2	C
COBALTO	0,4	0,41	<0.3	<0.3	0,5	C
CROMO TOTAL	0,482	0,47	<0.3	<0.3	NA	NA
PLOMO	0,307	0,313	<0.3	<0.3	0,2	LC < LMP
MANGANESO	25,7	25,9	0	0	2	
HIERRO	4,466	4,4572	0,186	0,19	10	C
CADMIO	0,027	0,026	<0.01	<0.01	0,02	C
PLATA	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0,1	C
ZINC	80	79,8	0,211	0,199	5	C
MERCURIO	0,002456	0,00245	<0.005	<0.005	0,005	C
ARSÉNICO	0,000817	0,000875	<0.0005	<0.0005	0,1	C
SELENIO	0,0013996	0,001429	<0.005	<0.005	0,1	C

**INERTIZACIÓN DE METALES PESADOS DE UN LODO DE LA INDUSTRIA
METALMECÁNICA, UTILIZANDO EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN EX SITU**

Porcentaje de inertización de cada metal

METAL	P1	P2	P3	P4	P5
	70% L/30% V	60% L/40% V	50% L/50% V	40% L/60% V	30% L/70% V
COBRE	75,355	80,639	90,576	95,899	97,831
NÍQUEL	97,678	98,311	100,000	100,000	100,000
COBALTO	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
CROMO TOTAL	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
PLOMO	93,226	100,000	100,000	100,000	100,000
MANGANESO	99,859	100,000	100,000	100,000	100,000
HIERRO	83,750	89,522	95,786	96,974	98,308
CADMIO	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
ZINC	99,397	99,674	99,743	99,856	99,924
MERCURIO	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
ARSÉNICO	53,428	94,775	100,000	100,000	100,000
SELENIO	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000