



---

---

# PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COMO EVALUACIÓN AMBIENTAL DE MATERIALES

María Guadalupe López Domínguez  
Alfonso Pérez Salazar

**Publicación Técnica No. 515**  
**Sanfandila, Qro, 2018**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Pruebas de lixiviación como evaluación  
ambiental de materiales**

**Publicación Técnica No. 515**  
**Sanfandila, Qro, 2018**

---



Este trabajo fue realizado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la M. en C. María Guadalupe López Domínguez y el Ing. Alfonso Pérez Salazar.

Este texto es el resultado final del proyecto de investigación interna II-04/15, Pruebas de lixiviación para la evaluación ambiental de materiales no convencionales empleados en base y subbase.

Agradecemos al Ing. Enrique Granell, Gerente de Producción de Concretos Reciclados, por el material para esta investigación; y al Dr. Gilles Levesse del Centro de Geociencias, Campus UNAM Juriquilla, por el apoyo en los análisis químicos realizados.



# Contenido

---

Índice de tablas		iv
Índice de figuras		vi
Sinopsis		viii
Abstract		
Resumen	ejecutivo	
Introducción.		1
Capítulo 1.	Movilidad de contaminantes en el suelo	3
Capítulo 2.	Lixiviación y pruebas	11
Capítulo 3.	Metodología	17
Capítulo 4.	Resultados	23
Capítulo 5.	Conclusiones	27
Bibliografía		29



# Índice de tablas

---

2.1 Componentes esperados en relación con el pH	12
3.1 Parámetros empleados en la determinación de muestras	22
4.1 Resultados del análisis en mg/kg DM por ICP	23



# Índice de figuras

---

1.1 Fases del suelo	5
1.2 Rutas de absorción que pueden llevarse a cabo en el suelo	6
2.1 Gráfica de solubilidad de As respecto al pH en cenizas volantes	13
2.2 Gráfica de solubilidad de As respecto al pH en cenizas volantes	14
3.1 a) Instalaciones de separación y trituración del material b) características físicas del material	17
3.2 Análisis granulométrico de material para subbase	18
3.3 Análisis granulométrico de material para base	19
3.4 Curva granulométrica material “mezclado” para subbase	20
3.5 Diagrama de columna de lixiviación	21
4.1 Resultados de metales lixiviados	24
4.2 Diagrama Ep-pH de las fases Sb-Zn-Ni	25



## **Sinopsis**

---

Las pruebas de lixiviación son ensayos muy útiles en la caracterización de residuos y materiales empleados en la industria de la construcción. Los materiales no convencionales (residuos y subproductos industriales) utilizados en la construcción de caminos pueden contener compuestos que, al estar expuestos al agua (lluvia, agua superficial, agua subterránea, etc.), probablemente experimenten procesos de disolución y los liberen al ambiente (transporte). Si la concentración de alguno de estos componentes es elevada, puede presentar un riesgo al medio ambiente en el que se encuentran. En México, estas pruebas están empezando a ser empleadas para evaluar -en el entorno- el uso de materiales no convencionalmente empleados en la infraestructura carretera; como parte de las medidas para optimizar el uso de recursos, de manera que aporten soluciones técnica y ambientalmente viables.

Palabras clave: lixiviación, evaluación ambiental, materiales para construcción.



# Abstract

---

The leaching tests are very useful tests in the characterization of waste and materials used in the construction industry. The unconventional materials (waste and industrial by-products) used in the construction of roads can contain compounds that when exposed to water (rain, surface water, groundwater, etc.) can undergo dissolution processes and release them into the environment (transport). If the concentration of any of these components is high, it can present a risk into the environment. In Mexico, these tests are beginning to be use for environmental evaluation of the use of materials not conventionally used in the road infrastructure, as part of the measures to optimize the use of resources, so that they provide technically and environmentally viable solutions.

Keywords: leaching, environmental evaluation, construction materials.



## Resumen ejecutivo

---

Desde hace más de una década, la tendencia mundial es el ahorro de recursos naturales y la optimización de su uso; así, han sido desarrollados métodos y tecnologías para el tratamiento de materiales considerados como residuos, para lograr su reincorporación a procesos como los son los proyectos de construcción de carreteras, y contribuir de esta manera al ahorro de recursos naturales y a reducir emisiones a la atmósfera por actividades como la extracción en bancos de materiales. A esto le podríamos sumar el cumplimiento con las nuevas restricciones ambientales que día con día surgen en más lugares, que son cada vez más severas sobre la optimización y manejo de recursos naturales y algunos beneficios económicos, aunque estos últimos están fuera del alcance del análisis del presente trabajo.

Durante el periodo de vida útil del material cualquiera, su comportamiento puede verse afectado por diferentes factores (termales, químicos, mecánicos). En el uso de materiales desecho y reciclados, debemos tomar en cuenta la interacción que estos tendrán en el ambiente, desde un punto de vista químico y físico. Los efectos que pueden causar estos materiales en el ambiente están predominados a su exposición a la precipitación; en el caso de materiales reciclados y de reúso, es determinante evaluar la lixiviación de contaminantes para su control ambiental. Desde una perspectiva de ingeniería de caminos, los materiales empleados deben ser utilizados de tal manera que el rendimiento esperado del proyecto no se vea comprometido. Los residuos y materiales reciclados son materiales diferentes a los convencionales (naturales), ya que han sufrido procesos que modifican sus propiedades y una parte importante de su reutilización es la determinación de estas. Al emplear dichos materiales, debemos estar al tanto de las propiedades tanto geotécnicas como ambientales y de las condiciones a las que estará sometido.

De las interacciones potenciales que podrían darse entre los materiales está el transporte de partículas finas en su empleo (movilizadas por el aire), la infiltración por lluvia, la transferencia de elementos (contaminantes) al subsuelo o agua subterránea por infiltración de la lluvia; esto último puede ocurrir antes, durante o después de las capas de coberturas del proyecto; y finalmente, la transferencia de elemento (contaminantes) por deformaciones debidas al envejecimiento de las carpetas dado a condiciones climáticas y las ocasionadas por el flujo de tránsito.

Las pruebas de lixiviación son protocolos realizados para liberar de manera acelerada las especies químicas contenidas en un material, con el objetivo de caracterizar su potencial para ser movilizado al ambiente. Existen diferentes pruebas de lixiviación que pueden ser más o menos selectivas, y son aplicadas

dependiendo del objetivo de la prueba; principalmente para la caracterización de un material en un estado particular, bajo la cual los compuestos están en fase sólida. Para esto, se reduce el tamaño de partícula del material que se pretende utilizar para la construcción de caminos para aumentar el área de contacto entre la solución y los sólidos, y se utilizan volúmenes de solución a pH bajos para promover la solubilización.

Los resultados de estas pruebas sirven para predecir el comportamiento del material en la estructura (del camino) durante su vida útil, relacionando los resultados de las pruebas de laboratorio con las condiciones y los factores ambientales a las que se someterá el material, una vez empleado. Los contaminantes de mayor interés que pudieran ser movilizados por el intemperismo y lixiviación debido a la lluvia son los metales pesados, debido a su alta toxicidad a bajas concentraciones. El contenido de sulfatos es determinante para conocer la interacción que experimentará el material, debido al efecto del agua, y el potencial de lixiviar sales que ocasionen un impacto ambiental.

# Introducción

---

La situación ambiental mundial ha desencadenado un fuerte desarrollo de alternativas para solucionar la problemática que actualmente enfrentamos en materia ambiental. Durante años, las carreteras y caminos han brindado beneficios económicos y sociales a la población, y tienen el potencial de también brindar soluciones ante la necesidad de preservar el medio ambiente. Las experiencias nos muestran la necesidad de elaborar normativas que marquen las especificaciones adecuadas sobre los métodos y procesos que se están aplicando. Así, las evaluaciones sobre la sustentabilidad de estas soluciones implicarían realmente soluciones óptimas y, sobretodo, inocuas.

Bajo estos criterios; los beneficios del reaprovechamiento, reciclado o reproceso de materiales que han sido clasificados ya como residuos o subproductos pueden brindar soluciones a los problemas ambientales, a través de la infraestructura de carreteras. Debido a que la construcción de caminos requiere grandes volúmenes de materiales, los organismos viales se han convertido en los principales participantes en estos esfuerzos acerca de su reutilización y reciclaje. El aprovechamiento de estos materiales secundarios (residuos y subproductos) como alternativa a los materiales vírgenes, no es nuevo; sin embargo, incluirlos en proyectos de construcción aún no ha influido en la demanda de materiales ni ha sido constante en todos los proyectos de infraestructura.

Además, ya que las soluciones ambientales aportadas para, por un lado, resolver la problemática de la generación de residuos que presentan la factibilidad de ser aprovechados como materiales de construcción y, por el otro, reducir el empleo de materiales vírgenes que se explotan en los bancos de materiales; deben generarse propuestas para evaluar que estas se lleven a cabo de manera que no generen un nuevo riesgo al medioambiente o comprometan el rendimiento esperado del proyecto.

En ese contexto, los residuos o subproductos han mostrado que pueden fungir como materiales con desempeños iguales, o -en algunos casos- mejores, a los materiales vírgenes explotados en los bancos de materiales que aún no han tenido un proceso previo. Los residuos y subproductos, son materiales muy diferentes a los naturales vírgenes (convencionales), ya que sus propiedades han sufrido procesos de modificación; por lo que una parte importante de su reutilización es determinarlas para encontrar su uso óptimo y especificaciones.

Por lo que, los materiales deben ser evaluados no solo desde un aspecto geotécnico, sino también ambiental; debido a que su naturaleza puede ser resultado de un proceso que podría contener elementos potencialmente peligrosos

para el medio ambiente, en cuyo caso restaría su valor ambiental al ser utilizados en alguna capa de la infraestructura carretera, debido a fenómenos como la percolación.

Sobre estos potenciales riesgos, es necesario evaluar el empleo de materiales considerados como subproductos -o en algún momento clasificados como residuos- para su empleo en cualquiera de las estructuras que forman parte de una carretera, y determinar la existencia o no de posible contaminación derivada de la interacción de los materiales entre sí, o con el ambiente.

Con esa finalidad, proponemos las pruebas de lixiviación como metodología para evaluar el ambiente; ya que permiten determinar la movilidad del contaminante de interés, en suelos y materiales. Estas pruebas se basan en la capacidad que tiene un contaminante para solubilizarse o ser estabilizados por componentes del ambiente donde se encuentran -sedimentos, materia orgánica, partículas finas- o modificaciones en las condiciones del ambiente, como la alcalinidad o acidez del medio. Con estas pruebas podemos conocer el potencial de contaminación de elementos importantes, las cuáles complementan la evaluación para la incorporación de residuos y subproductos en cualquier parte o elemento de una carretera ya sea para su uso en base, subbase, carpetas u otros.

# 1 Movilidad de Contaminantes

---

La permeabilidad de posibles contaminantes se hace con base en los escenarios más probables, los cuáles involucran que estos pasen principalmente al resto del suelo en donde son introducidos y pueden producir una fuente de contaminación al suelo y al agua. Los principales mecanismos de transporte la solubilidad de los elementos químicos presentes son la difusión, cuando exista bajas permeabilidades; y la percolación, cuando hay un libre movimiento de los contaminantes.

Varios contaminantes son movilizados a través de vectores físicos, químicos y biológicos. Esta movilidad puede ser en forma de cationes, aniones o iones complejos. Los compuestos contaminantes pueden, de igual manera, incorporarse a las fases de sólidos inorgánicos (como sedimentos, partículas suspendidas) o ser adsorbidas por los mismos (procesos de sorción). De esta forma estos elementos químicos pueden ser transportados y depositados diferentes ambientes o, incluso, cuerpos de agua. En particular, la movilización de elementos químicos como los metales pesados en concentraciones mayores a las que naturalmente se encuentran en el ambiente, puede ser toxica a algunas formas de vida, o estar acumulándose a través del tiempo [Siegel, 2002] en tejidos orgánicos; ya sea por ser consumidos en la cadena trófica o por tener contacto directo y ser absorbido por otro medio (respiración, contacto, entre otros).

Existen una serie de elementos químicos que pueden resultar nocivos para el medio ambiente; como los elementos radioactivos, componentes orgánicos y órgano metálicos, metales pesados y metaloides, así como sus especies químicas. En este documento nos enfocaremos a la evaluación ambiental por metales pesados y algunos metaloides; estos han sido caracterizados por su potencial tóxico hacia las formas de vida, por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA-US), la Asociación Mundial de la Salud (OMS) y por el Programa de Evaluación y Vigilancia del Ártico (AMAP).

Así, los metales y metaloides considerados dentro de esta categoría son el arsénico (As), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), mercurio (Hg), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y cinc (Zn). Algunos otros elementos que se encuentran de manera mayoritaria en la formación de minerales en los materiales geológicos son el aluminio (Al), calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), fósforo (P) y estroncio (Sr); estos son de importancia ya que nos ayudan a identificar la fase en la que podemos encontrar a un contaminante [Fernández Sempere, 1997].

## **1.1 Movilidad de contaminantes**

Muchos contaminantes de interés, como los metales pesados y algunos compuestos orgánicos e hidrocarburos, obedecen a procesos dinámicos de biogeoquímica; en donde se llevan a cabo una serie de interacciones químicas y físicas con el suelo. La heterogeneidad del sustrato y la cercanía del ambiente a la superficie, tipo de suelo, contenido de agua y aire determinan los procesos biogeoquímicos que regulan los estados de oxidación, y controlan la solubilidad, movilidad, disponibilidad y toxicidad.

El principal objetivo es evitar que se genere contaminación en el suelo, en torno a la infraestructura; incluyendo subsuelo y componentes debajo de ella. Cuando hablamos de contaminación del suelo, nos referimos de las alteraciones físicas, químicas e incluso biológicas -de manera negativa- a causa de componentes de origen humano; que no se encontraban como componentes originales de este. Los “nuevos” elementos se encuentran en concentraciones tales que representan un riesgo a la salud o al medio ambiente. En este sentido, podemos encontrar una amplia normativa que marca los parámetros y límites permisibles para una serie de elementos y compuestos; la que nos determina cuándo un suelo está contaminado, o supera los límites superiores permisibles para algún elemento.

En el presente trabajo, nos enfocaremos a la determinación y evaluación ambiental por lixiviación; en específico de metales pesados y su potencial de contaminación al suelo, por percolación del agua. No descartamos que esta pueda interactuar con el aire; en el entendido de que el medio ambiente no cuenta con entes delimitados físicamente, sino que existe una interacción constante entre aire, agua y suelo; sin embargo, la volatilización de estos y su paso a la atmósfera quedan fuera del alcance del presente estudio.

Los principales efectos y riesgos, dado la movilización de contaminantes en el suelo, dependen de las concentraciones que se presenten; sin embargo, -como lo veremos más adelante- los metales pesados y metaloides presentan una alta toxicidad a concentraciones muy bajas; lo que puede suponer riesgos tóxicos a la salud humana, inclusive pérdidas de recursos naturales y económicas. Debido a que el principal transporte de contaminantes se da por medio de la disolución o transporte de forma particular debido a la percolación del agua, podemos identificar la ingestión indirecta de estos contaminantes como uno de los principales riesgos; al tener suelos de cultivo contaminados, así como la contaminación de mantos freáticos y acuíferos, por su flujo subterráneo.

## **1.2 Adsorción y desorción en el ambiente**

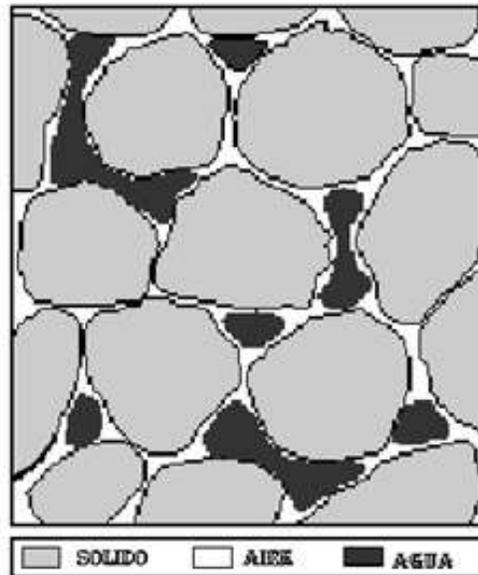
Los metales y metaloides obedecen procesos dinámicos de biogeoquímica en zonas de interés donde se llevan a cabo la mayor parte de interacciones químicas y físicas con el suelo. La heterogeneidad del sustrato y la cercanía del ambiente a

la superficie, donde las interacciones de complejación tienen lugar e involucran a la roca, tipo suelo, agua, aire y organismos biológicos presentes; y estos son los que regulan el hábitat natural y determinan la disponibilidad de recursos indispensables para la vida [Nacional Research Council, 2001]. Los procesos biogeoquímicos afectan la especiación (forma en que se presentan) de los metales al controlar su solubilidad, movilidad, biodisponibilidad y toxicidad.

La solución del suelo es la fase líquida-acuosa (figura 1.1) del suelo y todo lo disuelto en ella; los metales ingresan en forma de iones a esta solución y comienza una competencia de mecanismos de reacción, la cual pueden seguir estos iones.

La sorción de metales, es decir su retención, incluyendo a algunos compuestos alcalinos (como el potasio y el calcio), metales de transición (como el cadmio y el níquel) en minerales inorgánicos (arcillas minerales, óxidos metálicos y oxihidróxidos) y sustancias orgánicas húmicas son de los mecanismos más importantes que controlan el destino, transporte y biodisponibilidad de los metales en los ambientes de suelo y agua.

Entonces, el suelo puede contener metales como iones libres, complejos ligados a materia orgánica o a inorgánica. Todos compuestos complejos y iones libres pueden ser tomados por las plantas; ser retenidos en superficies minerales, en la materia orgánica natural del suelo y microbiota, o ser transportados al subsuelo por lixiviación o por transporte facilitado por coloides, precipitar como sólidos y quedar como partículas que ocupan la fase porosa del suelo.



**Figura 1.1 Fases del suelo.**

Las raíces y microorganismos afectan el transporte y solubilidad de metales en el suelo. Como ya se ha mencionado, microorganismos pueden metabolizar ciertos metales, como el Hg, Se, Sn, As y Cr a través de reacciones de oxidación-reducción y de metilación [Sparks, 2002]. Por ejemplo el caso del mercurio, cuya forma metiladas (orgánicas) con mucho más tóxicas que sus inorgánicas, y sus bioacumulación en los organismos. La metilación es favorecida en ambientes con características como bajos niveles de oxígeno, pH y alto contenido de materia orgánica en el suelo.



Figura 1.2 Rutas de absorción que pueden llevarse a cabo en el suelo.

Cuando estos metales potencialmente tóxicos son movilizados, por procesos arriba descritos; con el tiempo, estos compuestos pueden generar problemas lixivando elementos como el arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg) y plomo (Pb) al agua para cultivos; y transferirlos a la cadena trófica, o percolándolos al subsuelo y mantos freáticos.

Varios mecanismos de sorción de metales están relacionados con el componente (sorbente) con el que interactúan. Para los sistemas naturales en suelos y sedimentos están las arcillas minerales, los óxidos metálicos y los oxihidróxidos, así como las sustancias húmicas asociadas a la materia orgánica. Estos sorbentes se caracterizan por una gran carga superficial y alta superficie de carga, las cuáles juegan un rol primordial en la porción de metales. La superficie de carga puede ser negativa y no cambiar en respeto al pH, en el caso de minerales arcillosos de carga constante como la montmorillonita y la vermiculita. Esta carga constante resulta de la sustitución iónica en la estructura de la arcilla (sustitución isomórfica). Sin embargo, esta superficie de carga puede ser variable dependiendo de los cambios de pH, debido a los grupos funcionales en la superficie de los sorbentes [Sparks, 2002].

Tanto como fuerzas químicas y físicas se involucran en porción de metales de una solución. Las físicas son relacionadas a fuerzas de Van der Waals y electrostáticas de complejación de esfera interna y externa, y las fuerzas químicas resultan de interacciones más cercanas; pues incluyen complejidad de esfera interna al involucrar mecanismos de intercambio, enlaces covalentes y puentes de hidrógeno [Stumm,1992; Sparks, 2002].

La sorción de metales, es decir su retención, incluyendo a algunos compuestos alcalinos (como el potasio y el calcio), a metales de transición (como el cadmio y el níquel) en minerales inorgánicos (arcillas minerales, óxidos metálicos y oxihidróxidos) y sustancias orgánicas húmicas, son de los mecanismos más importantes que controlan el destino, transporte y biodisponibilidad de los metales en los ambientes de suelo y agua [Levresse, 2012].

### **1.3 Metales Pesados**

Existen varias fuentes naturales y antropogénicas de metales pesados en el ambiente. De forma natural, cerca del 80% provienen principalmente del intemperismo y erosión de la corteza terrestre o por erupciones volcánicas; y en menor parte de incendios forestales o fuentes biogénicas [Nriagu, 1990]. Existe una multitud de emisiones por fuentes antropogénicas al ambiente, en estos casos la industria de la minería y de la fundición son las principales. La minería libera los metales a efluentes ambientales como partículas enriquecidas de estos a la atmósfera, como resultados de procesos de refinamiento de altas temperaturas. En la explotación del plomo, Pb-Cu-Zn-Cd son liberados en gran cantidad; y en la fundición del Cu y del Ni, son el Co-Zn-Pb-Mn, al igual que el Cu-Ni [Adriano, 1986]. A medida que la tecnología ha ido avanzando, también se ha incrementado la demanda de estos metales debido a sus usos. No hay que dejar a un lado fuentes antropogénicas igualmente importantes como son la quema de hidrocarburos fósiles, la producción de cementos, uso de pesticidas, etcétera.

Las dos rutas principales en las que los metales pesados se incorporan al sistema aire-suelo-sedimento-agua son el transporte por aire (atmosférico) y agua (fluvial). La fuente primaria a la atmósfera son los procesos de refinación en la extracción de minerales que los contienen. Muchos metales son utilizados en productos tecnológicos; los cuáles, al ser inapropiadamente descartados, producen una fuente secundaria pero igualmente importante. Actualmente muchos de estos metales son incorporados a alimentos, gasolinas y otros productos; cuando estos han sido utilizados por el hombre, comúnmente terminan en las aguas de residuo incorporándose a sistemas acuáticos.

La preocupación por las concentraciones de metales pesados en el ambiente, ha sido por su reciente incremento debido a actividades antropogénicas y al extenso uso de componentes nuevos que los contienen [Dietl, 1997; Fowler y Goering, 1991; Shotyk y col., 2005]. Suelos agrícolas pueden llegar a ser contaminados por metales por deposición húmeda y seca, provenientes de diferentes fuentes

[Crecelius y col., 1974]. Varios estudios han reportado altos niveles de concentración de metales pesados en el suelo, en vegetales, en mamíferos y en insectos herbívoros [Hidalgo y Alonso, 2005].

El inventario tóxico de la Agencia de Protección del Ambiente (EPA) para el período, de 1993 a 2005, demostró que las plantas industriales de Estados Unidos lanzaron más de 900 toneladas por año de antimonio en todas las formas al suelo, y cerca de 25 toneladas por año al agua subterránea. Existe una preocupación por la lixiviación de los pigmentos que contienen estos compuestos, principalmente en los estabilizadores de calor y en los retardadores de la llama de productos desechados de los plásticos, debido a la presencia que tienen estos últimos en todo el planeta.

## **1.4 Residuos de demolición y construcción (RDC)**

Los residuos de demolición y construcción (denominados RDC), en México carecen de una gestión adecuada que permita la promoción de su uso o reciclaje en nuevas obras o proyectos. Sin embargo, las necesidades actuales de materiales en la construcción de infraestructura (carreteras, puentes, entre otros), el aumento de la demanda de viviendas y la gestión medioambiental casi nula en este tipo de residuos ha generado una problemática en torno a su disposición y regulación.

Entre los diferentes tipos de residuos que pueden ser considerados para su reutilización en las carreteras y autopistas, tenemos:

- Desde el mismo sitio de trabajo de construcción y las instalaciones adyacentes: el exceso de material, suelos marginales e inadecuados, excavación lodo reciclado de la carpeta y la recuperación de relleno.
- Desde el mismo sitio de trabajo de construcción con un tratamiento selectivo: molienda para la fabricación concretos asfálticos y demolición de concretos hidráulicos.
- A partir de la construcción y demolición planta de tratamiento.
- Viniendo de otra actividad: residuos industriales, urbanos, ruedas, ceniza inerte y escoria, entre otros.

Dentro de los esfuerzos por lograr una regulación en el tema de reuso de los RDC; en el 2006, el Gobierno de la Ciudad de México emitió una serie de normas sobre este tipo de residuos, en las cuáles se estipula que al menos el 25% de los nuevos materiales sean sustituidos por materiales reciclados en los proyectos de construcción; a reserva que los resultados de las pruebas de control puedan establecer otro porcentaje para ser usado. Esta normativa tiene el objetivo de promover la reutilización de materiales en cualquier proyecto de construcción y al momento es obligatorio para la Ciudad de México. Sin embargo, hay renuencia sobre si estos materiales cumplen con la calidad y también con las expectativas

ambientales que se pretenden con su incorporación a proyectos de obra civil, así como la necesidad de extender esta regulación al resto del territorio nacional.

A nivel mundial, existe experiencia en el uso de estos materiales; en ensayos de caracterización geotécnica se llevan a cabo en el material utilizado, sobre todo los desechos o residuos industriales para predecir el comportamiento estructural al lado de pruebas y determinar que no se consideran desechos peligrosos. Analizar estos materiales en la estructura destino en el proyecto complementa los estudios básicos sobre el comportamiento del suelo, y propone acciones para su uso seguro. Acciones como determinar si se requiere un tratamiento previo o si es necesario la inclusión de estabilizadores para alcanzar las especificaciones y obtener el máximo valor de su incorporación en el proceso.



## **2 Lixiviación y pruebas**

---

Las pruebas de lixiviación han probado ser una herramienta de caracterización útil en la estimación de efectos medioambientales en varios países. El contenido total de un contaminante en un material (ejemplo un suelo) no es determinante, sino su capacidad de ser movilizado hacia el agua (fase acuosa), a esto se le llama movilidad de contaminante o lixiviación [Erdem y Özverdi, 2008]. El uso de estas pruebas está cambiando significativamente, ya que cada vez más los resultados obtenidos son considerados para la disposición de residuos y en el beneficio para el reuso de materiales en la construcción.

### **2.1 Proceso de lixiviación**

En esta parte, definamos primeramente al fenómeno de lixiviación. La lixiviación es el proceso mediante el cual un compuesto o elementos contaminantes son liberados de una fase sólida a una fase acuosa. En una prueba de lixiviación, el material es puesto en contacto con un eluyente -en este caso sería el agua, fuente de fenómenos meteorológicos- para extraerle los componentes del material disueltos o acarreados, como partículas finas por su flujo en el material. Así, el principal transporte de contaminantes se da por medio de la disolución del suelo; es decir, los iones y especies disueltas compiten por las reacciones por seguir, lo que resulta en un lixiviado. Aquí, hablamos de procesos de sorción, los cuáles se refieren al grado de retención que una sustancia puede tener con otra. En el contexto de las pruebas de lixiviación puede ser afinidad a ciertos materiales cuando están en contacto, o a otros componentes químicos que pueden estar presente en los materiales; por ejemplo: materia orgánica o carbonatos. Le llamamos solamente sorción para englobar cualquiera de estos procesos que esté ocurriendo: absorción, adsorción, intercambio iónico o diálisis.

### **2.2 Pruebas**

El objetivo de las pruebas de lixiviación es determinar la liberación de componentes a partir de los materiales, y la contaminación potencial del medio ambiente por dichos componentes a lo largo de un periodo prolongado (hasta 100 años). Obtener una indicación de la movilidad de los componentes y del tipo posible de liberación. Obtener una indicación de la capacidad de neutralización del material. Los ensayos de lixiviación pueden ser realizados en materiales de construcción, residuos y suelos granulares o compactos.

En una prueba de lixiviación, el material de interés es puesto en contacto con un lixivante (solución), para extraer algunos de los componentes del material. Lo

anterior, para determinar la liberación de componentes a partir de los materiales, y la contaminación potencial del medio ambiente por dichos componentes a lo largo de un periodo prolongado (100 años). A través de estas pruebas se puede obtener una proyección sobre la movilidad de los componentes (sustancias con potencial de contaminación) y su posible liberación en el medio ambiente (movilidad). El conocer esta ruta de movilidad, nos permite de igual manera identificar cómo podemos neutralizar o inmovilizarlos para evitar el proceso de lixiviación en el medio. Los ensayos de lixiviación pueden ser realizados en materiales de construcción, residuos y suelos granulares o compactos.

## 2.3 Tipos de ensayo

Algunos países han realizado catálogos de materiales no convencionales con fichas técnicas; en donde obtienen información acerca del material, volumen, distribución, incluso valorización de acuerdo con sus propiedades y sugerencias de su aplicación en las diversas capas que conforman la carretera, así como en la construcción civil, o sobre caminos de bajas especificaciones (ciclovías, caminos residenciales, pedestres, entre otros). En ellos podemos encontrar también la normativa y legislación aplicable, así como propuestas de reuso en construcción, basadas en la evaluación ambiental por medio de pruebas de lixiviación. Desde el 2010, la Agencia para Protección del Ambiente en Estados Unidos ha creado una Red de Evaluación de Lixiviación ambiental (Leaching Environmental Assessment Framework [LEAF, 2013]), en el documento SW-846 proponen los métodos y condiciones de evaluación para la determinación de la movilidad de compuestos inorgánicos a través de estas pruebas y los componentes esperados en relación con el pH (tabla 2.1).

**Tabla 2.1 Componentes esperados en relación al pH**

<b>pH</b>	<b>Relación de Extracciones a pH</b>
Natural	Relación L/S de 10 mL/g material seco (sin adición de base/ácido)
2.0 ± 0.5	Provee el estimado del total o contenido del componente disponible
4.0 ± 0.5	Límite inferior de pH para la mayoría de los escenarios de prueba
5.5 ± 0.5	Rango del límite inferior para rellenos de residuos industriales
7.0 ± 0.5	Región de pH neutral con la principal obtención de oxianiones
8.0 ± 0.5	pH final de materiales carbonatados alcalinos
9.0 ± 0.5	Equilibrio mínimo en la curva de partición de componentes catiónicos
10.5 ± 0.5	Sustitución simple si el pH natural está en un rango mandatorio
12.0 ± 0.5	Máximo en el rango alcalino del equilibrio en la curva de partición
13.0 ± 0.5	Límite superior de condiciones de la mayoría de componentes

Tenemos así, ensayos de partición relación líquido – sólido como función de la extracción por modificación de la acidez o alcalinidad de los constituyentes sólidos de los materiales utilizando extracción por lotes paralelos. Estos métodos

incorporan un rango mayor de procedimientos anteriormente utilizados, como los de determinación de toxicidad del lixiviado o de precipitación basados en un solo potencial de hidrógeno (pH). Esto basado en que el pH del medio juega un papel muy importante en el control de los componentes que se disuelven y lixivian de las partes sólidas del material, principalmente metales.

Los tiempos de extracción van de 24 a 72 horas, en función del tamaño de partícula en las muestras analizadas (0.3 a 5.0 mm). Las pruebas requieren una reducción del radio del tamaño de partícula a 9.5 mm antes del análisis. Una vez que la extracción del líquido (fluido) se ha llevado a cabo, la solución resultante es filtrada y se determina el pH final, la conductividad eléctrica y se realizan los análisis elementales; de manera adicional se efectúan pruebas de oxidación – reducción para conocer las especies en el lixiviado.

Como resultados de las extracciones paralelas, obtenemos las curvas de partición líquido – sólido. En la figura 2.1 y 2.2, observamos ejemplos de la curva obtenida para arsénico (As) y para el selenio (Se) logrado en pruebas de lixiviación llevadas a cabo en muestras de cenizas volantes.

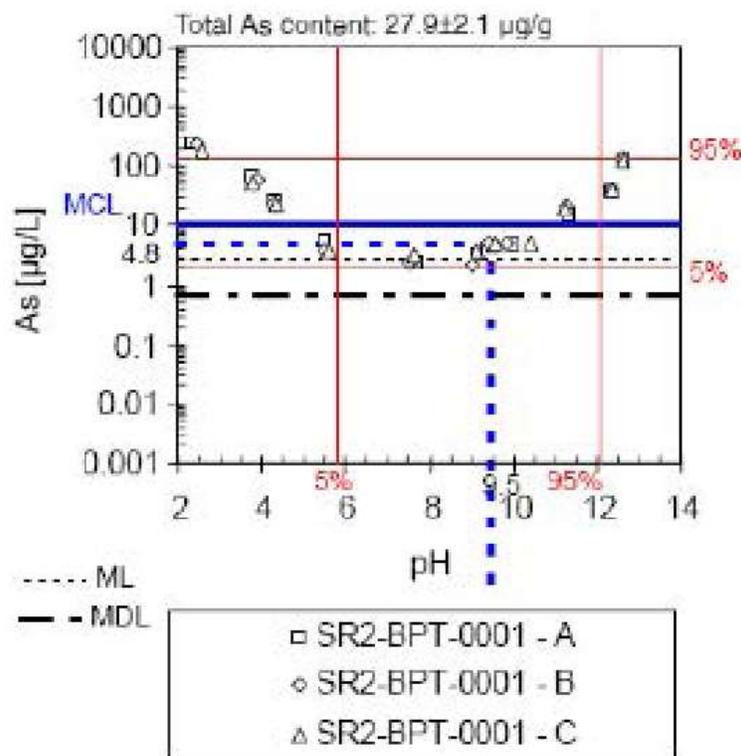
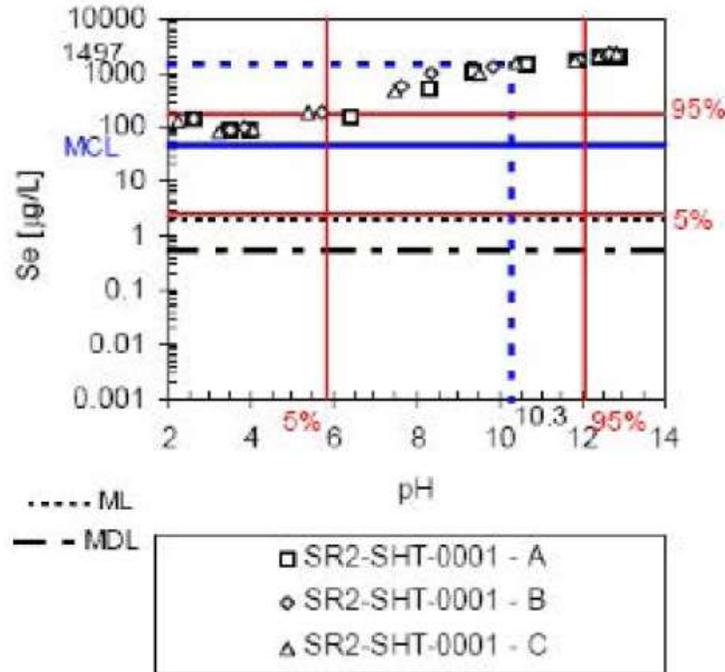


Figura 2.1 Gráfica Solubilidad de As respecto al pH en cenizas volantes



**Figura 2.2 Gráfica Solubilidad de Se respecto al pH en cenizas volantes.**

En la curva de la figura 2.1, observamos que la solubilidad del arsénico aumenta a bajos y altos valores de pH; si el pH se mantiene en rangos neutrales, encontramos que la concentración de As está por debajo de los límites permisibles en el agua (MCL=10 µg/L). En la figura 2.2 podemos observar la curva para el selenio (Se); en este caso vemos que cuando el pH aumenta, el contenido de Se en el lixiviado, hasta 20 veces por encima del límite permisible para el agua (MCL). Para el caso, el mantener el pH entre 4 y 5 nos asegurará la mínima concentración tanto para el arsénico como para el selenio, para lo cual seguramente tendremos que adicionar componentes estabilizadores para el control del pH.

Si el objetivo de este trabajo es proporcionar al conocimiento a involucrados cuya iniciativa de emplear materiales no convencionales, como los ya descritos en la construcción de caminos, lineamientos base para la evaluación ambiental en México, con la propuesta de las pruebas de lixiviación; todos los materiales no convencionales, en primera instancia, tienen que contar con un análisis CRETIB, que los determina como materiales inocuos y que pueden ser reutilizados en otra actividad diferente a la que los generó.

El análisis CRETIB se refiere a las características de corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso, de un material. De las siglas de estas características es que recibe su nombre. A partir de este análisis, se lleva a cabo directamente al material sin considerar las interacciones con el medio, sino como

parte de las propiedades intrínsecas del material; por lo que se recurre a las pruebas de lixiviación, para saber la solubilidad de compuestos que presenten potencial de contaminación, cuando sean insertados a un medio; el que, por las condiciones (atmosféricas, de interacción, intemperismo, etc.) pudieren liberar algún elemento que sea fuente de contaminación.



## 3 Metodología

---

La realización de esta prueba es consecutiva al análisis de determinación total o CRETIB, para identificar los componentes contaminantes o tóxicos que podría tener; la prueba de lixiviación da los indicativos de cómo estos se movilizan en el medio, con base en los límites normados. Del análisis obtenemos indicadores de contaminantes en solución; a diferencia de los contenidos totales, estos tienen el potencial de movilizarse en el suelo y desplazarse a otros entes de la superficie, principalmente.

### 3.1 Material

Para el análisis a través de este método, es necesario la homogenización del material; así, una reducción en el tamaño de partícula puede dar mejores resultados ya que se aumenta el área superficial al reducir el tamaño de las partículas. El material de interés son los residuos de demolición y construcción caracterizados en proyecto previo y donados por la empresa Concretos Reciclados, como material de investigación.

Esta empresa cuenta con la actualización anual de la LAUDF con NRA: CRE-KW-09-009-1-1, y actualmente opera para recibir el material de demolición y construcción de diversas obras civiles y lo clasifica, reprocessa y provee material reciclado que cumpla con los planes de manejo enunciados en la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013. La capacidad de producción de la planta es de 1,000 toneladas de material al día por equipo instalado (figura 3.1.a) y una capacidad total de almacenaje de 3 millones de toneladas.



**Figura 3.1 a) Instalaciones de separación y trituración del material, b) características físicas del material.**

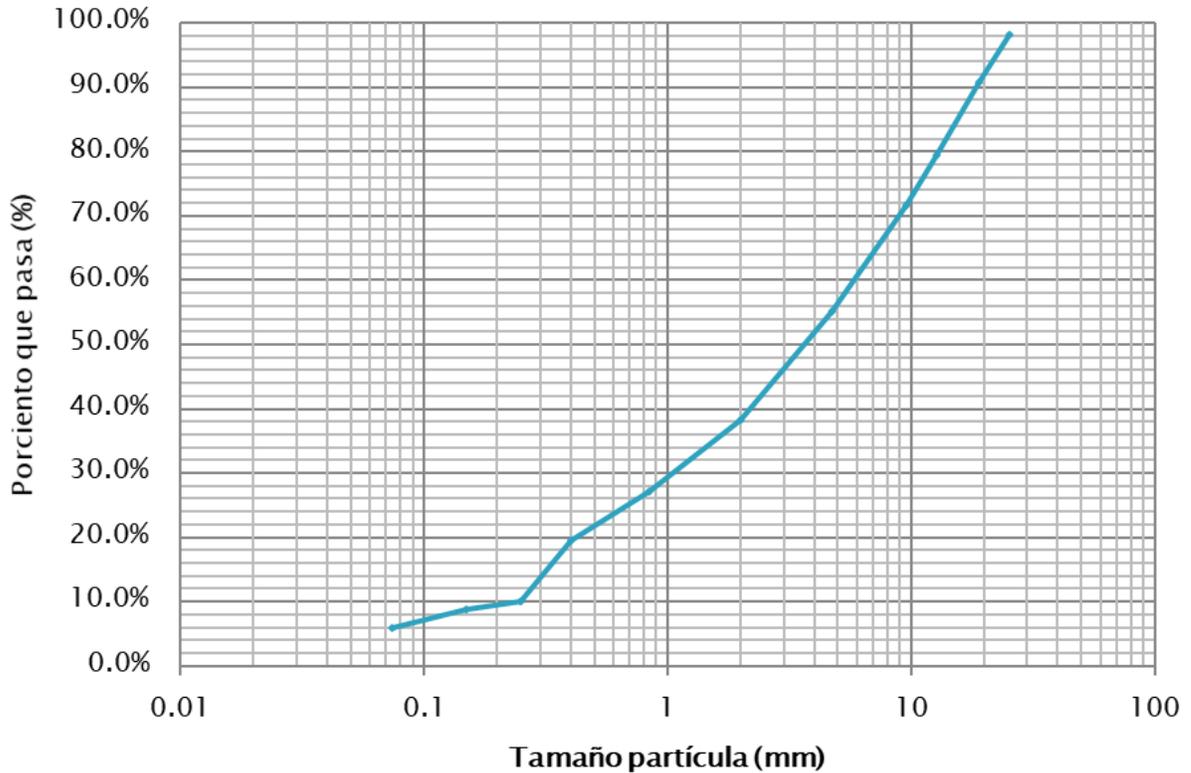
El material de trabajo empleado está clasificado como “mezclados” (figura 3.1b), con origen principalmente de morteros y concretos, prefabricados de mortero o concreto (tabiques, adcretos, tubos, blocks, etc.), mamposterías, piedra, cerámicos, prefabricados de arcilla (tabiques, blocks, ladrillos), etc. El análisis granulométrico del material para base y subbase son los obtenidos en las curvas granulométricas; figuras 3.2 y 3.3 respectivamente. También como parte del análisis, realizamos las pruebas de tamaño y forma de la partícula; igualmente, determinamos el pH natural del material.

ENSAYE DE MATERIAL PARA SUBBASE			
CLIENTE:			
OBRA:			
PROCEDENCIA:	<b>CONCRETOS RECICLADOS</b>		
UTILIZACIÓN:	<b>SUBBASE CON MATERIAL RECICLADO</b>		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
MALLAS	NORMA	PASA	ESPECIFICACIÓN
1"	N-MMP.4.02.003/04	92	70 - 100
3/4"	N-MMP.4.02.003/04	89	60 - 100
3/8"	N-MMP.4.02.003/04	71	40 - 100
Núm. 4	N-MMP.4.02.003/04	60	30 - 80
Núm. 10	N-MMP.4.02.003/04	52	21 - 60
Núm. 20	N-MMP.4.02.003/04	40	13 - 44
Núm. 40	N-MMP.4.02.003/04	28	8 - 31
Núm. 60	N-MMP.4.02.003/04	20	5 - 23
Núm. 100	N-MMP.4.02.003/04	15	3 - 17
Núm. 200	N-MMP.4.02.003/04	10	0 - 10
LÍMITE LÍQUIDO MÁXIMO	N-MMP.4.02.003/04	31.2	
LÍMITE PLÁSTICO MÁXIMO	N-MMP.4.02.003/04	6.3	
DESGASTE MÁXIMO %	N-MMP.4.02.003/04		
PART. ALARGADAS %	N-MMP.4.02.003/04	29.0	
PART. LAJEADAS %	N-MMP.4.02.003/04	29.0	
EQUIV. DE ARENA %	N-MMP.4.02.003/04	28.2	
GRADO DE COMPACTACIÓN	N-MMP.1-07	95.0	
VALOR RELATIVO DE SOPORTE (VRS) MÍNIMO		65.0	

Figura 3.2 Análisis granulométrico de material para subbase.

ENSAYE DE MATERIAL PARA BASE					
CLIENTE:					
OBRA:					
PROCEDENCIA:	CONCRETOS RECICLADOS				
UTILIZACIÓN:	BASE CON MATERIAL RECICLADO				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
MALLAS	NORMA	PASA	ESPECIFICACIÓN		
1"	N-MMP.4.02.003/04	82	70	-	100
3/4"	N-MMP.4.02.003/04	75	60	-	100
3/8"	N-MMP.4.02.003/04	60	40	-	100
Núm. 4	N-MMP.4.02.003/04	50	30	-	80
Núm. 10	N-MMP.4.02.003/04	37	21	-	60
Núm. 20	N-MMP.4.02.003/04	26	13	-	44
Núm. 40	N-MMP.4.02.003/04	22	8	-	31
Núm. 60	N-MMP.4.02.003/04	17	5	-	23
Núm. 100	N-MMP.4.02.003/04	13	3	-	17
Núm. 200	N-MMP.4.02.003/04	10	0	-	10
LÍMITE LÍQUIDO MÁXIMO	N-MMP.4.02.003/04	24.2	25.0		
LÍMITE PLÁSTICO MÁXIMO	N-MMP.4.02.003/04	6.0	6.0		
DESGASTE MÁXIMO %	N-MMP.4.02.003/04		35.0		
PART. ALARGADAS %	N-MMP.4.02.003/04	31.0	40.0		
PART. LAJEADAS %	N-MMP.4.02.003/04	31.0	40.0		
EQUIV. DE ARENA %	N-MMP.4.02.003/04	32.0	40.0		
GRADO DE COMPACTACIÓN	N-MMP.1-07	100.0	100.0		
VALOR RELATIVO DE SOPORTE (VRS) MÍNIMO		91.0	90.0		

Figura 3.3 Análisis granulométrico de material para base.



**Figura 3.4 Curva granulométrica material “mezclado” para subbase.**

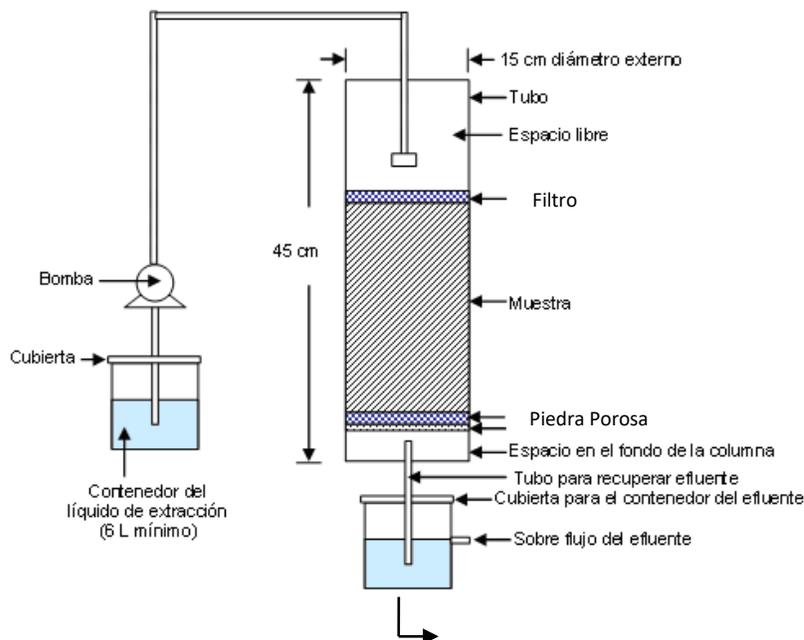
## **3.2 Método**

### **3.2.1 Columnas de lixiviación**

El ensayo se realiza por columna de infiltración dinámica para determinar la lixiviación (liberación) a partir de la relación líquido sólido (L/S) de 0.1 a 10. La emisión total para L/S igual a 10, es la cantidad máxima que se puede lixiviar a lo largo de un periodo de entre 60 y 100 años, en miligramos por kilogramos materia seca (mg/kg DM). En la columna se determina la movilidad y disponibilidad de los elementos contenidos que puedan ser liberados al ambiente y tengan alguna repercusión ambiental adversa.

La columna se rellena con el material en estudio, en capas compactadas de manera dinámica. Una vez rellena, se hace circular el fluido (eluyente), hasta su saturación. Una vez alcanzado el equilibrio, el eluyente es bombeado a contracorriente con una determinada velocidad de flujo y se retira fracciones de lixiviado, según van alcanzado las sucesivas relaciones liquido/sólido (L/S).

Las determinaciones de contaminantes de interés son la concentración de metales pesados y sulfatos como especies móviles. Igualmente determina contenido de materia orgánica total por método de calcinación.



**Figura 3.5 Diagrama de columna de lixiviación. Modificado NOM-155-SEMARNAT-2007.**

Para la preparación de las columnas se toman 5 kilogramos del material seco y con las características para base o sub-base dependiendo el objetivo de la prueba; y se analizan respecto a un blanco y a 3 potenciales de hidrógeno (pH), pH= 3, pH 7 (neutro) y pH= 11(básico). Los sólidos resultantes en la prueba serán filtrados por filtro de (0.6 a 0.8 micrones [ $\mu\text{m}$ ]) para descartarlos [Giraldo, 2001].

Los resultados son expresados en función de la relación L/S aplicada o bien como la cantidad de metal (analito) movilizada por unidad de masa de material (mg de plomo /kg material) en el tiempo de la prueba. El tiempo requerido depende de la velocidad de flujo aplicada y de las dimensiones de la columna empleada, las que a su vez condicionan que las relaciones L/S prefijadas se alcancen en un momento o en otro. Las curvas de evolución permiten discriminar entre los mecanismos de lixiviación y valorar el efecto del pH, y las condiciones redox sobre la incorporación de los distintos analitos al agua [Vite y col., 1998]. Al igual que los ensayos anteriores, permite hacer predicciones sobre el comportamiento del material a largo plazo.

### 3.2.2 Análisis de elementos

Una vez obtenido el lixiviado de la columna, se filtra con papel de retención de 2.5 mm para eliminar las partículas muy finas (componentes que puedan interferir en el análisis de elementos). Previo al análisis, las muestras fueron acidificadas añadiendo unas gotas de HNO<sub>3</sub> concentrado para llevarlas al pH cercano a 2, requerido para preservar la muestra. Se prepararon siete patrones de curva de calibración a partir de estándares certificados que contienen los analitos de interés en un intervalo de 0.5 hasta 100 mg/L para la medición de las muestras. Esta metodología de análisis está basada en el procedimiento 200.8 de la EPA. Las muestras fueron conservadas en refrigeración hasta el análisis, con un período de almacenamiento no mayor de cuatro semanas.

Las muestras fueron medidas en un equipo Thermo Electron Corp. modelo X series II acoplado a un automuestreador CETAC ASX-510, el equipo fue optimizado hasta llegar a los valores establecidos; describimos los parámetros de medición en el cuadro siguiente (tabla 3.1). La cuantificación de los metales en todas las muestras se realizó con reactivos analíticos ultrapuros, soluciones estándar procedentes de patrones comerciales (Merck Darmstadt, Germany y J.T. Baker, North Kingstown, RI, USA) y ácidos Baker Instra-Analyzed® (J.T. Baker, North Kingstown, RI, USA). Todo el material de vidrio utilizado en el transcurso del tratamiento de las muestras y las determinaciones analíticas fue lavado con ácido nítrico al 25% y agua MiliQ. Además, realizó una repetición de cada pH, considerando al neutro como la muestra de blanco.

**Tabla 3.1. Parámetros empleados en la determinación de muestras.**

Parámetro	
Potencia RF (W)	1200
Flujo gas frío (L/min)	14.59
Flujo gas auxiliar (L/min)	0.90
Flujo de gas nebulizador (L/min)	0.78

### 3.2.3 Diagramas Eh-pH

La utilización de diagramas de tipo Eh-pH como herramienta para resolver problemas geoquímicos fue propuesta hace tiempo [Garrels y Christ, 1965; Krauskopf, 1979], y fue retomada en estos últimos años, con un gran interés en estudios de tipo ambiental; en particular enfocados a los desechos de minería y lixiviados. Este diagrama permite determinar cuáles son las especies inorgánicas predominantes en el agua que han interactuado con un suelo a 25°C de temperatura y a 1 atmósfera de presión. El programa de equilibrio geoquímico Medusa [Puigdomenech, 1979] fue empleado para el análisis, una vez obtenidos las concentraciones a distintos potenciales de hidrógeno.





## 4 Resultados

---

La prueba propuesta para la evaluación ambiental sobre la liberación de sustancias peligrosas en materiales para la construcción son las pruebas de lixiviación a través de columnas. La información obtenida, para determinar el mecanismo fundamental para la movilidad que condiciona la incorporación de sustancias peligrosas al agua o el ritmo de su incorporación bajo las condiciones de las pruebas realizadas es obtenida bajo los diagramas de Eh-pH.

### 4.1 Análisis elemental

Para la elaboración de la columna, se tomó la fracción granulométrica de la caracterización previa del material y se compactó en la columna donde se realiza la lixiviación. Como límite máximo permisible se tomaron los publicados por la Norma Oficial Mexicana 001 de SEMARNAT para contaminantes en descargas de aguas residuales en bienes nacionales, para descarga diaria para aguas en uso agrícola. Para el antimonio se consideró el límite propuesto por la EPA.

Las soluciones obtenidas después de flujo de la solución (eluyente) por el material fueron sometidas a análisis elemental por ICP-MS, para determinar concentraciones de arsénico (As), bismuto (Bi), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), mercurio (Hg), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb), cinc (Zn) y cadmio (Cd), ya que así lo permite el análisis.

Los valores de concentración de metales determinados son presentados en la tabla 4.1 en mg/kg de material seco, por 24 horas de duración de la prueba; y en la figura 4.1 aparece el diagrama de estos. Es necesario remarcar que los datos no deben ser tomados como determinantes en el uso o no de estos materiales; ya que, por su origen, los componentes pueden variar.

**Tabla 4.1 Resultados del análisis en mg/kg DM por ICP.**

	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sb	Hg	Pb
Neutra pH=7	1.3	6.7	276	8.5	2.6	2.7	15.8	0.03	0.75	0.01	0.7
Ácida pH=3	1.9	4.8	396	10.2	3.8	3.1	18.7	0.09	0.83	0.02	1
Básica pH=11	1.4	7.3	253	12.3	2.4	2.1	14.3	0.07	0.56	BLD	BLD
NOM *EPA	1.5	ND	ND	ND	4	6	20	0.1	*6.0	0.02	1

ND: no determinado; BLD: bajo el límite de detección.



Figura 4.1 Resultados de metales en lixiviados.

## 4.2 Diagramas Eh-pH

En la figura 4.2 podemos observar el diagrama de potencial electroquímico, necesario para la formación de especies con respecto al pH (Eh-pH). En este vemos que las fases de antimonio (rojo), cinc (verde) y níquel (azul) están en equilibrio, según la evolución de las condiciones de pH y Eh. El programa de equilibrio geoquímico sugiere que la movilidad del antimonio (en rojo) es debida a la presencia de óxidos de antimonio ( $Sb_2O_3$  y  $Sb_2O_4$ ); bajo condiciones de Eh superior a 0,5 se equilibran en hidróxido de antimonio ( $Sb(OH)_6$ ), que podría movilizarse y ser absorbida por plantas.

Hay estudios de la especiación de antimonio en suelo y agua relacionadas [Denys y col., 2008; Oorts y col., 2009; y Tella y col. 2009] con muy baja materia orgánica disuelta (DOC = dissolved organic matter) obteniendo valores similares a los del material en estudio. La movilidad del zinc (en verde) probablemente es debida a la presencia de calamina (o hemimorfita,  $Zn_4[(OH)_2SiO_7] \cdot H_2O$  y smithsonita ( $ZnCO_3$ ) en los jales (parte de la mineralización de óxidos procesada) que, bajo condiciones

de Eh superior a 0,5, se equilibran en ion cinc ( $Zn^{2+}$ ), hidrosmithsonita ( $ZnCO_3 \cdot H_2O$ ) e hidrozincita ( $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ ) con el incremento del pH.

La ausencia de movilidad del níquel (en azul) en las condiciones determinadas (pH de 6,5-8,0; Eh >0,5) es debida muy probablemente a especies como el sulfato de níquel, el cual se va modificando conforme se incrementa el pH.

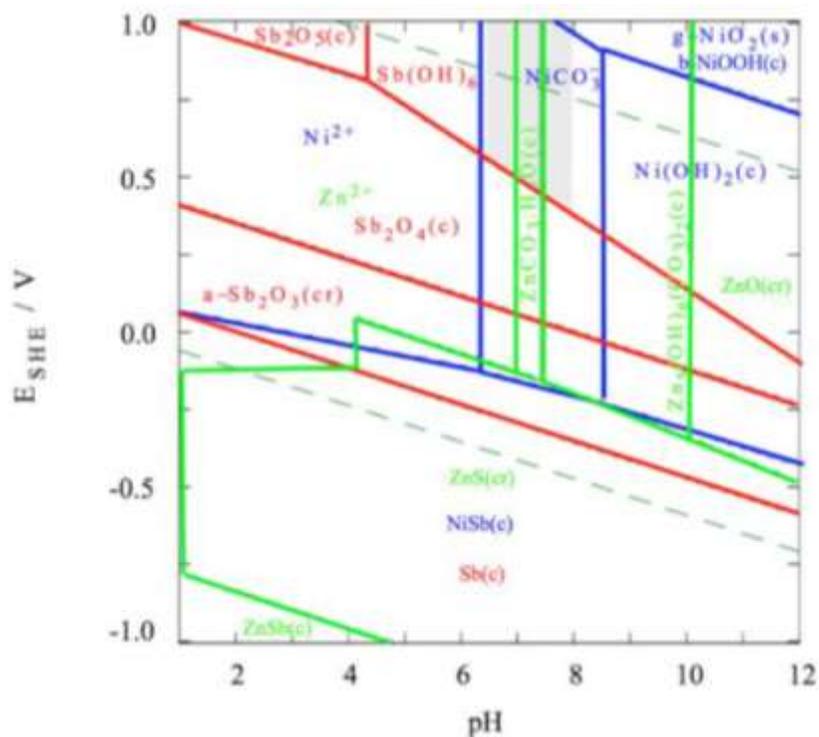


Figura 4.2 Diagrama Eh-pH de las fases de Sb-Zn-Ni.

En el caso de la movilidad de metales en el suelo, la modelación por el programa Medusa ilustra las especies con mayor probabilidad de estar presentes de acuerdo con los parámetros de pH y Eh. Bajo condiciones de pH neutral a básicas y Eh positivo, las fases minerales oxidadas son más fácilmente transformadas en especies disueltas lixiviables (hidróxidos en general). Las condiciones de solubilización a 25°C y 1 atm no son idénticas para todos los metales.



## 5 Conclusiones

---

Para el material del estudio, se tiene que las concentraciones encontradas de metales no sobrepasan los límites permisibles de la norma referenciada en las especificaciones establecidas para uso agrícola; ya que se pretendió simular el escenario donde el mayor potencial de contaminación por contacto del lixiviado del material de bases y subbase fuera por percolación al suelo.

El análisis efectuado a las pruebas muestra que ninguno de los contaminantes establecidos en la Norma Oficial Mexicana o EPA, para el caso del antimonio, es rebasado en los lixiviados obtenidos. Es necesario destacar que los análisis efectuados son de carácter informativo para resultados de este trabajo, debido a que fueron determinaciones únicas y obligaría a realizar un análisis estadístico de repetitividad para las determinaciones de cada una de las concentraciones de los elementos presentados.

El objetivo de este trabajo introductorio fue mostrar las pruebas de lixiviación como una metodología para la evaluación ambiental en materiales empleados en base y subbase. Los valores aquí presentados no deben de tomarse como determinantes para el uso o no de residuos de demolición y construcción como materiales alternativos a los empleados actualmente para bases y sub base. En todo caso, sí como ruta de evaluación ambiental de este y otros materiales.

La creciente necesidad de incrementar políticas con respecto al ambiente, que incluyan metodologías efectivas para la valoración de materiales como es el caso de los residuos aquí propuestos, sugieren que pruebas de lixiviación como se presentan, comiencen a ser de rigor normativo para la implementación de estos en los proyectos de infraestructura de caminos.

Es necesario la complementación de este trabajo con distintos materiales para poder integrar la metodología de prueba y proponer una normativa nacional para la evaluación ambiental y el ciclo de vida de materiales no convencionales.



## Bibliografía

---

CEDEX. "Material de final del término de un ciclo principal de consumo de un producto o ciclo de extracción; productos secundarios" (2002). <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/25/escorias-de-aceria-de-horno-de-arco-electrico/56/consideraciones-medioambientales.html>

Crecelius, E. A., Bothner, M. H., Carpenter, R. Geochemistries of arsenic, antimony, mercury, and related elements in sediments of pugged sands. *Environmental Science Technology*. num 9. Pp 325-333. (1974).

Denys, S., Tack, K., Caboche, J., Delalain, P. Bioaccessibility, solid phase distribution, and speciation of Sb in soils and in digestive fluids. *Chemosphere*. Num 74. Vol 5. Pp711-716. (2008).

Dietl, C. Association of antimony with traffic-occurrence in airborne dust, deposition and accumulation in standardized grass cultures. *The Science of the Total Environment*. Num 205. Pp. 235-244. (1997).

EPA-US. United States Environmental Protection Agency. Residential lead hazard standard – TSCA section 403: office of pollution prevention and toxics. (2002).

Erdem, M. y Özverdi, A. Leaching behavior of chromium in Chrome shaving generated in tanning process and its stabilization. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 156, pp. 51-55. (2008).

Fernandez Sempere, J. Barruesco Matrínez, M.L., Font Montesinos, R., Sabater Lillo, M.C. Characterization of Tanner Wastes, Comparison of Three Leachability Tests. *Journal of Hazardous Materials*. Num. 54. Pp. 31- 45. (1997).

Fowler, B. A. y Goering, P. L. Antimony. Metals and their compounds in the environment. Editorial In E. Merian. Nueva York. Basel Cambridge: VCH Weinheim. (1991).

G. Levresse, G. Lopez, J. Tritlla, E. Cardellach López, A. Carrillo Chavez, E. Mascañano Salvador, A. Soler, M. Corbella, L.G. Hernández Sandoval, R. Corona-Esquivel. Phytoavailability of antimony and heavy metals in arid regions: The case of the Wadley Sb district (San Luis, Potosi, Mexico). *Science of The Total Environment*. Numero 427-427. Pp:115-125. (2012).

Garrels, R., Christ, L. Solutions, minerals and equilibria. 2da edición Freeman Cooper Co.(1965).

Giraldo, E. Tratamiento de lixiviado de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista de Ingeniería*. Num 14. Pp. 44-55. (2001).

Hidalgo, A. y Alonso, C. Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. I Jornadas de Investigación en Construcción (Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja"). España, Tomo I, pp. 571-581, (2005).

Krauskopf, K. B. introduction to geochemistry. Editorial McGrawHill. 2da edición, Nueva York. (1979).

LEAF. Leaching Environmental Assessment Framework. ReSolution Partners Remediation Trends. Agosto (2013). [www.resolutionpartnersllc.net](http://www.resolutionpartnersllc.net)

National Research Council. Proceedings of the National Academy of Science. USA. <http://www.pnas.org/content/4539/>. (2001).

NOM-001-SEMARNAT-1996, Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-155-SEMARNAT-2007, Norma Oficial Mexicana que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.

Nriagu, J. O. Global metal pollution. Environment. Num 32. Pp. 7-33. (1990).

Oorts, K., Smolders, E., Degryse, F., Buekers, J., Gasco, G., Cornelis, G., Mertens, J. Solubility and toxicity of antimony trioxide in soil. Environmental Science and Technology. Num 42. Vol. 12. Pp. 4378- 4383. (2009).

Puigdomenech, I. Programa Make Equilibrium using Sophisticated Algorithms (MEDUSA). Inorganic Chemistry Department. Royal Institute of Technology, 100 44, Stockholm, Sweeden. (1979) <http://web.telia.com/>

Shotyk, W., Krachler, M., y Chen, B. Antimony: global environmental contaminant. Journal of Environmental Monitoring. Vol. 7. Pp. 1135-1136. (2005).

Siegel, F. R. Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals. Editorial Springer. Berlin. Capítulo 3. Pp. 45-57 (2002).

Sparks, D. L. Toxic metals in the environment: role of the surfaces. Revista Elements, num 1. Pp 193-197. (2005).

Stumm, W. Chemistry of solid-water interface. Editorial Jhon Wiley e hijos. Nueva York. (1992).

Tella, M. y Pokrovski, G. S. Antimony (V) complexing with O-bearing organic ligands in aqueous solution: an X-ray absorption fine structure spectroscopy and potentiometric study. Mineralogical magazine. Num 1. Pp. 205-209. (2009).

U. S. Geological Survey. Heavy metals in the environment: historical trends. Reporte 2002. Capítulo 9. Pp. 67-105. (2002).

Vite., J., Vite, M., Carreño, C. Lixiviación de metales pesados de residuos industriales peligrosos por medio de columnas termostáticas y diseño de una planta piloto. Ambient. Num 14 vol. 2. Pp. 101-110. (1998).



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad  
certificada bajo la norma ISO 9001:2015