



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN SISTEMAS DE PAVIMENTOS
 PERMEABLES APLICADOS A LAS VÍAS TERRESTRES

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
 Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Juan Francisco Silva Juárez

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

Dr. Omar Chávez Alegría
 Presidente


 Firma

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza
 Secretario


 Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
 Vocal

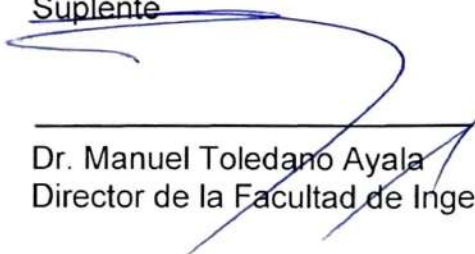

 Firma

Dr. Alexander Iriondo Perrée
 Suplente


 Firma

M.I. Gerardo Medellín Aguilar
 Suplente


 Firma


 Dr. Manuel Toledano Ayala
 Director de la Facultad de Ingeniería


 Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
 Director de Investigación y Posgrado



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Remoción de metales pesados en sistemas de
pavimentos permeable aplicado a las vías terrestres

por

Juan Francisco Silva Juárez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-266690

RESUMEN

Actualmente existe un alto daño ecológico asociado a la contaminación del agua debido al aporte que representan los metales pesados encontrados en las carreteras y estacionamientos ocasionado por fugas de combustible y lubricantes, óxido de carrocerías, desgaste de los neumáticos, frenos y por las emisiones de dióxido de carbono. El objetivo de esta investigación es aplicar agregado de roca basáltica natural en mezclas de concreto permeable por el método de adsorción por lotes y determinar la efectividad para eliminar las concentraciones típicas de arsénico y cadmio asociados con el sedimento acumulado sobre la infraestructura hidráulica en vialidades de bajo tránsito de las carreteras en México.

Para las pruebas de absorción de los metales pesados se sumergieron cilindros de concreto permeable mezclado con agregado basáltico de 50 x 100 mm en vasos de precipitado durante 96 h, en reactivos patrones de arsénico, cadmio, cobre y zinc con una concentración de 10, 30, 50 y 90 mg/l respectivamente. Los resultados mostraron que existe una mejor eficiencia de retención del cadmio concentraciones iguales o mayores a 90 mg/l respecto a el zinc y el arsénico; mostrando una retención de zinc 97%, 96%, 86% y 75%, así como para el arsénico del 81%, 82% 56% 62% y una retención del cadmio del 50%, 59%, 79% y 89%, para cada una de las diferentes concentraciones. Lo que determina una gran retención de metales pesados contaminantes y un pretratamiento del agua.

Palabras clave: concreto permeable, metales pesados, basalto, contaminación.

SUMMARY

Currently, there is great ecological damage associated with water pollution due to the contribution of heavy metals found on roads and parking lots caused by fuel and lubricant leaks, body rust, tire wear, brakes and the drops of carbon dioxide. The objective of this research is to apply aggregate of natural basaltic rock in permeable concrete mixtures by the batch adsorption method and determine the effectiveness to eliminate the typical concentrations of arsenic and cadmium associated with the accumulated sediment on the hydraulic infrastructure in low roadways. transit of roads in Mexico.

For the heavy metals absorption tests, pervious concrete cylinders mixed with basaltic aggregate of 50 x 100 mm in beakers were immersed for 96 h in standard reagents of arsenic, cadmium, copper and zinc with a concentration of 10, 30, 50 and 90 mg/l respectively. The results showed that there is a better efficiency of retention of cadmium concentrations equal to or greater than 90 mg / l with respect to zinc and arsenic; showing a retention of zinc 97%, 96%, 86% and 75%, as well as for arsenic of 81%, 82% 56% 62% and a retention of cadmium of 50%, 59%, 79% and 89%, for each of the different concentrations. What determines a large retention of contaminating heavy metals and a pretreatment of water.

Key words: permeable pavements, heavy metals, basalt, pollution.

AGRADECIMIENTOS

Sin duda el concluir una etapa como profesionista es de entera satisfacción, la presente investigación representó en mi un reto constante, un reto que con perseverancia y trabajo se pudo lograr, sin duda alguna el obtener un grado de Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad ha sido uno de mis más grandes proyectos hasta el momento y sin duda sé que lo aprendido durante mi formación como maestro me ayudará a innovar e implementar cosas nuevas en esta profesión que es la Ingeniería Civil.

Agradezco con toda el alma a mis padres, María Dolores Juárez García y Juan Pablo Silva Castañeda que han sido mi motivación y fuerza estos años, sin duda su partida de este mundo fue algo que marco mi vida, esta investigación y todos mis logros durante todo este tiempo que ya no están a mi lado se los dedico, sé que ellos están orgullosos y contentos porque al fin pude concluir lo que ellos querían ver en mí ser maestro, agradezco a mis hermanos Fátima del Roció Silva Juárez y Pablo Cesar Silva Juárez por ser mi soporte desde que mis padres no están, gracias por cuidar siempre de su hermano menor.

Agradezco con todo mi amor a mi novia Estefanía Páez, por su apoyo, compañía y amor durante todo este proceso, sus consejos y motivaciones lograron que nunca me rindiera en esta investigación, gracias por formar parte de mi vida.

Agradezco especialmente al Dr. Omar Chávez Alegría por ser mi asesor y guía en el desarrollo de esta investigación, sus consejos, regaños y motivación fueron clave para concluir con satisfacción la maestría, e hicieron de mí una persona capaz de resolver problemas y ejercer mi profesión de una manera ética y profesional.

Agradezco también de manera muy especial al Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza, a la Dra. María de la Luz Pérez Rea, al Dr. Alexander Iriundo Perrée, al M.I. Gerardo Medellín Aguilar, al Dr. Mario Enrique Rodríguez García y a

la Dr. Carmen Peza Ledesma por todo el apoyo y conocimientos que me brindaron durante todo el desarrollo de esta investigación sus sabios consejos fueron de grandiosa ayuda para concluir esta etapa como profesionista.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado durante mi formación como estudiante de maestría, este apoyo fue de vital importancia para el desarrollo de esta investigación y de mi estancia en la ciudad de Querétaro, gracias por apoyar a los jóvenes investigadores de este país.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, a la Facultad de Ingeniería y a la División de Investigación y Posgrado por darme las herramientas, espacios y recursos para terminar en tiempo y en forma esta investigación, además agradezco haber pertenecido a un posgrado de calidad con docentes altamente calificados y preparados con el único fin de transmitir su experiencia para hacer de los jóvenes investigadores mejores profesionistas.

Agradezco a cada uno de mis amigos, compañeros y personas que estuvieron en estos dos años de maestría a mi lado, con los cuales compartí experiencias y momentos muy valiosos que estarán en mi mente por el resto de mi vida, gracias a ellos por darme ánimos cuando más lo necesitaba.

TABLA DE CONTENIDOS

	PÁG.
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICACIÓN	18
1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVO	20
1.3.1 <i>Hipótesis</i>	20
1.3.2 <i>Objetivo General</i>	20
1.3.3 <i>Objetivos particulares</i>	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 GEOLOGÍA. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS	21
2.1.1 <i>Clasificación de Rocas</i>	22
2.1.2 <i>Microscopía en láminas delgadas de rocas para análisis petrográfico</i>	25
2.1.3 <i>Composición mineralógica y clasificación petrográfica del basalto</i>	27
2.2 PAVIMENTOS	28
2.3 PAVIMENTOS PERMEABLES	31
2.3.1 <i>Definición y aplicación</i>	31
2.3.2 <i>Clasificación</i>	31
2.3.3 <i>Retención de metales pasados con la utilización de pavimentos permeables</i>	33
2.4 CONCRETO PERMEABLE.....	40
2.4.1 <i>Antecedentes</i>	40
2.4.2 <i>Definición de concreto permeable</i>	41
2.4.3 <i>Aplicaciones</i>	42
2.4.4 <i>Materiales para un concreto permeable</i>	42
2.4.5 <i>Criterios de diseño de mezclas para un concreto permeable</i>	44
2.4.6 <i>Propiedades del concreto permeable</i>	47
2.5 PROCESOS PARA LA EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN MATRICES SÓLIDAS	52
2.6 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS	54

2.6.1	<i>Absorción atómica</i>	54
2.6.2	<i>Espectrometría de fluorescencia de rayos X de reflexión total (TXRF)</i>	55
2.6.3	<i>Espectrometría de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF) para análisis elemental</i>	58
3.	METODOLOGÍA.....	60
3.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA LA MEZCLA DE CONCRETO PERMEABLE.....	61
3.1.1	<i>Muestreo en banco de materiales</i>	61
3.1.2	<i>Reducción de la muestra de agregados</i>	63
3.1.3	<i>Microscopía de láminas delgadas de rocas para análisis petrográfico</i>	64
3.1.4	<i>Granulometría por el método de mallas</i>	67
3.1.5	<i>Densidad, absorción y humedad del agregado grueso</i>	68
3.1.6	<i>Masa volumétrica del agregado grueso</i>	70
3.2	PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO PERMEABLE.....	72
3.2.1	<i>Determinación del porcentaje de vacíos</i>	72
3.2.2	<i>Determinación de la resistencia a la compresión de diseño</i>	73
3.2.3	<i>Determinación del volumen de pasta</i>	73
3.2.4	<i>Elección de la relación agua-cemento</i>	76
3.2.5	<i>Método de volúmenes absolutos y corrección</i>	76
3.3	LOTES DE ABSORCIÓN DE METALES CON CONCRETO PERMEABLE Y MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CON ESPECTROMETRÍA TXRF.....	77
3.3.1	<i>Calibración del equipo TXRF</i>	77
3.3.2	<i>Preparación de las soluciones con metales pesados</i>	77
3.3.3	<i>Preparación de muestras para análisis TRXF</i>	78
3.3.4	<i>Mediciones de las concentraciones con S2 PICOFOX método TXRF</i>	80
3.4	LOTES DE ABSORCIÓN DE ARSÉNICO CON CONCRETO PERMEABLE Y MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CON ESPECTROMETRÍA (EDXRF).....	81
3.4.1	<i>Preparación de la solución con arsénico</i>	81
3.4.2	<i>La preparación de los especímenes de concreto y basalto</i>	81
3.4.3	<i>Preparación de las muestras sólidas y líquidas para análisis EDXRF</i>	82
3.4.4	<i>Mediciones de las concentraciones con S2 PUMA por el método EDXRF</i>	84
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	87

4.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA EL CONCRETO PERMEABLE	87
4.1.1	<i>Muestreo en banco de materiales</i>	87
4.1.2	<i>Reducción de la muestra de agregados</i>	89
4.1.3	<i>Microscopia en láminas delgadas de rocas para análisis petrográfico</i>	90
4.1.4	<i>Granulometría por el método de mallas</i>	91
4.1.5	<i>Densidad, absorción y humedad del agregado grueso</i>	93
4.1.6	<i>Masa volumétrica agregado grueso</i>	94
4.2	PROCEDIMIENTO Y DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO PERMEABLE	95
4.2.1	<i>Diseño de mezcla con agregado de 3/8"</i>	95
4.2.2	<i>Ensayos de estado endurecido del concreto permeable</i>	100
4.3	LOTES DE ABSORCIÓN DE METALES CON CONCRETO PERMEABLE Y MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CON ESPECTROMETRÍA TXRF.....	102
4.3.1	<i>Cadmio</i>	102
4.3.2	<i>Zinc</i>	104
4.3.3	<i>Arsénico</i>	105
4.4	LOTES DE ABSORCIÓN DE ARSÉNICO CON CONCRETO Y BASALTO CON MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CON ESPECTROMETRÍA (EDXRF)	110
4.4.1	<i>Retención de arsénico en basalto y concreto.</i>	110
4.4.2	<i>Concreto y basalto como intercambiador iónico</i>	111
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
6.	REFERENCIAS	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de rocas sedimentarias químicas.	23
Tabla 2.2 Clasificación de rocas (características y propiedades mecánicas).....	24
Tabla 2.3 Métodos para la eliminación de metales pesados en pavimentos permeable.	37
Tabla 2.4 Fuentes principales de contaminación por metales pesados en las carreteras.....	38
Tabla 2.5 Concentración de metales pesados en la calzada y cuneta en una carretera.....	39
Tabla 2.6 Rangos típicos de las proporciones de materiales para un concreto permeable	44
Tabla 2.7 Valores efectivos de b/bo.	46
Tabla 2.8 Recomendaciones para base y subbase en sistemas de pavimentos permeables.....	48
Tabla 2.9 Límites permisibles de concentración de metales en el agua.	54
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas del equipo S2 PICOFOX.....	57
Tabla 3.1 Masa mínima requerida para el muestreo de materiales.....	63
Tabla 4.1 Granulometría del agregado fino del basalto banco La Cañada.	91
Tabla 4.2 Granulometría agregado grueso de basalto banco La Cañada.....	92
Tabla 4.3 Valores obtenidos para el cálculo de la muestra saturada superfinamente seca.....	93
Tabla 4.4 Masa volumétrica suelta.....	94

Tabla 4.5 Masa volumétrica compacta.....	94
Tabla 4.6 Resultados de las pruebas de resistencia a compresión de los cilindros de concreto de 30 x 15.....	101
Tabla 4.7 Concentraciones iniciales y finales de cadmio, zinc y arsénico en los lotes de absorción con arsénico.....	109
Tabla 4.8 Composición química del cemento y el basalto.....	112
Tabla 4.9 Composición química del concreto, basalto y zeolita.	113
Tabla 4.10 Composición química del concreto al estar expuesto a 8 días con arsénico en agua.....	115
Tabla 4.11 Composición química del basalto al estar expuesto a 8 días con arsénico en agua.	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Falta de capacidad hidráulica del Río Querétaro.	17
Figura 1.2 Ubicación de la estructura de pavimento permeable.....	17
Figura 2.1 Ciclo de las rocas.....	21
Figura 2.2 Sección transversal de una lámina delgada para petrografía.	26
Figura 2.3 Elementos de un microscopio y las propiedades que tiene para observar láminas delgadas de rocas y minerales.	26
Figura 2.4 Estructura de un pavimento.	28
Figura 2.5 Distribución de esfuerzos en la estructura de pavimento flexible y rígido.	30
Figura 2.6 Influencia de la urbanización en el drenaje natural.	34

Figura 2.7 Muestras de concreto permeable con diferentes relaciones agua-cemento (A/C).	45
Figura 2.8 Módulo de ruptura con respecto al contenido de vacíos de la mezcla de concreto permeable.....	49
Figura 2.9 Mecanismo de remoción de contaminantes con un concreto permeable.	53
Figura 2.10. Espectro de respuesta de análisis mediante técnica de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF).	59
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de la investigación.	60
Figura 3.2 Inventario de banco de Materiales de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.	61
Figura 3.3 Tipos de Suelos de acuerdo con la zona donde se ubica el banco de materiales.....	62
Figura 3.4 Procedimiento para reducir el tamaño de una muestra.....	64
Figura 3.5 Muestras de rocas obtenidas del banco de materiales	65
Figura 3.6 Utilización de la cortadora para poner una cara plana de la roca.....	65
Figura 3.7 Corte de la roca.....	66
Figura 3.8 Utilización de resina epoxi para pegar el porta objetos.....	66
Figura 3.9 Utilización de una plancha caliente para secar la muestra.....	67
Figura 3.10 Cortadora-rectificadora de muestras a 30 micras.....	67
Figura 3.11 Material para realizar la prueba de granulometría por mallas. Fuente: Elaboración propia.	68

Figura 3.12 Determinación de la condición saturada superficialmente seca de una grava.	69
Figura 3.13 Medición del volumen y peso del recipiente para determinar las masas volumétricas.	71
Figura 3.14 Determinación de la masa volumétrica de los agregados.	71
Figura 3.15 Relación entre contenido de vacíos y permeabilidad del concreto permeable.	72
Figura 3.16 Relación entre el contenido de vacíos y la resistencia a la compresión a los 28 días.	73
Figura 3.17 Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregados 3/4" y 3/8"	74
Figura 3.18 Especímenes de concreto permeable para lotes de absorción de metales pesados.	78
Figura 3.19 Preparación de las muestras para análisis con S2 PICOFOX.	79
Figura 3.20 Medición de la muestra con equipo S2 PICOFOX	80
Figura 3.21 Espectro de respuesta del análisis de la muestra.	80
Figura 3.22 Preparación de la solución de Arsénico para lotes de absorción.	81
Figura 3.23 Especímenes de concreto y basalto para análisis EDXRF.	82
Figura 3.24 Espécimen de concreto y basalto para lotes de absorción de metales pesados.	83
Figura 3.25 Preparación de las muestras para el análisis EDXRF	84
Figura 3.26 Colocación de los especímenes en el equipo S2 PUMA.	85
Figura 3.27 Medición de las muestras con equipo S2 PUMA.	86

Figura 3.28 Espectro de respuesta para la solución de 90 ppm de arsénico	86
Figura 4.1 Inventario de banco de materiales SCT.	87
Figura 4.2 Muestreo de agregado grueso en el banco la Cañada, El Marques....	88
Figura 4.3 Muestreo de agregado fino en el banco la Cañada, El Marques.....	88
Figura 4.4 Reducción del agregado grueso por medio del cuarteo manual.	89
Figura 4.5 Reducción del agregado fino por medio del cuarteo manual. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 4.6 Microscopia de las láminas delgadas del basalto obtenido en el banco de materiales.....	90
Figura 4.7 Curva granulométrica del agregado fino de basalto banco de La Cañada.	91
Figura 4.8 Curva granulométrica agregado grueso basalto banco La Cañada. ...	92
Figura 4.9. Relación entre el contenido de vacíos y la tasa de filtración. Fuente: Adaptado de ACI 522-10, ACI 211.3R-02).	96
Figura 4.10 Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregados 3/4" y 3/8".....	97
Figura 4.11 Ensayo de resistencia a compresión.....	101
Figura 4.12 Porcentaje de retención de cadmio	102
Figura 4.13 Concentración de calcio en la solución de cadmio antes y después de la prueba de absorción.....	103
Figura 4.14 Concentración de calcio en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.....	103

Figura 4.15 Concentración de calcio en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.....	104
Figura 4.16 Porcentaje de retención de zinc.....	104
Figura 4.17 Porcentaje de retención de arsénico.....	105
Figura 4.18 Concentración de calcio en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.....	106
Figura 4.19 Concentración de fosforo en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.....	107
Figura 4.20 Concentración de fosforo en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.....	107
Figura 4.21 Cilindro de concreto permeable expuesto a solución con arsénico.	108
Figura 4.22 Retención de cadmio, zinc y arsénico en solución con concreto permeable.....	109
Figura 4.23 Medición de la concentración de arsénico y eficiencia de retención con concreto.....	110
Figura 4.24 Medición de la concentración de arsénico y eficiencia de retención con concreto.....	111

1. Introducción

Li *et al.* (2017) mencionan que los problemas ambientales, como las inundaciones, la contaminación del agua, el clima y los fenómenos urbanos como lo es la isla de calor urbano, se deben a que no existen sistemas de drenaje sostenibles capaces de mitigar estos problemas. Por tanto, Maguesvari *et al.* (2013) y Starke *et al.* (2011) afirman que las secciones de pavimentos permeables nos permiten purificar previamente la lluvia, aunado a esto sirven como túneles para el intercambio de calor entre la humedad del ambiente y el pavimento, dando lugar a efectos ambientales positivos como lo son: el mantenimiento del equilibrio hídrico, alivio de los fenómenos de las islas de calor.

Sin embargo, estas superficies impermeables tienen como consecuencia un alto potencial para infiltrar contaminantes al subsuelo alterando sus propiedades y su calidad para satisfacer las necesidades del ser humano. Dentro de los contaminantes que se pueden encontrar en los pavimentos permeables están los sedimentos y sólidos en suspensión, residuos orgánicos con alta demanda bioquímica de oxígeno, aceites, grasas, plaguicidas y metales pesados (D'Arcy *et al.*, 1998; Scholz, 2006).

Haselbach *et al.* (2014) mencionan que los escurrimientos superficiales contienen niveles altos de metales pesados como el zinc y cobre, que representan una amenaza, si estos llegan a descargar en zonas acuáticas. La presencia de estos contaminantes en las aguas superficiales se ha vuelto un grave problema ambiental, ya que estos metales no son biodegradables y pueden incorporarse en la cadena alimenticia y así representar un peligro para la salud humana (Ammar *et al.*, 2016).

El concreto permeable es una estructura con la capacidad de reducir el volumen de las aguas pluviales superficiales a través de su red de poros, además, mejora la calidad del agua y ayuda a mitigar los efectos de la isla de calor debido al crecimiento de la mancha urbana (Haselbach *et al.*, 2011). En recientes investigaciones se ha demostrado que el uso del concreto permeable permite la

retención de metales pesados del escurrimiento superficial, estas investigaciones se enfocaron en sistemas de pavimentos totalmente permeables constituidos principalmente por cemento portland ordinario como material aglutinante, agregados gruesos, poco o nada de agregados finos y agua (ACI, 2010 & Delatte *et al.*, 2009).

Características como la distribución, el tamaño y la tortuosidad de los agregados pétreos en un concreto permeable pueden modificarse para que haya una filtración de contaminantes y proporcionar el tiempo suficiente para que el agua pueda interactuar con el pH [alto, >12.00 unidades estándar (S/U)] de la pasta del concreto permeable (Komastka *et al.*, 2003). Muchas técnicas tales como adsorción, oxidación química, precipitación, extracción con disolvente, intercambio iónico, procesos de membrana y la ósmosis inversa se han desarrollado para la eliminación de iones metálicos de soluciones acuosas (Eloussaief & Benzina, 2010). Entre ellos, la tecnología de adsorción es el proceso más prometedor involucrado en la eliminación de metales tóxicos de corrientes de desechos industriales y aguas naturales con la selección de un adsorbente adecuado (Potgieter *et al.*, 2006 & Aydin *et al.*, 2008).

1.1 Descripción del problema

Existe una problemática en distintos lugares del mundo en cuestión de inundaciones asociados a la ineficiencia de los sistemas de drenaje con las que cuentan los diferentes tipos de infraestructura. Aunado a esto, existe una falta de sistemas eficientes de infiltración y de recarga de acuíferos que permitan solucionar adecuadamente el control de la escorrentía en el entorno urbano y el tratamiento de los contaminantes nocivos para la salud que se encuentran en el escurrimiento superficial. Sin embargo, esta problemática se ve intensificada en la zona metropolitana y conurbada de la ciudad de Querétaro, que posee una red de drenaje pluvial muy extensa a lo largo de dicha área; este sistema pluvial causa conflictos en temporada de lluvia dado que en su historial regularmente se logran alcanzar sus niveles máximos de capacidad provocando serios daños en diversas zonas de la

ciudad. En la Figura 1.1 se muestra como los drenes no son capaces de solventar las avenidas máximas de lluvia.



Figura 1.1 Falta de capacidad hidráulica del Río Querétaro.
Fuente: Periódico Diario de Querétaro, 2017.

Es importante dar a conocer que en toda el área metropolitana solo se cuenta con un sistema de concreto permeable y el cual está localizado en la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Universitario. Así mismo, este sistema ha sido muestra del buen funcionamiento que tienen estos sistemas para el control del escurrimiento superficial. Como se muestra en la Figura 1.2 la ubicación de la estructura de pavimentos.



Figura 1.2 Ubicación de la estructura de pavimento permeable.
Fuente: Google Earth, 2017.

Esta temática de investigación en la ciudad de Querétaro no ha sido estudiada, por eso es de suma importancia que se pueda explotar esta línea de investigación en Querétaro, ya que el problema de las inundaciones es cada vez mayor y el control de las mismas es cada vez más difícil. Además, que las construcciones de nuevos drenajes no han podido mitigar los desbordamientos de los cauces primarios y secundarios a lo largo de toda la mancha urbana. Por ello todo lo mencionado anteriormente, es necesario que se busquen nuevas alternativas, como la implementación de sistemas de pavimentos permeables que nos permitan monitorear y controlar, a través del tiempo, el comportamiento del escurrimiento superficial y poder reutilizar el agua que se infiltra, producto de la escorrentía en otras actividades de uso cotidiano.

1.2 Justificación

Referencias como Javadi *et al.* (2016) indican que los metales pesados han generado especial atención a la comunidad científica, debido a lo tóxico de estos y su introducción en diferentes ambientes naturales. Además, tal y como comentan los diversos autores, se ha encontrado evidencia de que la construcción eficiente de un pavimento permeable ayuda a disminuir la cantidad de metales pesados que se mueven en la superficie, con la finalidad de mejorar la calidad del agua en el ciclo hidrológico continuo.

En recientes investigaciones como en Sounthararajah *et al.* (2017), realizadas en torno al uso de pavimentos permeables, relacionados con el tratamiento de agua, se ha observado que combinando un tratamiento con base en una mezcla de zeolita/basalto, en diferentes concentraciones, ha generado una buena calidad del agua de acuerdo con los estándares de agua marina, removiendo metales pesados, los cuales son producidos por diferentes fuentes contaminantes y transportadas actualmente a los océanos por escorrentías superficiales y hacia los mantos acuíferos por la infiltración de los mismos.

Otros estudios como el de Mayer *et al.* (2011) demuestran que la implementación de agregado de dolomita y cuarcita como cama en la base de un pavimento permeable mejora sustancialmente las propiedades de retención de metales pesados y por ende el mejoramiento de los estándares de calidad de agua, requerida para el aprovechamiento de usos domésticos y agrícolas.

Los basaltos y zeolitas son materiales importantes de bajo costo para el tratamiento de agua tanto de los escurrimientos superficiales, como de las aguas residuales. Debido a que cuentan con una gran capacidad de intercambio catiónico, lo cual es favorable ya que presentan un alto rendimiento en la absorción de los contaminantes metálicos que encontramos en la infiltración del agua en los pavimentos permeables (Wang & Peng, 2010).

Diversos investigadores como Pagotto *et al.* (2000) han demostrado la importancia de utilizar los pavimentos permeables a comparación de los pavimentos convencionales, ya que los pavimentos permeables permiten evacuar gradualmente la salida del agua a través del subsuelo. Aunado a esto, se consigue reducir el efecto de isla de calor urbano generada por la evaporación de la escorrentía superficial y mejorando así la calidad del agua con la remoción de los principales contaminantes metálicos que se pueden encontrar en el ambiente.

Es por eso que la implementación de los sistemas de concretos permeables ayuda a contrarrestar los efectos negativos de la urbanización en el ciclo hidrológico. Por medio de estos se pudiera la calidad del agua de lluvia en el sitio donde se produce, se puede obtener beneficio gracias al almacenamiento, no solo para el aprovechamiento del agua en las actividades diarias, sino en el control de inundaciones que con el cambio climático y la impermeabilidad de las zonas urbanizadas día a día se hace más presente.

1.3 Hipótesis y objetivo

1.3.1 Hipótesis

La retención de un metal pesado que atraviesa un pavimento de concreto permeable con la inclusión de basalto como agregado pétreo logra ser de más de un 50% respecto del contenido inicial, lo cual proveerá de una mejor calidad de agua a filtrar a capas inferiores de la estructura de pavimento o del terreno natural.

1.3.2 Objetivo General

Determinar si un pavimento permeable, construido o fabricado mediante la inclusión a base basalto, contribuye en el pre-tratamiento producto de la escorrentía superficial para la reducción de metales pesados.

1.3.3 Objetivos particulares

- Determinar la factibilidad del uso de agregado de roca basáltica natural en mezclas de concreto permeable para la retención de cadmio, zinc y arsénico.
- Revisar si el cadmio, zinc y arsénico al ser infiltrados por un pavimento de concreto permeable logra tener una reducción con respecto a su concentración inicial.
- Evaluar el agregado de roca basáltica natural y el concreto de manera independiente para determinar cuál de los dos es más eficiente en la retención de Arsénico al ser expuesto a estos materiales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GEOLOGÍA. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS

Los suelos son formados por la erosión de las rocas que se encuentran en la superficie de la tierra. Las propiedades físico-químicas de los suelos están directamente ligadas por los minerales que constituyen las partículas de las rocas. Asimismo, las rocas se clasifican en tres tipos básicos; ígneo, sedimentario y metamórfico (Braja, 2010). En la Figura 2.1 se muestra un diagrama del ciclo de formación de las diferentes rocas y los procesos asociados a ellos.

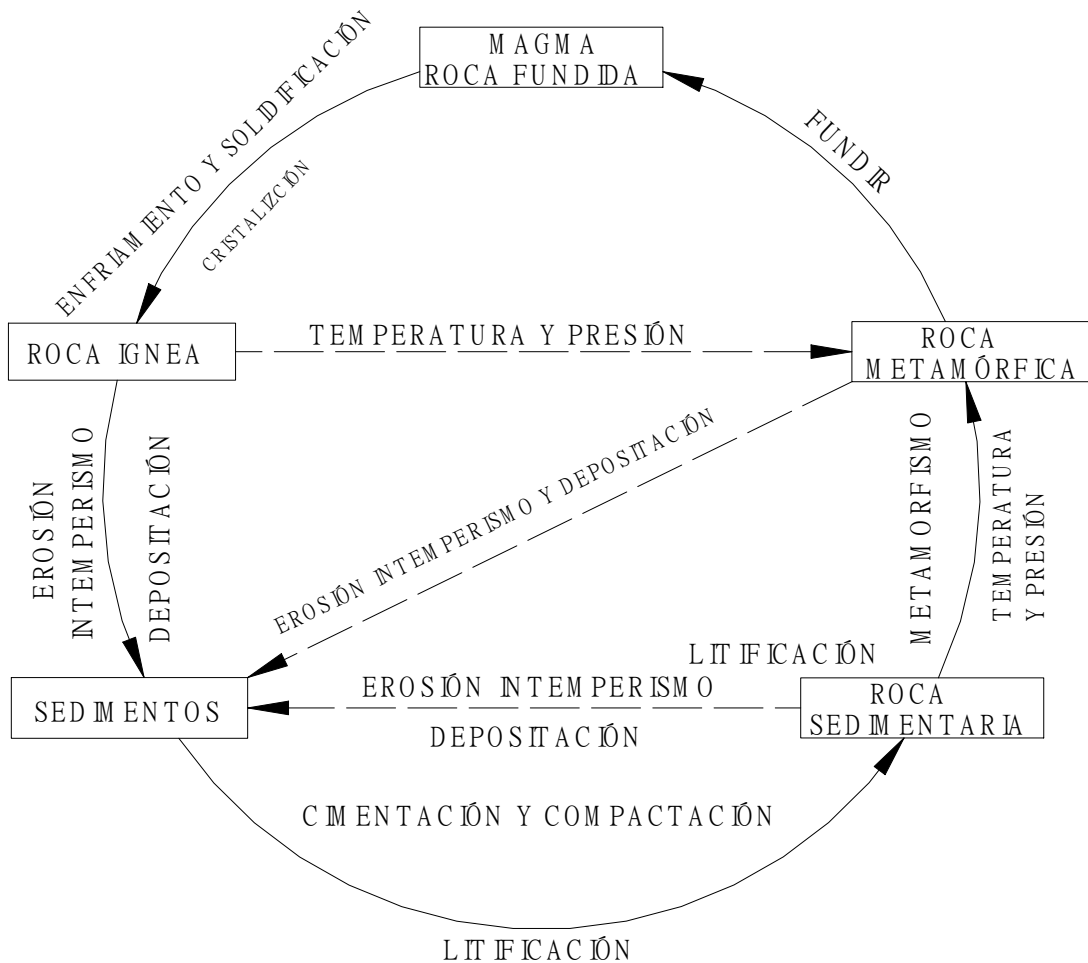


Figura 2.1 Ciclo de las rocas
Fuente: Braja, 2010.

2.1.1 Clasificación de Rocas

a) Rocas ígneas

Dentro de las tres clasificaciones litológicas de las rocas, las rocas ígneas constituyen una de las clases fundamentales. La palabra ígnea se deriva del griego “ignis” que significa “fuego”, este tipo de rocas se define como la solidificación a partir de un, material fundido o parcialmente fundido (Osinki *et al.*, 2018). El material que forma las rocas ígneas se denomina magma, este se forma por un proceso denominado fusión parcial. La fusión parcial se produce a varios niveles dentro de la corteza terrestre y el manto superior a profundidades que pueden superar los 200 kilómetros. Una vez formado, un cuerpo magmático asciende vigorosamente hacia la superficie porque es menos denso que las rocas que lo rodean. Cuando la roca fundida se abre paso hacia la superficie, produce una erupción volcánica. El magma que alcanza la superficie de la tierra se denomina lava. Las rocas ígneas que se forman cuando se solidifica la roca fundida en la superficie terrestre se clasifican como extrusivas o volcánicas (Braja, 2010).

El magma que pierde movilidad antes de alcanzar la superficie acaba cristalizando en la profundidad. Las rocas ígneas que se forman en la profundidad de la corteza se denominan intrusivas o plutónicas. Las rocas ígneas intrusivas nunca se observarían si la corteza no ascendiera y las rocas que las cubren no fueran eliminadas por la erosión (Braja, 2010).

b) Rocas sedimentarias

Los depósitos de arena, grava, limo y arcillas que son formados por el intemperismo pueden compactarse por la presión de sobrecarga y cementarse por agentes como óxido de hierro, calcita, dolomita y cuarzo. Los agentes cementantes generalmente son transportados en solución por agua subterránea. Llenan los espacios entre las partículas y forman rocas sedimentarias por proceso de litificación. Las rocas

formadas de esta manera se llaman rocas sedimentarias detríticas. Todas las rocas detríticas tienen una textura clástica (Braja, 2010).

Las rocas sedimentarias también pueden ser clasificadas de acuerdo a un proceso químico y se pueden clasificar como rocas sedimentarias químicas (Braja, 2010). En la Tabla 2.1 se pueden ver algunos ejemplos de esta clasificación.

Tabla 2.1 Tipos de rocas sedimentarias químicas.

Composición	Tipo de Roca
Calcita (CaCO_3)	Caliza
Dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]	Dolomía
Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Yeso
Halita (NaCl)	Sal de roca

Fuente: Braja, 2010.

c) Rocas metamórficas

El metamorfismo produce muchos cambios en las rocas, entre ellos un aumento de su densidad, crecimiento de cristales más grandes, reorientación de los granos minerales, lo que da a las rocas un aspecto planar bandeado, conocido como foliación y la transformación de los minerales de baja temperatura en minerales de alta temperatura (Braja, 2010).

En la Tabla 2.2 se muestra un esquema más completo de la clasificación de las rocas, así como sus características y sus propiedades mecánicas. Esta tabla ayudará a poder describir y clasificar de una manera correcta el basalto utilizado en el concreto permeable y el porqué de su elección, para la retención de metales pesados en el escurrimiento superficial en una vía terrestre.

Tabla 2.2 Clasificación de rocas (características y propiedades mecánicas).

TIPO DE ROCA	ROCA	COMPOSICIÓN		TEXTURA	ESTRUCTURA	DENSIDAD Kg/cm ³	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	RESISTENCIA A LA TENSIÓN	RESISTENCIA AL CORTE	MOD. YOUNG	
Í G N E A S	PLUTÓNICAS O INTRUSIVAS	GRANITO	1,2,4	(5) MICAS, BIOTITA	FANERÍTICA	BATOLITO	2.6-2.9	1000-2500	70-250	140-500	2.6-7.00
		DIORITA	3.5	Y MOSCOVITA		TRONCOS	2.7,3.05	1000-3500	150-350		
		GABRO	6.7,3	(6) ANPIBOLE Y PIROXENOS		LACOLITUS	2.8-3.1	1500-3000	150-300	250-600	6.0-11.0
		PERIDOTITA	6.7	(7) OLIVINO		DIQUES	-	-	-	-	-
	VOLCÁNICAS O EXTRUSIVAS	RIOLITA	1, 2,4	(1) SiO ₂ CUARZO	AFANÍTICA O PORFIRITICA	FLUIDAL Y MANTOS	2.4-2.6	1500.3000	150-300	-	-
		ANDESITA	3, 5	(2) ORTOCLASA		DERRAMES LÁVICOS	2.2-2.3	-	-	-	-
		BASALTO	6.7,3	(3) PLAGLIOCLASA		VESICULAR	2.8-2.9	1500-3000	100-300	200-600	2.0-10.0
				(4) SILICATOS Y FERROMAGNESIANOS		AMIGDALOIDAL	-	-	-	-	-
	ROCAS PIRO- CLÁSTICAS	AGLOMERADO. BRECHA	MAYOR DE 32 mm		PIROCLÁSTICAS	MASIVA PSEDUESTRATIFICADA					-
		TOBAS DE LAPILLI	MENOR DE 32 mm Y MAYOR DE 4 mm		PIROCLÁSTICAS	MASIVA PSEDUESTRATIFICADA	-	-	-	-	-
TOBAS ARENOSAS		MENOR DE 4 mm Y MAYOR DE 1/4 mm		PIROCLÁSTICAS	MASIVA PSEDUESTRATIFICADA					-	
Tobas		MENORES DE 1/4 mm		PIROCLÁSTICAS	MASIVA					-	
Obsidiana, tezontle, pómez		VIDRIOS		PIROCLÁSTICAS	PSEDUESTRATIFICADA					-	
S E D I M E N T A R I A S	MECÁNICAS	CONGLOMERADO	MAS DE 25% DE FRAGMENTOS		CLÁSTICA	IMBRICACIÓN	2.0-2.6	200-1700	40-250	80-400	-
		BRECHA sedimentaria	> 2mm DE DIÁMETRO			-	-	-	-	-	-
		ARENISCA	CUARZO, FEDELPASTO			ESTRATIFICACIÓN	-	200-1700	40-250	30-300	0.5-8.6
		LIMOLITA				CRUZADA	-	-	-	-	-
		LUTITA	MINERALES ARCILLOSOS			LAMINACIÓN - FISIL	2.0-2.4	50-1000	20-100	30-300	0.8-3.0
		CALIZA	CALCITA CaCO ₃			MASIVA	2.2-2.5	300-2500	50-250	100-300	1.0-8.0
	Q U Í M I C A S	DOLOMITA	CaMg(CO ₃) ₂		N	ESTRATIFICACIÓN	2.2-2.6	300-2500	150-250	-	2.0-8.4
		ARAGONITA	HCl 10%		O	GRUESA	-	-	-	-	-
		TRAVERTINOS				NODULAR	-	-	-	-	-
		MARGA			C	-	-	-	-	-	-
		PEDERNAL	CUARZO SiO ₂		L	ESTRATIFICACIÓN	2.5-2.7	-	-	-	-
		YESO	YESO CaSO ₄ ·2H ₂ O		Á	-	-	-	-	-	-
		HALITA	NaCl HOLITA		S	-	-	-	-	-	-
		ANHIDRITA	C.H.O.N.S		T	-	-	-	-	-	-
		COQUINA	CONCHAS GRUESAS		I	ESTRATIFICACIÓN	-	-	-	-	-
ORGÁNICAS	CARBÓN	MATERIAL VEGETAL		C	-	50	50-200	-	-	-	
	DIATOMITA	TIERRAS DIATOMEAS		A	-	-	-	-	-	-	
	CORAL	FÓSILES DE CALCITA		S	ARRECIFAL	-	-	-	-	-	
M E T A M Ó R F I C A S	PIZARRA	CUARZO, MICAS, PIROXENOS,		GRANOBLÁSTICAS	FOLIADAS	-	1000-2000	70-200	-	-	
	FILITA	CLORITA, HORBLENDIA		POIKILOBLÁSTICAS		2.6-2.7	1000-2000	70-200	150-300	-	
	ESQUISTO	GRANATE		CATACLÁSTICAS		-	-	-	-	4.1-7.2	
	GNEISS			CRISTALOBLÁSTICA	2.0-3.0	500-2000	50-200	-	2.0-6.0		
	MÁRMOL	CALCITA		LEPIDOBLASTICAS	NO FOLIADAS	2.6-2.7	1500-3000	100-300	100-400	6.0-9.0	
	CUARCITA	CUARZO		-	-	-	870-3600	50-200	200-600	2.6-10.2	

Fuente: Braja, 2010.

2.1.2 Microscopía en láminas delgadas de rocas para análisis petrográfico

Según Paulsen *et al.* (2013) mencionan que la información que puede proporcionar una roca es muy amplia, sobre los procesos geológicos y de formación en la superficie de un planeta. Además, para los geólogos son capaces de identificar las interacciones entre los minerales que conforman a una roca y la parte química de los minerales. Borazjani *et al.* (2016) señalan que la utilización de las secciones delgadas petrográficas es el primer paso para poder comprender la formación y clasificación de una roca.

En el planeta, estas secciones finas han sido utilizadas por más de 150 años y ha sido fundamentales para el estudio de muestras de roca con la utilización del microscopio petrográfico (luz polarizante o con luz transmitida a través de la sección delgada) (Vernon, 2004). Así mismo, Paulsen *et al.* (2013) establecen que las láminas delgadas son utilizadas principalmente para la identificación de minerales y aspectos como: fracturas, zonificación de minerales y texturas de roca, así como para poder identificar de manera concisa la formación de las rocas y su clasificación.

Cohen *et al.* (2018) describen que las secciones delgadas petrográficas son muestras de rocas reducidas a un espesor de 30 μm (micras), con sus superficies pulidas, esto con el fin de poder verlas a través de un microscopio petrográfico. Estas muestras se analizan utilizando luz transmitida para la determinación de contenido mineral, textura de la roca y la posible alteración mineral. Dreyer *et al.* (2013) dan a conocer que la preparación de estas secciones de roca es de manera manual. El primer paso comienza con el corte de la roca a un tamaño de muestra más viable y definir una cara plana de la muestra para su análisis. Estas láminas se montan en un portaobjetos de microscopio con un adhesivo epóxico, posteriormente se pulen el lado desmontado de la muestra hasta el espesor de las 30 μm (micras) y al final se cubre con cubreobjetos para su visualización en el microscopio

petrográfico. En la Figura 2.2 se puede ver los elementos que se incluyen en una lámina delgada para petrografía.

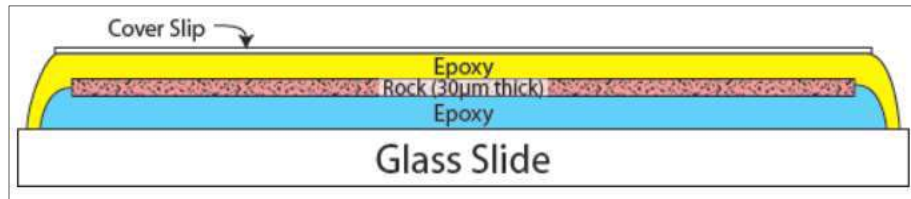


Figura 2.2 Sección transversal de una lámina delgada para petrografía.
Fuente: davehirsch.com/other/thinsections/, Consultado 24 de mayo del 2017.

Para observar las propiedades de las láminas delgadas, se ocupará la ayuda de un microscopio petrográfico para determinar los rasgos mineralógicos y petrográficos de la muestra de roca que se está analizando. En la Figura 2.3 se muestra un esquema de los principales elementos de un microscopio y la relación de cada uno de ellos con las propiedades de la luz y con la observación de láminas delgadas de minerales y rocas.

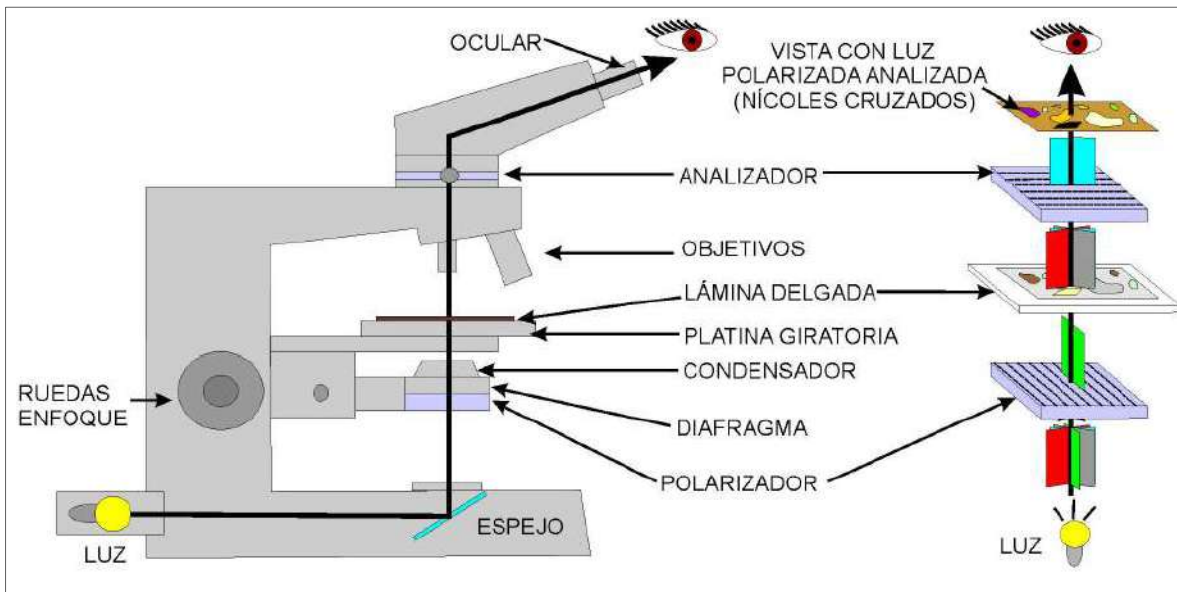


Figura 2.3 Elementos de un microscopio y las propiedades que tiene para observar láminas delgadas de rocas y minerales.

Fuente: Salazar *et al.* (2013).

2.1.3 Composición mineralógica y clasificación petrográfica del basalto

El basalto es una roca volcánica de grano fino y de color verde oscuro a negro, compuesta fundamentalmente por piroxeno y plagioclasa rica en calcio con cantidades menores de olivino y anfíbol o ferromagnesianos y feldespatos. Cuando es porfídico, el basalto contiene comúnmente fenocristales de plagioclasa calcica de colores claros o fenocristales de olivino de aspecto vítreo embebidos en una pasta oscura. El basalto es la roca extrusiva más común. Muchas islas volcánicas, como Hawai e Islandia, están compuestas principalmente de basalto. Además, las capas superiores de la corteza oceánica son de basalto (Li *et al.*, 2008).

De acuerdo en el método de clasificación de sílice total (TAS) sobre la clasificación de rocas ígneas que contienen SiO_2 , el basalto se puede clasificar como basalto, basalto andesítico y andesita si los porcentajes en peso están entre 45%-52%, 52-57% y 57-63%, respectivamente (Maitre *et al.*, 2002).

Los principales elementos químicos de un basalto (en forma de óxido mayores) son: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 (Maitre *et al.*, 2002).

2.2 PAVIMENTOS

Una estructura de pavimento está constituida por una o varias capas comprendidas entre el nivel de subrasante y el nivel de rasante. Esta estructura tiene la función de disipar los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares del tránsito y transmitir adecuadamente estos esfuerzos a las capas subyacentes. La capa superior del pavimento tiene como finalidad el garantizar una superficie de rodamiento segura y cómoda para el usuario durante la vida útil del pavimento. La estructura del pavimento debe tener una textura apropiada para el rodamiento, ser resistente a las acciones abrasivas del tránsito y a las acciones del intemperismo (Rico y Del Castillo, 1977; Zárate *et al.*, 2002).

Una estructura de pavimento generalmente se compone de una subbase, base hidráulica y finalmente una capa de rodamiento. El número de capas dependerá directamente del diseño del pavimento y dentro de la literatura, existen dos tipos de pavimentos: los pavimentos flexibles y los rígidos. La capa superior se denomina capa de rodamiento y es aquí donde se empiezan a transmitir las cargas generadas por el tránsito vehicular y se conforma principalmente por materiales pétreos y bituminoso para el caso de mezclas asfálticas, o pudiendo ser de materiales pétreos y cementantes como mezcla de concreto hidráulico. La siguiente capa, denominada base hidráulica, se ubica entre la subbase y la capa de rodamiento. Su composición es de material granular, al igual, que la última capa llamada subbase compuesta de material granular, como se muestra la Figura 2.4.

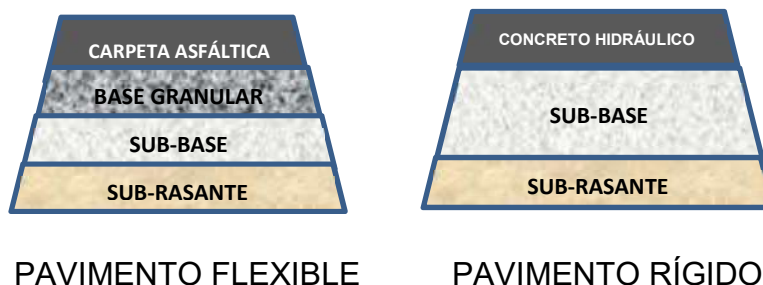


Figura 2.4 Estructura de un pavimento.

Según Montejo (2006), un pavimento debe reunir las siguientes características para que pueda trabajar de manera adecuada y cumpla su vida útil para lo cual fue diseñado:

- Ser resistente ante los agentes del intemperismo.
- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades de diseño.
- Debe ser durable y económico.
- Presentar condiciones adecuadas de drenaje.
- Debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

En la actualidad, existe una gran diversidad de diseño y tipos de pavimentos, pero en general, estas estructuras se clasifican en dos tipos: pavimentos rígidos y pavimentos flexibles. Sin embargo, según Rico y Del Castillo (1997) la forma en cómo se clasifican los pavimentos no es del todo adecuada, ya que es difícil saber “qué tan rígido puede ser un pavimento flexible o que tan flexible puede llegar a ser un pavimento rígido”. Por otro lado, una manera fácil de poder diferenciar cada tipo de pavimento, es saber de qué está constituido cada uno de ellos, ya que en el pavimento flexible su materia prima es agregado virgen y asfalto, y para el concreto hidráulico los materiales usados son agregados pétreos y cementantes.

Delatte (2008) establece que los costos iniciales para la construcción de un pavimento rígido son más elevados que el de un pavimento flexible, estos tienen una vida de servicio mayor y un costo de mantenimiento menor que los flexibles. Aunado a esto, Rico et al. (1998) mencionan que el uso de los pavimentos de losa de concreto hidráulico, en casos de tránsitos elevados, son más eficientes que los sistemas de pavimentos flexibles, ya que un pavimento rígido disipa de mejor manera los esfuerzos producidos por el flujo vehicular a comparación de un pavimento flexible. Esto se debe a que módulo elástico del concreto es más alto que el de una mezcla asfáltica. Por lo tanto, las cargas aplicadas por los vehículos se

distribuyen en un área mayor en la losa de concreto (ACPA, 2007). En la Figura 2.5, se muestra la distribución de esfuerzos que tiene cada tipo de pavimento.

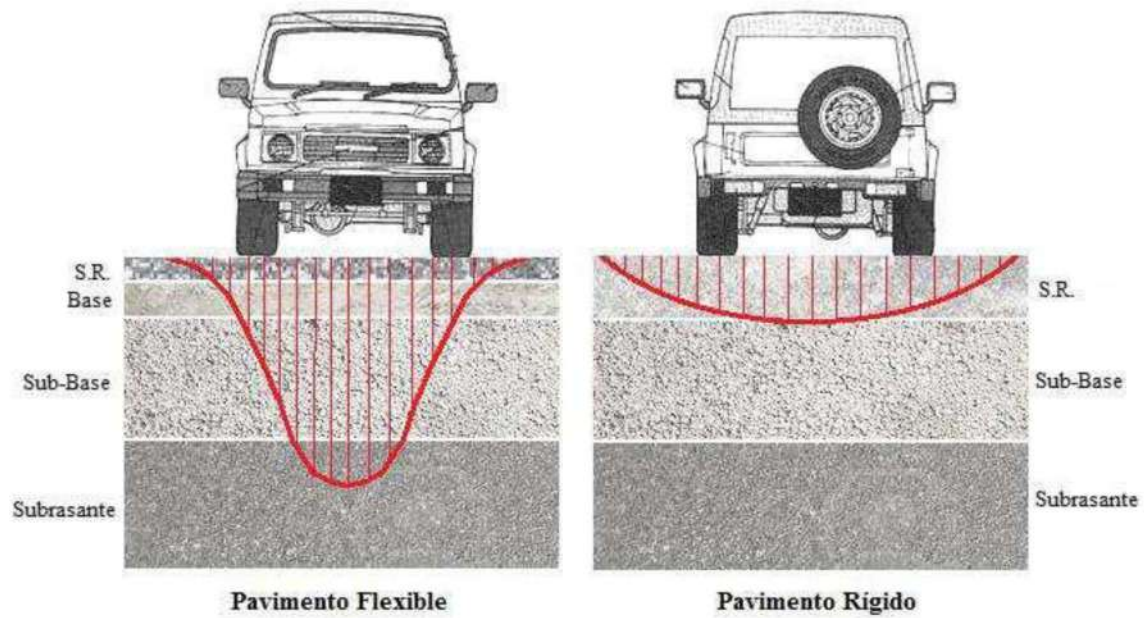


Figura 2.5 Distribución de esfuerzos en la estructura de pavimento flexible y rígido.

Fuente: ACPA (2007).

Un concreto permeable se podría clasificar dentro lo antes mencionado como un pavimento rígido ya que un pavimento de concreto hidráulico es una estructura que comprende una capa de cemento portland (Sabih & Tarefder, 2018).

2.3 PAVIMENTOS PERMEABLES

2.3.1 Definición y aplicación

Pratt et al. (2002) definen a un pavimento permeable como un subconjunto de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), el cual consiste en una capa de rodamiento, que permite la filtración de la escorrentía hacia una capa de grava subyacente, donde se almacena temporalmente para posteriormente infiltrarse al terreno natural o bien almacenarse en un sistema de captación de aguas pluviales.

Los firmes permeables son una alternativa sostenible con respecto a los firmes impermeables, ya que ambos están constituidos por los mismos materiales de construcción; cemento, agregados pétreos, agua, aditivos y geosintéticos.

Field et al. (1982) mencionan que las aplicaciones de los pavimentos permeables han sido principalmente para estacionamientos de vehículos ligeros y en carreteras de bajo tránsito. Los sistemas permeables ayudan a controlar la contaminación provocada por las emisiones de los vehículos en las áreas de los estacionamientos y carreteras de acceso (Valle et al., 2006).

Cook et al. (2006) y Ferguson (2006) señalan que la aplicación de los pavimentos permeables no solo se restringe a zonas de nueva construcción, sino que también pueden ser construidos en zonas renovadas del centro urbano, e incluso se han llevado a cabo en zonas de servicio en aeropuertos.

2.3.2 Clasificación

Dentro de la literatura se encuentra un sin fin de clasificaciones para los pavimentos permeables que van de acuerdo al material usado en la capa de rodamiento, o bien, por su sistema de filtración y almacenamiento del escurrimiento

superficial. Según Pratt et al. (2002) clasifican a los pavimentos permeables de la siguiente manera:

- Pavimentos permeables discontinuos
 - Césped o grava con refuerzos.
 - Adoquines con ranuras.
- Pavimentos permeables continuos
 - Mezcla bituminosa porosa.
 - Hormigón poroso.

McCormack (2006) divide a los pavimentos permeables en dos tipos:

- Pavimentos contruidos con elementos o materiales porosos.
- Pavimentos contruidos por materiales impermeables convencionales con huecos o ranuras que permitan la infiltración de agua a través de su superficie.

Por último, el Departamento de Transportes de California (Caltrans, 2007), clasifica a los pavimentos permeables en cuatro categorías, según el tipo de pavimento empleado en las capas drenantes:

- Concreto permeable.
- Asfalto poroso.
- Adoquines permeables
- Estructura de drenaje subterráneo.

Otra manera de clasificar a un pavimento permeable es de acuerdo al destino final de las aguas filtradas a través de su estructura. Según Woods-Ballard et al. (2007) se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) **Sistemas de infiltración total.** Este sistema se emplea cuando la capacidad de infiltración del terreno o bien la permeabilidad del suelo es suficientemente grande, para que el escurrimiento superficial pueda infiltrarse en su totalidad por toda la estructura hasta los acuíferos.

- b) **Sistemas de infiltración parcial con drenaje longitudinal.** Cuando el terreno tiene poca capacidad de infiltración, se completa la infraestructura con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacúan el exceso de agua hacia los sistemas de drenaje convencionales.
- c) **Sistemas de infiltración Nula.** Dado que la capacidad de infiltración o permeabilidad del suelo es escasa o prácticamente impermeable, el sistema debe contar con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacuan el agua almacenada a la red convencional. Esta alternativa es utilizada cuando la permeabilidad del suelo es muy baja, por ejemplo, si el terreno es de carácter arcilloso, o cuando se requiere reutilizar el agua que se filtre a través del pavimento permeable.

2.3.3 Retención de metales pasados con la utilización de pavimentos permeables

La construcción de pavimentos permeables en aceras y carreteras es una alternativa de desarrollo de bajo impacto para controlar los volúmenes de la escorrentía superficial y consecuentemente disminuir los contaminantes en las aguas receptoras (Kamali *et al.*, 2017). El objetivo de estas estructuras es generar zonas donde el agua se infiltre o se almacene amortiguando la cantidad de agua de lluvia precipitada y aumentando los tiempos de concentración de esta.

Legret *et al.* (1999) y la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos Norteamericanos (Environmental Protection Agency, 1999) coinciden en que se recomienda el uso de pavimentos permeables en zonas de baja pendiente, con poco tráfico como puede ser estacionamientos y vías con tránsito ligero, en donde su nivel freático se encuentre debajo del fondo de la zona de almacenamiento para que esto no interfiera en el volumen de acopio. En la Figura 2.6 se muestra como el drenaje natural es afectado o influenciado por la urbanización.

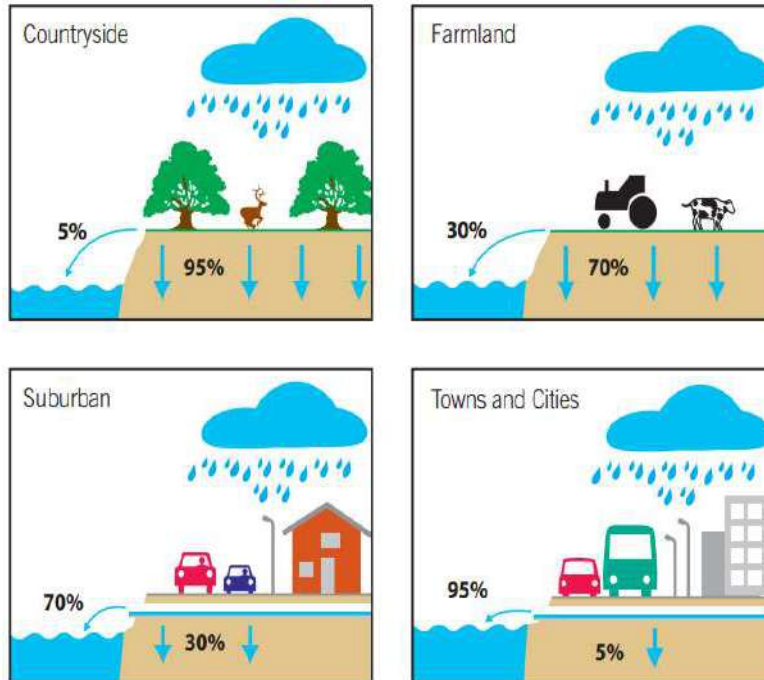


Figura 2.6 Influencia de la urbanización en el drenaje natural.

Fuente: Interpave (2008).

Así mismo Yinghong (2015) menciona que otro factor importante en un pavimento permeable es la mitigación de la isla de calor urbano ya que la construcción de grandes edificios y la actividad humana hacen que las ciudades sean varios grados más calientes que las áreas rurales y suburbanas, esta diferencia se llama el efecto de la isla de calor urbano (UHI por sus siglas en inglés).

Por su parte, Del Carpio *et al.* (2016) nos dicen que la isla de calor urbana se caracteriza por las altas temperaturas del aire en zonas densamente construidas en comparación con las zonas rurales circundantes. Una de las principales causas de la formación de una UHI es el uso de grandes cantidades de materiales industrializados (ladrillos, hormigón, mezclas asfálticas, piedras y otros) en las zonas urbanas para sustituir el terreno natural y zonas verdes. Estos materiales absorben un porcentaje elevado de onda corta de la radiación solar durante el día lo irradian al entorno más fácilmente que las superficies de baja densidad, que normalmente se encuentran en las zonas sub-urbanas o rurales de las regiones (Romeo & Zinzi, 2005; Solecki *et al.*, 2005).

A lo largo de los años, las diferentes estrategias para la mitigación de UHI han sido propuestos, incluyendo: la plantación de árboles de sombra y un aumento de áreas verdes en las ciudades, y el uso de superficies reflectantes, conocido como “cool” en las superficies de los edificios y pavimentos (Santamouris *et al.*, 2011; Akbari & Matthews, 2012; Zinzi & Carnielo, 2013; Santamouris, 2012).

Santamouris *et al.* (2012) informaron que un estudio sobre la aplicación de pavimentos reflectantes en una plaza urbana, en Atenas (Grecia), totalizando 4500 m² de terreno, logro reducir significativamente la isla de calor urbano. Se estima que, en un típico día de verano, el uso de pavimentos frescos podría reducir la temperatura del aire en la plaza por 1.9°C. Al mismo tiempo la temperatura de las superficies en la plaza se reducirá en 12°C. También, un estudio por Georgakis *et al.* (2014) realizado en Atenas, sugieren que el uso de materiales fríos para pavimentos y paredes en un cañón urbano podrían reducir las temperaturas de la superficie por 7°C - 8 °C a nivel del suelo y la temperatura del aire en la calle dentro del cañón por hasta 1 °C.

A diferencia de los pavimentos impermeables, los sistemas de pavimentos permeables incorporan un depósito en los huecos de sus materiales porosos y ofrecen la posibilidad de una medida de control en la infiltración de metales pesados y que esto puede reducir la carga de contaminantes de las aguas pluviales (Dierkes *et al.*, 2002; Brattebo & Booth, 2003). El escurrimiento de las calles urbanas y zonas de estacionamiento puede infiltrarse a través de estos sistemas para recargar las aguas subterráneas, reciclar el agua y reducir el déficit hídrico en los cuerpos de agua receptores. Hasta la fecha, la utilización de los pavimentos permeables ha sido bastante limitado debido a preocupaciones acerca de la migración de contaminantes en las aguas subterráneas y debido al tratamiento ineficaz por parte de las estructuras permeables tradicionales (Scholz & Grabowiecki, 2007).

Beecham *et al.* (2012) probaron la calidad del agua de efluentes de un sistema de pavimento permeable, en cuatro localidades diferentes en Adelaida, en el sur de Australia, encontraron que el cobre, plomo y cadmio fueron retirados de

las aguas pluviales mediante la implementación de una grava de 20 mm en la sub-base con una altura 280 mm. Pagotto *et al.* (2000) investigaron el rendimiento de un asfalto poroso en los sistemas de pavimentos permeables en una autopista francesa y descubrieron que el Cu, Zn, Cd y Pb se retiraron de las aguas pluviales probando que la utilización de estos sistemas permeables de retención pueden ser capaz de remover estos contaminantes.

Por otro lado, Dierkes *et al.* (2002) probaron el rendimiento de cuatro diferentes materiales de cama en la base de un pavimento, estos materiales fueron: piedra caliza, basalto, arenisca y grava en experimentos de laboratorio y encontraron que estos materiales ayudaron contundentemente a la eliminación de los contaminantes metálicos de las aguas pluviales al remover un pavimento convencional y colocar un pavimento permeable. Sin embargo, estos estudios utilizaron precipitaciones de baja intensidad y a una profundidad de capa base (390 mm) que no son comunes en las instalaciones típicas de los sistemas de pavimentos permeables. Myers *et al.* (2011) también llevaron a cabo estudios de laboratorio sobre los pavimentos permeables con una profundidad (380 mm) de materiales básicos, a saber, cuarcitas y dolomitas. Llegaron a la conclusión de que el Zn, Pb, Cu, fueron retirados de las aguas pluviales en los siguientes porcentajes: 99% Zn, 99% Pb, 94-97% Cu.

En diversos estudios, diversos materiales con muy alta capacidad de absorción de metales pesados tales como nanotubos de carbono (Rao *et al.*, 2007; Hua *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013), resinas de intercambio iónico (Demirbas *et al.*, 2005; Altun, 2007), y el titanio nanomateriales (Lv *et al.*, 2004; Sountharajah *et al.*, 2015) han sido desarrollados y probados en estructuras de pavimentos permeables dando resultados positivos en los límites permisibles de la calidad de agua marina y en la remoción de metales pesados. En la Tabla 2.3 se muestra el resumen de los autores en la investigación acerca de la eliminación de metales pesados en los pavimentos permeables, los porcentajes de remoción que obtuvieron y el método que aplicaron para la exclusión de estos metales:

Tabla 2.3 Métodos para la eliminación de metales pesados en pavimentos permeable.

Autores	Contaminantes registrados	Método usado para la eliminación de los metales	% Retención contaminante
Sounthararajah <i>et al.</i> (2017)	Níquel	Un post-tratamiento de una columna de filtro con un material nano-fibroso titanato (TNF) con un peso <1% de zeolita y mezclado con carbón activado granular (GAC) a una relación en peso GAC: TNF de 25: 1. Rocas basálticas obtenidas del área de Quiser, Egipto sumergidas en una solución de 50 mg/l de plomo, y se aplicó isotermas de absorción para estimar la absorción que tiene el basalto.	77
	Cadmio		99-100
	Zinc		99-100
	Plomo		99-100
Ammar <i>et al.</i> (2016)	Cobre	Se utilizaron 4 materiales permeables como son la calcita, zeolita, arena y hierro. Se realizó lotes de absorción con diferentes concentraciones iniciales, 15 a 300 m/l para Cd 2.5 a 50mg/l para Cu, 25 a 500 mg/l para plomo, 50 a 1000 mg/l para Ni, 2.5 a 50 mg/l para cromo y 25 a 500 mg/l para Zn, se realizó el modelado isotérmico para evaluar los mecanismos y cuantificar la absorción de los agregados con respecto a los contaminantes.	99-100
	Cadmio		95-100
Reddy <i>et al.</i> (2014)	Zinc	Se utilizaron 4 materiales permeables como son la calcita, zeolita, arena y hierro. Se realizó lotes de absorción con diferentes concentraciones iniciales, 15 a 300 m/l para Cd 2.5 a 50mg/l para Cu, 25 a 500 mg/l para plomo, 50 a 1000 mg/l para Ni, 2.5 a 50 mg/l para cromo y 25 a 500 mg/l para Zn, se realizó el modelado isotérmico para evaluar los mecanismos y cuantificar la absorción de los agregados con respecto a los contaminantes.	95-100
	Cromo		100
	Plomo		95-100
	Níquel		90

Fuente: Elaboración propia.

Turer (2005) y Essumang *et al.* (2006) mencionan que se han detectado concentraciones elevadas de plomo, cobre, zinc y cadmio en áreas con una alta densidad de tráfico. Aunado a esto, los usuarios de las vías y los habitantes que viven cercanos a las carreteras están potencialmente expuestos a estos metales pesados.

En las calzadas y estacionamientos, el aporte de metales pesados por parte de los vehículos se debe principalmente por fugas de combustible y lubricantes, oxido y herrumbre de carrocerías, desgaste de los neumáticos, frenos y a gases de combustión (Mangani et al., 2005). En la Tabla 2.4 se muestra una revisión de varios autores acerca de los metales pesados que se encuentran en las carreteras.

Tabla 2.4 Fuentes principales de contaminación por metales pesados en las carreteras.

Elemento	Frenos	llantas	Aceite de motor	Escape	Grasa	Partes móviles	Transmisiones y rodamientos	Laminado metálico y señalamiento horizontal
plomo	x	x	x	x	x	x	x	
zinc	x	x	x		x			
cobre	x	x	x			x	x	
cromo	x					x		x
níquel	x		x	x		x	x	x
cadmio	x	x	x	x				x
hierro	x					x		
manganeso	x	x				x		
cobalto		x					x	
bario	x	x	x	x				
arsénico	x	x	x	x				

Fuente: Drapper et al. (2000); Shaheen (1975); Kobriger & Geinopolos, A., (1975); Kennedy & Gadd, P., (2003).

Ellis & Revit (1982) encontraron que la mayor acumulación de metales pesados se concentraba en la cuneta de la calzada. Asimismo, Birch & Scollen (2005) determinaron que las concentraciones de metales pesados disminuyen con el aumento de la distancia que hay entre la cuneta y el eje central de la calzada. En la Tabla 2.5 se muestra una revisión bibliográfica acerca de la concentración de

metales pesados asociados con el sedimento acumulado sobre las superficies viales con respecto a la densidad de tráfico.

Tabla 2.5 Concentración de metales pesados en la calzada y cuneta en una carretera.

Densidad del tráfico (Vehículo/día)	Sitio de muestreo	Fracción analizada (μm)	Concentración (mg/kg)			Fuente
			Pb	Zn	Cu	
96000	calzada	150-250	187	593	217	Ellis y Revitt (1982)
96000	cuneta	<250	2296	1212	386	Ellis y Revitt (1982)
8800	calzada	<2000	23	125	119	Ball et al. (1984)
8800	cuneta	<200	511	249	124	Ball et al. (1984)
4500	calzada	75-125	14	100	91	Viklander (1998)
4500	cuneta	<250	978	2133	91	Viklander (1998)

Fuente: Elaboración propia

2.4 CONCRETO PERMEABLE

2.4.1 Antecedentes

En los últimos años, se han desarrollado a nivel mundial nuevas tecnologías para disminuir los problemas de evacuación de los escurrimientos superficiales en las ciudades. El método alternativo es la construcción de estructuras que permitan el paso del agua a través de su estructura hacia el interior de la misma, evitando así la acumulación de agua en la superficie, esto permite eliminar los problemas asociados a la contaminación del agua y las inundaciones (EPA, 1999).

Tennis *et al.* (2004) mencionan que la historia de los concretos permeables se remonta al año de 1852 donde este primer intento se usó en primer lugar en la construcción de dos casas en el Reino Unido. Pérez (2009) argumenta que, a finales de los años 1930, la Scottish Special Housing Association Limited adoptó el uso de concreto permeable para la construcción residencial. Para el año de 1942, el concreto permeable se había usado ya en la construcción de 900 casas. Pérez (2009) menciona que, a través de los años, el sistema de concreto permeable contribuyó a la producción de nuevas casas en el Reino Unido, Alemania, Holanda, Francia, Bélgica, Escocia, España, Hungría, Venezuela, África Occidental, el Medio Oriente, Australia y Rusia. En Alemania, después de la guerra, se usó este sistema debido a que la eliminación de grandes cantidades de escombros de ladrillos era un problema, llegando a la investigación de las propiedades del concreto permeable.

Aunado a lo anterior, a causa de la Segunda Guerra Mundial de 1939 a 1945 dejó a casi toda Europa con vastas necesidades habitacionales, lo que alentó el desarrollo de nuevos métodos de construcción de edificios, paneles prefabricados y bloques curados (Monahan, 1981). De manera notable, entre estos, estaba el concreto permeable que fue evolucionando en su aplicación a lo largo del tiempo. Ghafoori & Dutta (1995) nos dicen que la aplicación de pavimentos de concreto permeable son algo limitados y relativamente recientes, como ya se ha mencionado

anteriormente. Estos sistemas se han utilizado como material de construcción en Europa, Australia y el Medio Oriente por más de 60 años.

Los beneficios que se han logrado son los siguientes: la recarga de acuíferos (principal fuente de aguas en países europeos), el amortiguamiento de la lluvia, el aprovechamiento de encharcamientos (CIRIA, 2007). Además de lo anterior, los sistemas de pavimentos permeables nos han permitido dar solución a otros problemas más complejos que los mencionados anteriormente como pueden ser: para controlar el volumen de la escorrentía pluvial y consecuentemente disminuir la descarga de contaminantes en las aguas receptoras de acuerdo con Kamali *et al.* (2017).

2.4.2 Definición de concreto permeable

Elango & Revathi (2017) mencionan que un concreto permeable se puede describir como un concreto poroso que permite la penetración del agua a través de su red de poros y está constituido generalmente por cemento portland ordinario como aglutinante, agregado grueso, poco o nada de agregado fino y agua. La combinación de estos materiales producirá una mezcla endurecida con poros interconectados, estos poros varían de 2 a 8 mm de tamaño entre cada hueco, lo cual permite que al agua pueda filtrarse fácilmente a través de la estructura. El contenido de vacíos puede variar de 15 a 35%, y se pueden alcanzar resistencias a la compresión entre 28 y 280 kg/cm². La capacidad de drenaje de un pavimento de concreto permeable variará con el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente varía en el rango de 81 a 730 L/min/m² (ACI, 2010).

2.4.3 Aplicaciones

Xiang et al. (2011) mencionan que el uso principalmente del concreto permeable es peatonal y vehicular, en donde se requiere tener áreas permeables que permita que el agua de lluvia se infiltre libremente al subsuelo, reduciendo así el escurrimiento superficial. Aunado a esto, Henderson et al. (2009) mencionan que el uso de un concreto permeable es adecuado para la siguiente infraestructura:

- Calles residenciales
- Acotamientos de autopistas y carreteras
- Caminos
- Andadores, banquetas y carril bicicleta
- Terraplenes de puentes
- Área de estacionamientos
- Patios y jardines

La norma ACI 522R-10 “Reporte en Concreto Permeable” recomienda la colocación del concreto permeable en áreas de alta permeabilidad, suelo natural con una gran conductividad hidráulica. Además, las áreas no deberán tener pendientes mayores al 5%. En general, en todas estas aplicaciones se utiliza concreto permeable sin refuerzo, por el alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo debido a la estructura porosa de este material (ACI, 2010).

2.4.4 Materiales para un concreto permeable

2.4.4.1 Agregados

El tamaño del agregado debe ser de un tamaño uniforme para buscar la mayor permeabilidad posible en el concreto. Normalmente, las granulometrías de agregado grueso que se utilizan en un concreto deben cumplir con la norma ASTM C33, estas son: de la malla (3/4” a No. 4), (3/8” a No. 16), (3/8” a No. 50). Por lo

tanto, la norma ASTM D448 también puede ser utilizada para elegir las granulometrías, de manera que entre más grande sea el agregado, este proporcionará una superficie más porosa y por lo tanto más permeable.

Los agregados triturados, redondeados, normales y de peso ligero, se han utilizado para fabricar concreto permeable y estos deben satisfacer los requisitos estipulados en la norma ASTM D448 y C33.

2.4.4.2 Materiales cementantes

El cemento portland es el aglomerante principal y su función principal es la conexión entre las partículas de agregado grueso y este debe satisfacer las normas ASTM C150, C595 o C1157.

Solminihac et al. (2002) mencionan que al tener una mayor dosis de cemento generará un concreto más resistente, pero a su vez esto disminuirá el porcentaje de vacíos que interconectarán las partículas, perdiendo este su capacidad de infiltración. Con base en la investigación de Tennis et al. (2004) se hace una recomendación de utilizar un cemento que fluctúe entre los 270 y 450 kg/m³, según requisitos de resistencia y permeabilidad.

2.4.4.3 Agua

El uso de agua en la fabricación de un concreto permeable debe cumplir con la norma ACI 301. Los concretos permeables siempre deben ser diseñados con una relación agua-cemento (A/C) relativamente baja (0.26 a 0.45) debido a que una cantidad excesiva de agua puede generar el atascamiento de sistema de poros (ACI 522, 2006). La adición de agua, por lo tanto, tiene que ser vigilada cuidadosamente en el laboratorio.

2.4.5 Criterios de diseño de mezclas para un concreto permeable

Las principales variables para el diseño de un concreto permeable son las relaciones agregado-cemento (AG/C) y agua-cemento (A/C), estas variables afectarán directamente las propiedades mecánicas del concreto. Se han considerado algunos rangos permisibles para la dosificación de un concreto permeable. En la Tabla 2.6 se muestran los rangos de valores de referencia para la fabricación de un concreto permeable.

Tabla 2.6 Rangos típicos de las proporciones de materiales para un concreto permeable

Parámetro	Rango
Materiales cementantes (kg/m ³)	270 a 415
Agregado(kg/m ³)	1190 a 1480
Relación agua-cemento, en peso	0.26 a 0.45
Relación agregado-cemento, en peso	4 a 4.5:1
Relación agregado fino-agregado grueso, en peso	0 a 1:1

Fuente: Tennis *et al.* (2004).

2.4.5.1 Relación agua-cemento (a/c)

La relación agua-cemento tiene una gran influencia en las propiedades de la mezcla obtenida. Si es utilizada una cantidad insuficiente de agua, se obtendrá una mezcla sin consistencia y de baja resistencia a la compresión. Aunado a esto, si se tiene utiliza una cantidad excesiva de agua, generará que la pasta selle los espacios vacíos que hay entre las partículas; además, lavará el cemento dejando expuesto al agregado, produciendo aún más una resistencia baja en el concreto.

El valor de la relación A/C depende de la gradación y las características físicas de los agregados gruesos, así como el volumen del cemento de la mezcla.

En el concreto permeable, la relación A/C para obtener la trabajabilidad de un concreto es necesario que caiga dentro del rango 0.26 a 0.44. Al comprimir y soltar un puñado de mezcla esta no debe desmoronarse, se dice entonces que la relación agua-cemento es óptima. La consistencia correcta se obtiene normalmente a través de un proceso de inspección, que asegura que cada mezcla contiene cemento suficiente para recubrir las partículas gruesas con una película brillante, dándole un brillo metálico (Florida Concrete and Products Association, 2002).

Altas relaciones A/C puede resultar en que la pasta fluya desde el agregado y ocasione el rellenando de la estructura de vacíos. Asimismo, una baja relación A/C puede dar lugar a reducción de la adhesión entre las partículas de agregado y problemas en su colocación. En la Figura 2.7 se puede observar el resultado de combinar diferentes cantidades de agua y cemento.



Figura 2.7 Muestras de concreto permeable con diferentes relaciones agua-cemento (A/C).

Fuente: Tennis *et al.* (2004).

En resumen, la relación agua-cemento conforma uno de los parámetros más importantes en el diseño de un concreto permeable. Teniendo una buena relación entre estos dos elementos, se podrá asegurar una buena resistencia y permeabilidad de la estructura de pavimento.

2.4.5.2 Relación agregado-cemento

Las relaciones agregado-cemento (AG/C) en general varían entre 4:1 a 4.5:1, pero esta relación depende fundamentalmente del tipo de agregado que se utilice. Tanto la relación agua-cemento y la relación agregado-cemento deben satisfacer las características de permeabilidad, capacidad de carga y durabilidad.

2.4.5.3 Contenido de agregado grueso

Las pruebas de peso unitario seco-compactado de agregado grueso (b/bo) hecho por la National Aggregates Association – National Ready Mixed Concrete Association (NAA–NRMCA) muestra que el peso unitario seco-compactado del agregado grueso determinado de acuerdo con la norma ASTM C29 puede usarse en la proporción de la mezcla para el concreto permeable.

El valor b/bo automáticamente se compensa por los efectos de las diferentes formas de las partículas de los agregados, la graduación o tamaño y el peso específico. Además, para un rango de agregados de tamaño máximo nominal normalmente usados para concreto permeable (3/8" a 3/4") los valores b/bo son muy similares (ACI 211.3R, 1998), esto se puede apreciar en la Tabla 2.7 donde se muestran los diferentes valores de b/bo para un contenido de agregado fino de 0%, 10% y 20 % del total del agregado.

Tabla 2.7 Valores efectivos de b/bo.

Porcentaje de agregado fino (%)	b/bo	
	No. 8 (3/8")	No. 67 (3/4")
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Fuente: (ACI 211.3R, 1998).

Donde:

b/bo = volumen seco compactado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

b = volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

bo = volumen de agregado grueso por unidad de volumen de agregado grueso.

2.4.6 Propiedades del concreto permeable

Las propiedades del concreto permeable están relacionadas directamente con los materiales utilizados en el diseño de la mezcla, así como del contenido de material cementante, la relación agua-cemento, el nivel de compactación y el tamaño de los agregados y la calidad de los mismos (ACI, 2010).

2.4.6.1 Resistencia a la compresión

Wu Min-Hao et al. (2016) nos indican que un aspecto importante en el diseño de un pavimento permeable es la prueba de fuerza de compresión regida por la norma ASTM C39, donde se realizaron estudios al comportamiento de ladrillos permeables usados en estos sistemas de pavimentos, donde se determina la fuerza compresiva utilizando la ecuación:

$$C = \left(\frac{W}{A}\right) = \left(\frac{F}{A}\right) \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde: C= Fuerza Compresiva (mPa), W= Carga máxima (N), A= Área de compresión (cm²).

Por otro lado, Weiss *et al.* (2017) en su investigación mencionan que antes del diseño del pavimento permeable, se debe cuantificar la fuerza del suelo o la estabilidad propuesta por Interlocking Concrete Pavement (ICP) utilizando los siguientes parámetros:

- **Módulo de Resiliencia (Mr):** Valor mínimo aceptable Mn = 44.8 MPa (6500 Psi) (definido por AASHTO T-307).
- **California Bearing Ratio (CBR):** CBR = 4% (96-h húmedo por ASTM D 1883 o AASHTO T 193).
- **Resistencia (R-valor):** R-valor = 9 (según ASTM D 2844 o AASHTO T-190).

Smith (2011) recomienda una subbase mínima y un espesor de base para los sistemas PICP, donde se toman los valores arriba mencionados y se genera una tabla con diferentes rangos de parámetros como lo mostrado en la Tabla 2.8:

Tabla 2.8 Recomendaciones para base y subbase en sistemas de pavimentos permeables.

Pedestrian	Soaked CBR (R-value)	4 (9)	5 (11)	6 (12.5)	7 (14)	8 (15.5)	9 (17)	10 (18)
	Resilient Modulus, psi (Mpa)	6205 (43)	7157 (49)	8043 (55)	8877 (61)	9669 (67)	10,426 (72)	11,153 (77)
	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	6 (150)						
Vehicular	Soaked CBR (R-value)	4 (9)	5 (11)	6 (12.5)	7 (14)	8 (15.5)	9 (17)	10 (18)
	Resilient Modulus, psi (Mpa)	6205 (43)	7157 (49)	8043 (55)	8877 (61)	9669 (67)	10,426 (72)	11,153 (77)
Lifetime ESALs (Traffic Index)								
50,000 (6.3) and Residential Driveways	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)						
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	6 (150)						
100,000 (6.8)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)						
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	8 (200)	6 (150)					
200,000 (7.4)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)					
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	13 (325)	11 (275)	9 (225)	7 (175)	6 (150)		
300,000 (7.8)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)		
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	16 (400)	14 (350)	12 (300)	10 (250)	9 (225)	8 (200)	7 (175)
400,000 (8.1)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	19 (475)	16 (400)	14 (350)	12 (300)	11 (275)	10 (250)	9 (225)
500,000 (8.3)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	21 (525)	18 (450)	16 (400)	14 (350)	12 (300)	11 (275)	10 (250)
600,000 (8.5)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	22 (550)	19 (475)	17 (425)	15 (375)	14 (350)	12 (300)	11 (275)
700,000 (8.6)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	24 (600)	21 (525)	18 (450)	17 (425)	15 (375)	14 (350)	12 (300)
800,000 (8.8)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	25 (625)	22 (550)	20 (500)	18 (450)	16 (400)	15 (375)	13 (325)
900,000 (8.9)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	26 (650)	23 (575)	21 (525)	19 (475)	17 (425)	16 (400)	14 (350)
1,000,000 (9)	Base thickness, in. (mm) ASTM No. 57	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)	4 (100)
	Subbase thickness in. (mm) ASTM No. 2	27 (675)	24 (600)	21 (525)	19 (475)	18 (425)	16 (400)	15 (375)

Fuente: Smith (2011).

2.4.6.2 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión, o llamado módulo de ruptura, se usa en el diseño de pavimentos o losas de concreto sobre el terreno. La resistencia a flexión se puede definir como la resistencia a tracción del concreto (ASTM, 2010). La resistencia a la flexión es una de las características técnicas más importantes que presenta el concreto permeable, debido a que su resistencia a la flexión es mejor que la del concreto hidráulico convencional, comúnmente es 30% de la resistencia a la compresión, es decir, relativamente más alta que en el concreto convencional (Pérez, 2009).

La Figura 2.8 muestra la relación entre la flexión del concreto permeable y el contenido de vacíos en especímenes de vigas ensayadas en la misma serie de ensayos de laboratorio.

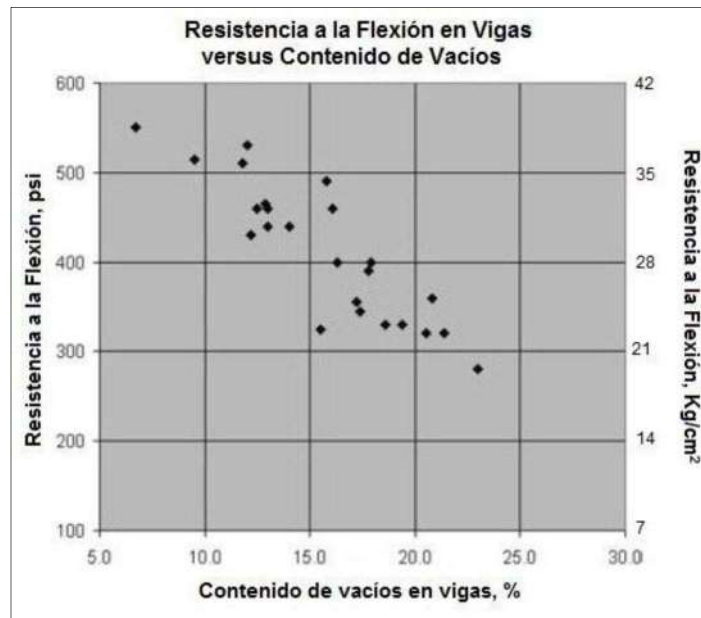


Figura 2.8 Módulo de ruptura con respecto al contenido de vacíos de la mezcla de concreto permeable.

Fuente: Meininger, (1988).

2.4.6.3 Revenimiento

El revenimiento, o asentamiento, generalmente es usado para medir la consistencia de una mezcla de concreto en estado fresco. Entre mayor sea el revenimiento, quiere decir que la mezcla es más húmeda. Una característica que tienen las mezclas de concreto permeable es tener un revenimiento de “cero slump” y al medir su valor, generalmente se obtienen valores de 0 a 1 cm. El procedimiento de este ensaye se puede ver en la norma ASTM C143.

2.4.6.4 Permeabilidad

A medida que aumenta la aplicación de los pavimentos completamente permeables, también aumenta la necesidad de una herramienta adecuada para medir la funcionalidad de la infiltración superficial de los pavimentos permeables, especialmente con respecto a la obstrucción que existe entre los espacios vacíos entre cada partícula del agregado pétreo (Cooley & Brown, 2000; Haselbach *et al.*, 2006; Kayhanian *et al.*, 2012; Maupin, 2001; Prowell & Dudley, 2002). Prowell & Dudley (2002) comparan el dispositivo del permeámetro utilizado en campo por the National Center for Asphalt Technology (NCAT) y el implementado en laboratorio usando el método estándar ASTM PS129-01 para el pavimento de asfalto y así determinar cuál de los dos arroja resultados más confiables. Por otro lado, Li Hui *et al.* (2013) mencionan un nuevo método estándar ASTM C1701 que fue desarrollado exclusivamente para medir la permeabilidad en campo de pavimentos permeables.

La fórmula empírica de Darcy (Darcy 1856; Ponce, 1989) para calcular el flujo de agua a través de medios porosos saturados ha sido utilizada para el análisis de este tipo de concreto y la cual se menciona a continuación:

$$Q = K_s * Ai = K_s * A\left(\frac{dh}{dl}\right) \quad \text{Ec. (2)}$$

Dónde: Q= El caudal a través de medios porosos saturados en m³/s, K_s = Coeficiente de permeabilidad en m/s, A= Área Transversal de la sección en m², i= Gradiente hidráulico.

De acuerdo con el National Center for Asphalt Technology (NCAT) para obtener el cálculo del coeficiente de permeabilidad empleando la fórmula de Darcy, en donde el K_s se representa por la siguiente expresión:

$$Q = K_s * Ai = K_s * A \left(\frac{dh}{dl} \right) \text{ Ec. (3)}$$

$$K_s = \frac{al}{At} * Ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \text{ Ec. (4)}$$

$$Q = \frac{al}{At} * Ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) * A \left(\frac{dh}{dl} \right) \text{ Ec. (5)}$$

Dónde: a = Diámetro interno de la sección transversal del tubo de entrada en cm, l= Espesor de la capa permeable en cm, t = Tiempo medio transcurrido del flujo de agua entre las marcas de temporización (t1-t2) en segundos.

Se tomará la fórmula de Darcy para el cálculo de la permeabilidad sustituyendo el K_s en la expresión de Darcy.

Li hui *et al.* (2013) mencionan que, para medir la permeabilidad en campo de una manera precisa, es importante evitar que no haya fugas de agua entre la superficie del pavimento y la base del permeámetro.

2.5 PROCESOS PARA LA EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS EN MATRICES SÓLIDAS

Los metales pesados son elementos químicos de alta densidad y se encuentran en una gran variedad de productos y residuos de la minería, residuos de pinturas y colorantes, subproductos de la corrosión de tuberías y depósitos metálicos (Schuurmann et al., 1998; MacFarlane et al., 2000). En México una fuente de contaminación de elementos tóxicos importantes es debido a la actividad industrial. Desde que comenzó esta actividad, se han generado diversos tipos de residuos peligrosos que han sido depositados en sitios inadecuados como terrenos aledaños que fueron adquiridos por las plantas para poder desecharlos en esa zona (Volke et al., 2005).

El suelo puede llegar a ser un receptor primario o secundario, según sea su depositación directa o indirecta (como la precipitación atmosférica). Los efectos sobre las funciones que cumple un suelo y su transferencia hacia los seres vivos, el agua y el aire, dependen, en gran medida del tipo de suelo en el que se depositan los contaminantes, ya que los diferentes tipos de suelo difieren en su vulnerabilidad a ser degradados (Manzanares et al., 2006). Entre los contaminantes del suelo se encuentran los metales pesados, los metaloides como el arsénico y el selenio, los cuales pueden presentar diferentes estados de oxidación en el agua, el aire y el suelo; por ende, diferentes grados de reactividad, carga iónica y solubilidad en el agua.

Según Holmes et al. (2017) un concreto permeable puede funcionar como un material reactivo, o bien, un medio pasivo de filtración a través de los mismos mecanismos que los sistemas tradicionales: (1) absorción, (2) precipitación y (3) difusión debido a la composición del concreto. Un segundo paso de retención puede ocurrir cuando los contaminantes se difunden desde la superficie hacia la matriz agregada de pasta de cemento hidratada, lo que permite una remoción adicional a largo plazo, como se puede observar en la Figura 2.9.

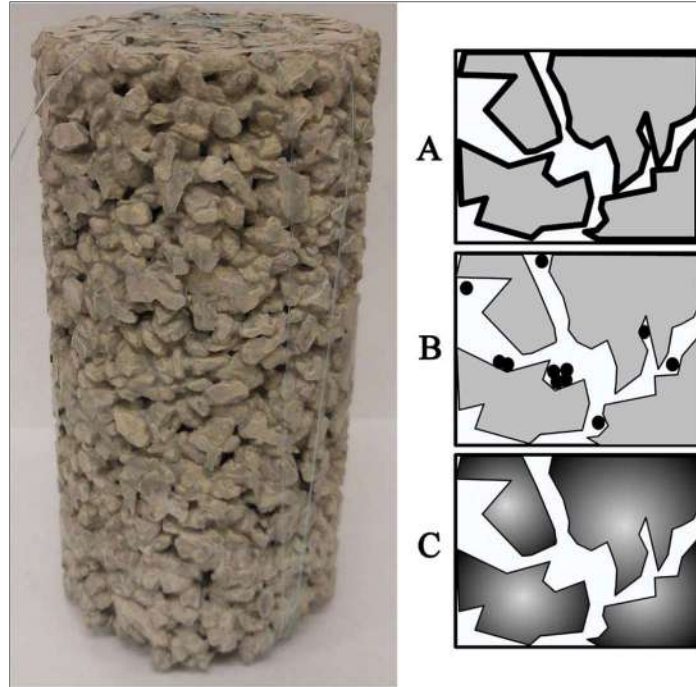


Figura 2.9 Mecanismo de remoción de contaminantes con un concreto permeable.

Fuente: Holmes et al., 2017.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 nos permitirá analizar cuáles son los parámetros idóneos para que el agua con contaminantes que es infiltrada a los sistemas de concreto permeables pueda estar dentro de los límites marcados en la norma para uso y consumo humano y se caracterizan de la siguiente manera:

- Características Bacteriológicas.
- Características Físicas y Organolépticas.
- Características Químicas.
- Características Radiactivas.

Dentro de los límites permisibles para los metales que más abundan en el escurrimiento superficial según la literatura dentro de un pavimento permeable serán los que se muestran en la Tabla 2.10:

Tabla 2.9 Límites permisibles de concentración de metales en el agua.

CARACTERÍSTICA	LIMITE PERMISIBLE (mg/l)
Aluminio	0.2
Arsénico	0.05
Cadmio	0.005
Cobre	2
Plomo	0.025
Zinc	5

Fuente: NOM-127-SSA1-1994.

2.6 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS

2.6.1 Absorción atómica

La espectrometría de absorción atómica (EAA) es una técnica analítica para la determinación de elementos basados en la absorción de energía radiante por átomos libres en su estado basal (Welz et al., 2005). Este método puede ser empleado por tres procesos de atomización diferentes, que son: espectrometría de absorción atómica de llama, espectrometría de absorción atómica por atomización electrotérmica, y espectrometría de absorción atómica de generación de vapor químico. Sin embargo, el uso adecuado de alguno de estos procesos estará determinado por el contenido de la muestra, así como la composición química de la muestra y su estado físico (Leopoldo et al., 2016). La única desventaja de la absorción atómica es que no es una técnica de medición de elementos múltiples, por lo que hace más limitado el trabajo de identificación de todos los elementos traza. Además, la técnica estandarización interna, que a menudo se recomienda para las correcciones de interferencias de la matriz (Ferreira *et al.*, 2018).

2.6.2 Espectrometría de fluorescencia de rayos X de reflexión total (TXRF)

Cataldo (2012) menciona que la técnica de fluorescencia de rayos x de reflexión total es un método competitivo en comparación con la espectroscopia de absorción atómica (EAA). Los límites de detección de la técnica TXRF son comparables con respecto a la espectroscopia de absorción atómica (Klockenkämper, 1997).

TXRF es una técnica no destructiva que mide la composición elemental de una sustancia, al exponerla a una radiación de rayos X. Los rayos X, al incidir sobre una muestra, la ionizan haciendo que en la muestra se expulsan electrones de sus capas más internas; estos iones son altamente inestables y sus vacantes son ocupadas por electrones de capas superiores, en cascada. Estos saltos de electrón de un nivel de mayor energía a uno de menor energía desprenden una radiación característica que es la fluorescencia de rayos X. El conjunto de saltos entre capas de un elemento es el formador del espectro característico que es único para cada elemento (Gutiérrez & Ranz, 2010). La fluorescencia es un proceso de emisión de importancia analítica, en el que los átomos de las moléculas se excitan mediante la absorción de un haz de radiación electromagnética; la emisión radiante se produce cuando las especies excitadas regresan al estado fundamental (Skoog *et al.*, 2001).

El análisis cualitativo se obtiene a partir de la conversión de la energía emitida por la radiación de fluorescencia de rayos X, que logra una clara e inequívoca identificación de cada uno de los elementos presentes en la muestra, ya que la longitud de onda es única para cada elemento, y el análisis cuantitativo se logra con la intensidad de los rayos X, que es directamente proporcional a la concentración del elemento (Meléndez & Camacho, 2009).

Las principales ventajas de TXRF son: análisis simultáneo de trazas de múltiples elementos que incluyen halógenos, análisis de cantidades de muestra muy pequeñas en nanogramos o microgramos, cuantificación simple utilizando un

estándar interno, adecuado para diversos tipos de muestras y aplicaciones, bajos costos operativos, se requiere un corto tiempo para realizar la preparación de la muestra y la medición de TXRF, alta sensibilidad y límites de detección bajos en el orden de ppm (Margui *et al.*, 2010).

El uso del espectrómetro de fluorescencia de rayos X ofrece la ventaja de realizar determinaciones de multielementos en tiempos cortos, reduciendo el tiempo de espera de los análisis tradicionales, como espectroscopia de absorción atómica o espectroscopia de emisión atómica acoplada inductivamente a un plasma, ya que las muestras no tienen que someterse a tratamiento de digestión (USEPA, 2007).

La técnica de fluorescencia de rayos X se usa en diversas aplicaciones industriales para realizar análisis elementales de la composición de diversos materiales. Esta técnica de análisis se utiliza para determinar metales y metaloides en suelos (International Atomic Energy Agency, 2005).

El Método de Fluorescencia de rayos x por reflexión total también conocido como TXRF por sus siglas en inglés, es un método más nuevo comparado con la espectrofotometría de absorción y emisión atómica. Este método funciona de la siguiente manera: un haz bien colimado emitido por un tubo de rayos-X, se apunta con incidencia de roce en un plano óptico que es donde se pone la muestra a analizar. Arriba de la muestra va un detector que mide la fluorescencia proveniente de la muestra. Con este método se puede analizar simultáneamente Cr, Mn, Fe, Cd, Co, Ni, Cu, Zn y As a niveles de traza (mg/l) (Hernandez & Gonzales, 2002; Beckhoff *et al.*, 2006; Olivera & William, 2004).

En esta investigación, se utilizó un espectrómetro TRFX portátil de sobremesa (S2 PICOFOX, Buker AXS Microanálisis GmbH). Este aparato cuenta un tubo de metal cerámica con rayos X de baja potencia refrigerado por aire con un objetivo de molibdeno, trabajando a una potencia máxima de 50 W, y un detector de deriva de silicio (SDD) sin nitrógeno líquido (Bruker, 2007). Las especificaciones técnicas del instrumento se resumen en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Especificaciones técnicas del equipo S2 PICOFOX

Tubo de Rayos X Óptica	50 W (50 kV, 1 mA), objetivo Mo Monochromator multicapa, 17.5 keV
Detector, área, resolución Carrier Quartz	Deriva del silicio 10 mm ² , ~ 140 eV @ K α -Mn 30 mm de diámetro
Carrusel de la estación	Muestra para 25 discos
Control	PC, transferencia de datos a través de interfaz en serie
Tamaño, peso	590×450×300 mm, 37 kg
Fabricante	Bruker AXS Microanalysis GmbH

Fuente: Bruker, 2007.

2.6.2.1 Calibración en TXRF

La prueba de calibración del instrumento TXRF se realiza a través de la medición de múltiples elementos estándares que contengan concentraciones certificadas de 1 mg/l de contaminante (Bruker Nano GmbH, Alemania). Los espectros de respuesta de cada elemento son procesados con el software S2 PicofoxTM con un tiempo de medición de muestra de 1000 s (tiempos reales), esto para verificar que los picos del espectro puedan observarse de la mejor manera posible. Finalmente, la concentración de los elementos se calculó a partir de la ecuación (3) utilizando las intensidades y las sensibilidades relativas de los elementos a analizar que son valores adimensionales que indican las intensidades máximas de los elementos respectivos en relación con la cantidad de muestra (S2 PICOFOX, Manual de usuario, 2011).

$$C_i = \frac{C_{IS} * N_i * S_{IS}}{N_{IS} * S_i} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde: C_i es la concentración del elemento a analizar, C_{IS} es la concentración del estándar interno, N_i es el número de pulso neto dentro del espectro de medición del elemento a analizar, N_{IS} el número de pulso neto dentro del espectro de medición del estándar interno, S_i la sensibilidad relativa del elemento i , S_{IS} la sensibilidad relativa del elemento estándar interno.

2.6.3 Espectrometría de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF) para análisis elemental

La fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF) es una técnica analítica que permite la identificación de elementos químicos presentes en muestras tanto sólidas como líquidas y en las que se requieren el uso de técnicas no destructivas.

Los instrumentos que contienen los análisis EDXRF son: la fuente de excitación, el detector de radiación de fluorescencia y el analizador multicanal. En los espectrómetros EDXRF, el tubo de rayos X genera el haz primario que irradia la muestra y excita la radiación de fluorescencia en modo continuo, cubriendo un amplio intervalo espectral con altos voltajes e intensidades de corriente controlables con pequeños incrementos en el rango de operación que oscilan entre 1 kV y 50 kV y entre 10 μ A y 1000 μ A. Esto permite excitar todos los elementos presentes en la muestra. La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición de electrones. Es decir, la salida de un análisis EDXRF es un espectro que muestra la intensidad de radiación en función de la energía, como se muestra en la Figura 2.10, donde se aprecian los picos del análisis de una muestra sólida.

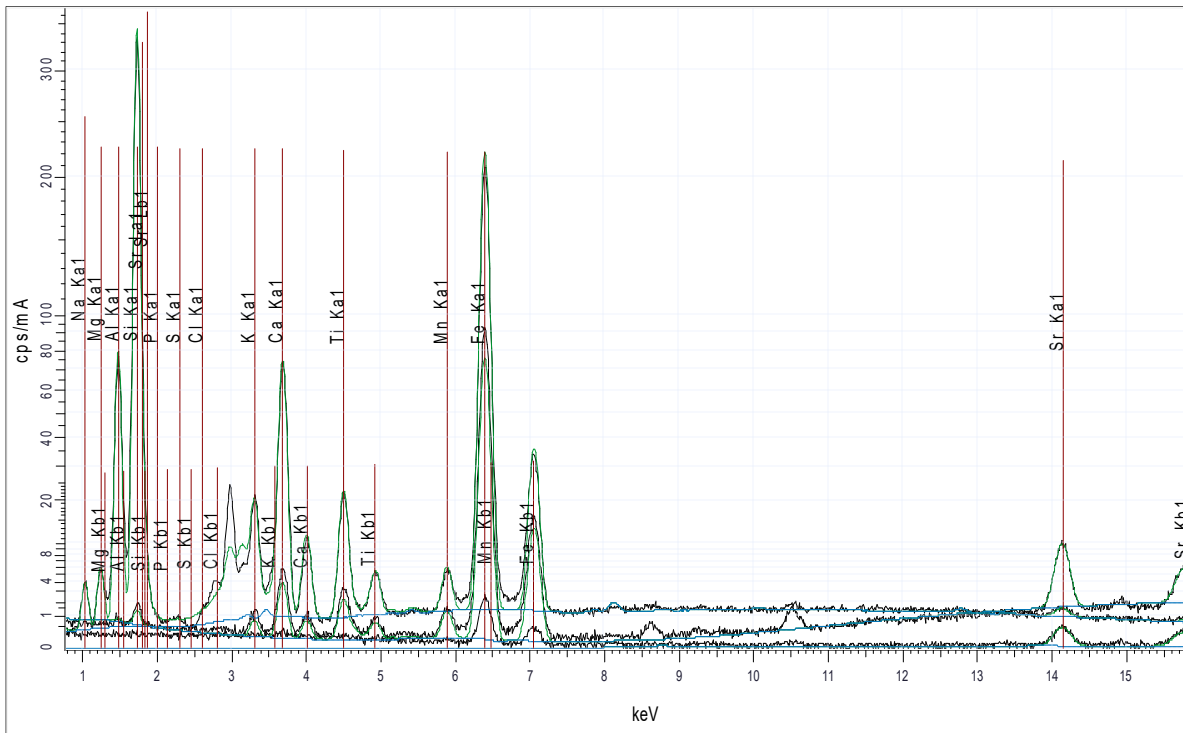


Figura 2.10. Espectro de respuesta de análisis mediante técnica de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF).

Fuente: Elaboración Propia.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 3.1 se muestra la metodología que se realizó en esta investigación.

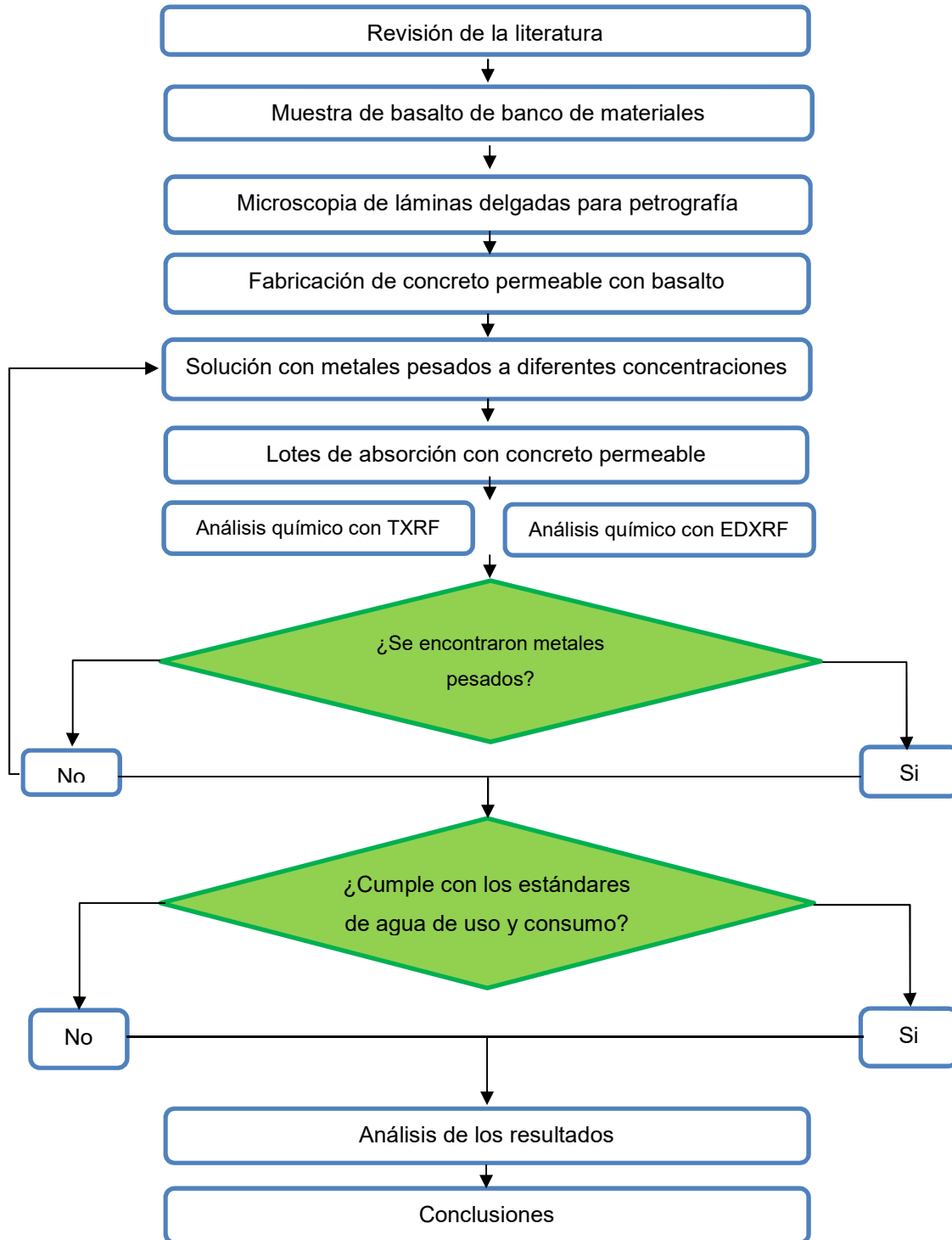


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de la investigación.

3.1 Caracterización de los agregados para la mezcla de concreto permeable

3.1.1 Muestreo en banco de materiales

Antes de realizar el muestreo de materiales es necesario ubicar las fuentes de abastecimiento y la cercanía que tienen los diferentes bancos de materiales de la zona metropolitana de Querétaro, así como también determinar el material que predomina en esa zona. Las fuentes de agregado pueden ser depósitos fluviales, volcánicos, almacenes de plantas de procesamiento o fabricación de agregados artificiales.

Los bancos más cercanos fueron ubicados por medio del inventario de bancos de materiales de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), y el tipo de material que predomina en cada banco se obtuvo del mapa digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), como se muestra en la Figura 3.2 y Figura 3.3, respectivamente, a cada una de las fuentes de información.



Figura 3.2 Inventario de banco de Materiales de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

Fuente: SCT (2016).



Figura 3.3 Tipos de Suelos de acuerdo con la zona donde se ubica el banco de materiales.

Fuente: INEGI (2017).

Una vez identificados los posibles bancos de materiales de acuerdo a su cercanía, accesibilidad y sobre todo al tipo de material que predomina en esa zona, se realizó una visita a cada uno de ellos para observar el proceso de trituración y control de calidad de cada planta de procesamiento. Esta actividad fue fundamental para tomar la decisión de cual banco utilizar el agregado pétreo para la fabricación de la mezcla del pavimento permeable.

El muestreo de materiales es una actividad de gran importancia, ya que es en esta etapa donde se procede a recolectar el material necesario tanto de arenas como de gravas para la elaboración de la mezcla de concreto. Es necesario que esta actividad se realice como lo establece la normativa mexicana NMX-C-030 (2004) para garantizar que la muestra resulte representativa de la fuente de abastecimiento.

Existen diferentes formas de realizar el muestreo para garantizar que realmente se esté tomando una muestra representativa de todo el abastecimiento.

En el caso de este estudio se realizaron canales verticales desde la parte superior del abastecimiento hasta la parte inferior, esto con el fin de mezclar de manera equitativa los agregados más gruesos ubicados en la parte inferior con los más finos ubicados en la parte superior.

La masa mínima de las muestras es de 100 kg para el caso de las arenas y de 150 kg para la grava. En la Tabla 3.1 se muestra las masas mínimas que se requieren de material de banco para el muestreo de materiales.

Tabla 3.1 Masa mínima requerida para el muestreo de materiales.

Material	Tamaño máximo nominal (en mm)	Pasa por la malla (Criba No.)	Masa mínima de la muestra de campo* (en kg)
Arena	Hasta 5	4.75 mm (No.4)	100
Grava	Hasta 75	75 mm (3")	150
Grava	Mayor de 75	---	200
Grava	Cualquiera	---	300

* En agregados ligeros (aquellos cuya masa específica sea inferior de 2.0) Estas masas deben multiplicarse por 0.65.

Fuente: SCT-NMX-C-030, 2004.

3.1.2 Reducción de la muestra de agregados

Una vez realizado el muestreo, y la obtención de todo el material requerido para la elaboración de concreto, es necesario reducir el tamaño de la muestra para obtener porciones representativas, las cuales serán utilizadas en las pruebas de caracterización del agregado. La reducción del material se realiza hasta obtener el tamaño apropiado para la prueba a realizarse, tal como lo establece la norma mexicana NMX-C-170, como se muestra en la Figura 3.4.

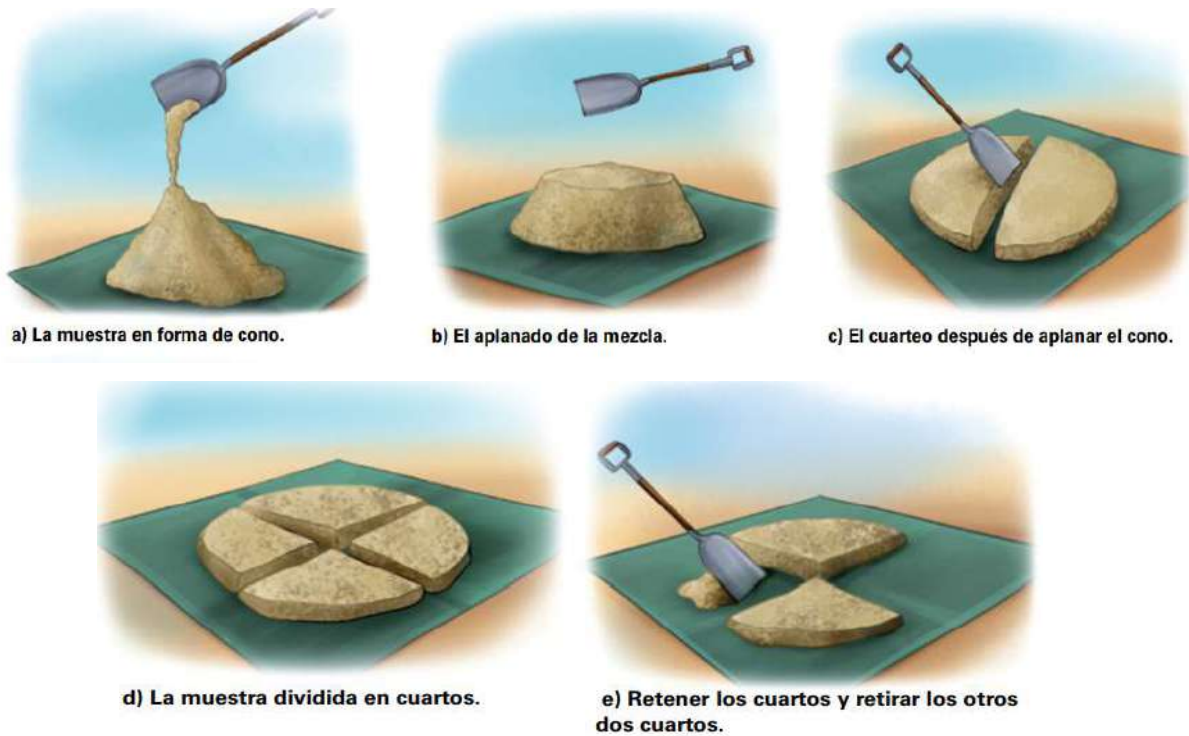


Figura 3.4 Procedimiento para reducir el tamaño de una muestra.

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (2010).

Existen dos métodos para la reducción de la muestra de agregados, el primero es mediante un cuarteador mecánico y el segundo de manera manual. Para esta investigación se utilizó el cuarteo de manera manual, ya que los cuarteadores mecánicos no estaban disponibles en el laboratorio.

3.1.3 Microscopía de láminas delgadas de rocas para análisis petrográfico

Una vez realizado el muestreo del banco de materiales y la reducción del tamaño de la muestra, se realizó la clasificación del agregado pétreo. El primer paso para obtener las láminas delgadas es la preparación de las rocas que se van a cortar para el análisis de las muestras. Se marcaron las siglas de cada uno de los especímenes que se obtuvieron en el banco de materiales, para posteriormente elegir el plano de corte de la roca como se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Muestras de rocas obtenidas del banco de materiales

Para cortar las rocas se utilizó una cortadora de disco adiamantado refrigerado por agua, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Utilización de la cortadora para poner una cara plana de la roca.

Posteriormente, se cortaron las rocas en prismas rectangulares con dimensiones aproximadas de 4cm x 3cm x 1cm, como se observa en la Figura 3.7.



Figura 3.7 Corte de la roca.

La lámina generada se desbastó por una de las caras planas utilizando un polvo de carburo de silíceo de diferentes texturas de grano (desde grado 100 hasta 1000), y mezclado con agua (lubricante) sobre cristales esmerilados. Sobre la cara pulida se pega el portaobjetos, utilizando resina epoxi y haciendo presión para que no queden burbujas, como se muestra la Figura 3.8.



Figura 3.8 Utilización de resina epoxi para pegar el porta objetos.

Posteriormente, se depositan las láminas delgadas sobre una plancha caliente unos minutos. Una vez pegadas están listas para generar otro corte, como se muestra en a la Figura 3.9.



Figura 3.9 Utilización de una plancha caliente para secar la muestra.

Se realizó un corte de la muestra con la perfiladora para llegar a un espesor de muestra de 1 mm aproximadamente., como se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10 Cortadora-rectificadora de muestras a 30 micras.

3.1.4 Granulometría por el método de mallas

La granulometría de los agregados pétreos se determinó con forme lo establece la norma NMX-C-077 (1997). A partir de los datos obtenidos en la granulometría se obtuvo la clasificación de acuerdo a la curva granulométrica.

Asimismo, el tamaño máximo nominal de las gravas (TMA) se determinó de la granulometría de estas.

La granulometría de los agregados nos sirve para determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños que conforman a la muestra general. Para esta investigación se tomarán en cuenta solo un tipo de agregado grueso que corresponden con el retenido en 3/8" se utilizará para el diseño de la mezcla de concreto permeable.

Los agregados finos fueron cribados por medio de las mallas de 3/8", y no. 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200; mientras que en los agregados grueso se utilizaron las mallas de 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4" y no. 4, como se muestra en la Figura 3.11.

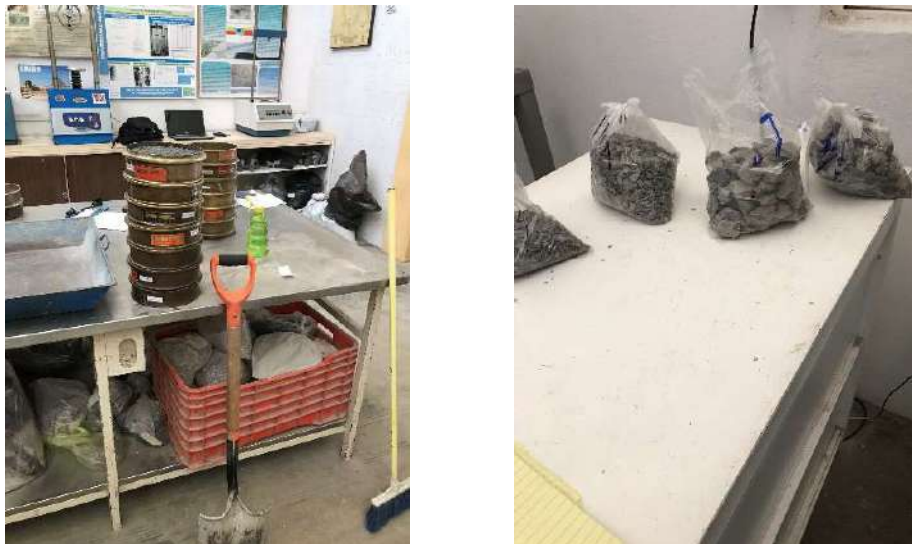


Figura 3.11 Material para realizar la prueba de granulometría por mallas.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.5 Densidad, absorción y humedad del agregado grueso

La prueba de densidad relativa o peso específico del agregado grueso para determinar su capacidad de absorción se realizó acorde a la norma mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014. Con respecto al contenido de humedad del material se realizó mediante la normativa ASTM D2216.

La densidad específica relativa de un agregado es la relación entre su masa y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Con esto, se obtendrán tres valores fundamentales para el diseño de la mezcla, que serán la absorción del agregado pétreo para el concreto permeable, densidad en la condición saturada superficialmente seca y el contenido de humedad del suelo que se mencionarán a continuación.

En la Figura 3.12 se muestra el proceso de sumergido de la grava para saber su densidad saturada superficialmente seca.



Figura 3.12 Determinación de la condición saturada superficialmente seca de una grava.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el valor se utilizó la siguiente ecuación:

$$D_{r\ sss} = \frac{M_{sss}}{M_{sh} - M_{cms}} \text{ Ec. (7)}$$

Donde:

M_{sss} = Masa de la muestra saturada superficialmente seca.

M_{sh} = Masa de la muestra secada al horno.

M_{cms} = Masa de la canasta más la muestra sumergida.

La ecuación para determinar el porcentaje de absorción del material será la siguiente:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{M_{sss}(g) - M_{ms}(g)}{M_{ms}(g)} \text{ Ec. (8)}$$

Donde:

M_{sss} = Masa de la muestra superficialmente seca (g)

M_{ms} = Masa de la muestra seca (g)

Por último, para determinar el contenido de humedad que presenta el material se utilizó la siguiente expresión:

$$W = \frac{P_a(g)}{P_{ss}(g)} * 100 \text{ Ec. (9)}$$

Donde:

P_a = Peso del agua (g)

P_{ms} = Peso seco del suelo (g)

3.1.6 Masa volumétrica del agregado grueso

Para obtener los valores correspondientes a la masa volumétrica seca suelta y la masa volumétrica seca compacta para el agregado traído del banco de materiales que se utilizará en la mezcla del concreto permeable se utilizó el procedimiento y las especificaciones que establece la norma mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004.

La masa volumétrica determina el espacio que ocuparan los agregados, además de los vacíos que se generan entre cada partícula de grava. Este valor es determinado mediante el uso de un recipiente con volumen y con sus pesos previamente medidos para la realización de la prueba como se puede ilustrar en la Figura 3.13.



Figura 3.13 Medición del volumen y peso del recipiente para determinar las masas volumétricas.

Después de haber obtenido sus medidas, se procede a hacer un cuarteo del material previamente muestreado para realizar la prueba, la forma correcta de hacer el llenado del recipiente es dejando caer el agregado de una altura de 10 cm a 15 cm aproximadamente a partir de la parte superior del recipiente y dejándolo acomodarse solo para la prueba de la masa volumétrica seca suelta. En el caso de la compactada se realizará un llenado de tres capas con recipiente añadiéndole 25 golpes con una varilla punta de bala entre cada capa. Posteriormente para cada prueba se enrasa el recipiente para quitar el exceso de agregado en el envase y se pesa como se puede ilustrar en la Figura 3.14.

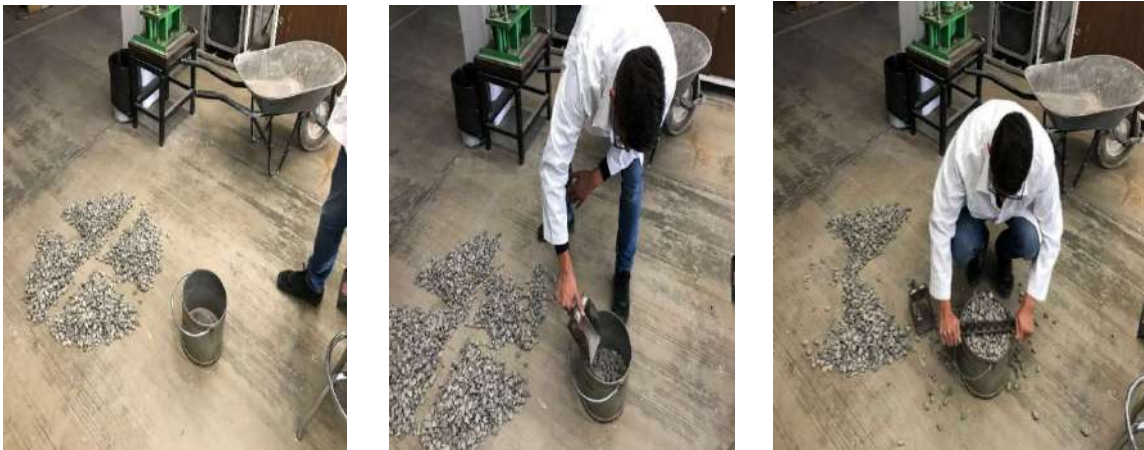


Figura 3.14 Determinación de la masa volumétrica de los agregados.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Procedimiento para el diseño de la mezcla de concreto permeable

3.2.1 Determinación del porcentaje de vacíos

La elección del porcentaje de vacíos que tendrá el diseño de un concreto permeable está ligado directamente a la velocidad de infiltración de agua pluvial requerida para la zona de estudio, la cual se determina por la intensidad de un evento hidrológico, tanto para el periodo de retorno, como para la duración de dicho evento.

Esto se obtiene con los datos históricos de precipitación en el lugar donde se implementará el pavimento permeable. En la Figura 3.15 se muestra la relación entre el contenido de vacíos y la tasa de infiltración de la mezcla de concreto permeable.

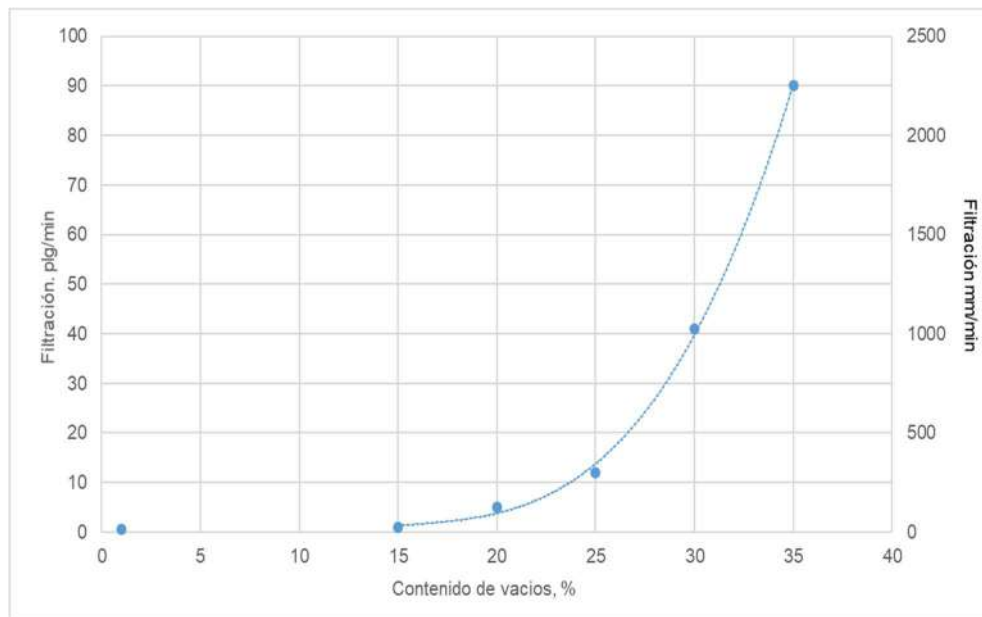


Figura 3.15 Relación entre contenido de vacíos y permeabilidad del concreto permeable.

Fuente: Adaptado de ACI 522-10, ACI 211.3R-02.7

3.2.2 Determinación de la resistencia a la compresión de diseño

Una vez obtenido el porcentaje de vacíos con respecto a la tasa de infiltración, como se muestra en la Figura 5.8, se puede suponer la resistencia a compresión que puede tener el diseño de la mezcla del concreto permeable. En la Figura 3.16 se puede observar los valores de resistencia a la compresión desarrollados a los 28 días por los cilindros de concreto permeable elaborados con los tamaños de agregados de 3/4" y 3/8".

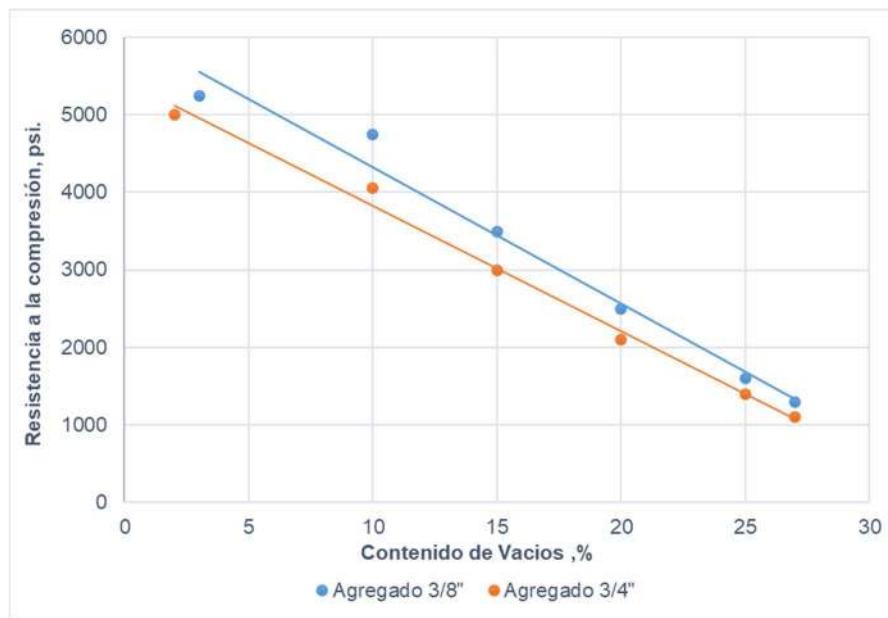


Figura 3.16 Relación entre el contenido de vacíos y la resistencia a la compresión a los 28 días.

Fuente: Adaptado de ACI 522-10, ACI 211.3R-02.

3.2.3 Determinación del volumen de pasta

El procedimiento de proporcionamiento para concreto permeable está basado en el volumen de pasta necesario para mantener unidas las partículas de agregado, mientras se mantiene la estructura necesaria de vacíos. Para el cálculo

del volumen de pasta basado en el documento ACI 255R-10 y ACI-211.3R-02, en el cual, a partir del contenido de vacío elegido para el diseño de la mezcla, se puede obtener el porcentaje del volumen de pasta en la mezcla.

La cantidad de agregado depende del peso unitario seco compactado y de los valores de b/bo seleccionados de la Tabla 7 (ACI 211.3R, 1998).

En la Figura 3.17 se muestra la relación entre el contenido de vacíos y el volumen de pasta necesario para la elaboración de los concretos permeables con agregados gruesos de 3/4" y 3/8".

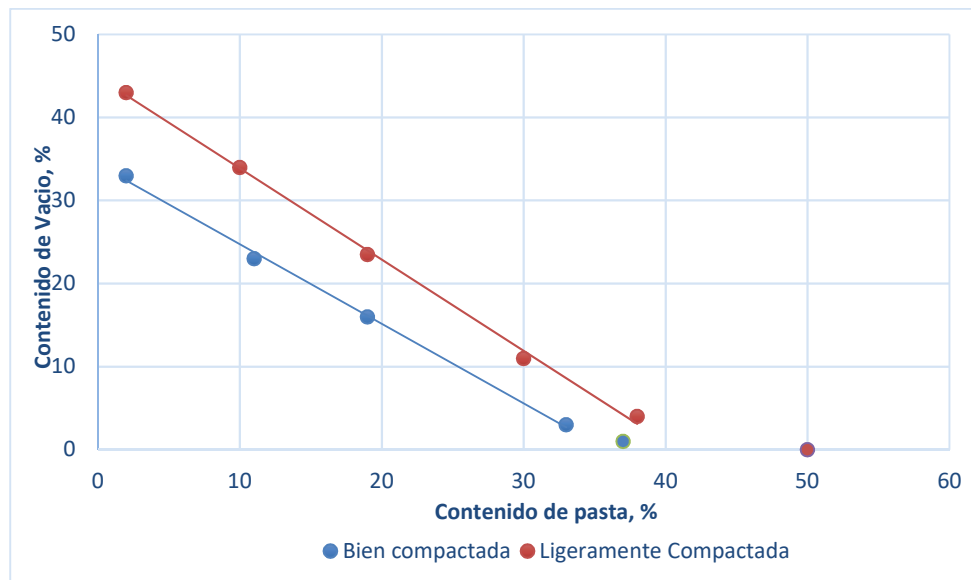


Figura 3.17 Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregados 3/4" y 3/8".

Fuente: Adaptado de ACI 522-10, ACI 211.3R-02.

Como se aprecia en esta gráfica existen dos curvas, las cuales definen el tipo de compactación que tendrán cuando se vacíe el concreto permeable en las probetas de ensayo. La curva ligeramente compactada incrementará el volumen de pasta y la bien compactada disminuye el volumen de pasta, esta condición se identifica en un mismo porcentaje de vacíos.

Por lo tanto, una vez que se determinó el volumen de pasta de la Figura 18, se puede determinar el peso del cemento portland y el peso del agua por metro cúbico de mezcla, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Vp = Vc + Va \text{ Ec. (10)}$$

Donde:

Vp = Volumen de pasta

Vc = Volumen de cemento

Va = Volumen de agua

Por lo tanto, la ecuación puede quedar expresada como:

$$Vp = \frac{c}{\gamma_c * 1000} + \frac{\left(\frac{a}{c}\right) * c}{\gamma_a * 1000} \text{ Ec. (11)}$$

Donde:

c = Peso del cemento por m3 de mezcla.

A = Peso del agua por m3 de mezcla.

Yc = Peso específico del cemento.

Ya = Peso específico del agua.

a/c = Relación agua-cemento.

Cuando el agregado fino es utilizado, el volumen de pasta debe ser reducido en 2% por cada 10% del agregado fino del total del agregado para concreto permeable bien compactado y por cada 1% por cada 10% del agregado fino del total del agregado para concreto permeable ligeramente compactado (ACI 211.3R-02). Estas reducciones son utilizadas para mantener el mismo porcentaje de vacíos por volumen.

3.2.4 Elección de la relación agua-cemento

En cuanto a la relación agua-cemento (a/c), el reporte ACI 211.3R-02 recomienda utilizar una relación entre 0.35 a 0.45; los que aseguran que la pasta recubra por completo todos los áridos, uniéndolos de tal forma que no comprometan la formación de poros y por ende su permeabilidad. Un exceso de agua puede generar el colapso del sistema de poros que son lo más importante en este tipo de concreto ya que ellos son los que permiten el paso del agua. Un déficit de agua produce una ligadura deficiente entre los áridos.

3.2.5 Método de volúmenes absolutos y corrección

Una vez obtenido el porcentaje de vacíos, volumen de pasta y la relación agua/cemento, se calcula la cantidad de cada material convirtiendo a un volumen absoluto por metro cúbico en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS) como se realiza en el concreto convencional. Posteriormente, se corrige luego por humedad y se obtiene la cantidad de materiales por metro cúbico para el diseño.

3.2.5.1 Corrección por humedad y absorción

El contenido de humedad, se refiere a la condición actual del agregado que por motivo de exposición al ambiente ha podido perder o ganar agua; el porcentaje de absorción es la capacidad que tiene el agregado de absorber agua. Entonces si al contenido de humedad (condición presente en el vaciado) se le resta el porcentaje de absorción (capacidad de absorber agua), estamos conociendo la cantidad de agua que el agregado va absorber durante el vaciado, por lo tanto, se sabe de la cantidad de agua que debemos retirar o adicionar del seco para corregirlo, teniendo:

% Contenido de Humedad > % Absoluto: Se retira agua en el diseño SSS.

% Contenido de Humedad < % Absoluto: Se adiciona agua en el diseño SSS.

3.2.5.2 Agua

El concreto permeable debe ser proporcionado con una relación agua-cemento (a/c) relativamente baja (0.35 a 0.45) ya que una cantidad excesiva de agua conducirá a drenar la pasta y el atascamiento del sistema de poros (ACI 522, 2006). La adición del agua, por consiguiente, tiene que ser supervisada cuidadosamente en el laboratorio.

3.3 Lotes de absorción de metales con concreto permeable y medición de la concentración con espectrometría TXRF

3.3.1 Calibración del equipo TXRF

La calibración del instrumento se realizó con un estándar de múltiples elementos que contenían concentración de Ar, Cr, Cd y Zn de 1 mg/l (Bruker Nano GmbH, Alemania). El tiempo de adquisición de los datos para cada medición de muestra fue de 1000 s (tiempo de lectura real). Los espectros fueron procesados con el software S2 Picofox™ (Bruker Nano GmbH, Alemania). Posteriormente se identificaron las líneas de los elementos a encontrar en el espectro de respuesta para verificar que los elementos se encuentran en la muestra para ser analizados. En el Anexo, se muestran los reportes que emite el equipo donde se muestra la concentración del estándar y el espectro de respuesta donde solo aparece el elemento a buscar y el estándar para la medición que es el galio (Ga).

3.3.2 Preparación de las soluciones con metales pesados

Se prepararon tres soluciones con reactivos patrones de arsénico (As), cadmio (Cd) y zinc (Zn) (ASTM 2011a). Las soluciones patrón tenían una concentración de 1000 ppm en estos elementos. A partir de cada solución patrón se

realizaron diluciones para obtener concentraciones uniformes de cadmio, plomo, cobre y zinc de 10 mg/l, 30 mg/l, 50 mg/l y 90 mg/l, para cada contaminante. Esta prueba de lotes se realizó con la suspensión de los especímenes de concreto en vasos de precipitado de 1 L durante 96 h. Después de las 96 h, los cilindros de concreto fueron retirados de la solución, para posteriormente hacer el análisis en el espectrómetro de fluorescencia TXRF.



Figura 3.18 Especímenes de concreto permeable para lotes de absorción de metales pesados.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Preparación de muestras para análisis TRXF

Se usaron discos de cuarzo espectrosil (sintético) pulidos de 30 mm de diámetro x 3.0 mm de grosor para la preparación de la muestra. Antes de comenzar la prueba se siguió un protocolo de limpieza que comprende varias etapas (solución de limpieza RBS 50TM (SigmaTM, Alemania) 5:50 a agua ultrapura (18 M Ω · cm, Milli-Q, Millipore), ácido nítrico solución al 10% bajo calentamiento, enjuagando con

agua ultrapura, secando en un horno a 80 °C. Finalmente, la siliconización de la superficie se realizó con una solución de silicio en isopropanol (ServaTM, Alemania) para que la superficie se vuelva hidrófoba y cause un pequeño punto de evaporación. Se verificó la eliminación exitosa de la muestra previa realizando mediciones de prueba en blanco en el equipo S2 PICOFOX. En la Figura 3.19 se muestra el proceso de preparación de la muestra.

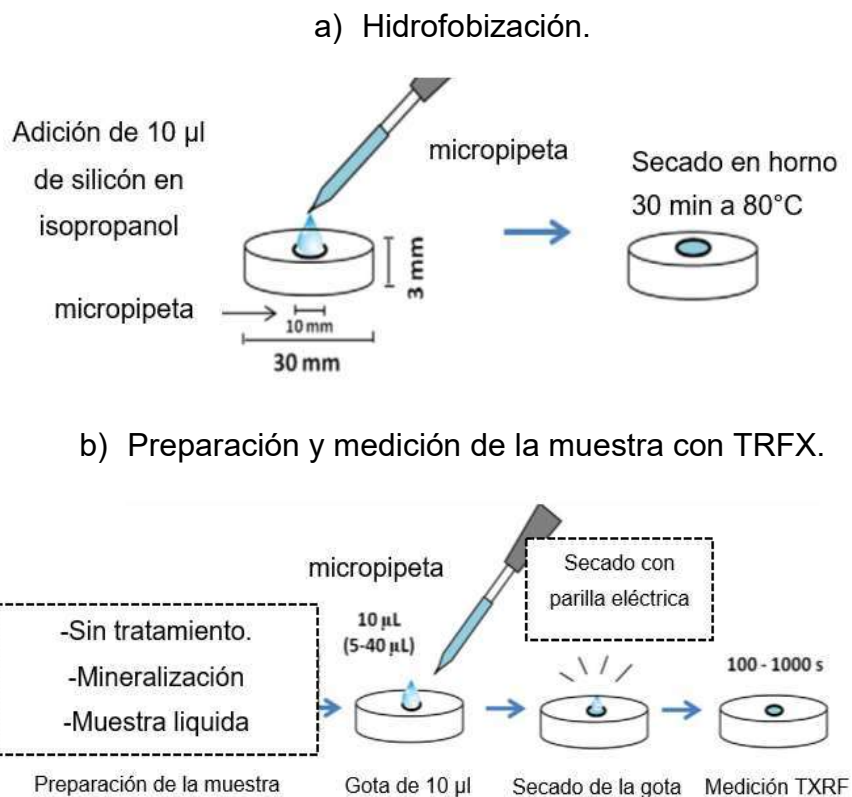


Figura 3.19 Preparación de las muestras para análisis con S2 PICOFOX.

Fuente: De la calle, 2013.

Además, se apreció la ausencia de picos de elementos, aparte de silicio (Si) de cuarzo y molibdeno (Mo) de la fuente. El análisis cuantitativo se realizó por estandarización interna de las muestras de análisis. El galio fue elegido como el estándar interno debido a su baja abundancia en el tipo estudiado de muestras y buena sensibilidad en la determinación de TXRF.

3.3.4 Mediciones de las concentraciones con S2 PICOFOX método TXRF.

Una vez realizado el proceso de preparación de la muestra para las concentraciones de 1,3,5 y 9% de los metales pesados, se inserta la celda de cuarzo en el porta muestras del equipo S2 PICOFOX y posteriormente se realiza la medición como se muestra en la Figura 3.20.

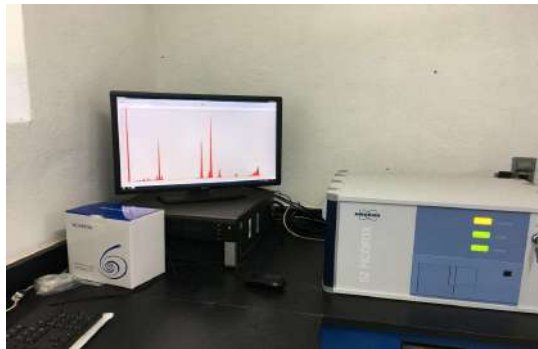


Figura 3.20 Medición de la muestra con equipo S2 PICOFOX

Fuente: Elaboración propia

Después de haber realizado el análisis, el equipo reporta un espectro de respuesta donde en el eje de las X muestra la energía en kilo-electronvolt y en el eje de las Y las intensidades; cada uno de los picos corresponde a un elemento químico, como se muestra en la Figura 3.21.

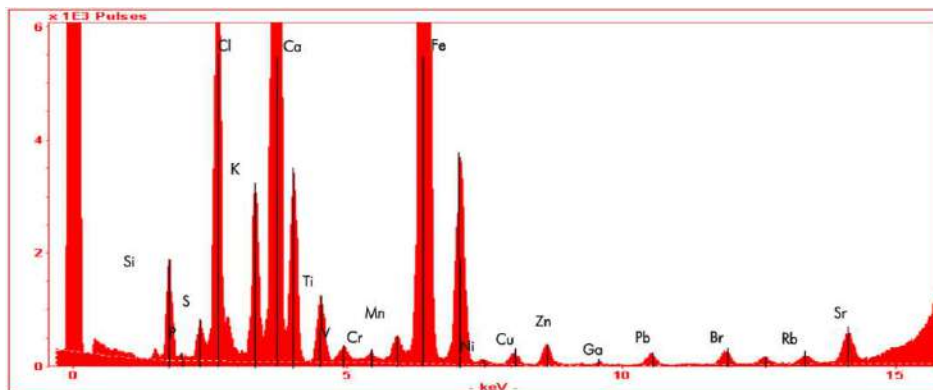


Figura 3.21 Espectro de respuesta del análisis de la muestra.

3.4 Lotes de absorción de arsénico con concreto permeable y medición de la concentración con espectrometría (EDXRF)

3.4.1 Preparación de la solución con arsénico

Se preparó una solución con arsénico (As) a una concentración de 90 partes por millón (ppm), esto con el fin de poder evaluar la concentración más alta que se utilizó con el análisis TXRF para una concentración de 90 mg/l de arsénico, como se muestra en la Figura 3.22 y donde se utilizó una campana de extracción para evitar inhalar los vapores que emanaran de la solución con metal pesado.



Figura 3.22 Preparación de la solución de Arsénico para lotes de absorción.

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2 La preparación de los especímenes de concreto y basalto

La preparación de los especímenes de concreto y basalto siguieron una metodología similar al de las láminas delgadas para petrografía. Primero se hizo la fabricación de cubos de concreto con la proporción del diseño de la mezcla para el

concreto permeable, solo que, sin el agregado pétreo de basalto, esto fue con la finalidad de poder realizar el análisis por separado para el concreto y el basalto. Se utilizó una cortadora de materiales MK-500 para poder darle una forma regular a los especímenes, como se muestra en la Figura 3.23.

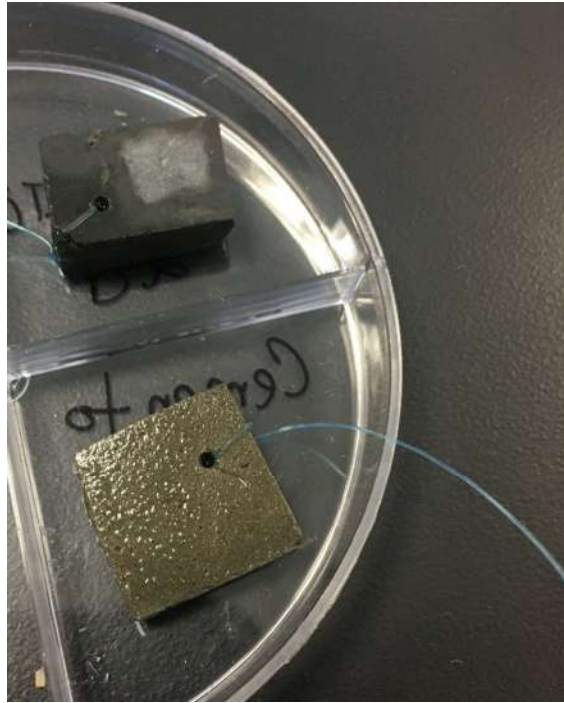


Figura 3.23 Especímenes de concreto y basalto para análisis EDXRF.

Fuente: Elaboración Propia

3.4.3 Preparación de las muestras sólidas y líquidas para análisis EDXRF

Una vez preparada la solución a una concentración de 90 ppm de arsénico en agua, se realizó la suspensión de especímenes de concreto de 5 cm x 5 cm de lado con un espesor de 5 mm y de basalto con medidas de 3 cm x 2 cm con un espesor de 5 mm, en tubos de centrifugado marca Falcon hasta una altura de solución de arsénico de 10 ml como se muestra en la Figura 3.24. El tiempo de la prueba fue de 8 días a una temperatura constante de 25°C en un horno. Después

de los 8 días, los especímenes fueron retirados de la solución, para posteriormente hacer el análisis en el espectrómetro S2 PUMA con la técnica EDXRF.

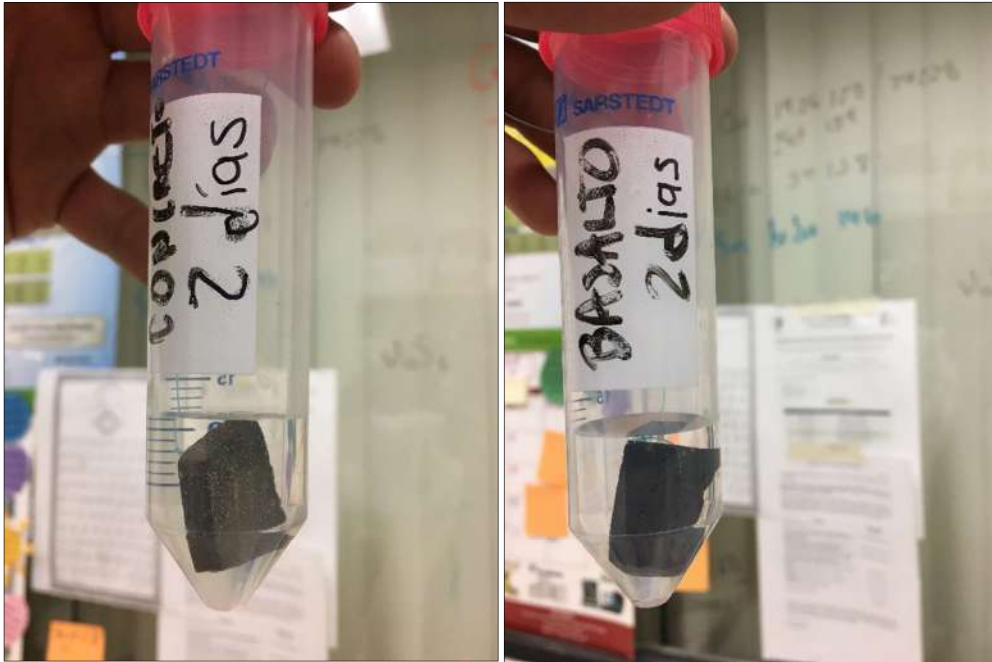


Figura 3.24 Especimen de concreto y basalto para lotes de absorción de metales pesados.

Fuente: Elaboración Propia

La toma de muestras se realizó a los 2, 4, 6 y 8 días, tanto para las muestras líquidas como sólidas de basalto y concreto. Los especímenes sólidos fueron secados al horno a una temperatura de 25 °C durante 24 horas antes de realizar su medición. Para las muestras líquidas, el proceso fue distinto, toda vez que para su preparación se utilizaron copas de plástico para almacenar 7.0 g de muestra líquida ya contaminada con arsénico, en la parte inferior de esta copa se utilizó una membrana Mylar transparente. Esto con la finalidad de permitir que los rayos x pudieran atravesar la muestra y poder realizar su cuantificación en el equipo, como se muestra en la Figura 3.25.

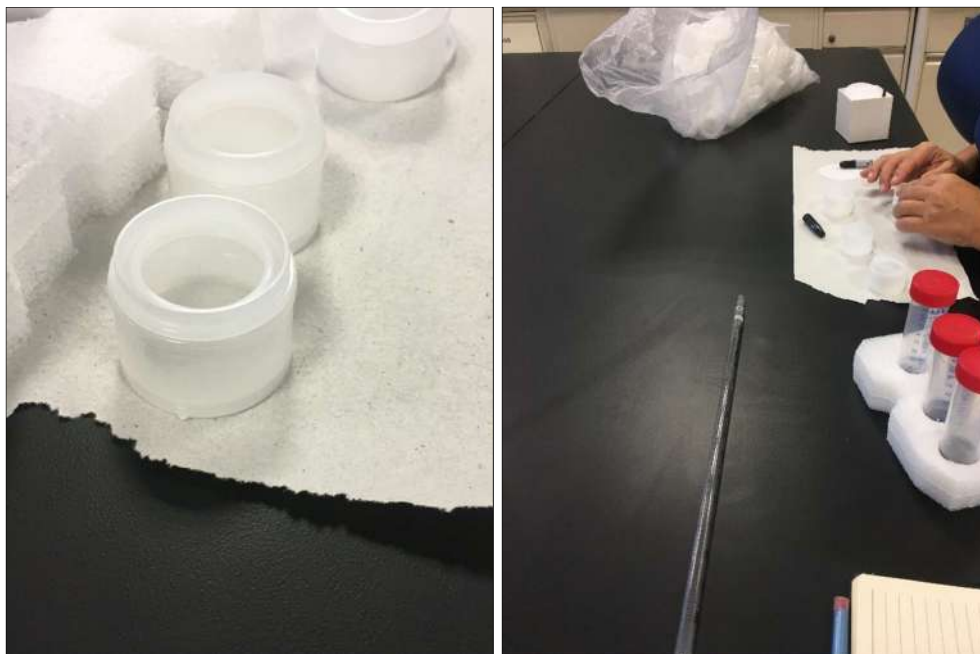


Figura 3.25 Preparación de las muestras para el análisis EDXRF

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4 Mediciones de las concentraciones con S2 PUMA por el método EDXRF.

Una vez transcurrido los 8 días de toma y preparación de las muestras, se procedió a la medición de todos los especímenes. Para ello se utilizó un equipo marca Bruker S2 PUMA para medición de hasta 11 muestras. Se colocaron las copas de plástico que contenían las muestras líquidas en el carrusel del equipo, como se muestra en la Figura 3.26.



Figura 3.26 Colocación de los especímenes en el equipo S2 PUMA

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que todas las muestras fueron montadas en el S2 PUMA, se selecciona el tipo de muestra (sólida o líquida) y las características de los especímenes. Se introdujo el ID de la muestra, posteriormente el diámetro de 3.5 cm de la copa de plástico, con una membrana Myler de espesor de 3.60 micras (μm), para luego realizar la cuantificación con el equipo con una duración de 5 minutos por espécimen como se muestra en la Figura 3.27.



Figura 3.27 Medición de las muestras con equipo S2 PUMA.

Fuente: Elaboración propia.

Después de haber realizado el análisis, el equipo arroja un espectro de respuesta donde en el eje de las X muestra la energía en kilo-electronvolt y en el eje de las Y las intensidades. Cada uno de los picos corresponde a un elemento químico, como se muestra en la Figura 3.28.

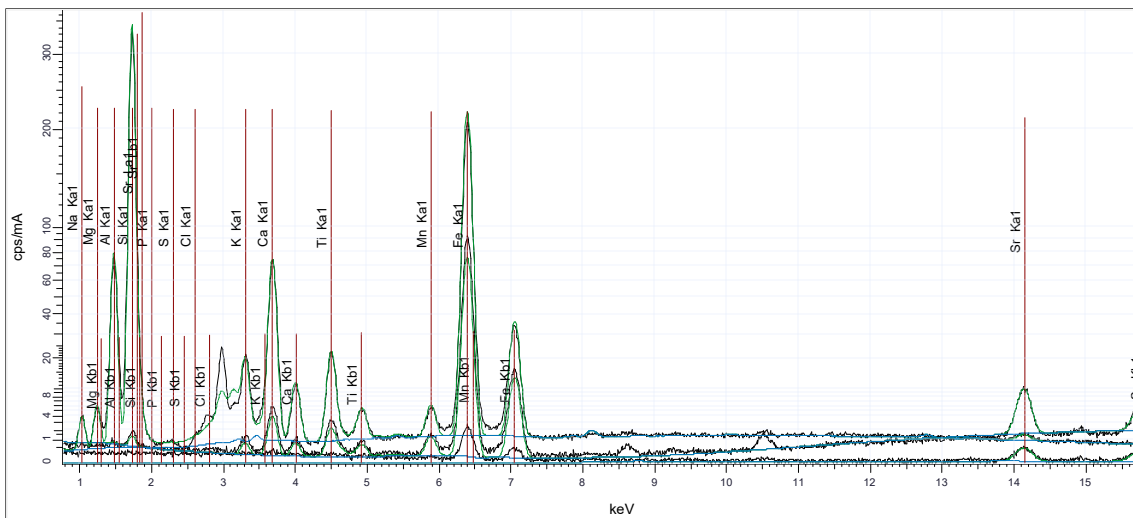


Figura 3.28 Espectro de respuesta para la solución de 90 ppm de arsénico

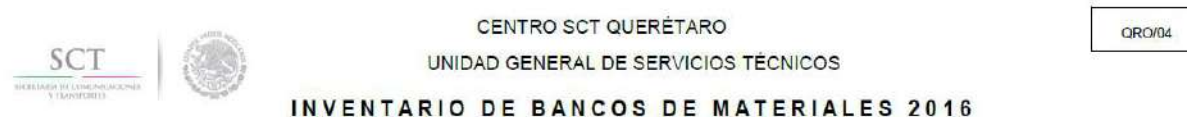
Fuente: Elaboración propia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de los agregados para el concreto permeable

4.1.1 Muestreo en banco de materiales

Se ubicaron los bancos más cercanos, de acuerdo con el inventario de bancos de materiales de la SCT. La grava fue proporcionada y obtenida del banco de materiales “La Cañada” el cual se encuentra ubicado en la Cañada, El Marqués, Qro. El material que predomina en esta zona es de origen volcánico denominado basalto y tiene un tamaño nominal de 1 ½”, como se puede ver en la Figura 4.1, donde se muestra que es un material producto de una trituración total y cribado, así como el tipo de material.



CARRETERA: QUERÉTARO-TEQUISQUIAPAN

BCO. NUM.	NOMBRE	KILOMETRO	DESVIACION	FECHA ESTUDIO	FECHA DE ACT.	TIPO PROP.	TIPO MATERIAL	TRATAMIENTO	VOLUMEN X 1000 m³	ESPESOR DESPALME (m)	USOS PROB.	USO EXPL.	RESTRICC. ECOLOG.	ASPEC. ECONOM.
0016	LA PALIZADA	010+000	I 02500	SEP-99	ABR-16	PART.	BASALTO - ARENA	DC-TTC	0250	00.5	4-5-6-10	NR.	NO EXISTEN	CONVE.
0017	BUENAVISTILLA	010+000	I 02600	SEP-99	MAY-16	PART.	CONG.	DC	0020	00.6	10	NR.	NO EXISTEN	CONVE.
0018	LA TRINIDAD	010+200	I 00500	SEP-99	MAY-16	PART.	BASALTO	TTC	0080	00.8	2-4-5-6-10	SR.	NO EXISTEN	REC.
0019	LA CAÑADA	008+400	D 00050	SEP-99	ABR-16	PART.	BASALTO	TTC	0250	00.5	5-6-8	NR.	NO EXISTEN	REC.
0020	C.P.Q. CONSTRUCCIONES	010+000	I 02400	AGO-08	ABR-16	PART.	BASALTO	TTC	0180	00.3	2-5-6-10	SR.	NO EXISTEN	CONVE.
0021	EL CONEJO	010+000	I 01800	AGO-08	MAY-16	PART.	CONG.	DC	0100	00.6	1-10	NR.	NO EXISTEN	CONVE.
0022	CERRO PRIETO	010+750	I 02200	SEP-99	MAY-16	PART.	VOLC.	TTC	0003	00.8	5-10	ACEP.	NO EXISTEN	CONVE.
0023	URIEL ESPINOZA	012+100	I 01200	AGO-08	MAY-16	PART.	CONG.	DC	0200	00.6	9-10	NR.	NO EXISTEN	REC.
0024	LOS ESTABLOS	011+500	I 01100	AGO-08	MAY-16	PART.	CONG.	DC	0010	00.4	9-10	NR.	NO EXISTEN	REC.

Figura 4.1 Inventario de banco de materiales SCT.

Fuente: SCT (2016).

Una vez identificados los posibles bancos de materiales de acuerdo a su cercanía, accesibilidad y sobre todo al tipo de material que predomina en esa zona, se realizó una visita a cada uno de ellos para observar el proceso de trituración y control de calidad de cada planta de procesamiento. Esta actividad fue fundamental

para tomar la decisión de cual banco tomar para la fabricación de la mezcla del pavimento permeable.

En el caso de este estudio, se realizaron canales verticales desde la parte superior del abastecimiento hasta la parte inferior, esto con el fin de mezclar de manera equitativa los agregados más gruesos ubicados en la parte inferior con los más finos ubicados en la parte superior. En las Figuras 4.2 y 4.3 se observa la técnica anteriormente descrita en el banco de materiales de La Cañada.

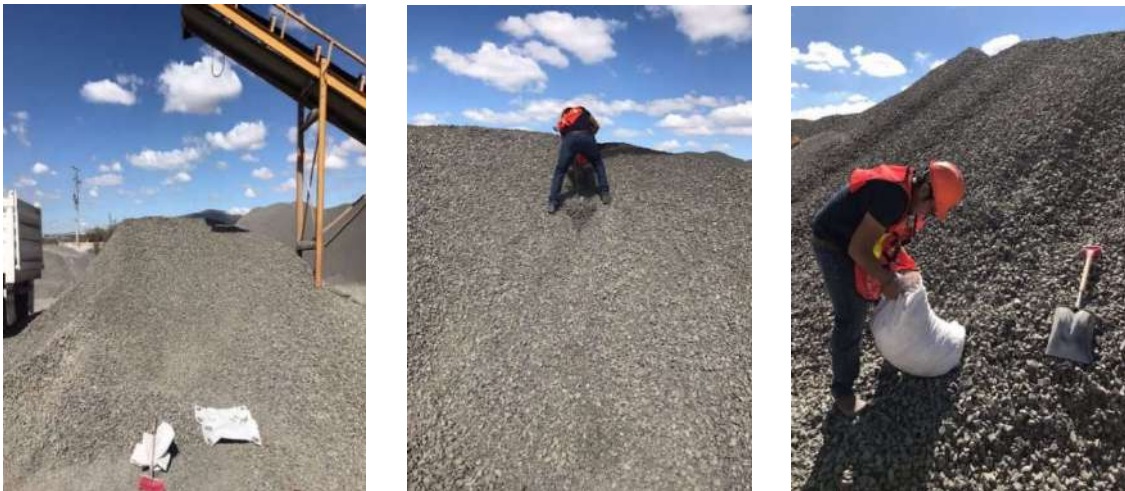


Figura 4.2 Muestreo de agregado grueso en el banco la Cañada, El Marques.

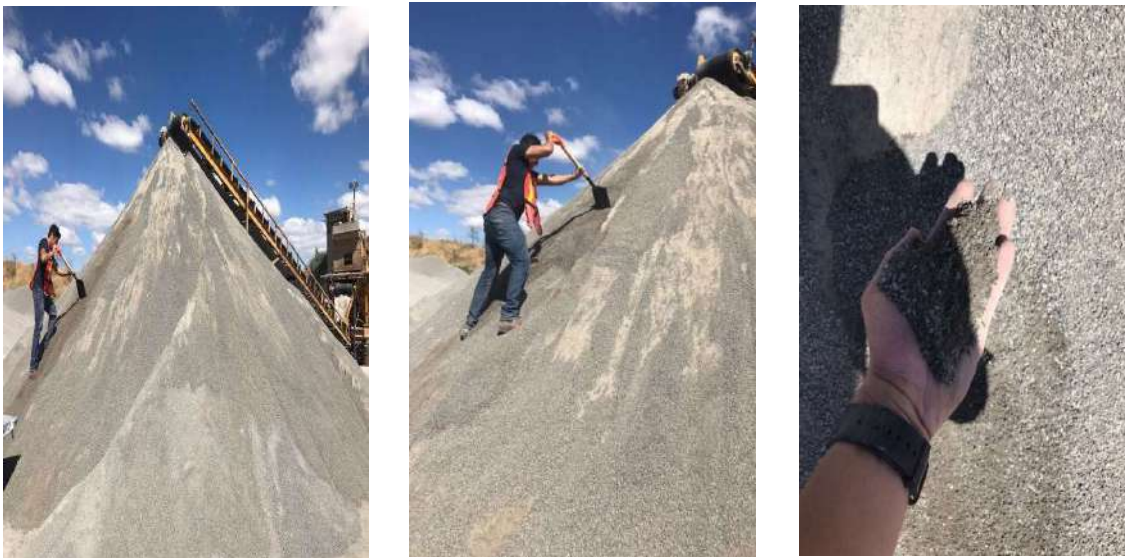


Figura 4.3 Muestreo de agregado fino en el banco la Cañada, El Marques.

Fuente: elaboración propia.

4.1.2 Reducción de la muestra de agregados

El método que se utilizó para la reducción de la muestra fue un cuarteo manual, el cual ayudará a tomar la muestra representativa del material traído de banco y posteriormente evaluar su granulometría para la clasificación del material en el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestran los cuarteos que se realizaron al material de banco.



Figura 4.4 Reducción del agregado grueso por medio del cuarteo manual.



Figura 4.5 Reducción del agregado fino por medio del cuarteo manual.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Microscopia en láminas delgadas de rocas para análisis petrográfico

El basalto es una roca volcánica de grano fino y de color verde oscuro a negro. De acuerdo a lo observado en el microscopio está compuesta fundamentalmente por piroxenos y plagioclasas ricas en calcio con cantidades menores de olivino y anfíbol o ferromagnesianos y feldespatos. Su clasificación, de acuerdo a sus características físico-químicas y sus propiedades mecánicas entra en el ramo de las rocas ígneas, su textura es de forma afanítica y su estructura es comúnmente vesicular. De esta manera, se tuvo la certeza de que el basalto que está en el banco de materiales, del cual se obtuvo el agregado pétreo para el diseño de la mezcla es efectivamente un basalto. En la Figura 4.6 se puede observar la textura del basalto a treves del microscopio, la cual presenta pequeñas plagioclasas.

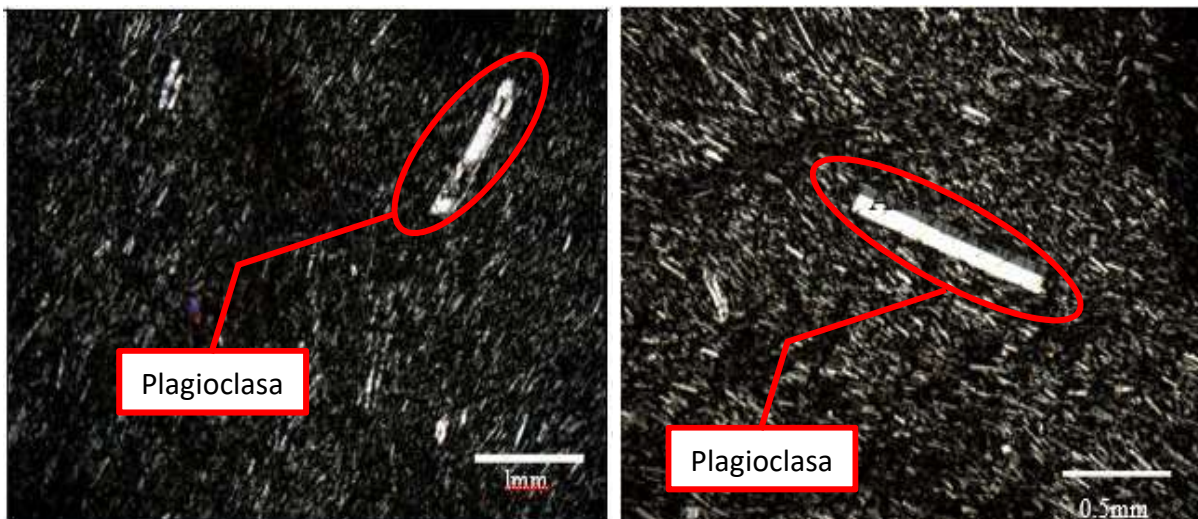


Figura 4.6 Microscopia de las láminas delgadas del basalto obtenido en el banco de materiales.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Granulometría por el método de mallas

La granulometría del agregado se realizó en tres ocasiones con el fin de verificar los resultados para que estos fueran consistentes y para posteriormente hacer válidos los datos. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 4.1 y en la Figura 4.7.

Tabla 4.1 Granulometría del agregado fino del basalto banco La Cañada.

Malla	Número de prueba	NMX-111	ASTM-C-33			
				1	2	3
Abertura mm	Designación	% que pasa (en peso)			Límites	Límites
9.5	3/8"	100	99.7	99.64	100	100
4.75	#4	97.41	96.59	95.44	95-100	95-100
2.36	#8	89.43	89.09	85.65	80-100	80-100
1.18	#16	74.01	73.87	67.98	50-85	50-85
0.6	#30	49.28	49.3	43.28	25-60	25-60
0.3	#50	22.5	22.54	18.37	10-30	5-30
0.15	#100	7.01	7.64	5.83	2-10	0-10
Charola		0.01	0.01	0.01	-	-

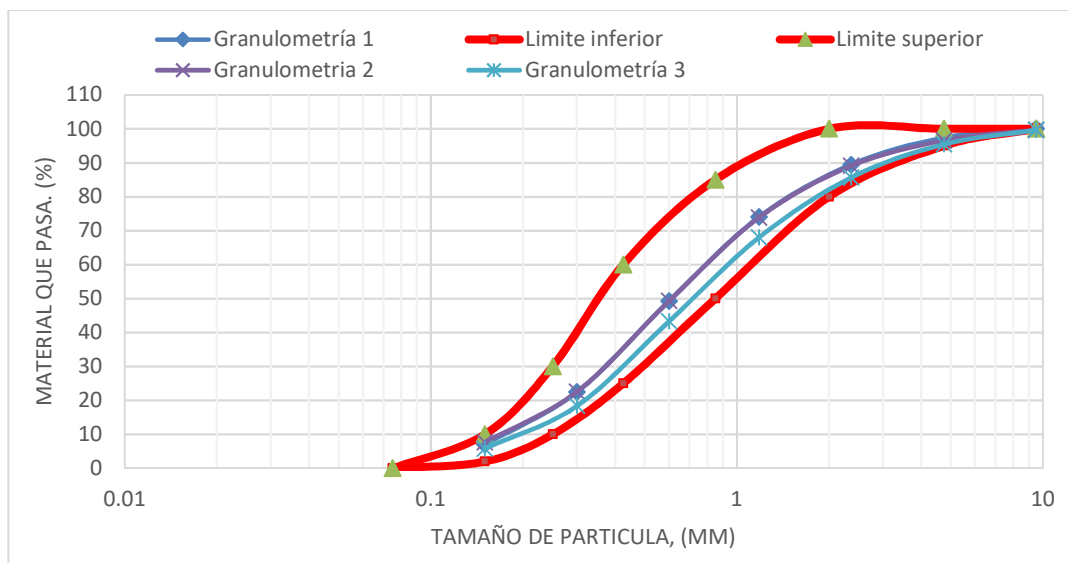


Figura 4.7 Curva granulométrica del agregado fino de basalto banco de La Cañada.

De los datos obtenidos anteriormente se puede apreciar que no hay demasiada dispersión entre las granulometrías realizadas para los diferentes pesos obtenidos de cada prueba. Así mismo, se puede observar que el agregado fino presenta una muy buena gradación, la cual cumple con los límites permisibles para la norma ASTM-C-33 y NMX-C-111. De igual manera, se obtuvieron los valores para la curva granulométrica del agregado grueso que se muestra en la Tabla 4.2 y en la Figura 4.8.

Tabla 4.2 Granulometría agregado grueso de basalto banco La Cañada.

Malla		Número de prueba			NMX-111	ASTM-C-33
Abertura mm	Designación	1	2	3	Límites	Límites
		% que pasa (en peso)				
50	2"	100	100	100	100	100
37.5	1 1/2"	100	99.77	99.7	95-100	95-100
25	1"	69.14	75.73	75.32	-	-
19	3/4"	36.25	34.1	32.55	35-70	35-70
12.5	1/2"	6.83	6.33	5.39	-	-
9.5	3/8"	2.26	2.02	1.94	10-30	10-30
6.3	1/4"	0.29	0.24	0.25	-	-
4.75	#4	0	0.01	0.01	0-5	0-5

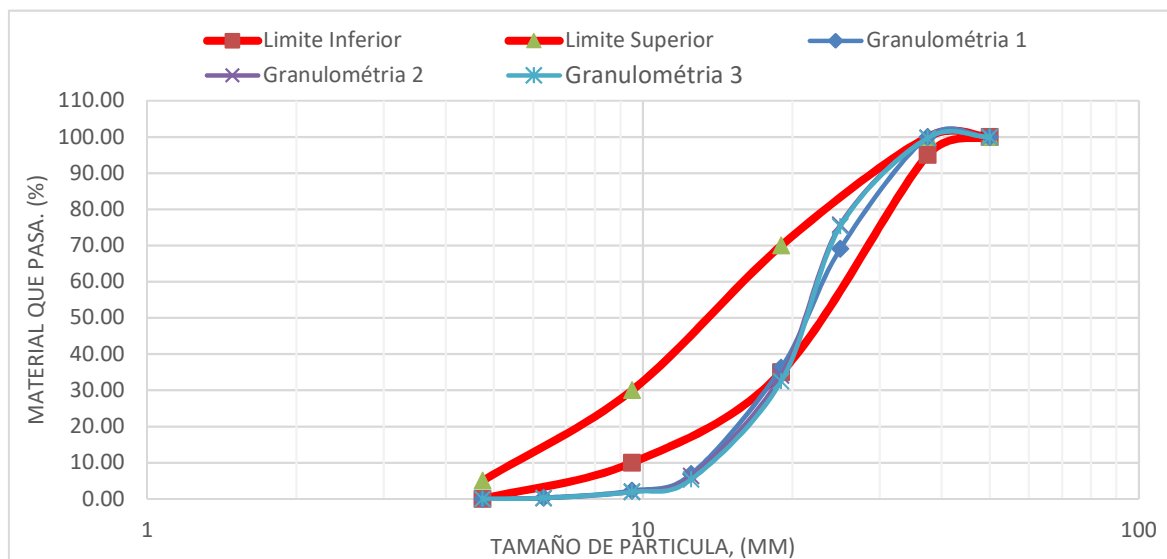


Figura 4.8 Curva granulométrica agregado grueso basalto banco La Cañada.

De acuerdo a los datos mostrados en la Figura 4.8 con respecto a los porcentajes de los pesos en cada malla de la Tabla 4.2, se puede observar que el tamaño máximo nominal del agregado grueso es de 1 ½" (37.5mm) y su curva granulométrica es uniforme, esto significa que varía desde el tamaño del agregado de 1 ½" a la No. 4. Aunado a esto el agregado grueso no cumple con la norma NMX-C-111 ni con la norma ASTM-C-33, debido a que no cuenta con suficientes partículas pequeñas, principalmente aquellas que pasan por la malla de 1/2" (12.5 mm), 3/8" (9.5 mm) y 1/4" (6.3 mm).

4.1.5 Densidad, absorción y humedad del agregado grueso

La densidad relativa o peso específico saturada superficialmente seca es de 2.85 kg/cm³ para el caso del agregado grueso y su absorción es de 1.58%. Estos datos se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores obtenidos para el cálculo de la muestra saturada superfinamente seca.

Masa de la muestra total (g).....	5000.00
Masa de la muestra secada al horno (g).....	4956.37
Masa de la muestra saturada superficialmente seca (g).....	5034.80
Masa de la canasta más la muestra sumergida (g).....	3268.25
Peso específico aparente (kg/cm ³)	2.81
Peso específico aparente (S.S.S) (kg/cm ³)	2.85
Peso específico nominal (kg/cm ³)	2.94
%Absorción.....	1.58

El material que fue analizado es un basalto, de acuerdo a la Tabla 2.2 nos menciona que su densidad oscila entre los valores de 2.8 a 3.2 kg/cm³ y podemos tomar los datos de la prueba como correctos. Por otro lado, la absorción de la grava

servirá para hacer la corrección por humedad en el diseño de la mezcla para el concreto permeable.

4.1.6 Masa volumétrica agregado grueso

Los valores obtenidos tanto para el agregado fino como para el agregado grueso están dentro del rango establecido por Kosmatka *et al.* (2004), quienes comentan que la masa volumétrica de un agregado utilizado para un concreto de peso normal varía de 1200 a 1750 kg/cm² como se puede apreciar en las Tablas 4.4 y Tabla 4.5 donde se muestran los valores para la masa volumétrica suelta y compacta.

Tabla 4.4 Masa volumétrica suelta.

Parámetros	Espécimen		
	1	2	3
Peso del molde (g)	3840	3840	3840
Peso del molde + muestra (g)	17670	17770	17570
Peso de la muestra (g)	89.43	89.09	85.65
Volumen del molde (cm ³)	9587.7	9587.7	9587.7
Peso unitario (g/cm ³)	1.44	1.45	1.43
Peso unitario suelto (kg/cm ³)		1.442	

Tabla 4.5 Masa volumétrica compacta.

Parámetros	1	2	3
	Peso del molde (g)	3840	3840
Peso del molde + muestra (g)	18460	18560	18540
Peso de la muestra (g)	89.43	89.09	85.65
Volumen del molde (cm ³)	9587.7	9587.7	9587.7
Peso unitario (g/cm ³)	1.52	1.54	1.53
Peso unitario suelto (kg/cm ³)		1.531	

Estos valores fueron obtenidos para utilizarlos en el diseño de la mezcla de concreto y poder conocer el volumen de la pasta considerando la masa del agregado.

4.2 Procedimiento y diseño de mezcla de concreto permeable

4.2.1 Diseño de mezcla con agregado de 3/8"

Normatividad:

- ACI 211.3R-02 "Guía para la selección de proporciones para concretos de cero slump".
- ACI 522R-10 "Reporte en concreto permeable".

Datos iniciales de agregado 3/8":

Propiedad		Agregado Grueso	Und.
Tamaño Máximo Nominal	TMN	1 1/2"	
Peso Específico	Pe	2810	kg/m ³
Peso Específico SSS	Pe(SSS)	2.9	gr/cm ³
Masa Volumétrica Suelta	MVS	1442	kg/m ³
Masa Volumétrica Compactado	MVC	1531	kg/m ³
Absorción	a%	1.53	%

Cemento: CEMEX CPC 30R (Cemento Portland Compuesto)

Agua: Agua potable-Universidad Autónoma de Querétaro.

Propiedad		Valor	Und.
Peso Específico del Cemento	Pec	3.15	gr/cm ³
Peso Específico del Agua	Pew	1.00	gr/cm ³

Datos para el diseño de la mezcla de concreto permeable.

Paso 1: Elección de contenido de vacíos y la tasa de infiltración posible.

Si no se tiene determinada el área de estudio donde se implementará el concreto permeable, se puede tener una aproximación de la tasa de filtración de acuerdo a un porcentaje de vacíos dado. Por otro lado, si se ha determinado la intensidad de la lluvia de acuerdo a un estudio hidrológico previo se puede obtener el contenido de vacíos que tendrá la estructura, como se muestra en la Figura 4.9, donde se grafica la intensidad vs el porcentaje de vacíos.

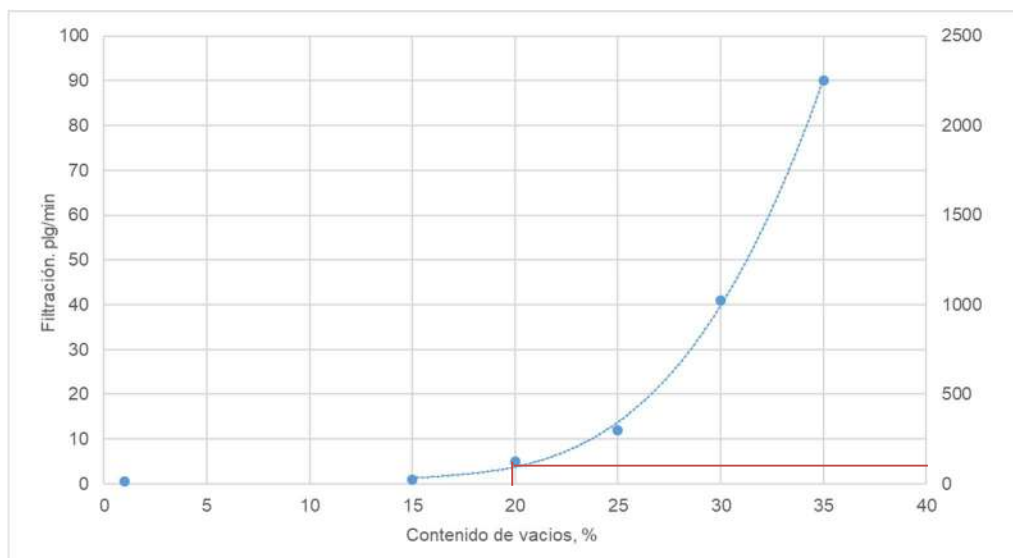


Figura 4.9. Relación entre el contenido de vacíos y la tasa de filtración. Fuente: Adaptado de ACI 522-10, ACI 211.3R-02).

Según la Figura 4.9 para un contenido de vacíos del 20% el concreto permeable puede tener una tasa de infiltración de aproximadamente 150 mm/h, el porcentaje de vacíos que se utilizó para el diseño del concreto permeable es el recomendado por la literatura el cual nos permitirá tener una buena tasa de infiltración sin perder tanta resistencia a la compresión y el valor de la infiltración es el correspondiente a ese porcentaje de vacíos antes mencionado.

Paso 2: Elección de la relación agua-cemento (a/c):

Para el concreto permeable, los valores recomendados de relación a/c se encuentran en el intervalo de 0.35 a 0.45 (ACI 522r-10 y ACI 211.3R-02). Estos

valores son para que la pasta pueda recubrir por completo a todos los agregados de la mezcla.

Para valores altos de a/c pueden generar el colapso de la estructura, ya que el sistema de poros que forma los agregados con el cemento puede ocasionar que el contenido de vacíos sea poco y pierda permeabilidad. Por otro lado, para valores bajos de a/c producen ligadura deficiente entre los agregados.

La variable de a/c se fijó en un valor de 0.40. Este valor fue escogido ya que se busca evitar los problemas de un déficit o exceso de agua en la pasta.

Paso 3: Cálculo de volumen de pasta:

De acuerdo con el nivel de compactación aplicado y el porcentaje de vacíos de diseño, se puede obtener el porcentaje de pasta en volumen con el siguiente nomograma.

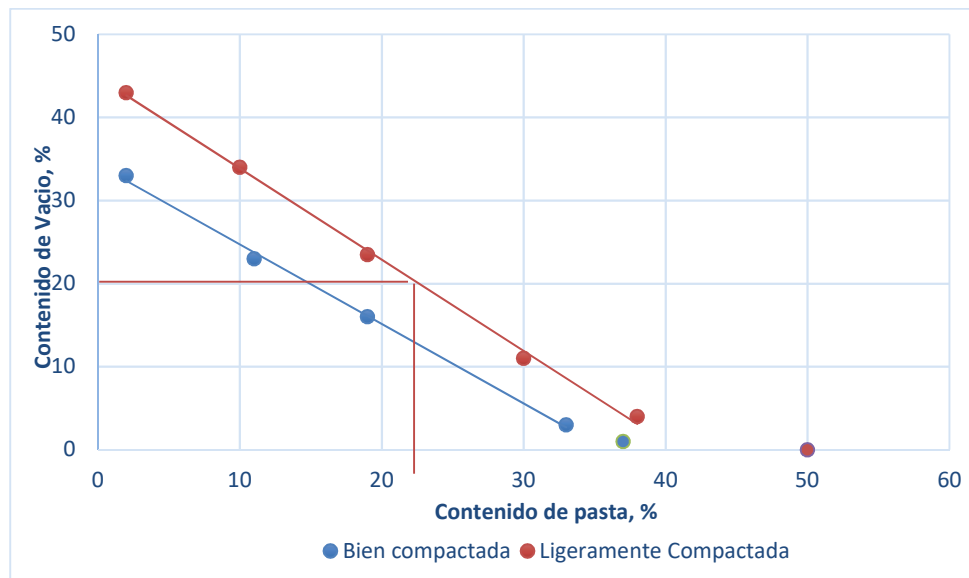


Figura 4.10 Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregados 3/4" y 3/8".

Fuente: Adaptado de ACI 522-10, ACI 211.3R-02).

El porcentaje de pasta para un contenido de vacíos del 20% es de 23% con una ligera compactación en el colado del concreto este valor nos servirá posteriormente para determinar el volumen de cemento y el volumen de agua por metro cúbico de mezcla de concreto permeable.

Paso 4: Cálculo de volumen de pasta: (Volumen de pasta = Volumen de cemento + Volumen de agua)

Partiendo de la siguiente ecuación:

$$Vp = Vc + Va \text{ Ec. (12)}$$

Donde:

$Vp = \text{Volumen de pasta}$

$Vc = \text{Volumen de cemento}$

$Va = \text{Volumen de agua}$

Por lo tanto, la ecuación (1) puede quedar expresada como:

$$Vp = \frac{c}{Yc \cdot 1000} + \frac{\left(\frac{a}{c}\right) \cdot c}{Ya \cdot 1000} \text{ Ec. (13)}$$

Donde:

$c = \text{Peso del cemento por } m^3 \text{ de mezcla. } a = \text{Peso del agua por } m^3 \text{ de mezcla.}$
 $Yc = \text{Peso específico del cemento. } Ya = \text{Peso específico del agua. } a/c = \text{Relación agua-cemento.}$

Considerando el peso específico del cemento de 3.15 g/cm³ y agua de 1.00 g/cm³, así como la relación a/c de 0.40 y el porcentaje de pasta de 23% se remplazan en la ecuación para obtener:

$$0.23 = \frac{c}{3.15 \cdot 1000} + \frac{0.40 \cdot c}{1.00 \cdot 1000} \text{ Ec. (14)}$$

Primero de obtiene el valor de c para conocer el volumen de cemento necesario, de la siguiente manera:

$$0.23 = \frac{c}{3.15 \cdot 1000} + \frac{0.40 \cdot c}{1.00 \cdot 1000} \text{ Ec. (15)}$$

$$0.23 = 0.0003174 c + 0.0040 c$$

$$0.23 = 0.000717460 c$$

$$c = \frac{0.23}{0.000717460}$$

$$c = 320.57 \text{ kg}$$

Para obtener el valor de a se sustituye en la fórmula el valor de c y se despeja, de la siguiente manera:

$$0.23 = \frac{320.57}{3.15 \cdot 1000} + \frac{a}{1.00 \cdot 1000}$$

$$0.23 = 0.10158 + 0.0001 a$$

$$a = \frac{0.23 - 0.10158}{0.001}$$

$$a = 128.41 \text{ kg}$$

Paso 5: Cálculo de volúmenes absolutos:

	Peso SSS (kg)	Peso Específico(kg/cm ³)	Volumen (m ³)
Agua	128.410	1.000	0.128
Cemento	320.570	3150.000	0.102
Vacios			0.200
		SUMA PARCIAL	0.4301
Agregado 3/8"	1652.71	2900	0.5699
		TOTAL (M³)	1.000

Paso 6: Corrección por Humedad, Absorción y Aporte:

Humedad (CH %) = 1.60 %

Absorción (a %) = 1.58 %

Aporte (l) = 0.33 litros

Paso 7: Valores de diseño corregidos por humedad:

	Cantidades	Unidades
Cemento	320.57	kg/m ³
Agregado Grueso	1679.153	kg/m ³
Agua efectiva	128.08	kg/m ³

Estos valores de diseño de la mezcla de concreto permeable son para un metro cúbico (m³) de pasta.

Culminando el diseño y obtenida la dosificación de la mezcla, se calcularon en peso todos los materiales necesarios para la elaboración de los cilindros de concreto 15 cm x 30 cm, que serán sometidos al ensayo de compresión simple y saber su resistencia.

4.2.2 Ensayos de estado endurecido del concreto permeable

4.2.2.1 Resistencia a compresión

La determinación de la resistencia a compresión de las mezclas de diseño de concreto permeable se realizó de acuerdo con la norma ASTM C39. Por cada mezcla de concreto se ensayaron tres especímenes. En la Figura 4.11 se muestra un ensayo de resistencia a compresión de un espécimen de concreto permeable.



Figura 4.11 Ensayo de resistencia a compresión.

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados de las resistencias a compresión obtenidas de todas las mezclas para 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 4.6 Resultados de las pruebas de resistencia a compresión de los cilindros de concreto de 30 x 15.

Edades	Resistencia cilindro No.1 (kg)	Resistencia cilindro No.2 (kg)	Resistencia cilindro No.3 (kg)	Resistencia Promedio (kg/cm ²)
7 días	108.68	107.52	109.68	108.63
14 días	126.89	125.68	127.63	126.73
21 días	153.48	151.36	154.87	153.24
28 días	177.69	178.69	181.65	179.34

Los resultados obtenidos y de acuerdo a la literatura las resistencias obtenidas se encuentran dentro del rango esperado de 140 kg/cm² a 180 kg/cm² posterior a los 28 días de fraguado (ACI 522.2006), los cuales son apropiados para la utilización de este concreto permeable como infraestructura de drenaje en una vía terrestre, o bien, calles o vialidades de bajo tránsito.

4.3 Lotes de absorción de metales con concreto permeable y medición de la concentración con espectrometría TXRF.

4.3.1 Cadmio

En la Figura 4.12, se puede observar los porcentajes de retención para las soluciones al 1%,3%,5% y 9% de cadmio. Estos datos fueron obtenidos del espectro de respuesta de la lectura de la muestra con el equipo S2 PICOFOX que se encuentra en el Anexo A.

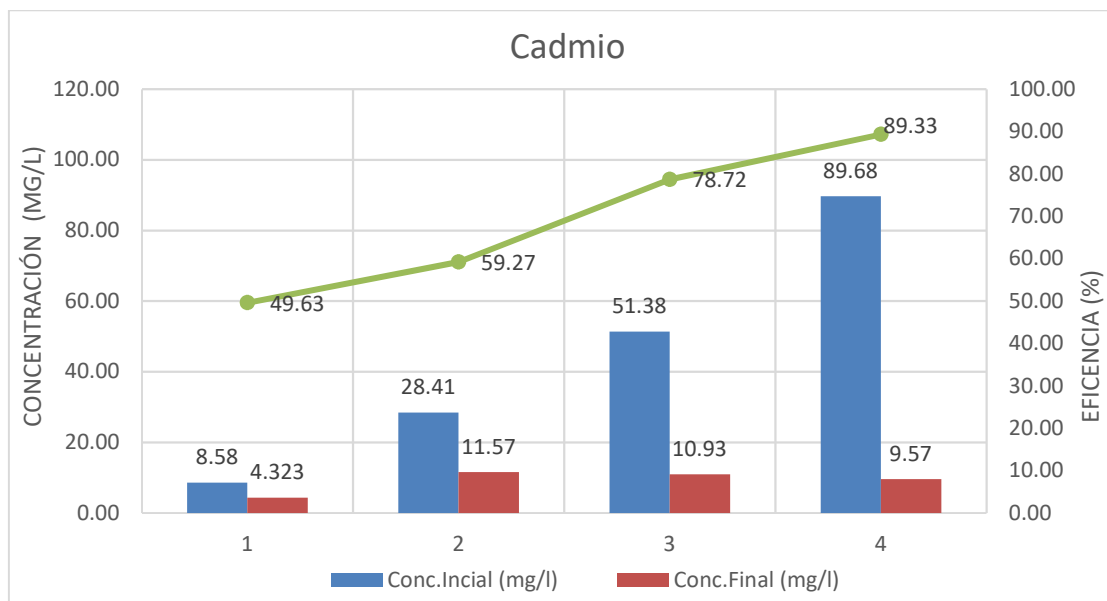


Figura 4.12 Porcentaje de retención de cadmio

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura anterior, el cadmio logra ser más eficiente a una concentración de 90 mg/l, teniendo un porcentaje de retención de hasta un 89%, esto quiere decir que el concreto permeable tiene más afinidad a este metal ya que no solo tienen un porcentaje alto de retención, sino que también pudiese estar expuesto a concentraciones mayores.

Dentro del análisis TXRF se encontró otros elementos como el calcio, potasio y fosforo, estos elementos mostraron un incremento con respecto a su

concentración inicial, el concreto permeable al ser expuesto al cadmio liberó un mayor porcentaje de calcio con respecto al fosforo y potasio, como se muestra en las Figuras

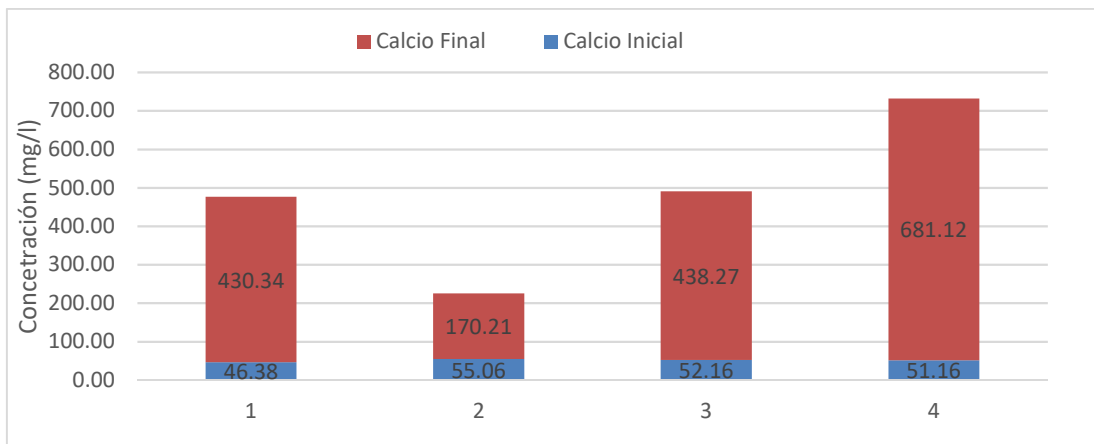


Figura 4.13 Concentración de calcio en la solución de cadmio antes y después de la prueba de absorción.

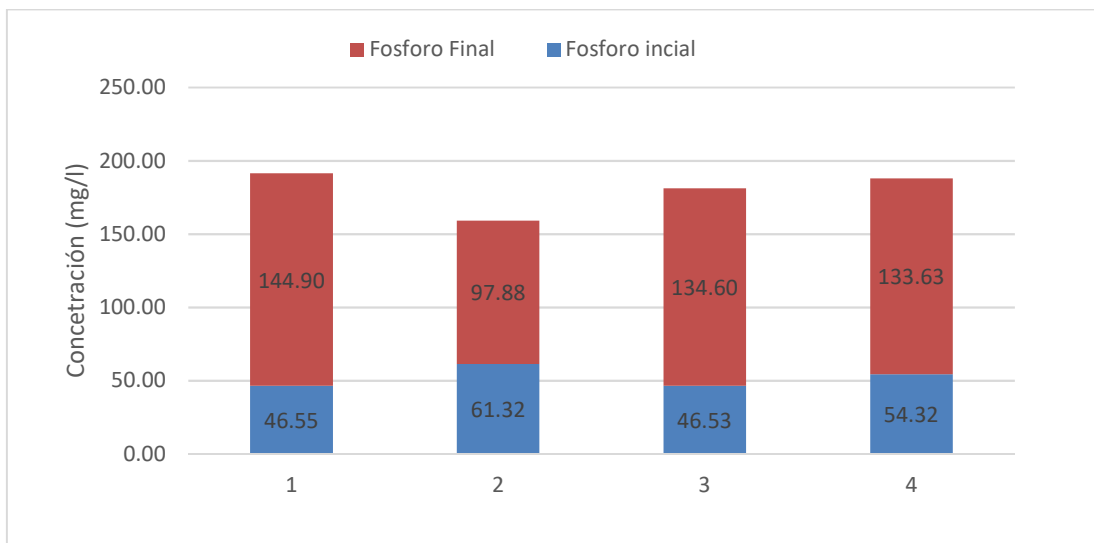


Figura 4.14 Concentración de calcio en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.

Fuente: Elaboración propia.

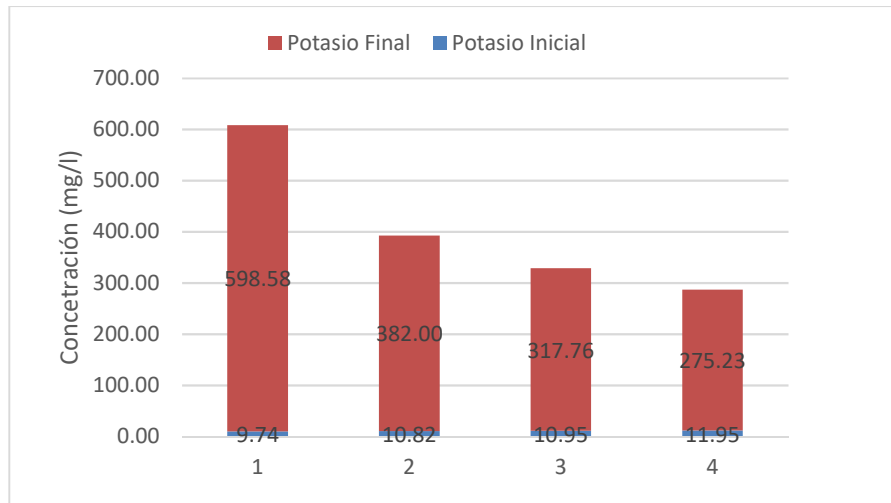


Figura 4.15 Concentración de calcio en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2 Zinc

En la Figura 4.16 se puede observar los porcentajes de retención para las soluciones al 1%,3%,5% y 9% de zinc. Estos datos fueron obtenidos del espectro de respuesta de la lectura de la muestra con el equipo S2 PICOFOX que se encuentra en el Anexo A.

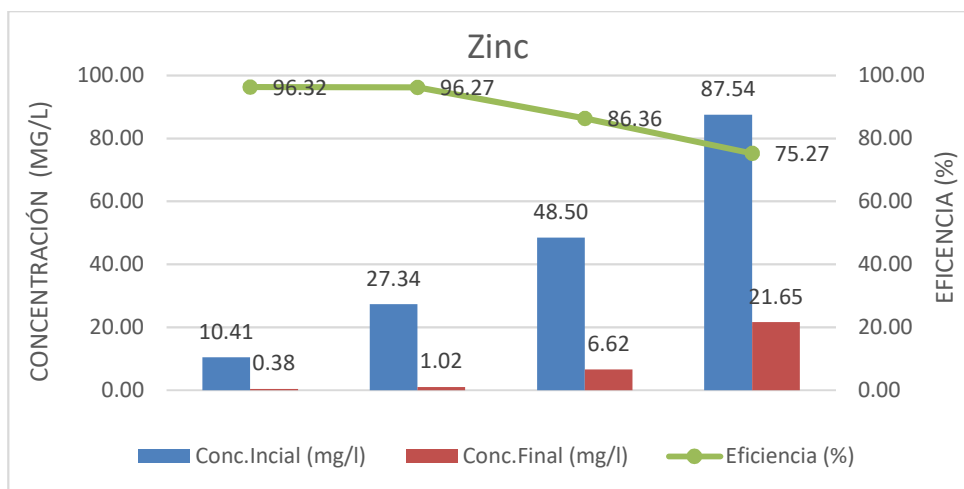


Figura 4.16 Porcentaje de retención de zinc.

De acuerdo a la figura anterior, se observó que el concreto permeable con agregado basáltico, logró tener mayor eficiencia para concentraciones menores o iguales a 30 mg/l con un porcentaje del 96%. Asimismo, para soluciones mayores de 50 mg/l no tienen el mismo comportamiento, toda vez que su eficiencia es menor con respecto a la concentración inicial en un rango del 86% al 75%. Sin embargo, el porcentaje de retención a la máxima concentración analizada presenta buenas condiciones para este metal pesado.

4.3.3 Arsénico

En la Figura 4.12, se puede observar los porcentajes de retención para las soluciones al 1%,3%,5% y 9% de arsénico. Estos datos fueron obtenidos del espectro de respuesta de la lectura de la muestra con el equipo S2 PICOFOX que se encuentra en los Anexos.

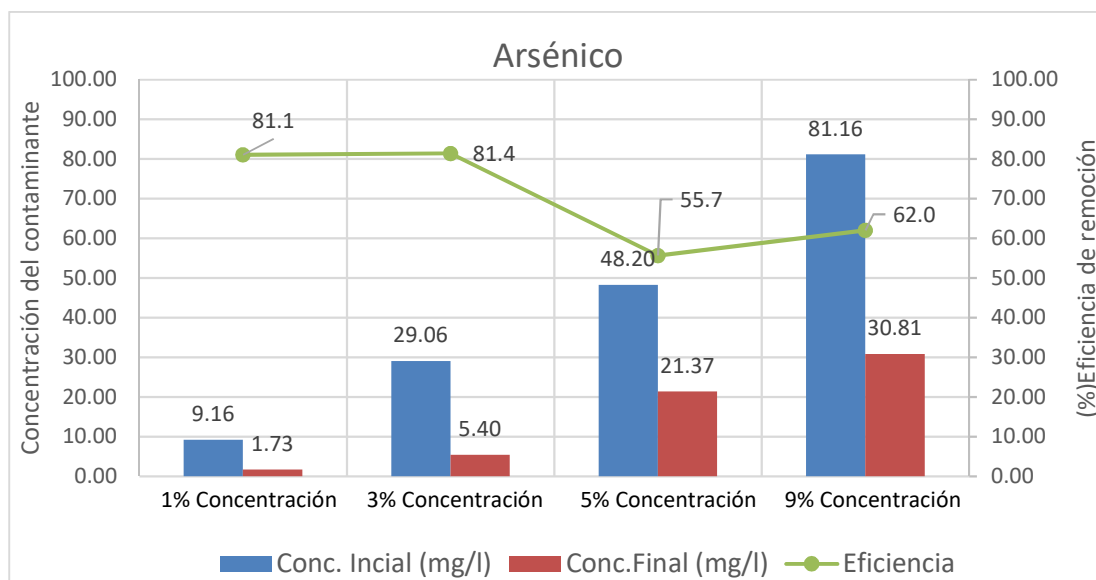


Figura 4.17 Porcentaje de retención de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la tabla anterior, se observó que el concreto permeable con agregado basáltico, logró tener mayor eficiencia para concentraciones menores o iguales a 30 mg/l con un porcentaje del 81%. Asimismo, para soluciones mayores de 50 mg/l no tienen el mismo comportamiento, toda vez que su eficiencia es menor con respecto a la concentración inicial en un rango del 55% al 62%. Sin embargo, el porcentaje de retención a la máxima concentración analizada presenta buenas condiciones para este metal pesados.

Asimismo, dentro del análisis se hizo la lectura de las concentraciones iniciales y finales de los elementos químicos que contenía el agua utilizada para la prueba de lotes de absorción con el concreto permeable, y poder determinar si al sumergir el cilindro de concreto este presentaba una disminución o aumento de estos químicos, los elementos encontrados fueron el potasio, calcio y fosforo.

En las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se observa que el mayor desprendimiento o liberación de calcio se dio en la concentración de 90 mg/l con respecto al fosforo y potasio, esto puede inferir directamente en la resistencia final que pueda tener el concreto permeable y, por ende, su vida útil.

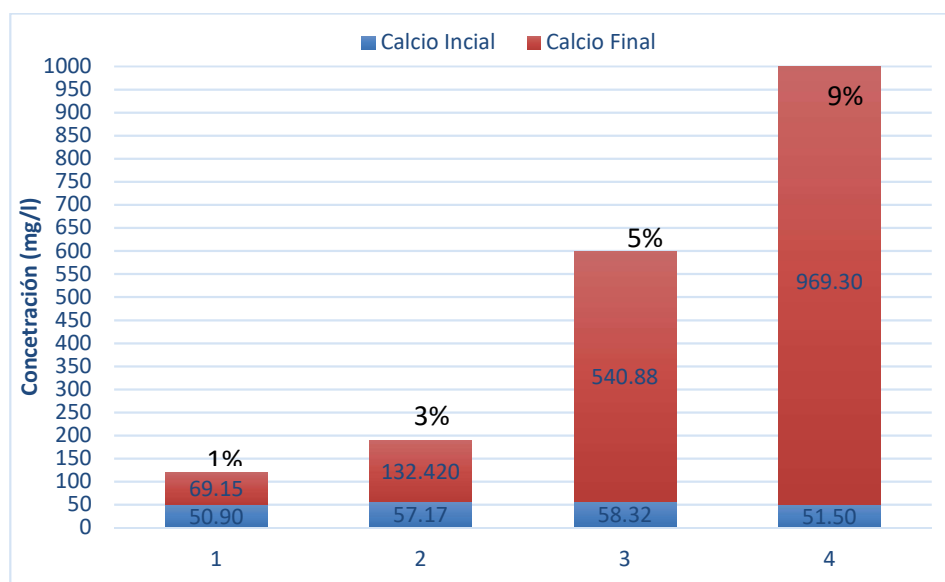


Figura 4.18 Concentración de calcio en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.

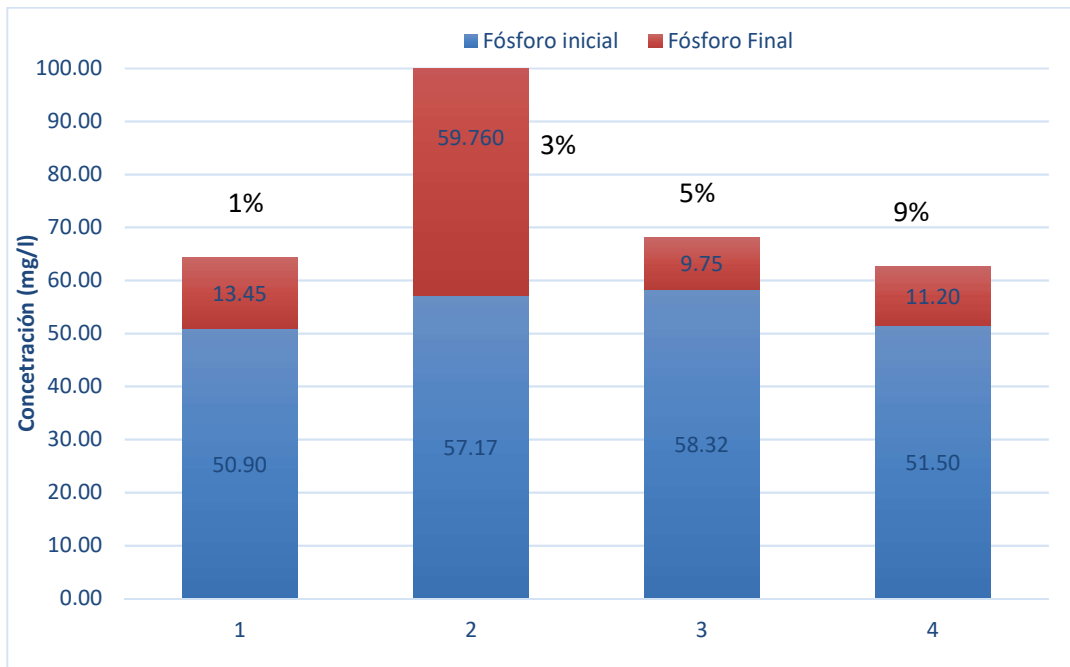


Figura 4.19 Concentración de fosforo en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.

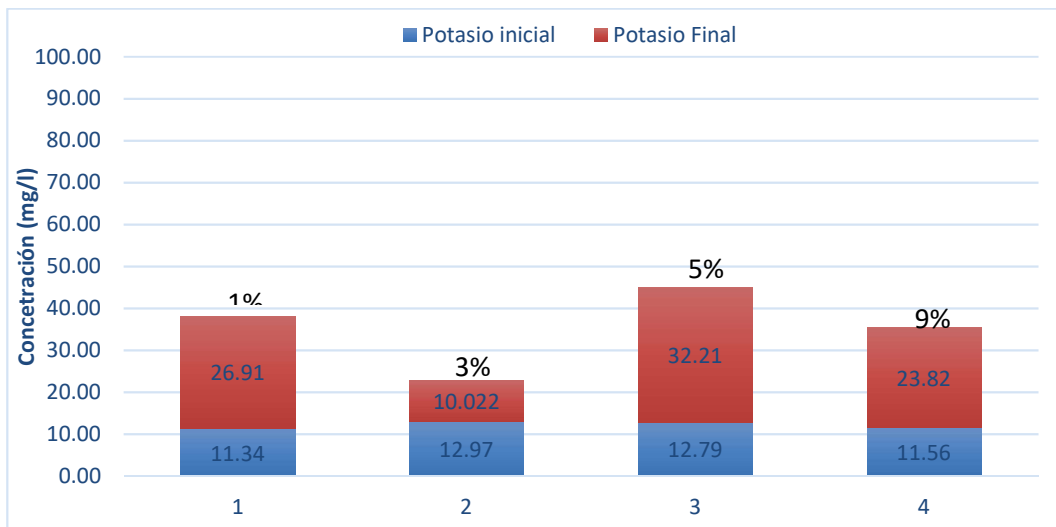


Figura 4.20 Concentración de fosforo en la solución de arsénico antes y después de la prueba de absorción.

De acuerdo a las gráficas mostradas, se puede observar que el zinc, arsénico y cadmio son atraído por potasio, calcio y fosforo, lo que ocasiona el intercambio iónico entre estos elementos. Se observó, además que hubo un proceso de descalcificación y degradación del concreto permeable ocasionado por la presencia del arsénico, zinc y cadmio en la solución, dejando expuesto al basalto en algunas zonas del cilindro. En la Figura 4.21 se muestra el basalto después de 96 horas de estar expuesto al arsénico.



Figura 4.21 Cilindro de concreto permeable expuesto a solución con arsénico.
Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente al analizar por separado cada uno de contaminantes se realizó una mezcla general con cadmio, arsénico y zinc en los porcentajes donde se obtuvo la mayor eficiencia de retención para cada uno de ellos. En la Tabla 4.7 se muestran las concentraciones iniciales y finales de los elementos encontrados en la mezcla completa de todos los contaminantes.

Tabla 4.7 Concentraciones iniciales y finales de cadmio, zinc y arsénico en los lotes de absorción con arsénico.

Elemento	Inicial	Final
K	9.16	373.90
Ca	47.19	3439.92
Zn	8.41	4.19
Ga (IS)	10.00	10.00
As	23.25	5.98
Cd	79.20	33.34

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.22 se puede observar que el arsénico en la mezcla con los demás contaminantes tiene mayor eficiencia de eliminación con respecto al cadmio y al arsénico.

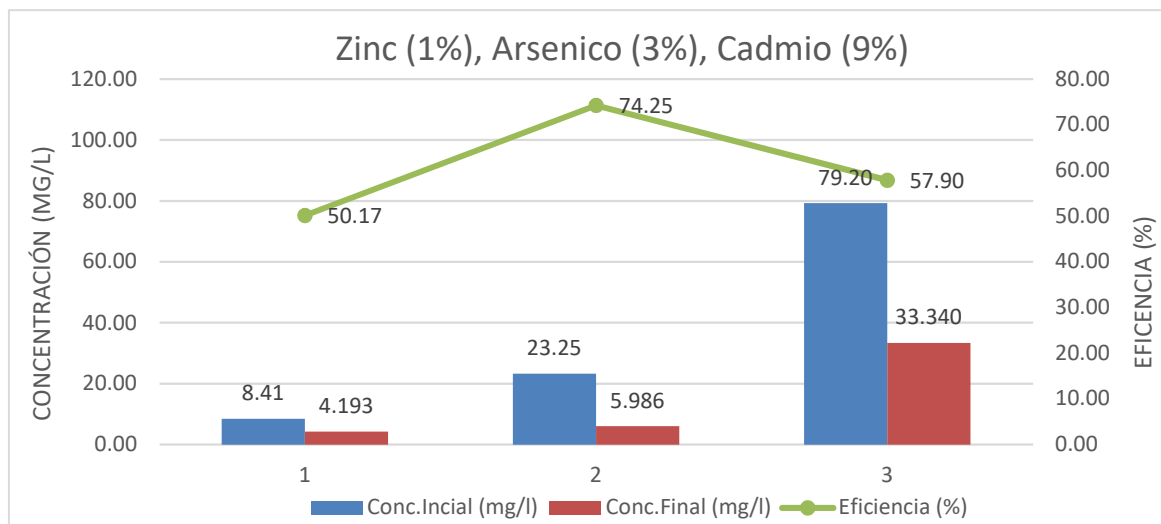


Figura 4.22 Retención de cadmio, zinc y arsénico en solución con concreto permeable.

4.4 Lotes de absorción de arsénico con concreto y basalto con medición de la concentración con espectrometría (EDXRF)

4.4.1 Retención de arsénico en basalto y concreto.

Una vez transcurridos los 8 días de prueba de exposición del material a la solución con arsénico para el concreto y basalto y posteriormente realizar las mediciones con el equipo S2 PUMA se verificó que el cálculo de la solución para 90 ppm de arsénico fuera la correcta y así poder obtener la concentración inicial con la que se tuvo referencia para conocer la eficiencia de cada uno de los materiales. En la Figura 4.23 se muestran las concentraciones medidas para cada uno de los días de prueba.

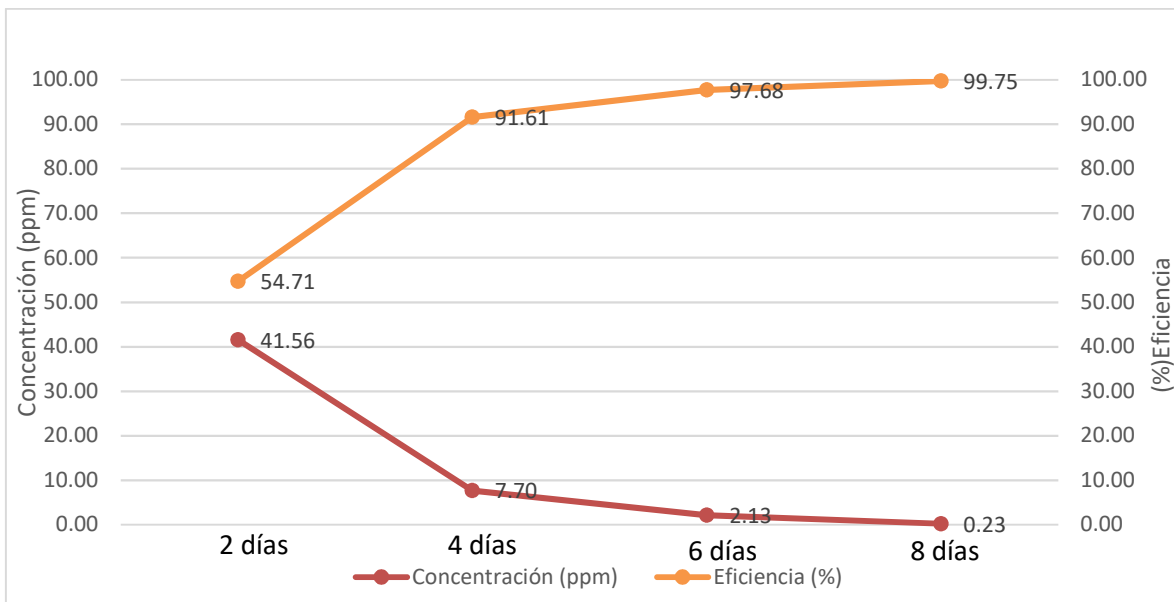


Figura 4.23 Medición de la concentración de arsénico y eficiencia de retención con concreto.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4.23 el concreto tras haber estado expuesto a la solución con arsénico durante 8 días pudo lograr una retención del 99.75%, lo que comprueba que este material posee excelentes características para la retención

de arsénico disuelto en agua. En la Figura 4.24 se muestra las mediciones de las concentraciones para el basalto.

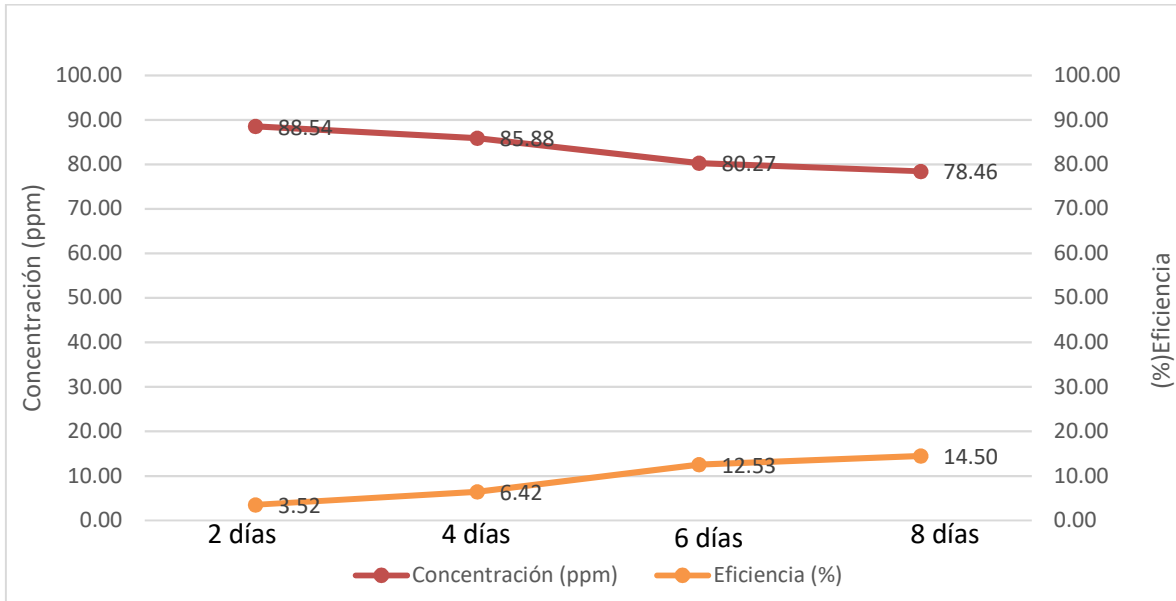


Figura 4.24 Medición de la concentración de arsénico y eficiencia de retención con concreto.

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la Figura 4.23 y Figura 4.24 el basalto presenta un menor porcentaje de retención de arsénico con respecto del concreto de hasta un 14.50% contra un 99.75% del concreto, por lo que se puede comprobar que el material que posee mayores cualidades para la retención es el concreto y no el basalto.

4.4.2 Concreto y basalto como intercambiador iónico.

Según el manual de constructor de Cemex (Cemex, 2015) la composición para la fabricación del cemento está constituida principalmente por roca caliza, arcilla y yeso en diferentes proporciones. Con los resultados obtenidos del análisis con la técnica EDXRF, se pudo lograr conocer la composición química del cemento

y basalto referencia antes de ser expuesto al arsénico durante 8 días. En la Tabla 4.8 se muestra la composición química del cemento y del basalto, estos datos fueron obtenidos con el equipo S2 PUMA marca Bruker y su espectro de respuesta se encuentra en el Anexo B.

Tabla 4.8 Composición química del cemento y el basalto.

Composición	CONCRETO	BASALTO
Na₂O	0.17%	2.94%
MgO	0.85%	2.68%
Al₂O₃	2.66%	19.77%
SiO₂	15.55%	53.18%
SO₄	1.18%	0.16%
Cl	17.2002 PPM	90.9707 PPM
K	1.54%	1.08%
CaO	73.66%	7.16%
MnO	0.16%	0.18%
Fe₂O₃	3.92%	10.64%
Gravedad específica	3.15	2.81

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 4.8 el concreto y el basalto contienen algunos elementos químicos similares. Sin embargo, algunos compuestos químicos como lo es el óxido de calcio, que fue el que más se liberó en las pruebas del TXRF presenta un mayor porcentaje respecto al basalto. Aunado a esto, estos materiales son muy parecidos a la composición química que contiene las Zeolitas y que se ha realizado más estudiados para el uso en filtros de purificación de agua por su alta capacidad de intercambio iónico. En la Tabla 4.9 se muestra la comparativa de las composiciones químicas que existen entre el concreto, basalto y zeolita.

Tabla 4.9 Composición química del concreto, basalto y zeolita.

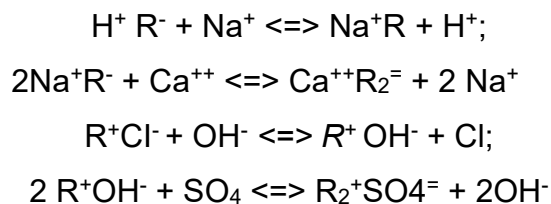
Composición	Concreto	Basalto	Zeolita
Na₂O	0.17%	2.94%	4.32%
MgO	0.85%	2.68%	0.34%
Al₂O₃	2.66%	19.77%	12.43%
SiO₂	15.55%	53.18%	64.70%
SO₄	1.18%	0.16%	-
Cl	17.2002 PPM	90.9707 PPM	-
K	1.54%	1.08%	2.28%
CaO	73.66%	7.16%	1.26%
MnO	0.16%	0.18%	-
Fe₂O₃	3.92%	10.64%	0.44%
Gravedad especifica	3.15	2.81	2.05

Fuente: Elaboración propia.

El intercambio iónico consiste en el intercambio reversible de iones entre un medio sólido y una solución. Los intercambiadores iónicos deben tener las siguientes características (Gebremedhin, 2002):

- Contener iones de intercambio
- Ser insolubles en agua
- Tener suficiente espacio en la estructura porosa para que los iones se difundan libremente al interior y exterior del sólido.

Según Turiel et al. (2015) el mecanismo de intercambio iónico de las zeolitas se muestra con las siguientes reacciones:



En donde R- y R+ simbolizan a la red cargada negativa y positivamente del intercambiador catiónico o aniónico, respectivamente.

Los iones que participan en el proceso de intercambio son básicamente el Na+, K+ y Ca+ de acuerdo al mecanismo anteriormente mostrado.

En algunas investigaciones como Turiel et al. (2015) se ha demostrado que los materiales que contienen óxido de aluminio (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃), óxido de manganeso (MnO) y óxido de silicio (SiO₂), así como los fosfatos y silicatos, tienen propiedades de intercambio iónico, estos elementos constitutivos del concreto y el basalto están involucrados en la remoción de arsénico, cadmio y el zinc utilizados en esta investigación.

La presencia de óxido de calcio (CaO) en el cemento, interfiere en la remoción de iones metálicos, este elemento influyó directamente en la eliminación del arsénico en las concentraciones empleadas en la prueba de absorción por lotes realizada en esta tesis. En las Tablas 4.10 y 4.11. se muestran los porcentajes que se obtuvieron de la composición química para los especímenes sólidos de concreto y basalto.

Tabla 4.10 Composición química del concreto al estar expuesto a 8 días con arsénico en agua.

Z	Formula	REFERENCIA	2 Días	4 Días	6 Días	8 Días
		Concentración (%)	Concentración (%)	Concentración (%)	Concentración (%)	Concentración (%)
11	Na ₂ O	0.17%	0.85%	0.78%	0.54%	0.47%
12	MgO	0.85%	3.65%	3.42%	2.55%	2.32%
13	Al ₂ O ₃	2.66%	6.27%	5.31%	4.66%	5.01%
14	SiO ₂	15.55%	26.59%	25.61%	23.60%	22.71%
16	SO ₄	1.18%	0.70%	0.88%	0.96%	1.78%
17	Cl	17.2002 PPM	0.0000 PPM	0.0000 PPM	0.0000 PPM	0.0000 PPM
19	K	1.54%	1.33%	1.33%	0.93%	1.00%
20	CaO	73.66%	55.47%	57.61%	61.43%	61.68%
25	MnO	0.16%	0.14%	0.14%	0.14%	0.15%
26	Fe ₂ O ₃	3.92%	4.06%	3.88%	3.97%	3.96%
30	ZnO	0.16%	0.17%	0.18%	0.21%	0.17%
33	As	-	0.66%	0.74%	0.88%	0.63%

Tabla 4.11 Composición química del basalto al estar expuesto a 8 días con arsénico en agua.

Z	Formula	REFERENCIA	2 Días	4 Días	6 Días	8 Días
		Concentración (%)	Concentración (%)	Concentración (%)	Concentración (%)	Concentración (%)
11	Na ₂ O	2.94%	2.87%	2.74%	2.82%	2.99%
12	MgO	2.68%	2.36%	2.64%	2.43%	2.75%
13	Al ₂ O ₃	19.77%	19.91%	20.06%	20.28%	19.90%
14	SiO ₂	53.18%	54.13%	54.51%	53.62%	53.79%
15	P ₂ O ₅	0.28%	66.8332 PPM	0.02%	0.05%	0.06%
16	SO ₄	0.0015904	0.00046669	0.0000 PPM	0.0000 PPM	0.0000 PPM
17	Cl	90.9707 PPM	0.0000 PPM	0.0000 PPM	0.0000 PPM	0.0000 PPM
19	K	1.08%	1.14%	1.06%	0.011581	1.05%
20	CaO	7.16%	6.27%	6.33%	6.66%	6.43%
22	TiO ₂	1.81%	1.96%	1.89%	1.94%	1.88%
25	MnO	0.18%	0.18%	0.21%	0.24%	0.24%
33	As	-	-	-	10.69%	10.78%
26	Fe ₂ O ₃	10.64%	11.02%	10.44%	0.03%	0.04%

Las mediciones de las composiciones químicas medidas antes y después de la contaminación de Arsénico para el basalto y concreto con la técnica EDXRF revelan que este metal pesado se queda retenido en la parte sólida, debido al intercambio iónico que existe a treves de los elementos que son afines al arsénico. Este resultado no se pudo obtener con la técnica TXRF.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La utilización de la microscopia de láminas delgadas para analizar petrográficamente los agregados gruesos que se utilizaron en el diseño de la mezcla, permite concluir que el material que se explota en el banco de materiales de la “Cañada” de Abraham Fernández Gonzalez es una roca ígnea y se clasifica como un basalto. Esto cumplió con el objetivo de utilizar una roca 100% basáltica natural para la retención de los metales pesados seleccionados (cadmio, zinc y arsénico)

Las mezclas de concreto permeable en estado fresco resultaron con una consistencia rígida, es decir, con un revenimiento de 0 cm. El peso volumétrico de las mezclas con 20% de vacíos resultó con un promedio de 1444 kg/cm^3 , quedando dentro del rango esperado del diseño. Además, las mezclas con 20% de vacíos resultaron con un promedio de 176 kg/cm^2 en resistencia a compresión a los 28 días.

La exposición del concreto permeable con agregado basáltico natural a soluciones con concentraciones de 1%,3%,5% y 9% de zinc, cadmio y arsénico provoca que haya una disminución de la pasta de concreto que envuelve al basalto en el concreto permeable. Esto influye directamente en la disminución de la resistencia del concreto al ser expuesto a estos contaminantes.

El óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de magnesio (MnO) y óxido de silicio (SiO_2) que contiene el basalto y el cemento contribuyen a la retención de arsénico, cadmio y zinc, siendo el arsénico el más afín a estos elementos, por lo que presenta una mayor eficiencia de retención.

La retención de arsénico en soluciones acuosas en concentraciones del orden de 90 ppm o mg/l es mayor para el concreto que para la roca basáltica. Sin embargo, esto no quiere decir que la mezcla de estos dos elementos en un concreto permeable sea la opción más viable. Toda vez que, de acuerdo a el análisis que se

realizó a él concreto y el basalto con la técnica EDXRF, se determinó que el concreto que está conformado en su composición básica por roca caliza, arcilla y oxido de calcio logró tener una mayor retención con respecto a las presentadas para el agregado basáltico de tamaño $\frac{3}{4}$ ", por lo que el basalto por sí solo no tiene una gran capacidad para la retención de arsénico en agua.

La implementación de concreto permeable como filtro para purificar agua que contiene metales pesado logra ser de un menor costo con respecto a la zeolita, toda vez que los materiales cementantes y el agregado (basalto) en la Ciudad de Querétaro se obtienen de una manera más rápida y económica, haciendo así un producto eficiente y a bajo costo.

6. REFERENCIAS

1. ACI (American Concrete Institute). (2010). “*Report on pervious concrete.*” Farmington Hills, MI.
2. ACI-522R.6. (2006). *Pervious Concrete*. American Concrete Institute. Washington.
3. Aydin, H., Bulut, Y., Yerlikaya, C. (2008) Removal of copper (II) from aqueous solution by adsorption onto low-cost adsorbents, *J. Environ. Manage.* 87, 37–45.
4. ACPA. (2007). *Subgrades and Subbases for Concrete Pavements*. Concrete Paving Technology, TB011. P. American Concrete Pavement Association.
5. Akbari, H., Matthews, H.D., (2012). Global cooling updates: reflective roofs and pavements. *Energy Buildings*, 55, 2–6.
6. Beecham, S., Pezzaniti, D., Kandasamy, J., (2012). Stormwater treatment using permeable pavements. *Water Management*, 165, 161-170.
7. Brattebo, B.O., Booth, D.B., (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research*. 37, 4369-4376.
8. B. Beckhoff, N. Langhoff, B. Kanngießer, R. Wedell, H. Wolff (2006) *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*, Editorial Springer. ISBN: 103-540-28603-9.
9. Braja M. Das. (2010). *Principles of geotechnical engineering*. Stamford, USA: Cengage Learning.
10. Bornemisza E., (1982). Introducción a la Química de Suelos, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, Secretaría General de la Organización de los Estados Unidos Americanos Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Monografía no. 25 p. 21-47.
11. Borazjani, O., Ghiasi-Freez, J., Hatampour, A., (2016). Two intelligent pattern recognition models for automatic identification of textural and pore space characteristics of the carbonate reservoir rocks using thin section images. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 944-955.

12. Buckman Harry and N.C. Brady, (1966). *The Nature and Properties of Soils*. The Macmillan Company. 590 pp.
13. Cataldo F “Multielement analysis of a municipal landfill leachate with total reflection X-ray fluorescence (TXRF). A comparison with ICP –OES analytical results”, *Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol.293, pp. 119-126, 2012.
14. CIRIA (2007). *The SUDS Manual*. CIRIA, Londres: CIRIA.
15. Carnielo, E., Zinzi, M., (2013). Optical and thermal characterization of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. *Building and Environment*, 60, 56–65.
16. Cooley, L., Brown, E., (2000). Selection and evaluation of field permeability device for asphalt pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1723, 73-82.
17. Cohena, S., Galatyb, Michael L., Fisherc, Christopher T., (2018). Petrographic analysis of ceramics and clay from Angamuco, Michoacán Anna. *Journal of Archaeological Science*, 19,155–165.
18. D’Arcy BJ, Usman F, Griffiths D, Chatfield P. (1998). Initiatives to tackle diffuse pollution in the UK. *Water Science and Technology*, 38(10), 131–8.
19. Delatte, Norbert, Mrkajic, Aleksandar & Miller, Daniel I. (2009). Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements, *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C.,132–139.
20. Delatte, N. (2008). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance. Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53)*. New York, E.U.A.
21. Dreyer, Christopher B., Schwendeman, James R., Steele, John P.H., Carrell, Thomas E., Niedringhaus, Andrew, Skok, John. (2013). Development of a thin section device for space exploration: Rock-cutting mechanism. *Advances in Space Research*, 51, 1674–1691.
22. Dierkes, C., Kuhlmann, L., Kandasamy, J., Angelis, G., (2002). Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements. In: Proc. 9th International Conference on Urban Drainage. Global Solutions for Urban Drainage, 8-13.
23. Del Carpio, J.A, Marinoski, D.L., Triches, Glicério, Lamberts, Roberto, Staub de Melo, J.V., (2016). Urban pavements used in Brazil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field. *Solar Energy*, 134, 72–81.

24. Demirbas, A., Pehlivan, E., Gode, F., Altun, T., Arslan, G., (2005). Adsorption of Cu(II), Zn(II), Ni(II), Pb(II), and Cd(II) from aqueous solution on Amberlite IR-120 synthetic resin. *Journal of Colloid and Interface Science*, 282, 20-25.
25. Eloussaief, M. Benzina, M. (2010). Efficiency of natural and acid-activated clays in the removal of Pb (II) from aqueous solutions, *J. Hazard. Mater.*178, 753–757.
26. E. Margui, G.H.Floor, M. Hidalgo “ Analytical Possibilities of Total Reflection X-Ray Fluorescence Spectroscopy (TXRF) for Trace Selenium Determination in Soils”, *Analytical Chemistry*, Vol. 82, pp.7744-7751, 2010.
27. EPA (*Environmental Protection Agency*). (1999). *Studies Preliminary Data Summary of Urban Stormwater Best Management Practices*, EPA-821-R-99-012.
28. Elango, K.S., Revathi, V. (2017). Fal-G Binder Pervious Concrete. *Construction and bulding materials*, 140, 91-99.
29. Ferguson B.K. (2005). Porous pavements. Boca Raton: CRC Pres. Taylor & Francis. Integrative Studies in Water Management and Land Development; 6, Series Editor Robert L. France
30. Ferguson B.K. (2006). “Porous pavements: the making of progress in technology and design”.8th International Conference on Concrete Bloc Paving. November 6-8. San Francisco, California USA pp.11-16.
31. Ghafoori, Nader y Dutta, Shivaji (1995). Laboratory Investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. *Journal of materials in civil engineering*, 183-191.
32. Gutierrez – Ginés M. y Ranz I., (2010), Utilización de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X para el estudio de metales pesados en suelos: puesta a punto y aplicación a vertederos, Universidad de Alcala, Madrid.
33. Georgakis, Ch., Zoras, S., Santamouris, M., (2014). Studying the effect of “cool” coatings in street urban canyons and its potential as a heat island mitigation technique. *Sustainable Cities and Society*, 13, 20–31.
34. Haselbach, L.M., Valavala, S., Montes, F., (2006). Permeability predictions for sandclogged portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of Environmental Management*, 81, 42-49.
35. Haselbach, L., Poor, C., and Tilson, J. (2014). “Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete.” *Constr. Build. Mater.* 53, 652–657.

36. Haselbach, L., Boyer, Michelle, John T. Keavern, & Schaefer, Vernon R. (2011). Cyclic Heat Island Impacts on Traditional Versus Pervious Concrete Pavement Systems. *Transportation Research Record*. 2240, 107-115.
37. Hunt W.F. y Collins K.E. (2008) Permeable Pavement: Research Update and Design Implications, Raleigh, NC. Bulletin de la North Caroline Extension Service, 12p.
38. Hua, M., Zhang, S., Pan, B., Zhang, W., Lv, L., Zhang, Q., (2012). Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: a review. *Journal of Hazardous Materials*. 211-212, 317-331.
39. Interpave. (2008). *Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements*. Interpave The Precast Concrete Paving & Kerb Association, 60 Charles Street, and Leicester.
40. International Atomic Energy Agency, In situ applications of X ray fluorescence techniques, (2003), Final report of a coordinate research project, 2000-2003. 258 pp.
41. James W. y Von-Langsdorff H. (2003). The Use of Permeable Concrete Block Pavement in Controlling Environmental Stressors in Urban Areas, International Conference on Concrete Block Paving (PAVE) (7th, 12th-17th octubre, 2003, Sun City, Sur de Africa). Document Transformation Technologies, Sun City, Sur de Africa, and Conference Planners.
42. Javadi, S., Abdollahian S., Ghavami M., Rochaway T., (2016), Effectiveness of Heavy Metal Removal in Urban Permeable Pavement Systems, *Geo-Chicago*, 273, 22-31.
43. Kamali, M., Delkash, M., Tajrishy M. (2017). Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. *Journal of Environmental Management*. 187, 43-53.
44. Klockenkämper; "Total Reflection X – ray Fluorescence Analysis", John Wiley & Sons, 1997.
45. Kayhanian, M., Vichare, A., Green, P.G., Harvey, J., (2009). Leachability of dissolved chromium in asphalt and concrete surfacing materials. *Journal of Environmental Management*, 90, 3574-3580.
46. Komastka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2003). *Design and control of concrete mixtures*, Portland Cement Association, Stokie, Illinois.
47. Knapton, J., Cook, I. D., and Morrell, D. (2002). "A new design method for permeable pavements surface with pavers." *Highway Engineer from the Institution of Highways & Transportation*, 23, 98-105.

48. Legret, M., Nicollet, M., Miloda, P., Colandini, V., and Raimbault, G. (1999). *Simulation of Heavy Metal Pollution from Stormwater Infiltration through a Porous Pavement with Reservoir Structure*, Water Science Technology, 39 pp, 119-125.
49. Li, Hui, Kayhanian, Masoud, Harvey T. John, (2013). Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. *Journal of Environmental Management*, 118, 144-152.
50. Lv, L., Tsoi, G., Zhao, X.S., (2004). Uptake equilibria and mechanisms of heavy metaions on microporous titanosilicate ETS-10. *Ind. Eng. Chem*, 43, 7900-7906.
51. Li, Jiusu, Zhang, Yi, Liu, Guanlan, Peng Xinghai, (2017). Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 138, 479–485.
52. Lucas Hernández & Claudio Gonzales Pérez (2002) *Introducción Al análisis Instrumental*, Editorial Ariel S.A, ISBN: 84-344-8043-3, pag: 167 -272, 155 - 165, 180 -181, 267 -272.
53. Meléndez, C. y Camacho, A., (2009), Espectrometría de fluorescencia de rayos X, Facultad de ciencias químicas/Universidad Autónoma de Chihuahua, Aventuras del pensamiento, Enero-Marzo pp.,1 – 4.
54. Maupin, G., (2001). Asphalt permeability testing: specimen preparation and testing variability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1767, 33-39.
55. Monahan, Alfred (1981). "*Porous Portland cement Concrete; The State of the Art.*", Rep, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Structures Laboratory Vicksburg, Washinton, D. C.
56. Montejo Fonseca Alfonso (2006), *Ingeniería de pavimentos*, Colombia, Editorial Panamericana formas e impresos.
57. Myers, B., Beecham, S., Leeuwen, J.A.V., (2011). Water quality with storage in permeable pavement basecourse. *Water Management*.164, 361-372.
58. Nabila S. Ammar, Ali I.M. Ismail & Ola I. El-Shafey (2016) Engineering behavior influence of basaltic rocks on the adsorption of heavy metal ions. *Desalination and Water Treatment*, 11, 5089-5099.
59. Nguyen T.C., Loganathan P., Nguyen T.V., Vigneswaran S., Kandasamy J., Naidu R. (2015). Simultaneous adsorption of Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn by an iron-coated Australian zeolite in batch and fixed-bed column studies. *Chemical Engineering Journal*, 270, 393-404.

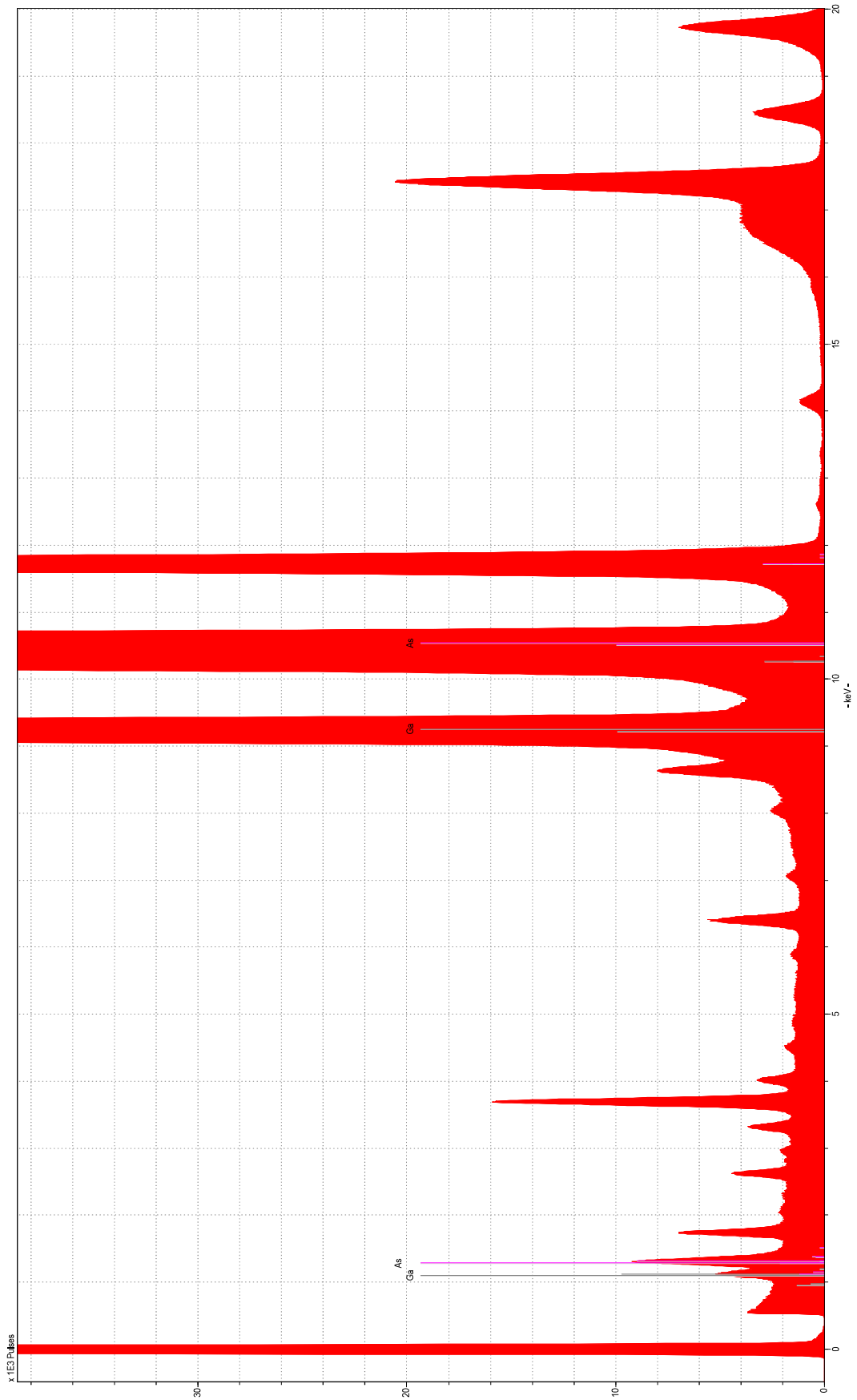
60. Olivera P., William T. (2004) Análisis directo de elementos traza en agua natural por fluorescencia de rayos x en reflexión total, chemistry department – IPEN / Lima, Perú.
61. Osinski, Gordon R., Grieve, Richard A.F., Bleacher, Jacob E., Neish, Catherine D., Pilles, Eric A., Tornabene, Livio L. (2018). Igneous rocks formed by hypervelocity impact. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 353, 25-24.
62. Paulsen, Gale, Zacny, Kris, Dreyer, Christopher B., Szucs, Attila, Szczesiak, Matt, Santoro, Chris, Craft, Jack, Hedlund, Magnus, Skok, John. (2013). Robotic Instrument for Grinding Rocks into Thin Sections (GRITS). *Advances in Space Research*, 51, 2181–2193.
63. Pérez, Daniel (2009). *Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos*. Ciudad de México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
64. Pagotto, C., Legret, M., Le Cloirec, P., (2000). Comparison of the hydraulic behavior and the quality of highway runoff water according to the type of pavement. *Water Research*, 34, 4446-4454.
65. Pehlivan, E., Altun, T., (2007). Ion-exchange of Pb²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺, and Ni²⁺ ions from aqueous solution by Lewatit CNP 80. *Journal of Hazardous Materials*, 140, 299-307.
66. Potgieter, J.H., Potgieter-Vermaak, S.S., Kalibantonga, P.D. (2006). Heavy metals removal from solution by palygorskite clay, *Miner. Eng.* 19, 463–470.
67. Pratt CJ, Wilson S, Cooper P (2002) *Source control using constructed pervious surfaces. Hydraulic, structural and water quality performance issues*. CIRIA. Londres, RU. C582, RP637. 152 pp.
68. Prowell, B., Dudley, M., (2002). Evaluation of measurement techniques for asphalt pavement density and permeability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1789, 36-45.
69. Qin, Yinghong, (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445-459.
70. Romeo, C., Zinzi, M., (2005). Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy Build*, 6 (1), 39-49.

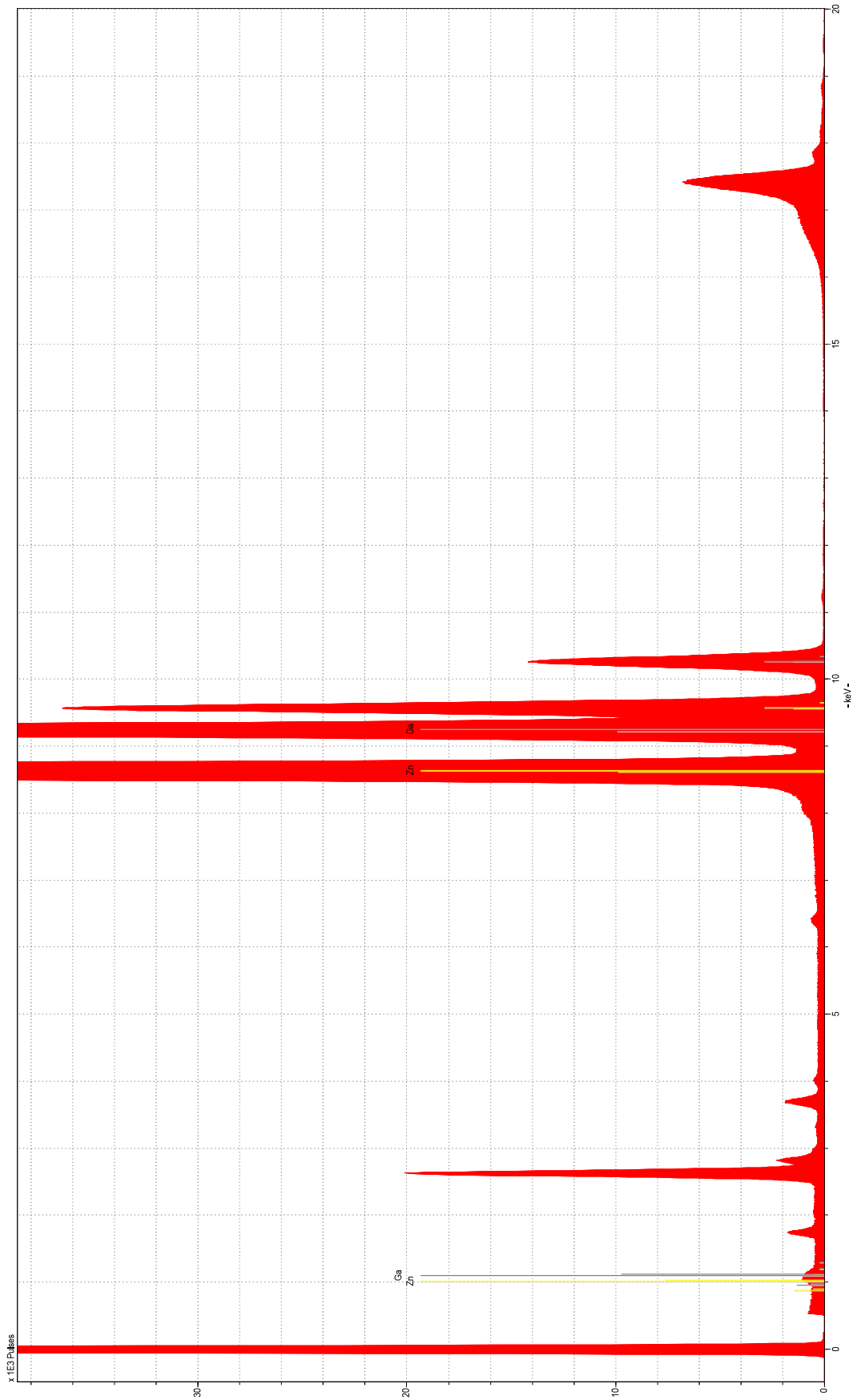
71. Rao, G.P., Lu, C., Su, F., (2007). Sorption of divalent metal ions from aqueous solution by carbon nanotubes: a review. *Separation and Purification Technology*, 58, 224-231.
72. Rico, A., y Del Castillo, H. (1977). *La Ingeniería De Suelos En Las Vías Terrestres, Carreteras, Ferrocarriles Y Aeropistas*. (Limusa, Ed.) (Vol. 2). México, D.F.
73. Rico, A., Téllez, R., y Garnica, P. (1998). Pavimentos flexibles Problemática, metodologías de diseño y tendencias. Querétaro, México.
74. SOIL SURVEY STAFF (1999). *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2a Ed. Agriculture Handbook N° 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869.
75. Skoog D. A., Holler F.J., Crouch S. R., (2001), Principios de análisis instrumental, 6ta edición, Cengage Learning, México.
76. Sabih, Gauhar, Tarefder, Rafiqul A. (2018). Characterizing strength and thermal properties of concrete for implementation of pavement mechanistic-empirical design in New México. *Transportation Geotechnics*, 15, 20-28.
77. Scholz M. (2006). *Wetland systems to control urban runoff*. Amsterdam: Elsevier.
78. Smith, D.R., (2011). *Permeable interlocking concrete pavements*. 4th ed. Herndon, Interlocking Concrete Pavement Institute.
79. Stormwater-Virginia D.C.R. Permeable Pavement, Design Specification Núm.7, Virginia, VA DCR, Version 1.8, March 1, 2011.
80. Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., Wiencke, M., (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environ. Change Part B: Environ. Hazards*, 6 (1), 39-49.
81. Scholz, M., Grabowiecki, P., (2007). Review of permeable pavement systems. *Build. Environ.* 42, 3830-3836.
82. Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T., (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85 (12), 3085–3102.
83. Santamouris, M., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Giannopoulou, K., Vasilakopoulou, K., Kardomateas, T., (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*. 53, 128–136.
84. Sountharajah, D., Loganathan, P., Kandasamy, J., & Vigneswaran, S. (2017). Removing Heavy Metals Using Permeable Pavement System with a

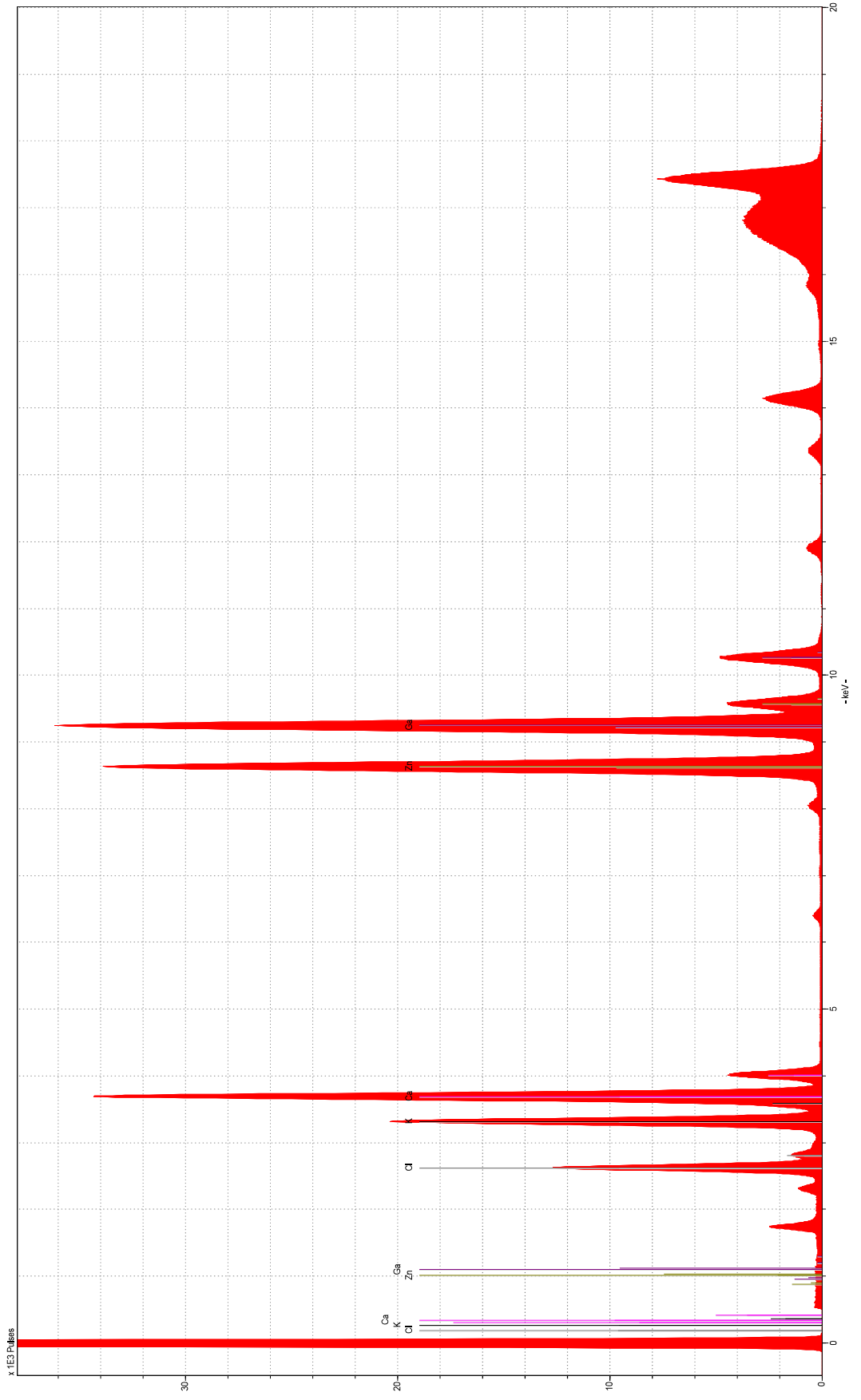
- Titanate Nano-fibrous Adsorbent Column as a Post Treatment. *Chemosphere*, 168, 467-473.
85. Sountharajah, D.P., Loganathan, P., Kandasamy, J., Vigneswaran, S., (2015). Adsorptive removal of heavy metals from water using sodium titanate nanofibers loaded onto GAC in fixed-bed columns. *J. Hazard. Mater.* 287, 306-316.
 86. Tarbuck E.J., Lutgens F.K. y Tasa, D. *Ciencias de la Tierra*. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed.
 87. Tennis, P., Leming, L., y Akers, D. (2004). *Pervious Concrete Pavements, EB302.02, Portland cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA*, 36.
 88. Starke, P., Wallmeyer C., Röfver, S., Göbel P., Coldewey. W.G., (2011) Development of a new laboratory evaporation measurement device as decision support for evaporation optimized building, *Building and Environment*, 46, 2552-2561.
 89. Uma Magesvari, M., Narasimha V.L., (2013) Studies on characterization of pervious concrete for pavement applications, *Social and Behavioral Sciences*, 104, 198-207.
 90. USEPA (2007), Field portable X-Ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment.
 91. Vernon, R.H. (2004). *A Practical Guide to Rock Microstructure*. Cambridge University Press. United Kingdom.
 92. Wang, S., Sun, H., Ang, H.M., Tade, M.O., (2013). Adsorptive remediation of environmental pollutants using novel graphene-based nanomaterials. *Chemical Engineering Journal*, 226, 336-347.
 93. Wang, S. & Pang, Y., (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156, 11-24.
 94. Watanabe, S. (1995). Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes. *Water Science Technolgy*; 32 pp: 25–32.
 95. Weiss, Peter T., Kayhanian, Masoud, Gulliver, John S. & Khazanovich, Lev (2017): Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps, *International Journal of Pavement Engineering*, 234, 345-354.
 96. Wu, Min-Hao, Lin, Chiou-Liang, Huang, Wei-Chieh, Chen, Jing-Wen (2016). Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. *Construction and Building Materials*, 111, 618-624.

97. Woods-Ballard B.; Kellagher R.; Martin P.; Jefferies C.; Bray R.; Shaffer P. (2007) *The SUDS Manual*. CIRIA C697. London.
98. Yong, C.F., McCarthy, D.T., Deletic, A., (2013). Predicting physical clogging of porous and permeable pavements. *Journal of Hydrology*, 491, 48-55.
99. Xiang Shu, Baoshan Huang, Wu Hao, Qiao Dong, Edwin G. (2011). Burdette, Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures, *Constr. Build. Mater.*25, 3187–3192.
100. Zárate, M., Salazar, A., y Tena, J. (2002). *Pavimentos de Concreto para Carreteras, Volumen 1. Proyecto y Construcción*. (IMCYC, Ed.) (Primera ed, Vol. 1). México, D.F.: IMCYC.
101. Zegarra Jorge Luis, Santos Jeferson, De Fátima Miriam (2014). Runoff on Pavements of Soil- Cement Blocks- an Experimental Boarding. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVI, 36-47.

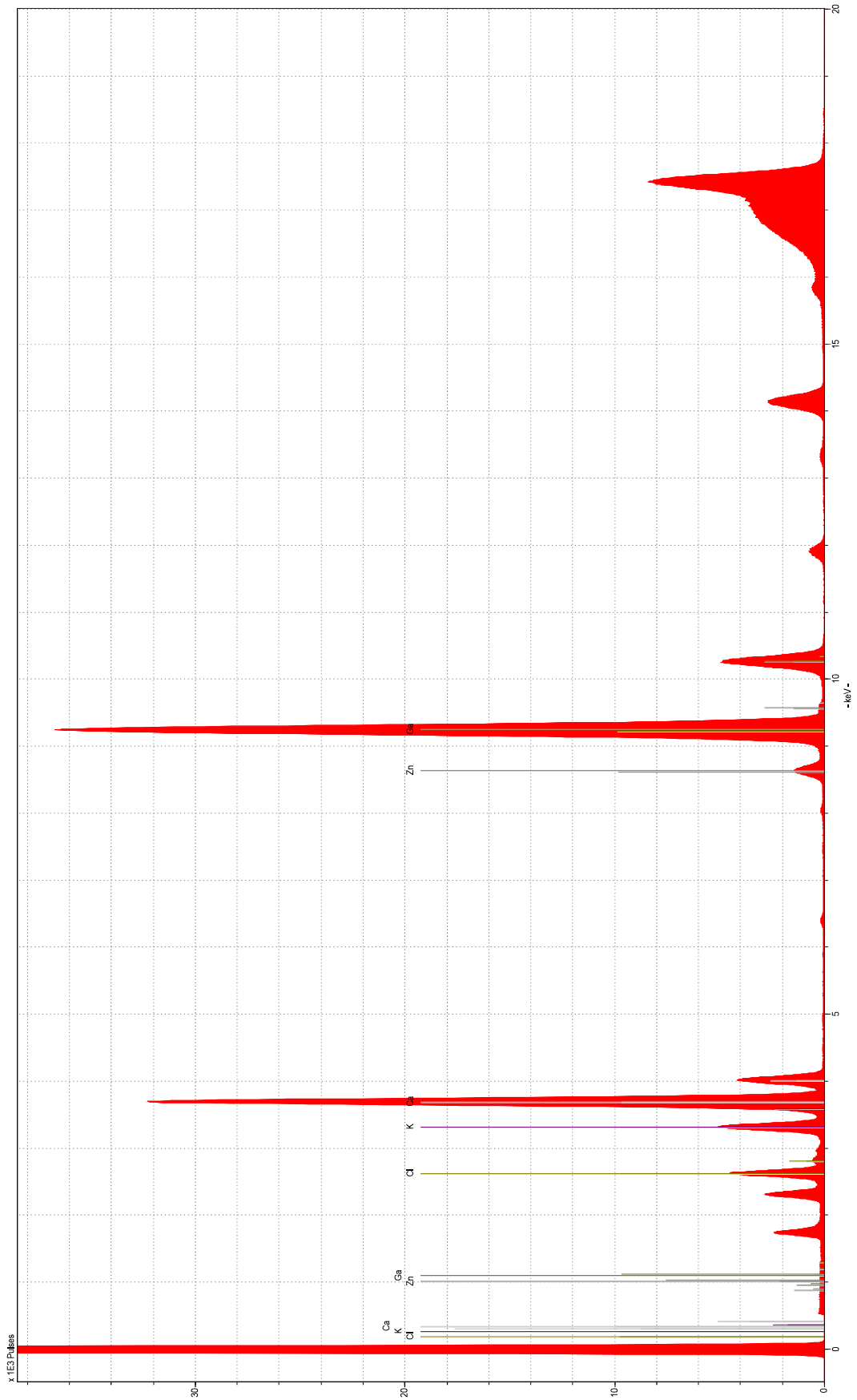
ANEXO A

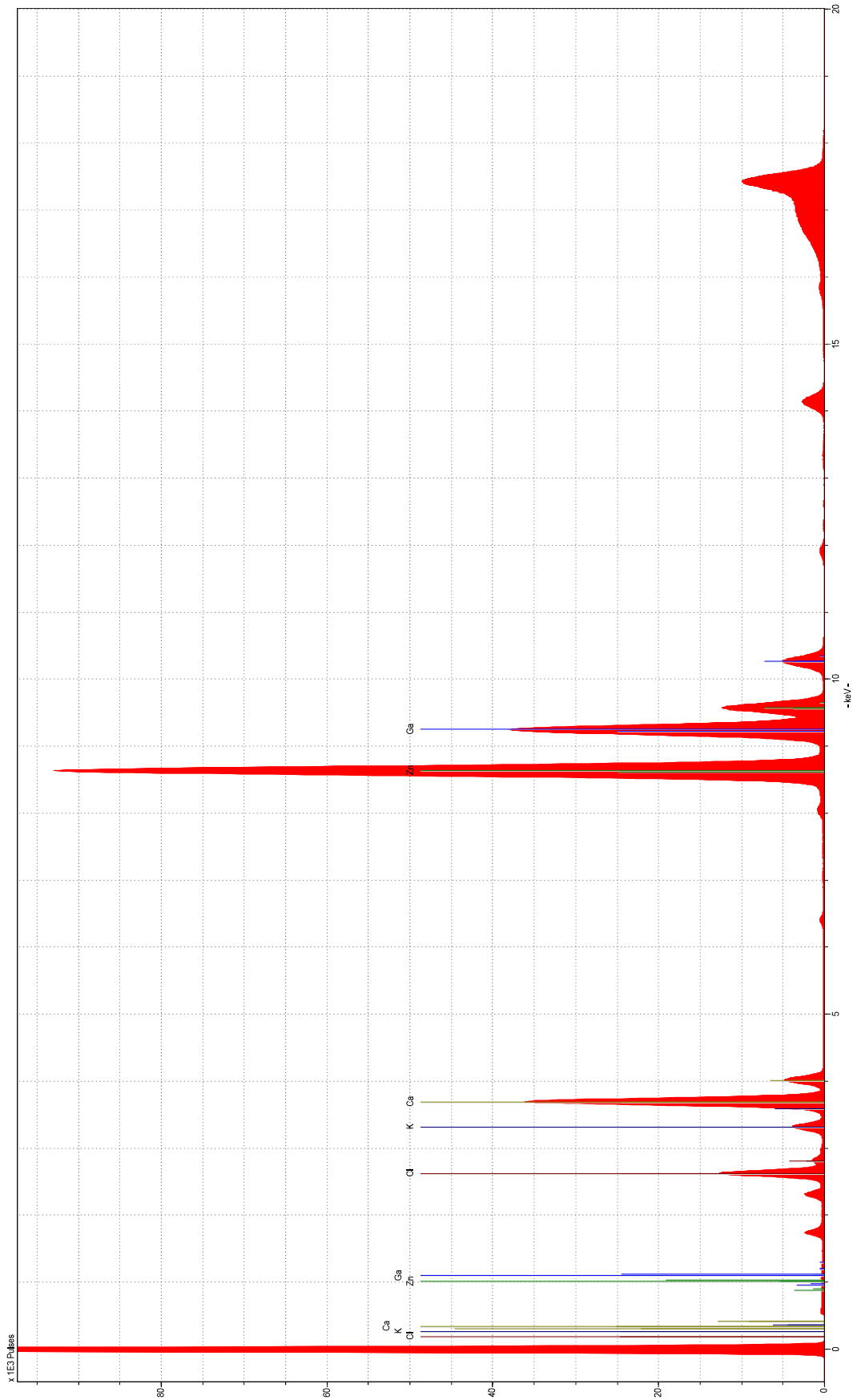






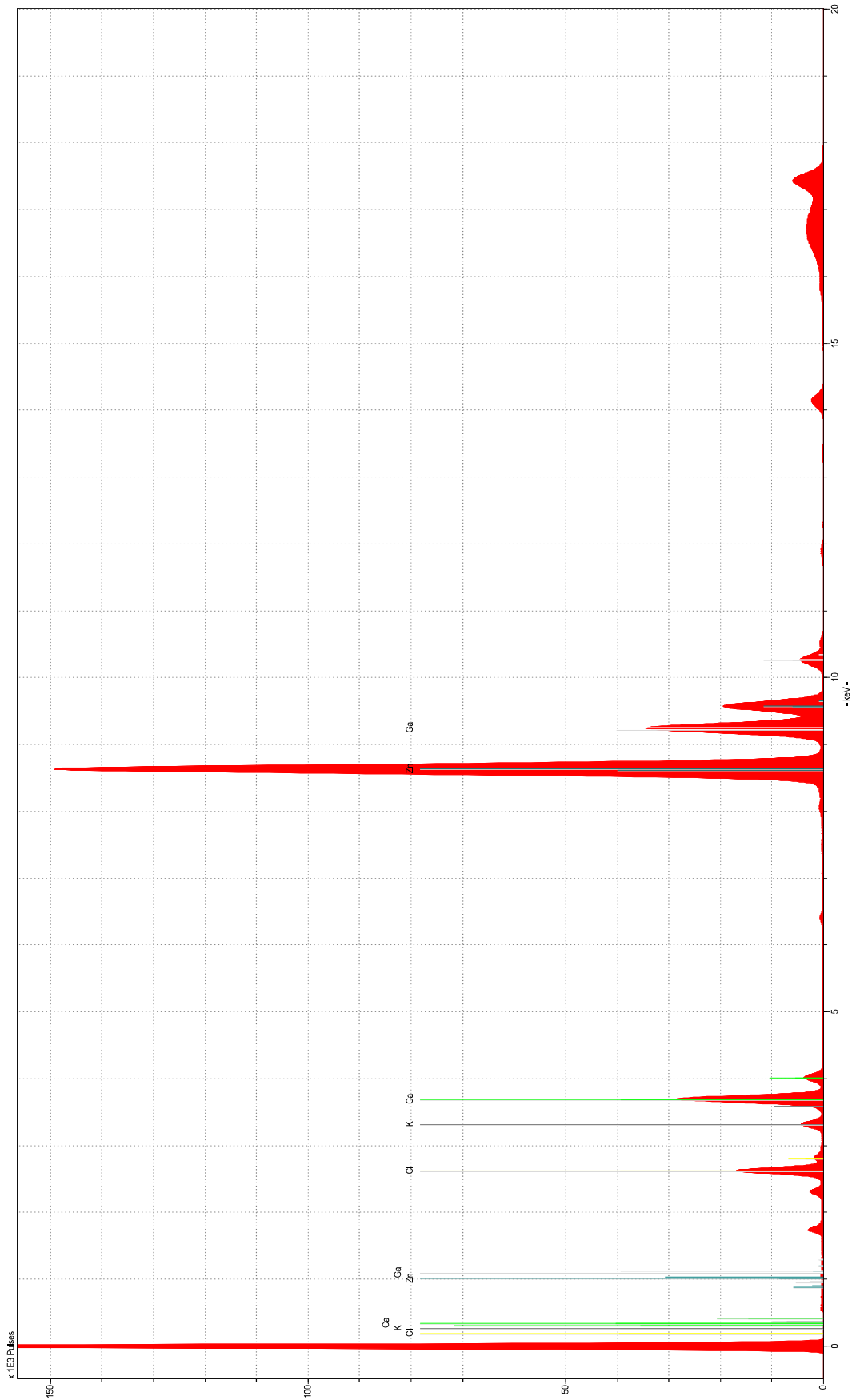
Page 2 - Spectrum: Zinc 10 ml inicial

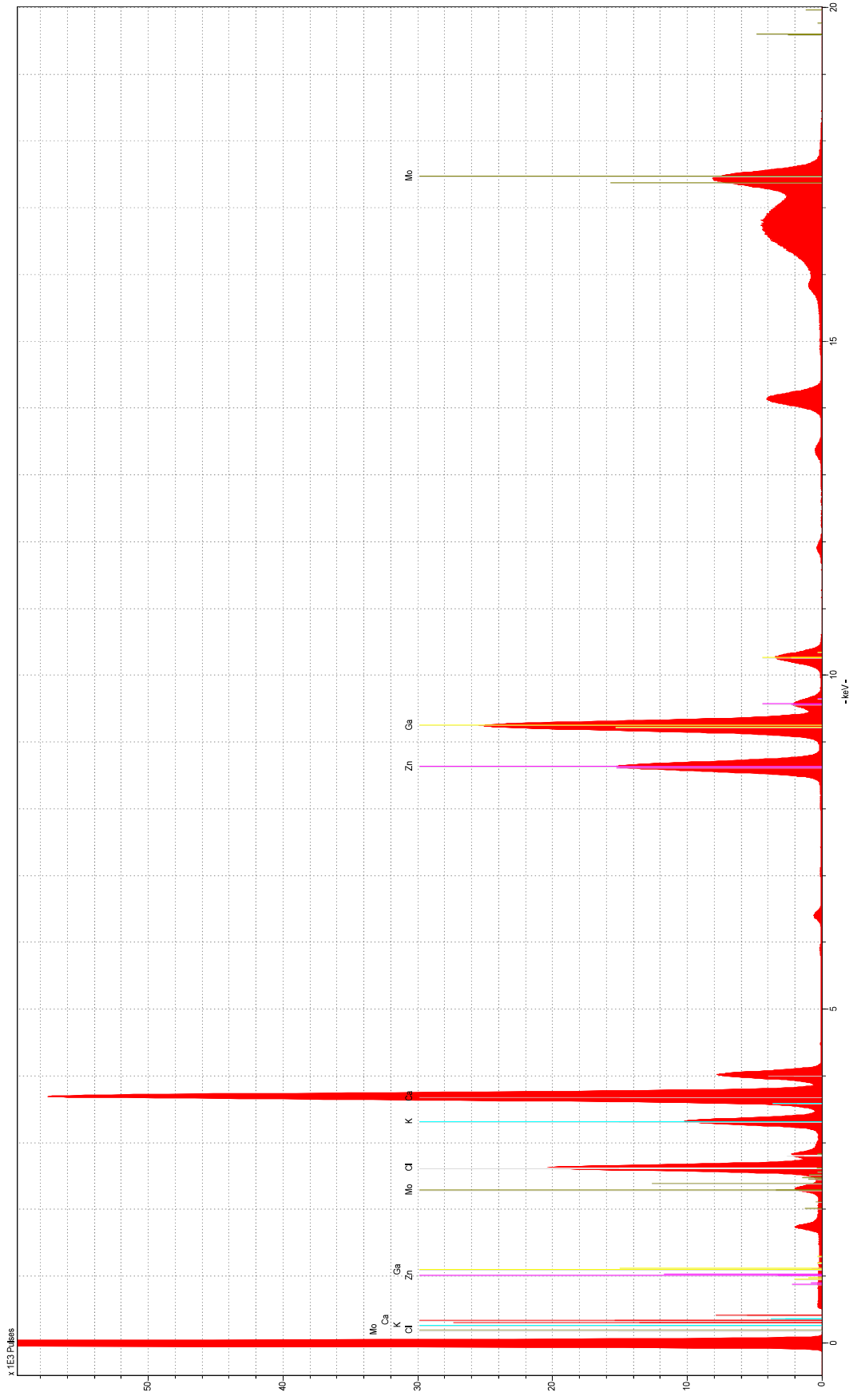


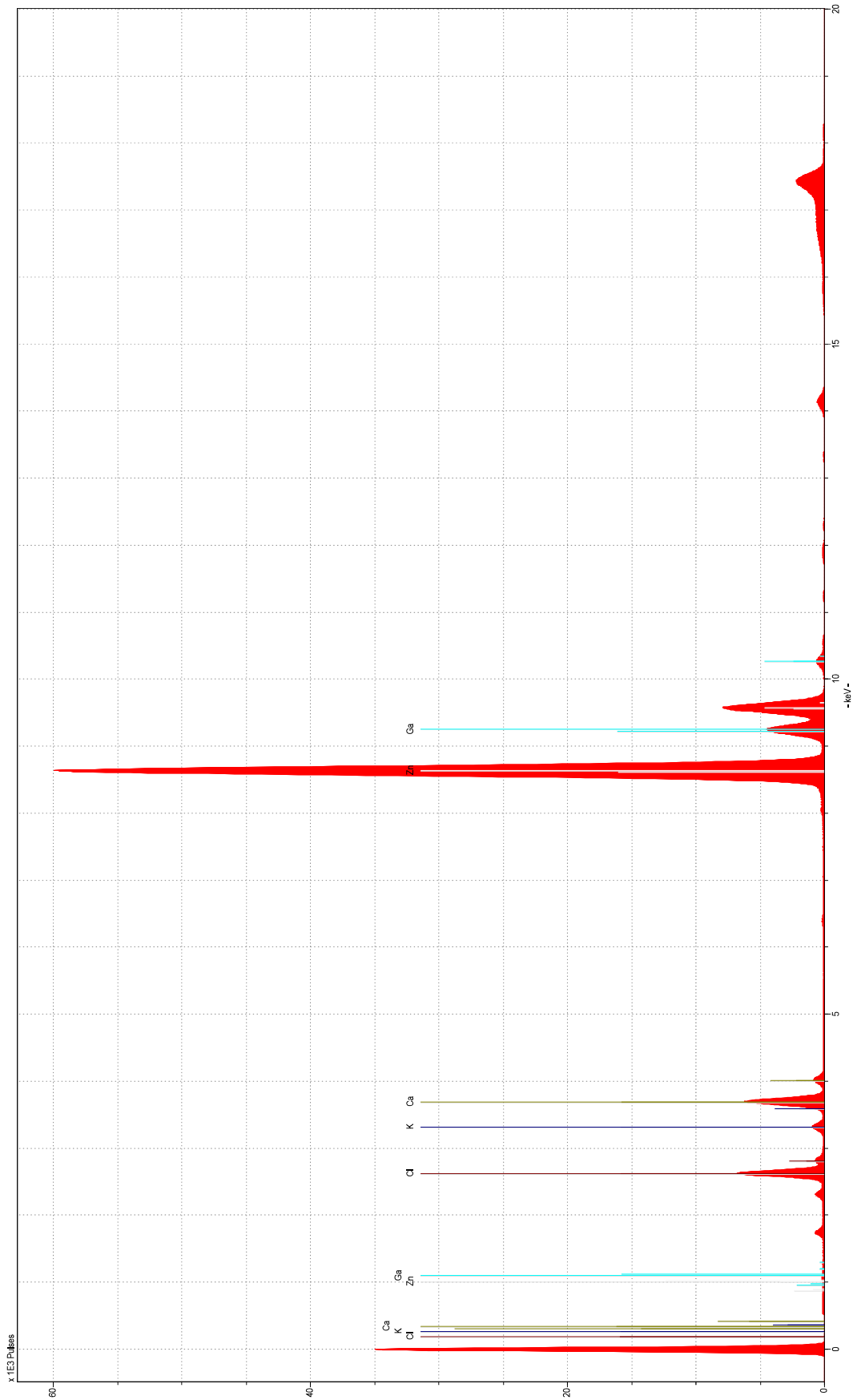


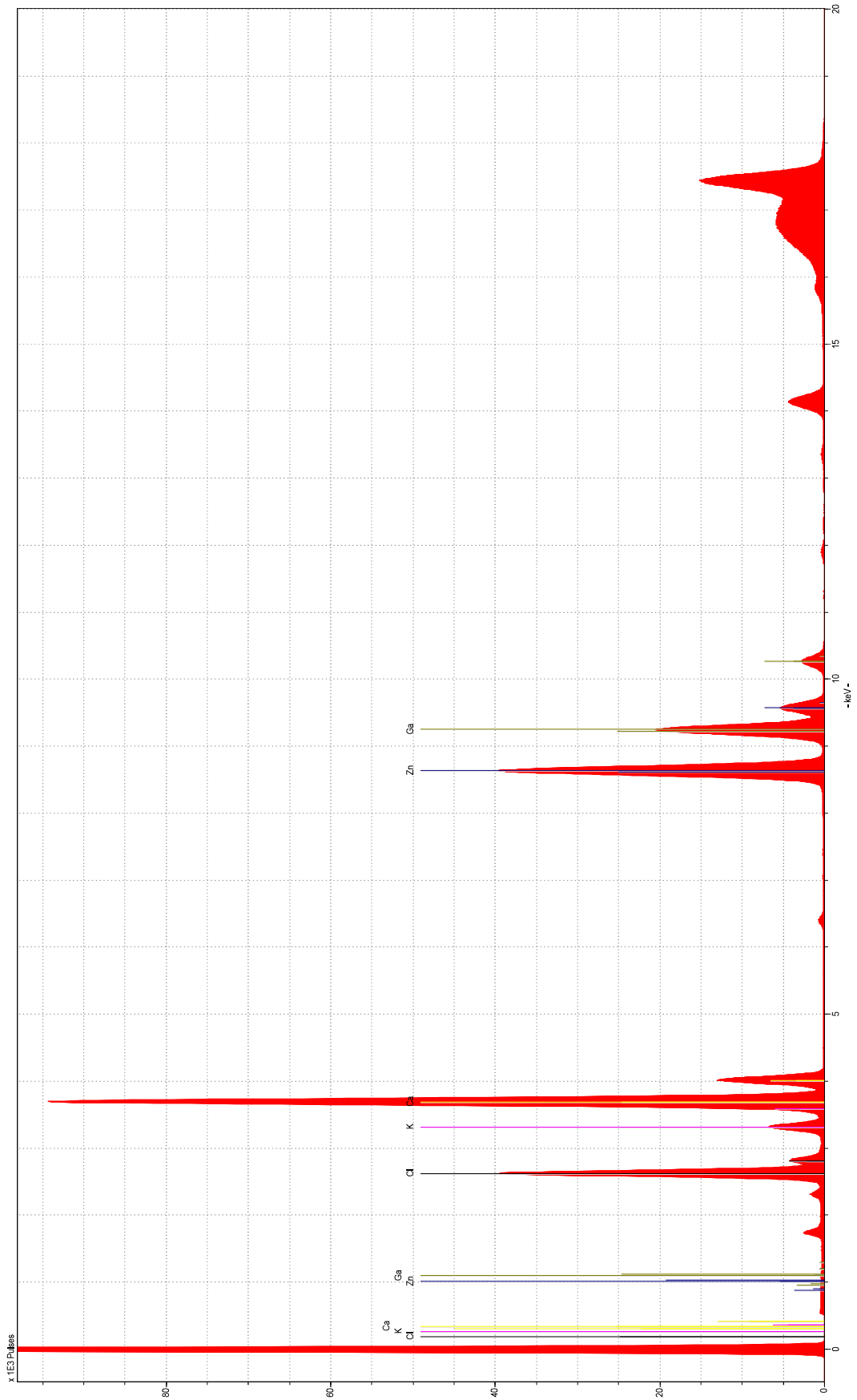
Page 2 - Spectrum: Zinc 30 ml inicial

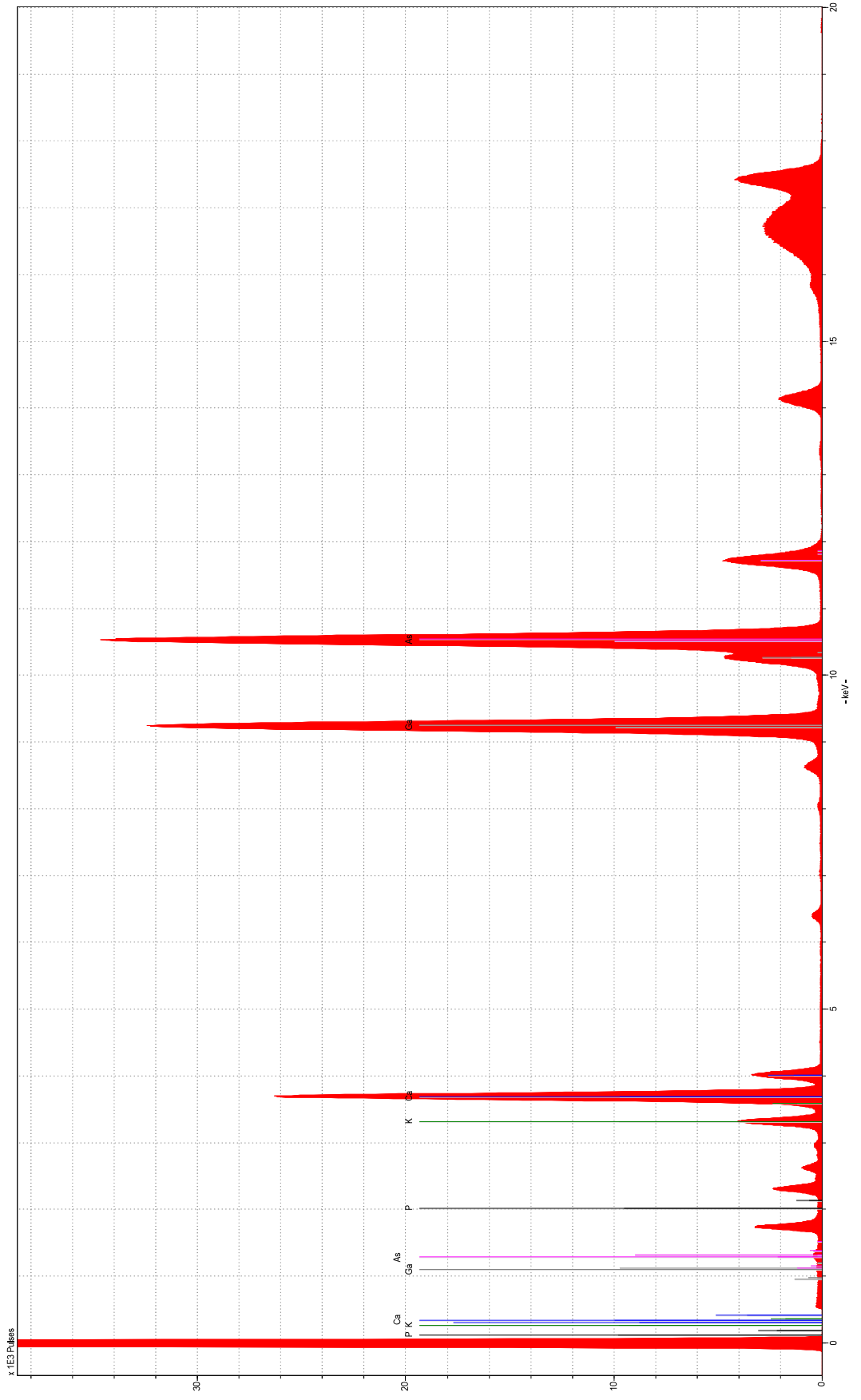


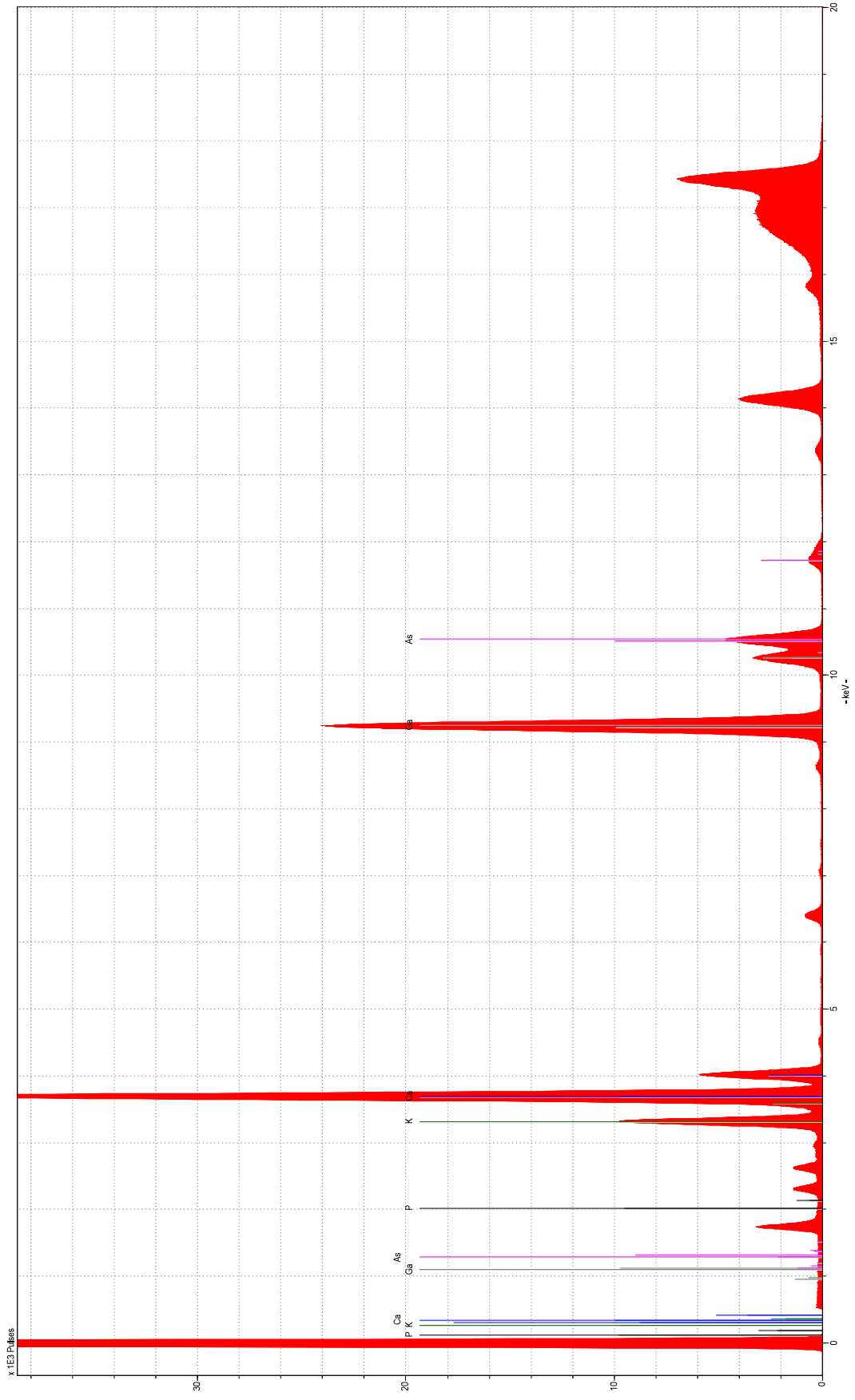


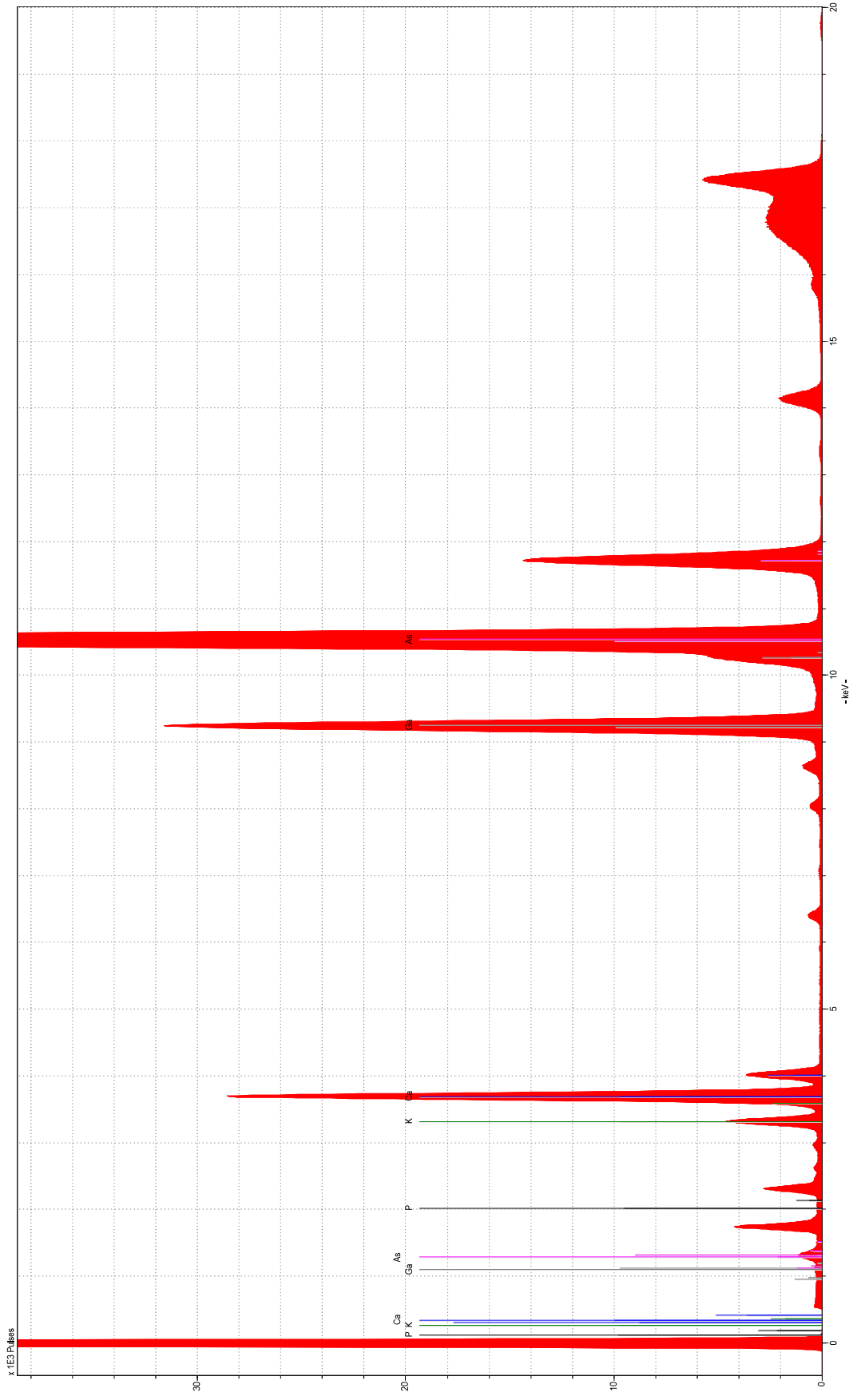


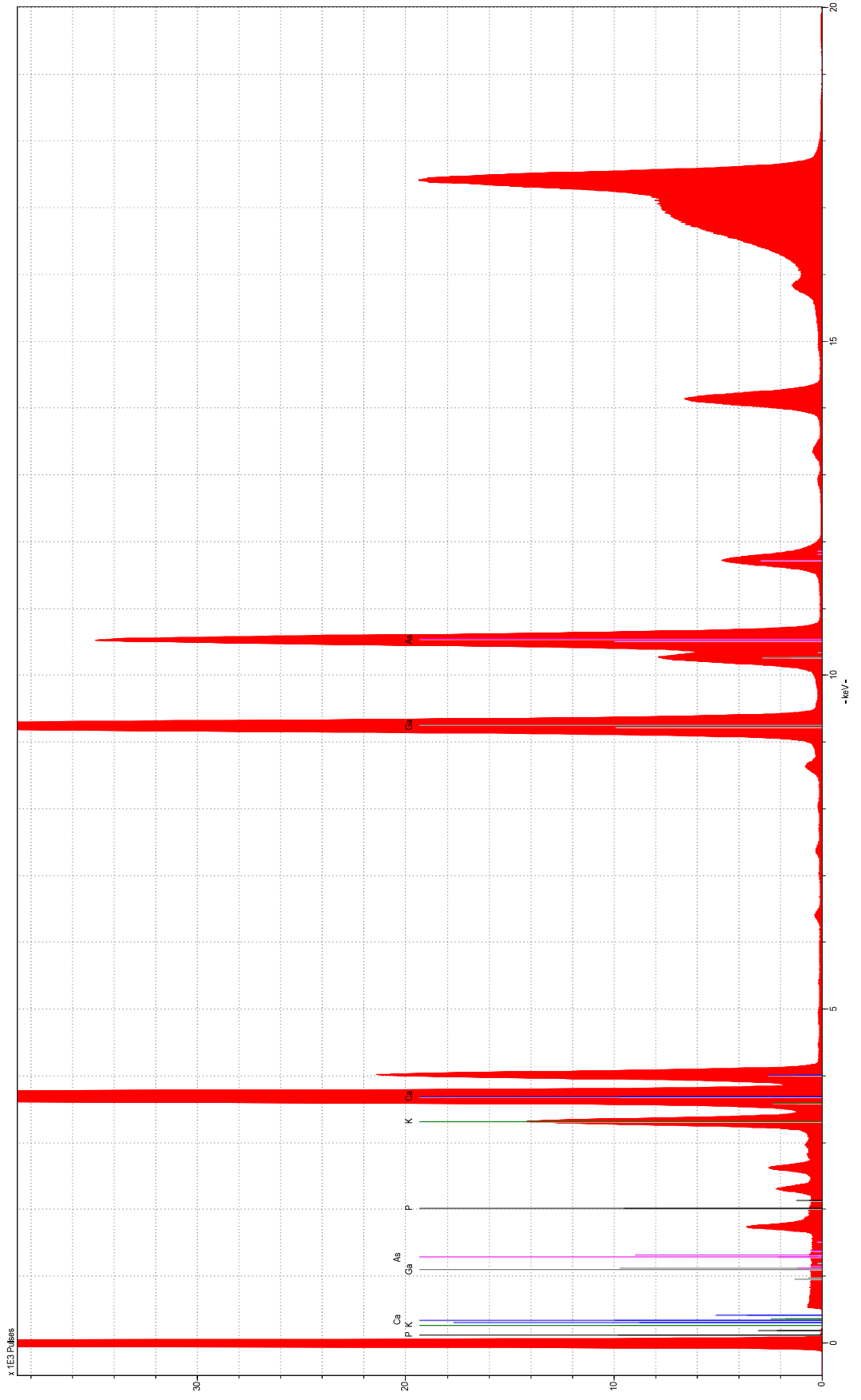


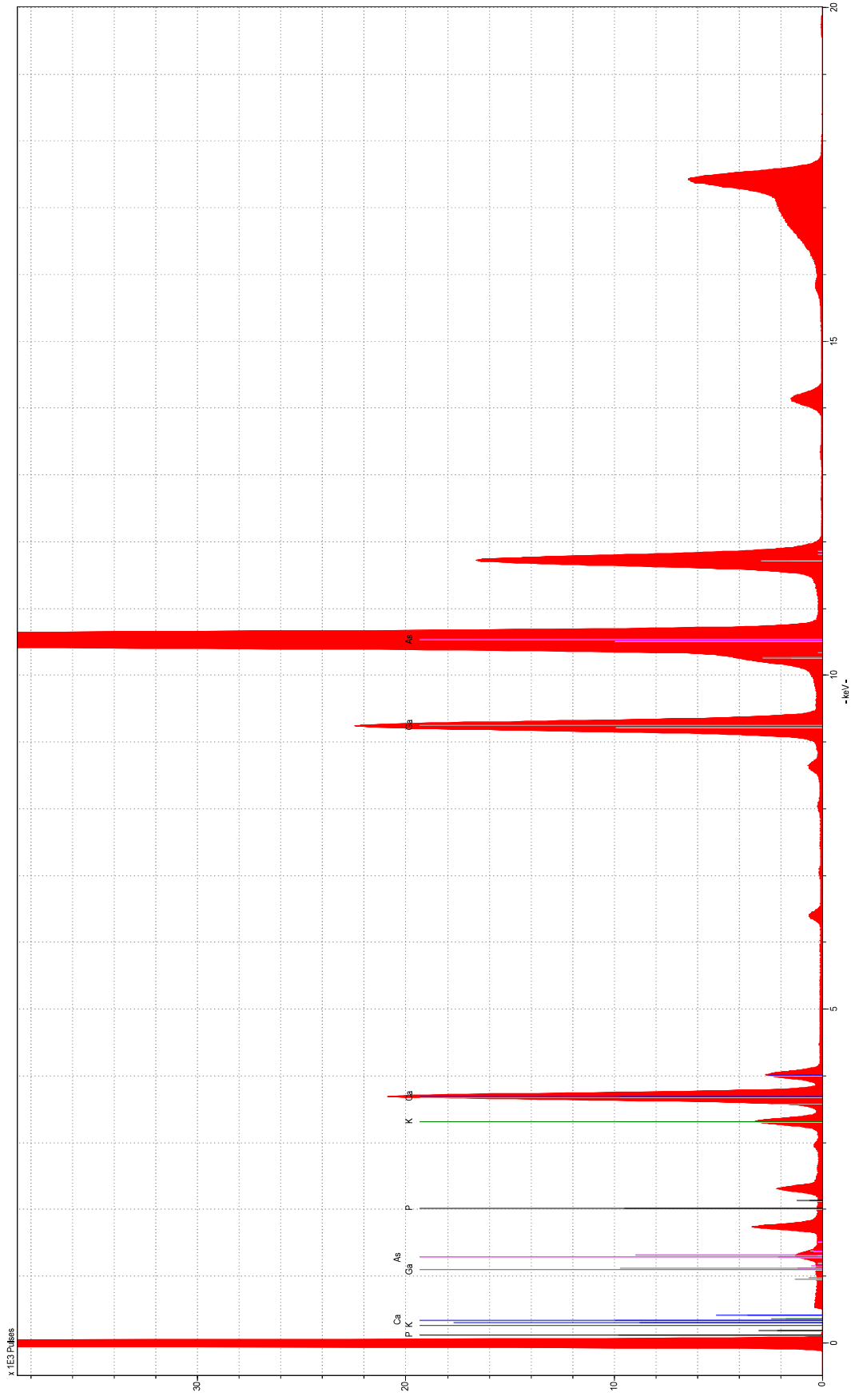


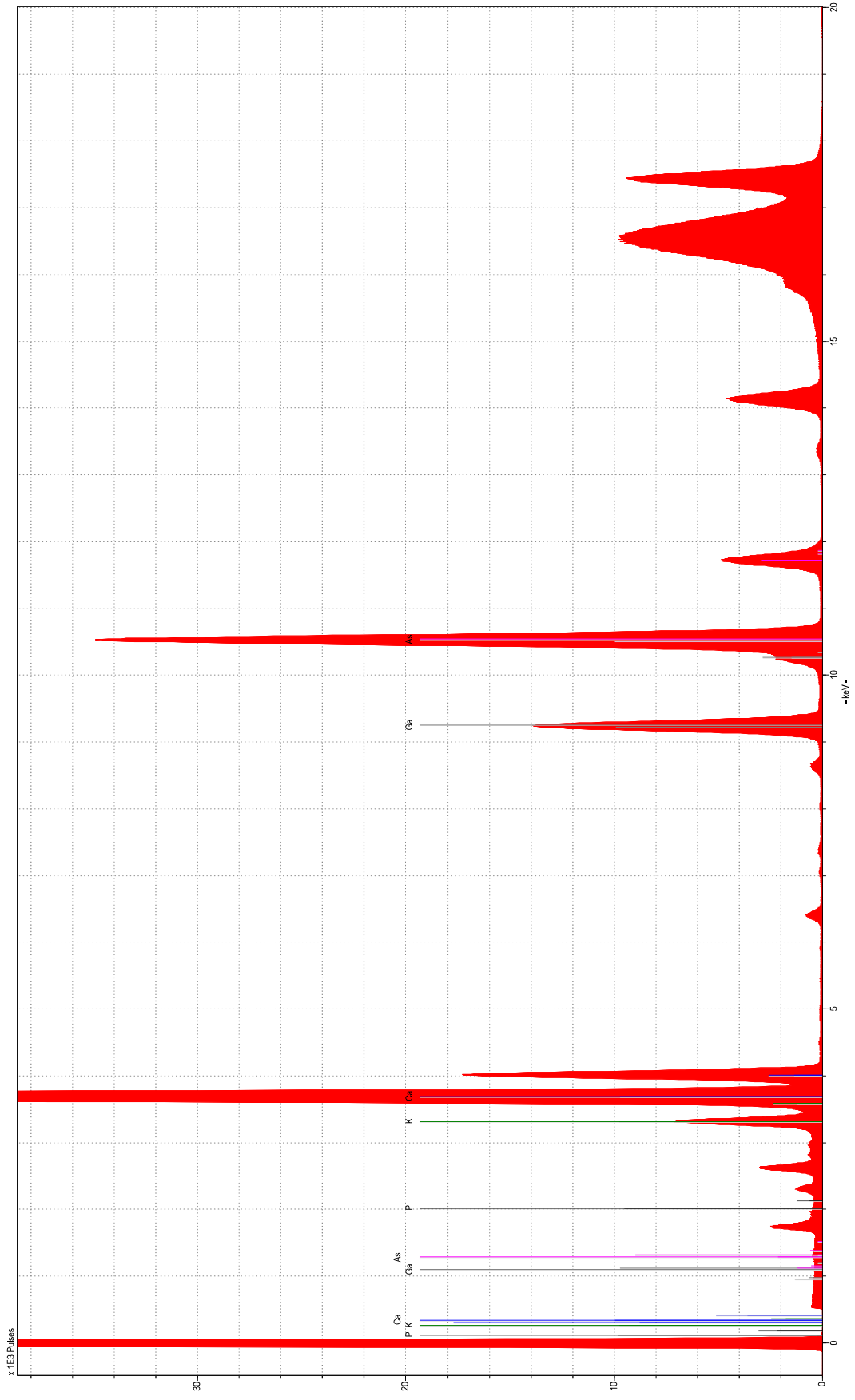


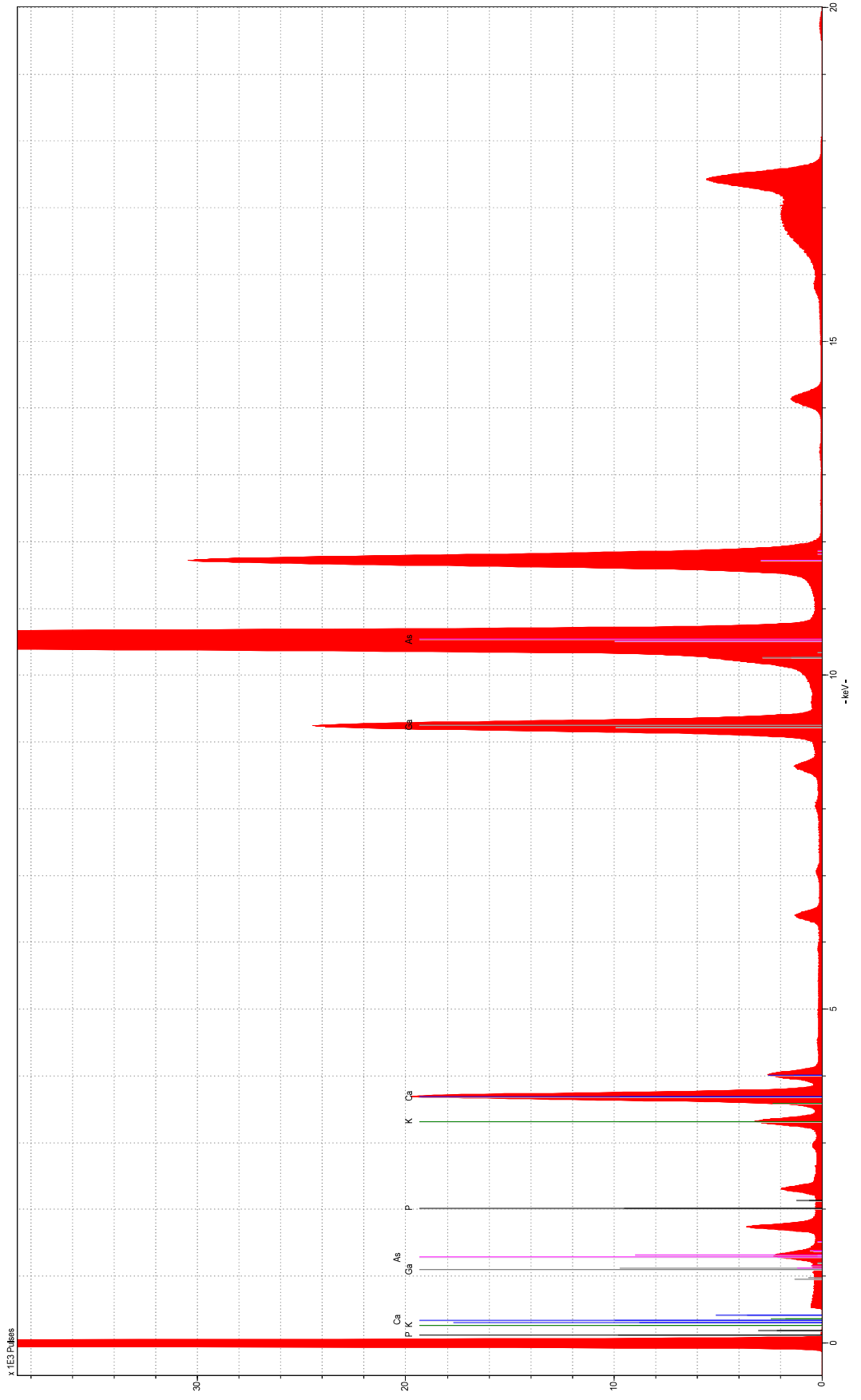


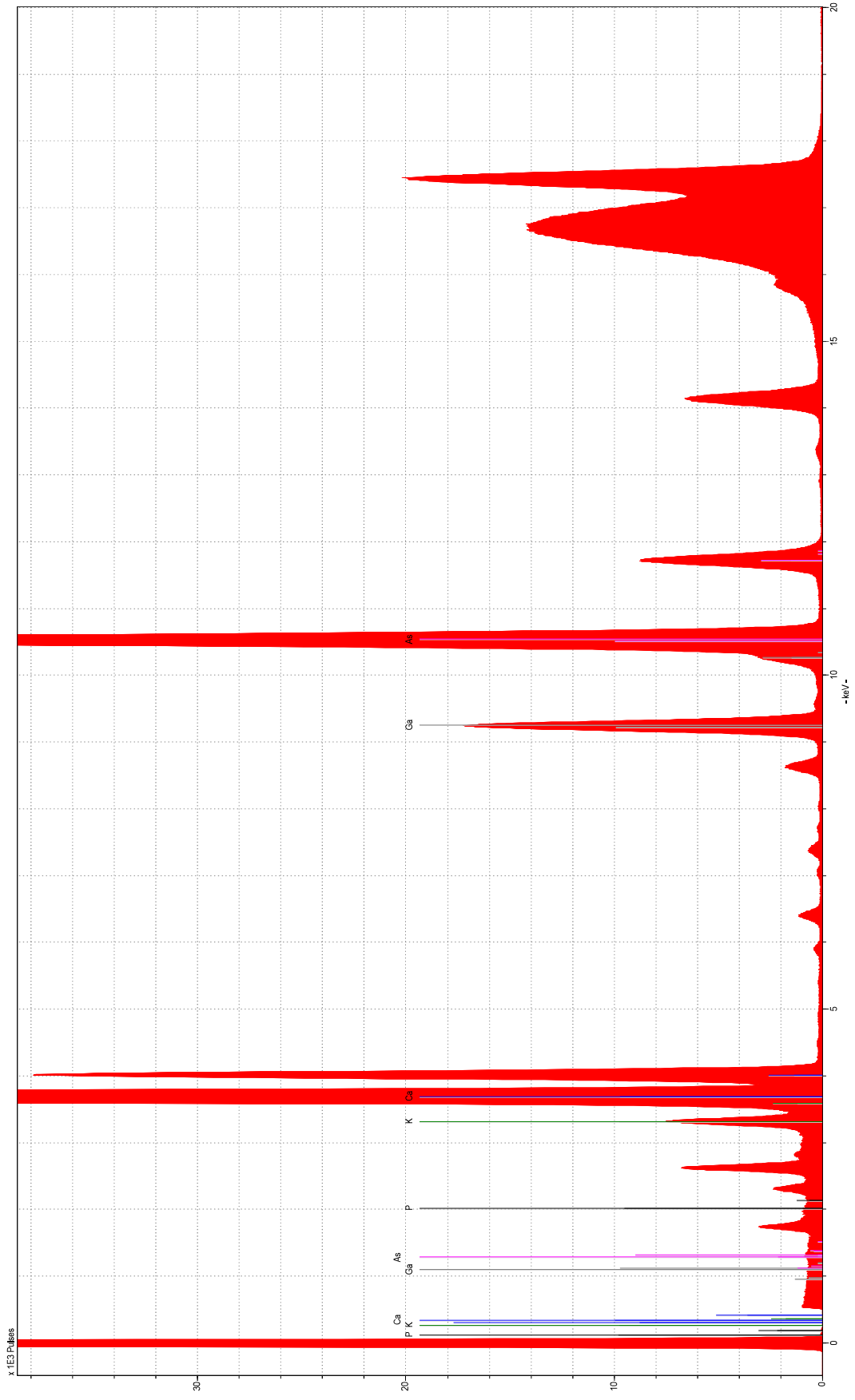


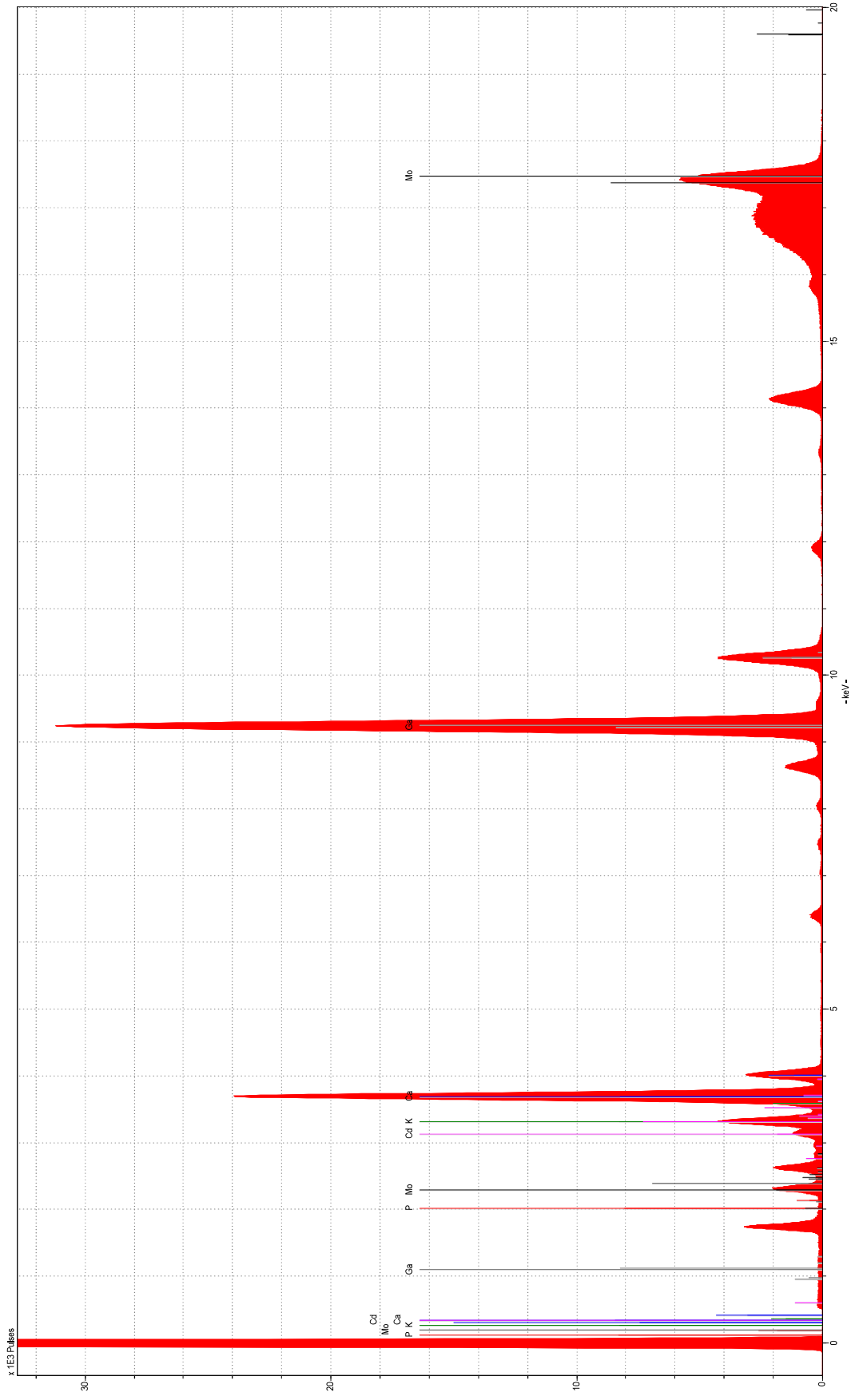


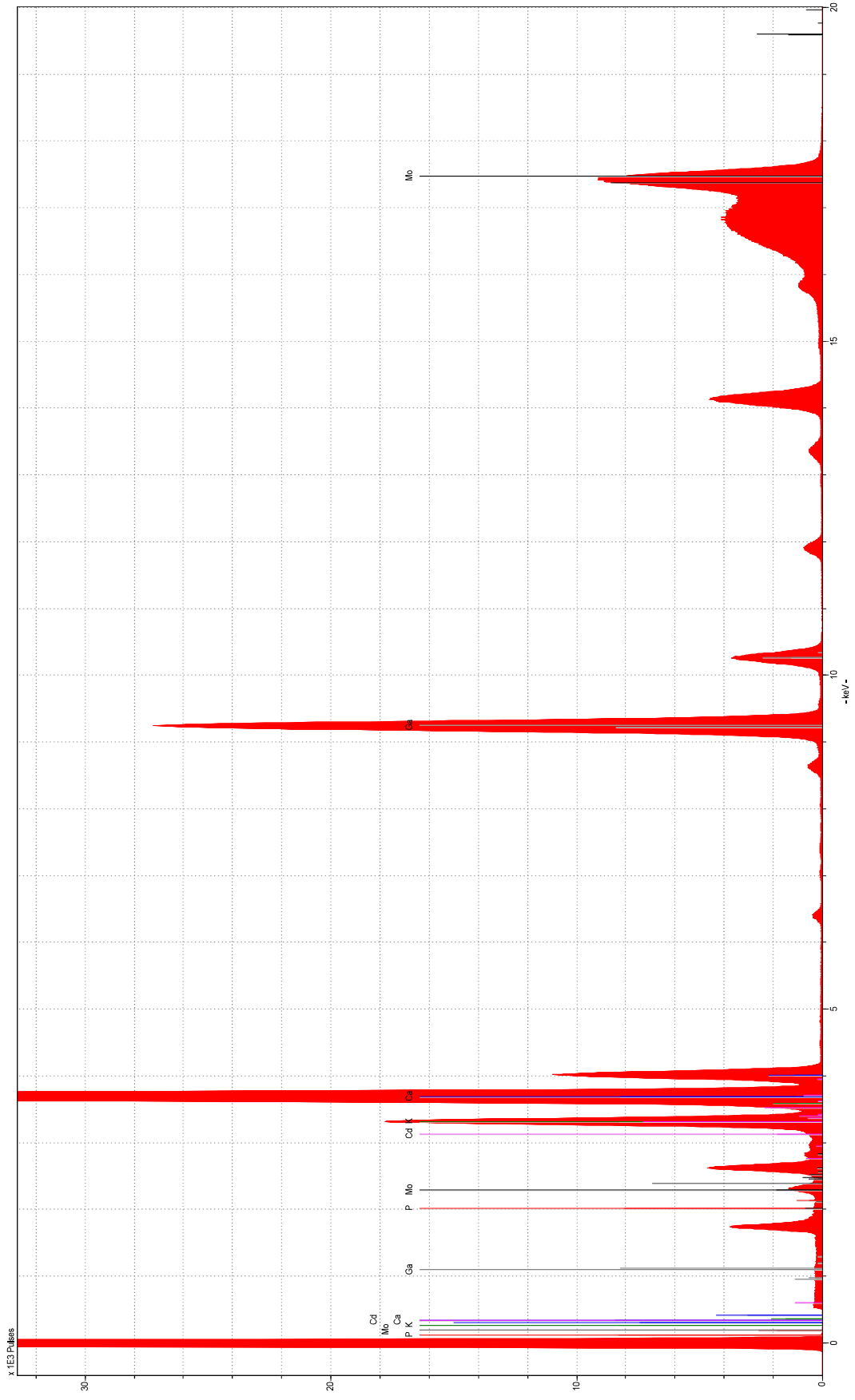




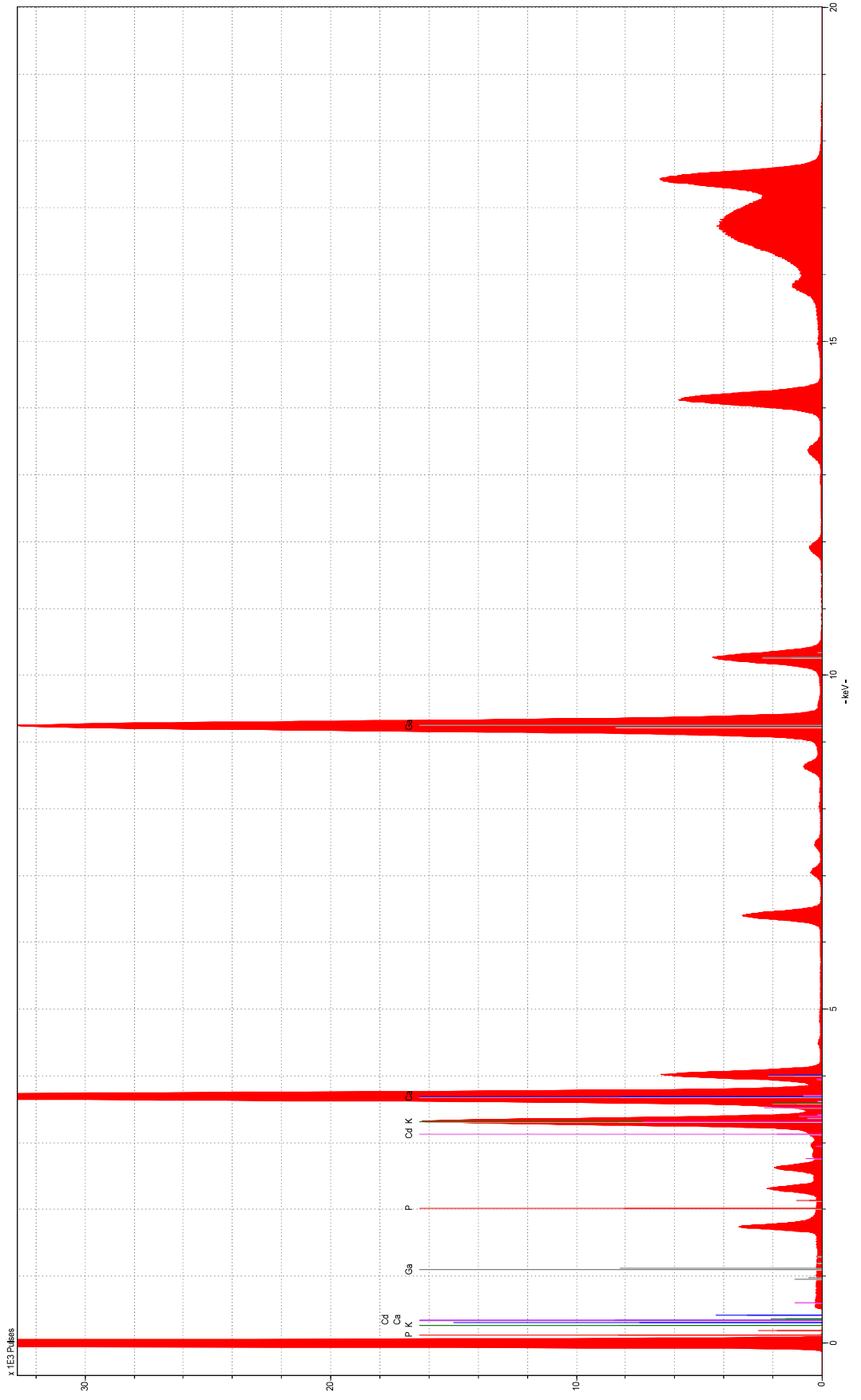


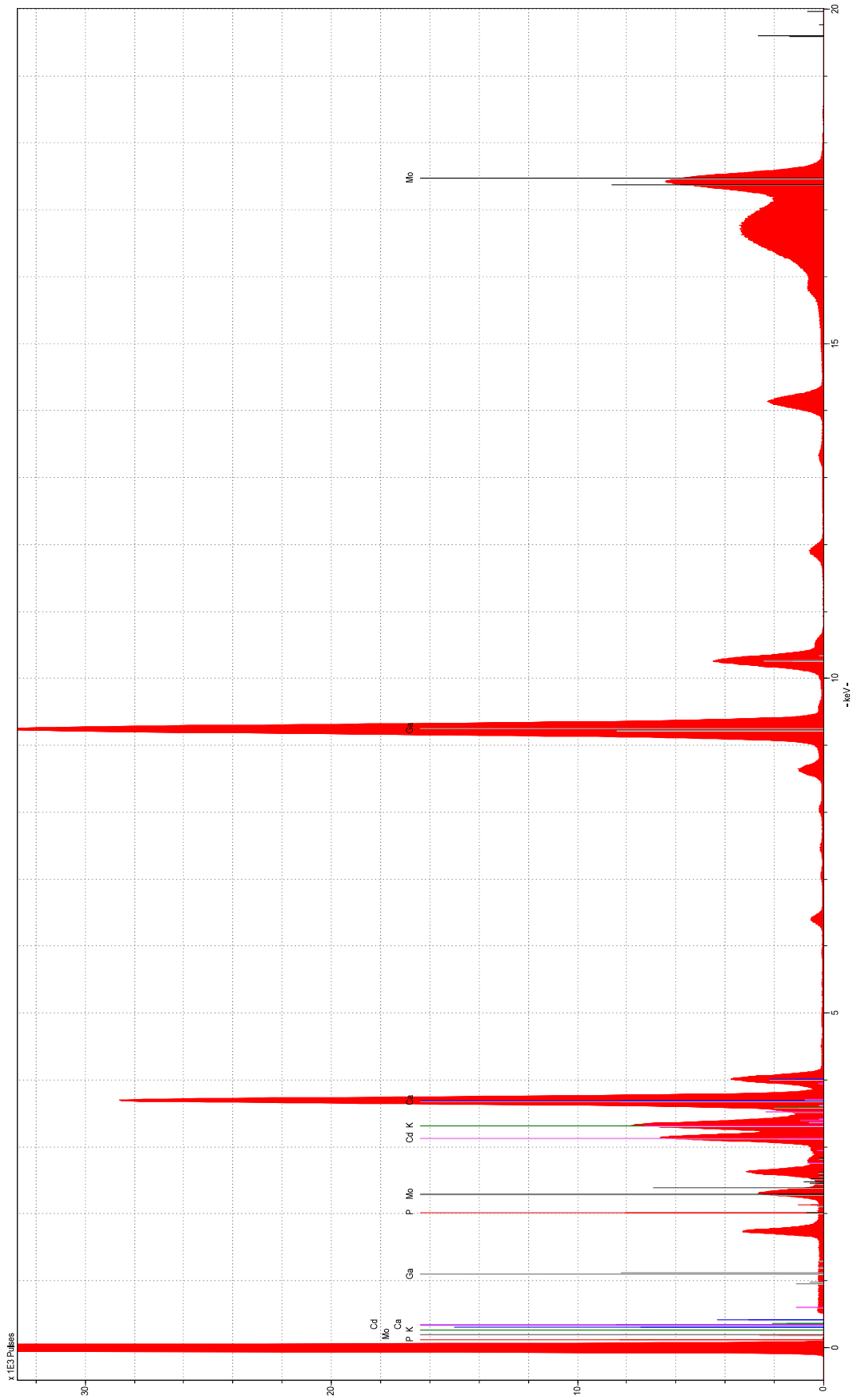


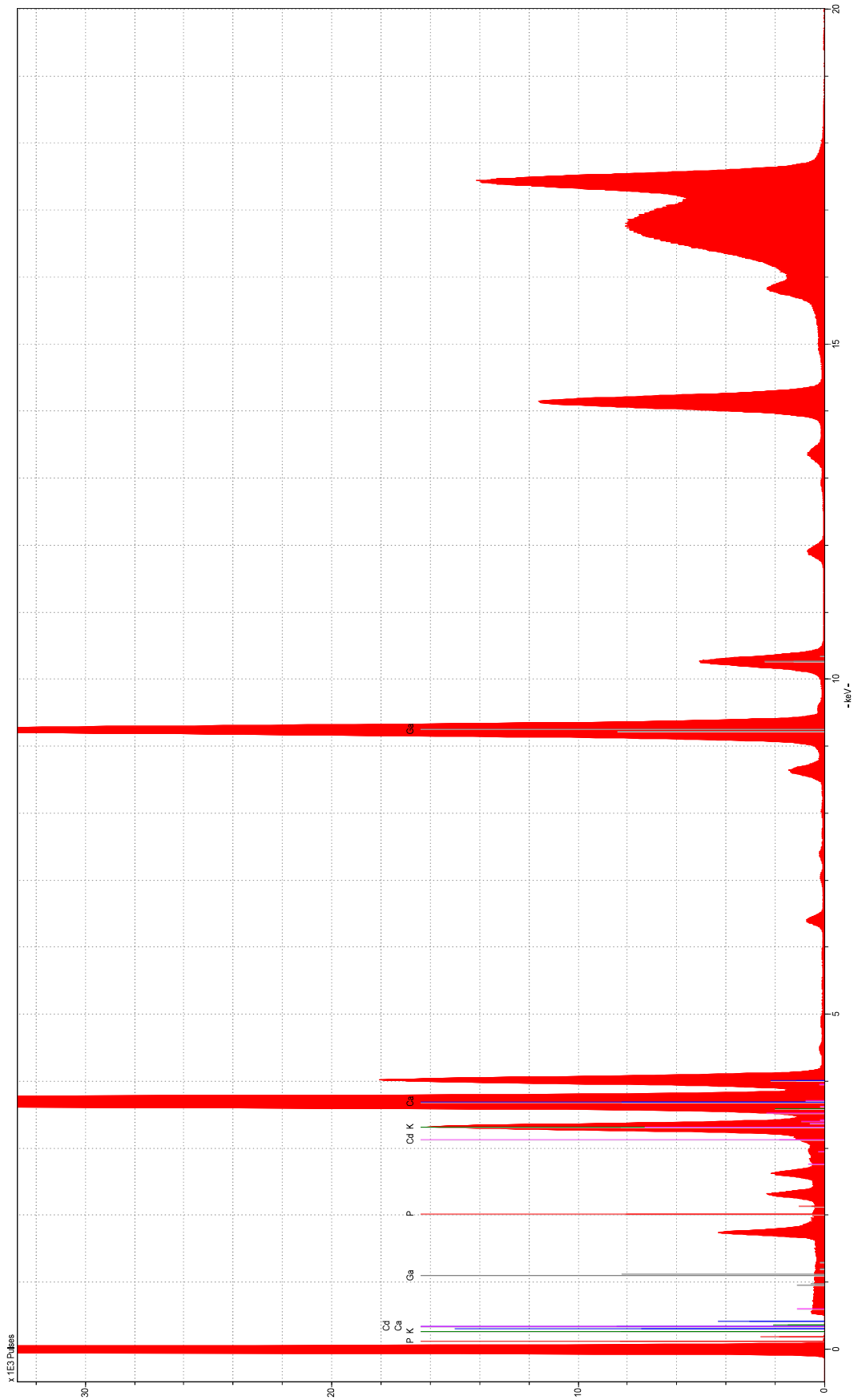


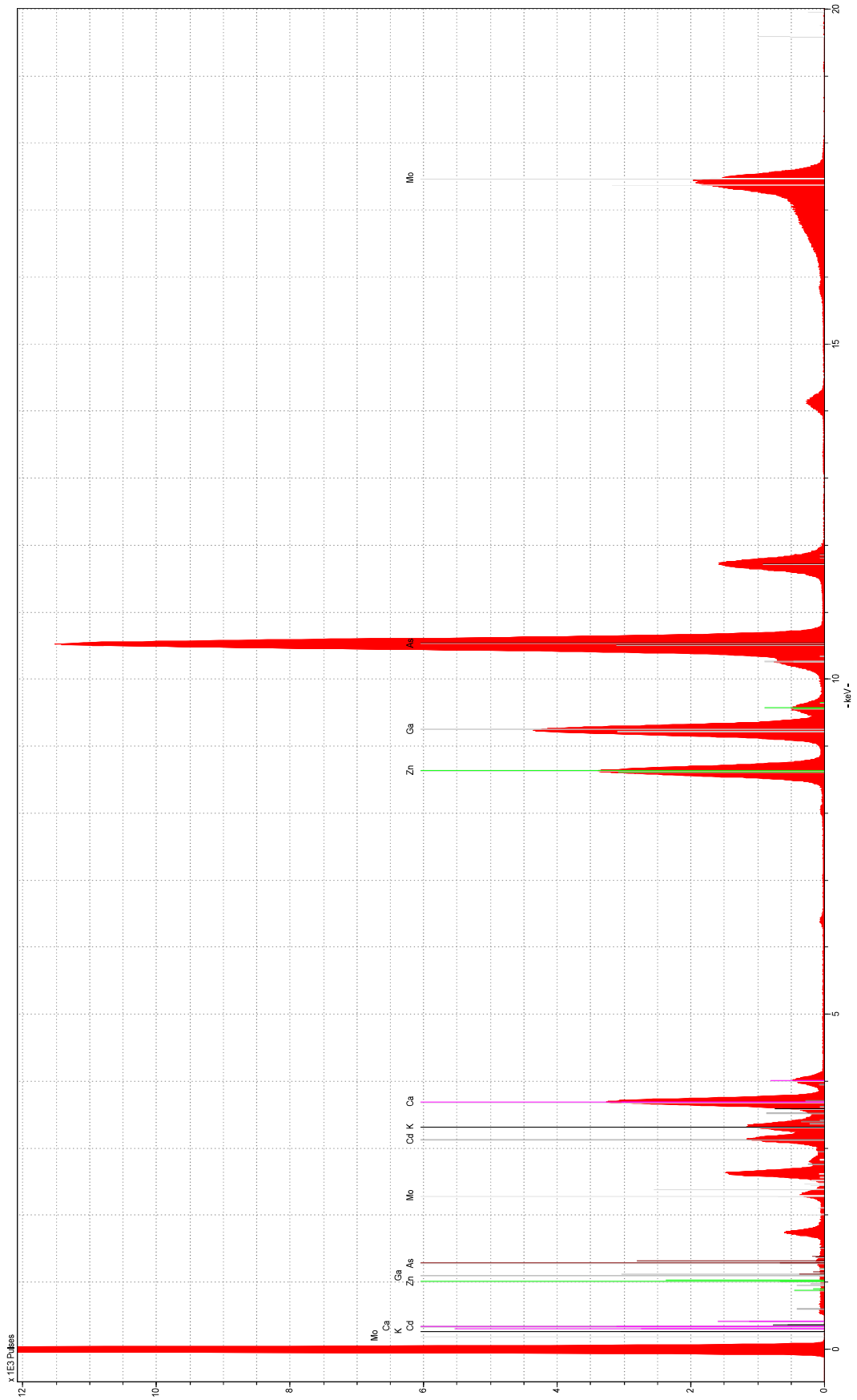


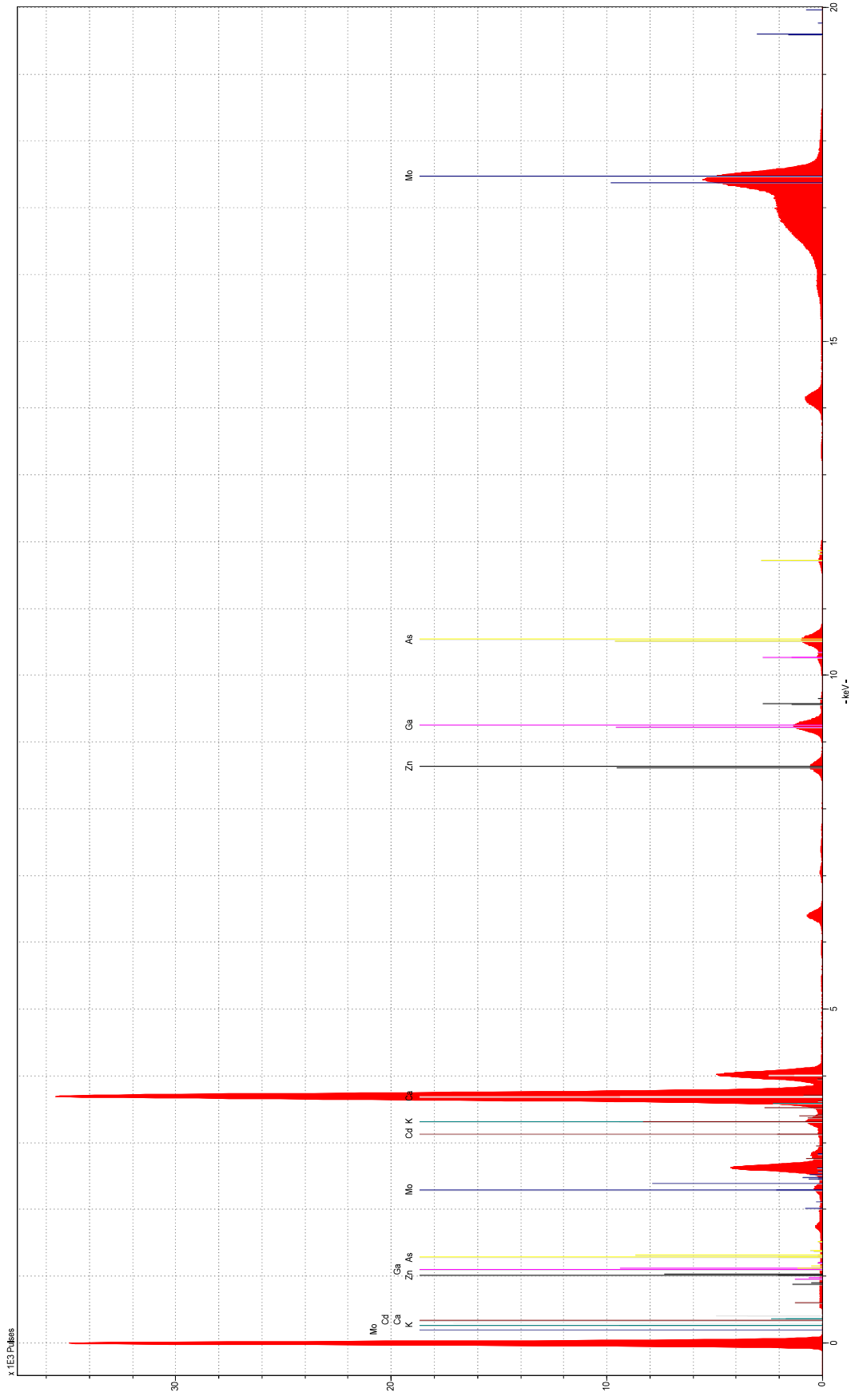








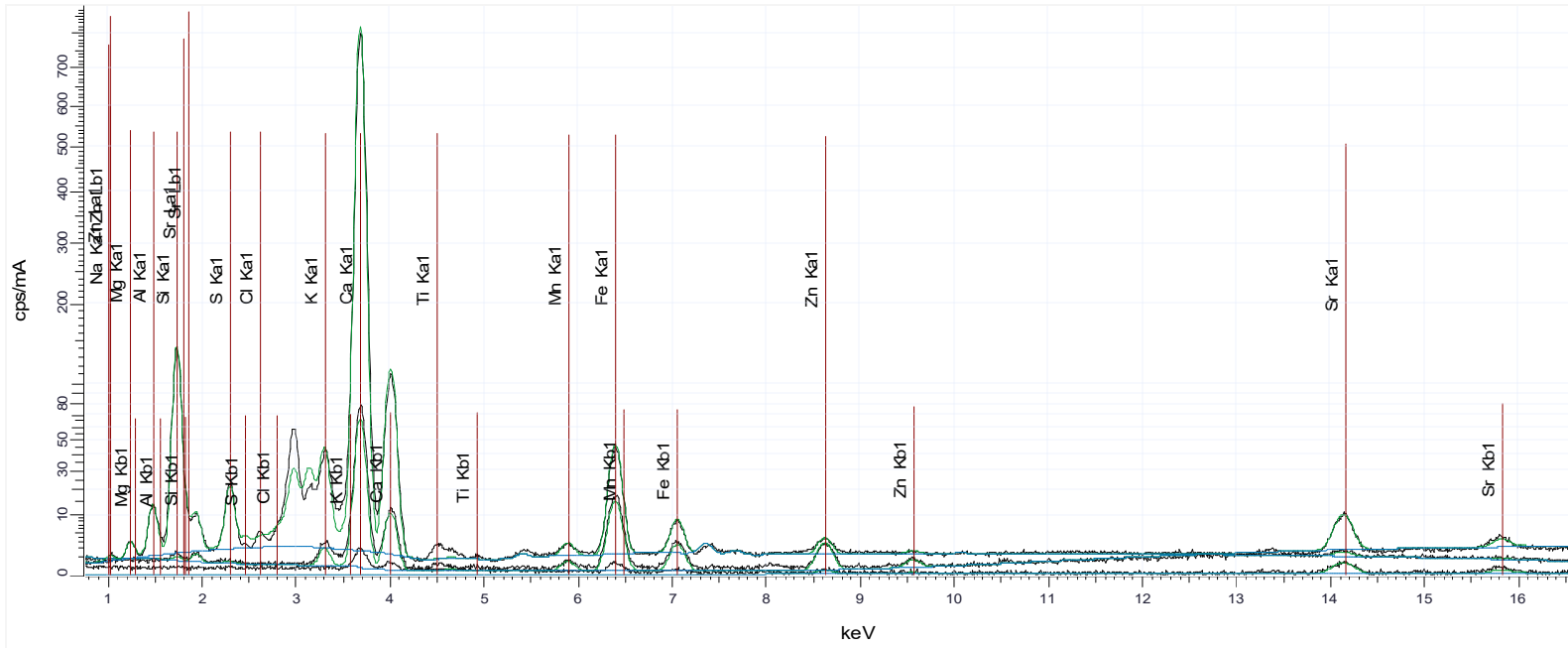




ANEXO B

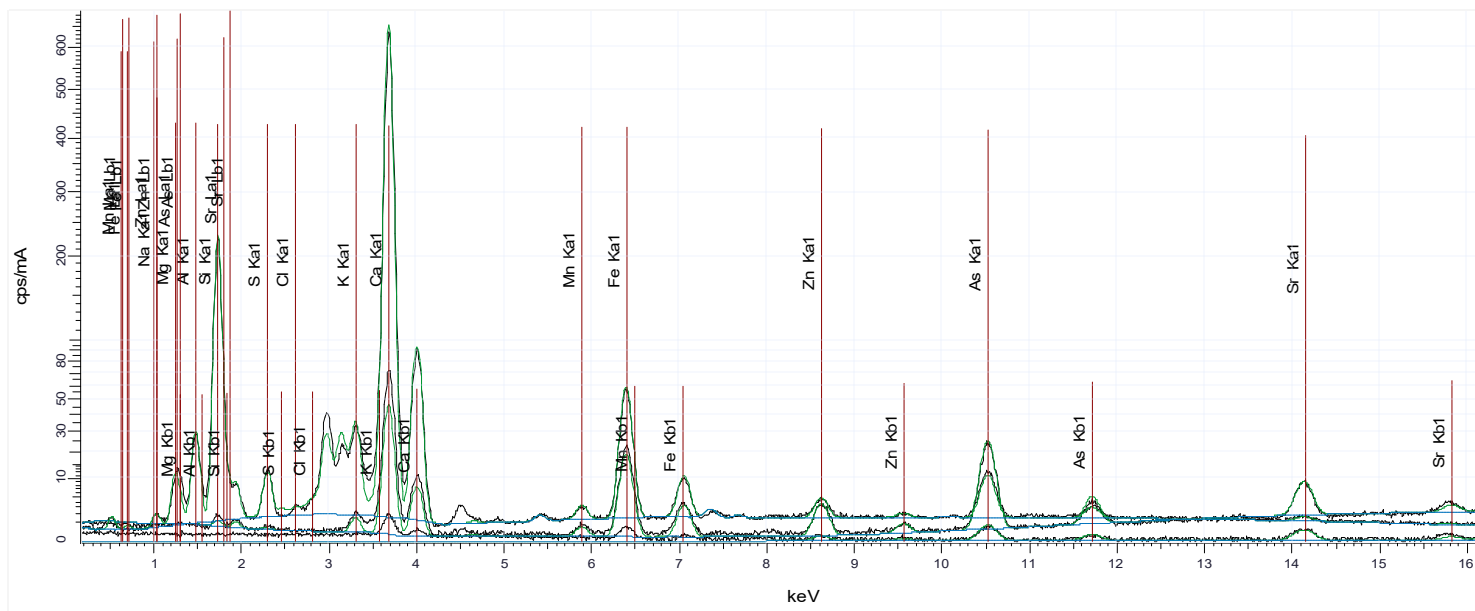
REFERENCIA CONCRETO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na2O	0.17%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	0.85%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al2O3	2.66%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO2	15.55%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO4	1.18%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	17.2002 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	1.54%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	73.66%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.16%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe2O3	3.92%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
30	ZnO	0.16%	K	Stdless	40 kV, Range 2
38	SrO	0.15%	K	Stdless	40 kV, Range 2



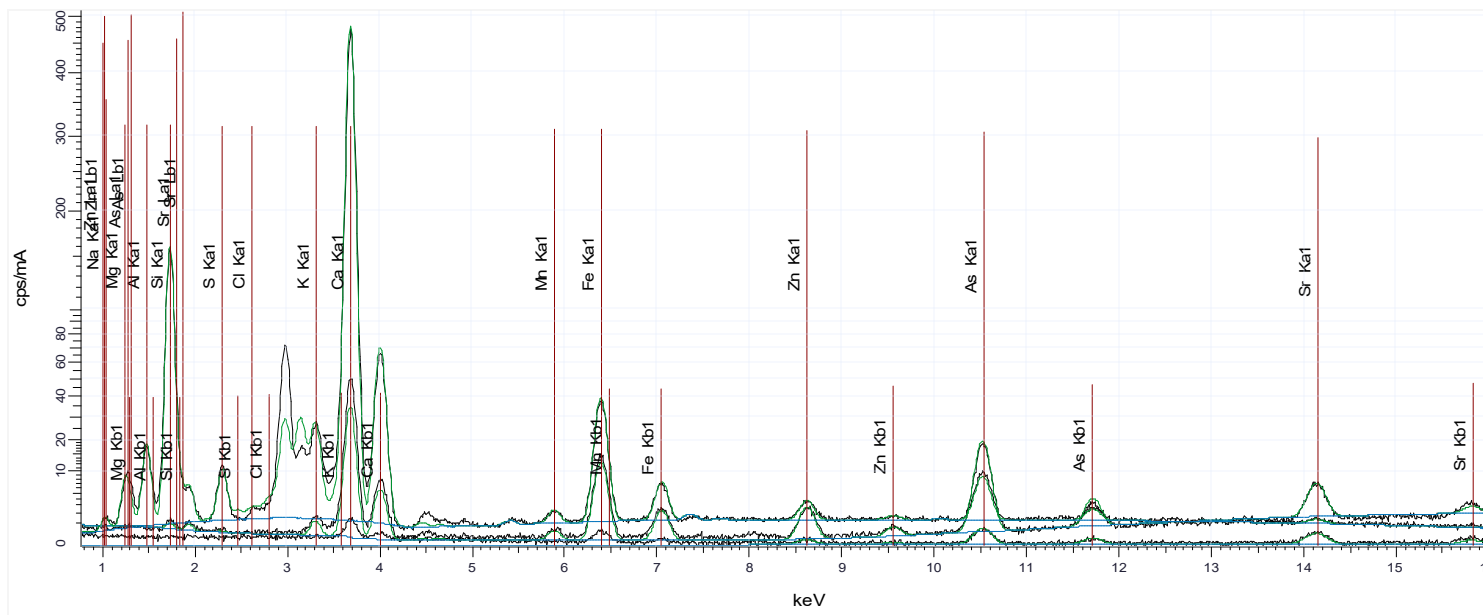
2 DIAS CONCRETO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na2O	0.85%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	3.65%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al2O3	6.27%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO2	26.59%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO4	0.70%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	1.33%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	55.47%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.14%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe2O3	4.06%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
30	ZnO	0.17%	K	Stdless	40 kV, Range 2
33	As2O3	0.66%	K	Stdless	40 kV, Range 2
38	SrO	0.11%	K	Stdless	40 kV, Range 2



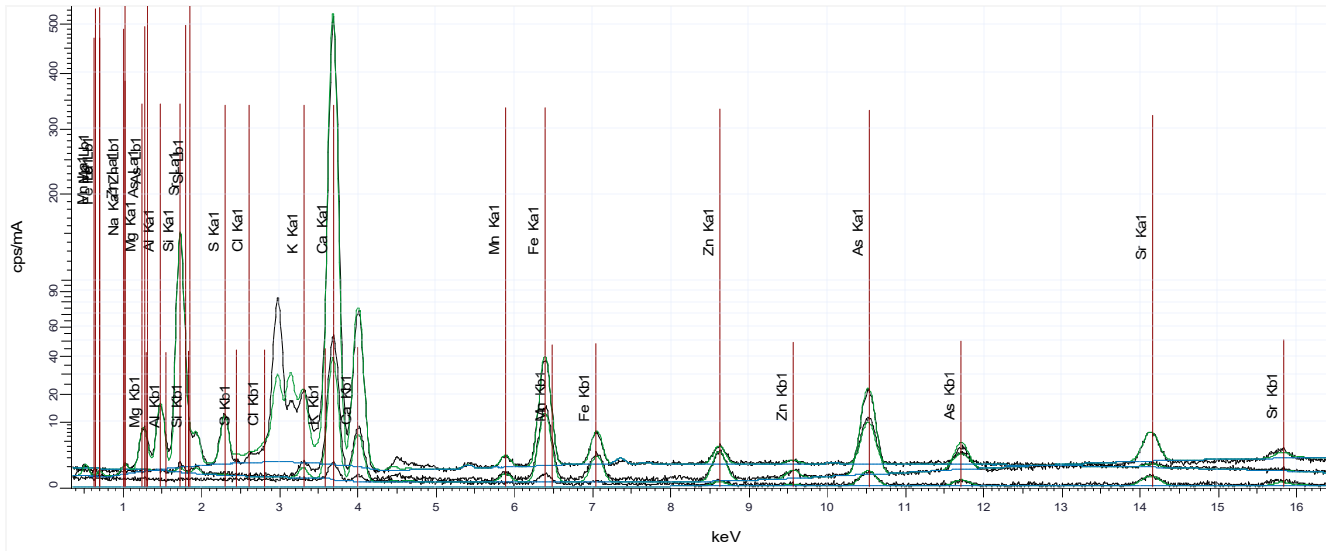
4 DÍAS CONCRETO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na2O	0.78%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	3.42%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al2O3	5.31%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO2	25.61%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO4	0.88%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	1.33%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	57.61%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.14%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe2O3	3.88%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
30	ZnO	0.18%	K	Stdless	40 kV, Range 2
33	As2O3	0.74%	K	Stdless	40 kV, Range 2
38	SrO	0.12%	K	Stdless	40 kV, Range 2



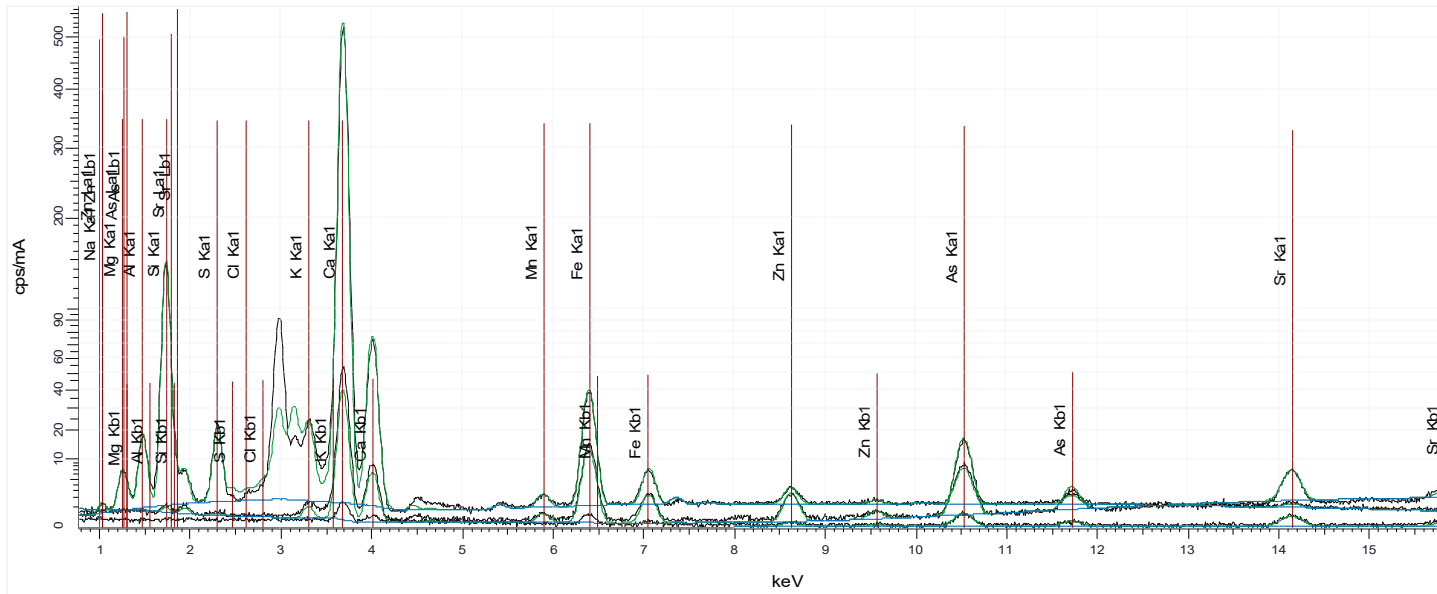
6 DÍAS CONCRETO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na2O	0.54%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	2.55%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al2O3	4.66%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO2	23.60%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO4	0.96%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	0.93%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	61.43%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.14%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe2O3	3.97%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
30	ZnO	0.21%	K	Stdless	40 kV, Range 2
33	As2O3	0.88%	K	Stdless	40 kV, Range 2
38	SrO	0.12%	K	Stdless	40 kV, Range 2



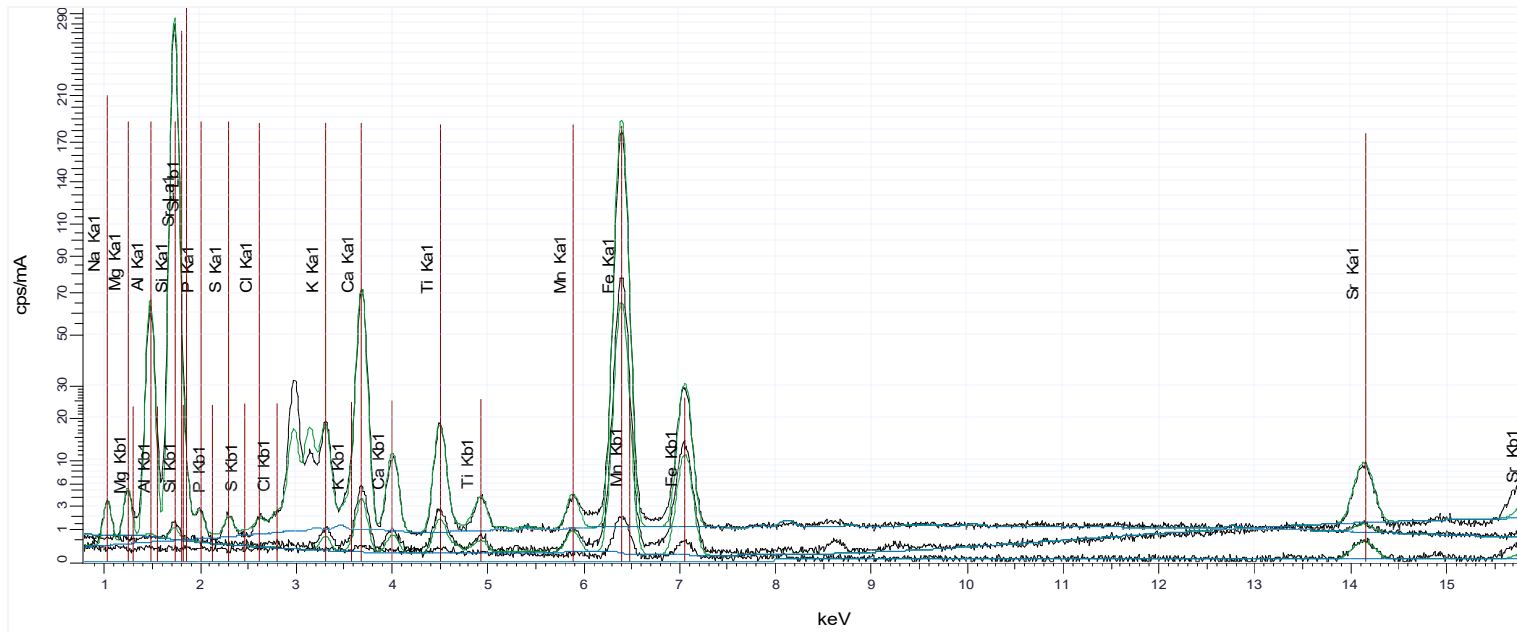
8 DÍAS COCNETO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na2O	0.47%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	2.32%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al2O3	5.01%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO2	22.71%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO4	1.78%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	1.00%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	61.68%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.15%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe2O3	3.96%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
30	ZnO	0.17%	K	Stdless	40 kV, Range 2
33	As2O3	0.63%	K	Stdless	40 kV, Range 2
38	SrO	0.12%	K	Stdless	40 kV, Range 2



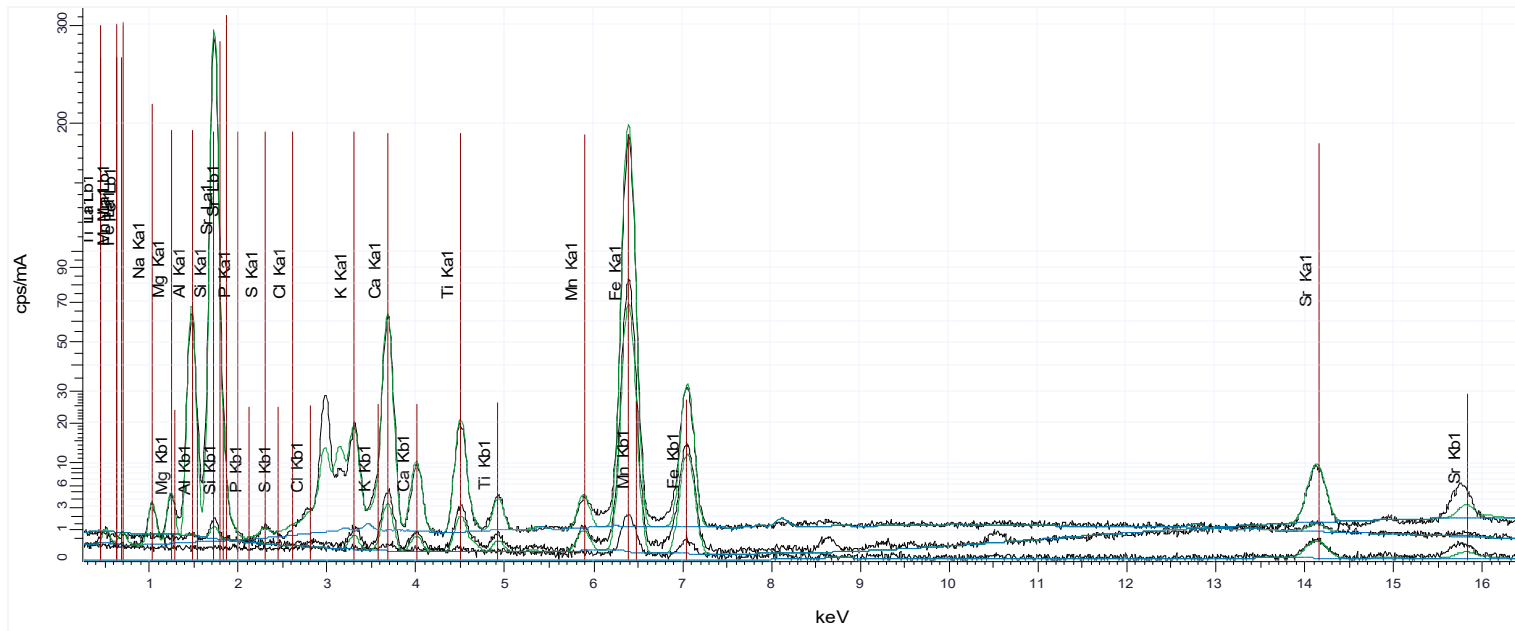
REFERENCIA BASALTO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na2O	2.94%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	2.68%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al2O3	19.77%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO2	53.18%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
15	P2O5	0.28%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO4	0.0015904	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	90.9707 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	1.08%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	7.16%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
22	TiO2	1.81%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.18%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe2O3	10.64%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
38	SrO	0.11%	K	Stdless	40 kV, Range 2



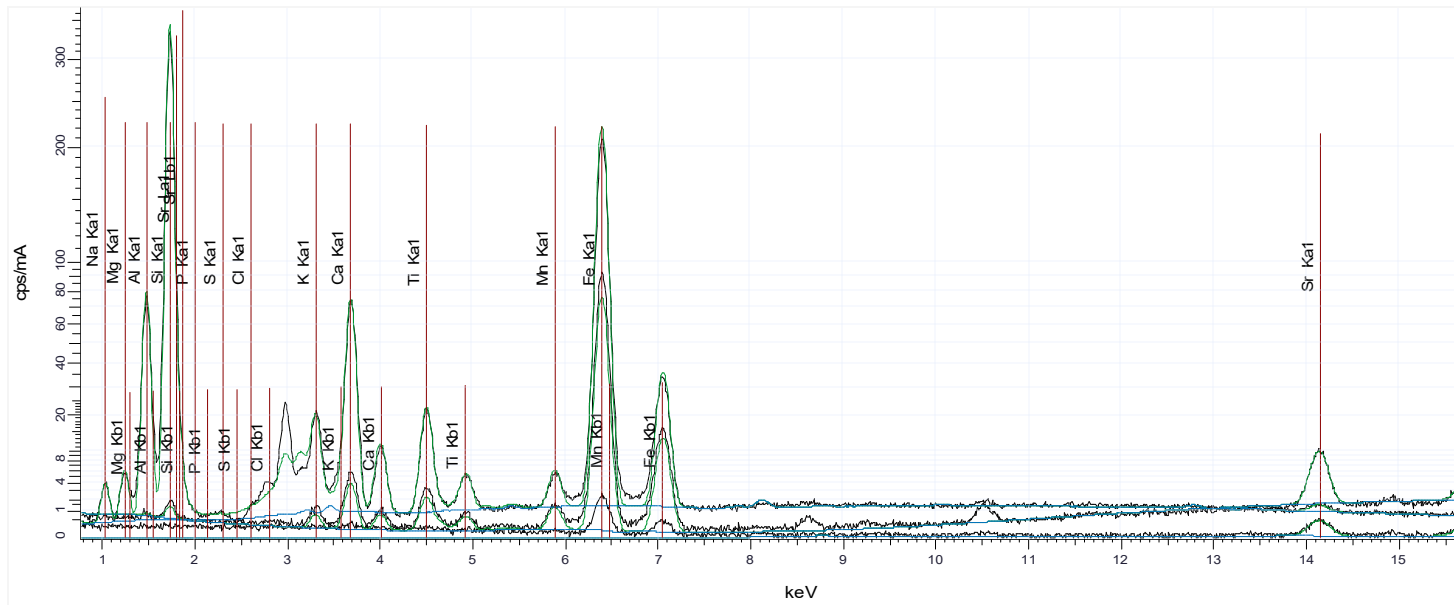
2 DÍAS BASALTO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na ₂ O	2.87%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	2.36%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al ₂ O ₃	19.91%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO ₂	54.13%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
15	P ₂ O ₅	66.8332 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO ₄	0.00046669	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	1.14%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	6.27%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
22	TiO ₂	1.96%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.18%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe ₂ O ₃	11.02%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
38	SrO	0.11%	K	Stdless	40 kV, Range 2



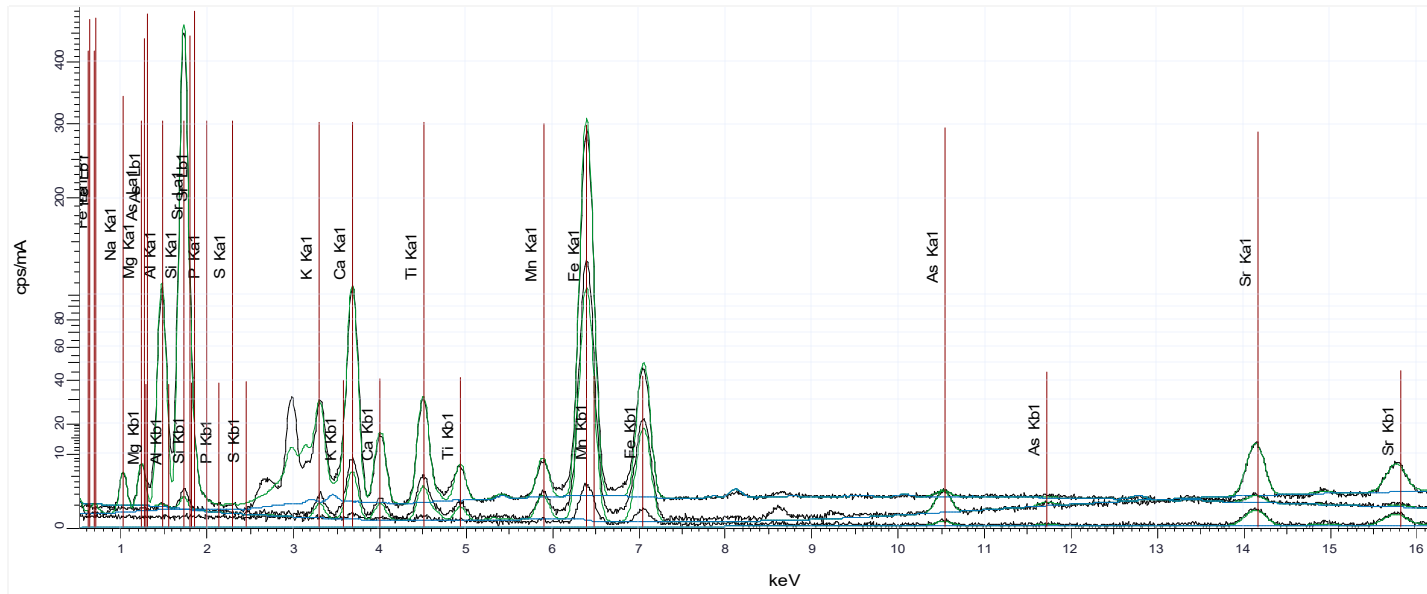
4 DÍAS BASALTO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na2O	2.74%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	2.64%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al2O3	20.06%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO2	54.51%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
15	P2O5	0.02%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO4	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	1.06%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	6.33%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
22	TiO2	1.89%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.21%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe2O3	10.44%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
38	SrO	0.10%	K	Stdless	40 kV, Range 2



6 DÍAS BASALTO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na2O	2.82%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	2.43%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al2O3	20.28%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO2	53.62%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
15	P2O5	0.05%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO4	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	0.011581	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	6.66%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
22	TiO2	1.94%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.24%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe2O3	10.69%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
33	As2O3	0.03%	K	Stdless	40 kV, Range 2
38	SrO	0.10%	K	Stdless	40 kV, Range 2



8 DÍAS BASALTO

Z	Formula	Concentration	Quantified by	Evaluation Mode	Range Name
11	Na ₂ O	2.99%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
12	MgO	2.75%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
13	Al ₂ O ₃	19.90%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
14	SiO ₂	53.79%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
15	P ₂ O ₅	0.06%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
16	SO ₄	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
17	Cl	0.0000 PPM	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
19	K	1.05%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
20	CaO	6.43%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
22	TiO ₂	1.88%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
25	MnO	0.24%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
26	Fe ₂ O ₃	10.78%	Auto	Stdless	20 kV, Range 3
33	As ₂ O ₃	0.04%	K	Stdless	40 kV, Range 2
38	SrO	0.10%	K	Stdless	40 kV, Range 2

