

**Obtención de agregados de construcción a partir de mezclas de relaves gravimétricos de  
Minera Reina de oro del municipio de Vetas**

**José Alberto Osorio Sánchez**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Metalúrgico**

**Director**

**Walter Pardave Livia**

**MSc en Ingeniería Metalúrgica**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales**

**Bucaramanga**

**2018**

### **Dedicatoria**

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Para mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles y por apoyarme con los recursos necesarios para estudiar.

Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi empeño, mi perseverancia y mi coraje para alcanzar mis objetivos.

Gracias también a algunos compañeros y técnicos que me apoyaron y permitieron enriquecer mi conocimiento a través de ellos.

Este no solo es mi logro, si no el de todas las personas que aportaron en este proyecto.

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Marco Referencial.....	13
1.1 Antecedentes .....	16
2. Objetivos.....	18
2.1 Objetivo General.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. Metodología.....	19
3.1 Materiales.....	21
3.2 Equipos .....	21
3.3 Procedimiento experimental .....	22
3.3.1 Toma de muestras .....	22
3.3.2 Caracterización de los relaves.....	23
3.3.3 Realización de pruebas experimentales .....	24
4. Resultados y Discusión.....	33
4.1 Ensayos al fuego posterior a la concentración gravimétrica con Knelson.....	33
4.2 Resistencia a la compresión de las probetas de concreto tipo D.....	35
4.2.1 Prueba de impurezas orgánicas .....	37
5. Conclusiones.....	37

6. Recomendaciones ..... 38

Referencias Bibliográficas ..... 39

Apéndices..... 41

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Límites de clasificación del agregado fino .....	15
Tabla 2. Resistencia a la compresión de concretos según el tipo, con un curado de 28 días. ....	15
Tabla 3. Tenor de oro de las muestras posterior a la clasificación .....	24
Tabla 4. Distribución según Modelo Buttler Volmer. ....	26
Tabla 5. Distribución según Modelo Rosin-Rammler. ....	26
Tabla 6 Distribución según Modelo Buttler Volmer. ....	28
Tabla 7. Distribución según Modelo Rosin-Rammler. ....	28
Tabla 8. Composición de la mezcla Concreto Reforzado tipo D.....	30
Tabla 9. Composición del agregado fino para Concreto Reforzado tipo D.....	30
Tabla 10. Tenores de oro de muestras después de realizarles la concentración en knelson KC- MD3. ....	34
Tabla 11. Porcentaje de recuperación, la razón de concentración, el índice de selectividad y la razón de enriquecimiento en relación a su clasificación.....	35
Tabla 12. Resistencia a la compresión de las probetas en Psi .....	36

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Pasivo ambiental en la vereda Volcán del municipio de Vetas- Santander .....	13
Figura 2. Descripción general de la metodología implementada.....	20
Figura 3. Concentrador Knelson KC-MD3 y mufla Terrigeno usados para la concentración y ensayos al fuego respectivamente.....	22
Figura 4. Ensayo para determinar de la densidad real en la botella Le Chatelier.....	24
Figura 5. % pasante vs Tamaño de partícula (micrones) de las arenas del sitio “La peña” .....	25
Figura 6. % pasante vs Tamaño de partícula (micrones) de los relaves almacenados.....	27
Figura 7. Ensayo de prueba de impurezas orgánicas. Mezclas agitadas y con 24 horas de reposo respectivamente.....	31
Figura 8. Probetas del concreto posterior al curado en el Laboratorio de Caracterización de materiales. ....	32
Figura 9. Ensayo de resistencia a la compresión a probetas de concreto preparado con el componente relaves del proceso gravimétrico de Reina de Oro.....	33
Figura 10. Resistencia a la compresión de las probetas de concreto tipo D a los 28 días de curado. ....	36

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Resultados de SEM-EDS .....	41

## Resumen

**TÍTULO:** OBTENCIÓN DE AGREGADOS DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE MEZCLAS DE RELAVES GRAVIMÉTRICOS DE MINERA REINA DE ORO DEL MUNICIPIO DE VETAS\*

**AUTORES:** Osorio Sánchez Jose Alberto \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Relaves, pasivo ambiental, concentrador centrífugo.

El propósito del presente trabajo radica en el aprovechamiento de la gran cantidad de relaves o colas generados por la empresa minera Reina de Oro ubicada en Vetas(Santander), actualmente considerados pasivos ambientales. El objetivo principal es la obtención de un agregado fino de construcción que cumpla las especificaciones de normas ACI 211.1, NTC 673-10 y NTC 550, a partir de relaves mineros caracterizados físico, química y granulométricamente. Posterior a la caracterización, se procede a la clasificación, como primera etapa se realiza la concentración centrífuga del oro residual contenidas en estas, con un knelson KC-MD3 y se evaluó el porcentaje de recuperación, razón de concentración, índice de selectividad y razón de enriquecimiento. Usando las colas del knelson y arenas del sitio “La Peña” ubicado en la zona rural del municipio de Vetas, las cuales son usadas como agregado de construcción para realizar placas huellas. Se elaboraron 4 grupos de probetas de concreto tipo D con 3 ejemplares cada uno, mediante procesos de mezclado, compactación y curado de 8, 15 y 28 días; donde la única variable es la composición del agregado fino (Colas del Knelson + arena del sitio “La Peña”). Las probetas fueron sometidas a pruebas de laboratorio y verificadas según la norma ICONTEC NTC 673-10.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Ing. Walter Pardavé Livia

### Abstract

**TITLE:** OBTAINING AGGREGATES OF CONSTRUCTION OF MIXES OF GRAVIMETRIC RELAYS OF MINERA QUEEN OF GOLD OF THE VETAS MUNICIPALITY\*

**AUTHOR:** Osorio Sánchez Jose Alberto\*\*

**KEYWORDS:** tailings, environmental passive, centrifugal concentrator.

The purpose of this work lies in the use of the large amount of tailings or tails generated by the mining company Reina de Oro located in Vetas (Santander), currently considered environmental liabilities. The main objective is to obtain a fine aggregate of construction that complies with the specifications of ACI 211.1, NTC 673-10 and NTC 550, from mine tailings characterized as physical, chemical and granulometrically. After the characterization, the classification is carried out, since in the first stage the centrifugal concentration of the residual gold contained in them is performed, with Knelson KC-MD3 and the recovery percentage, concentration ratio, selectivity index and enrichment ratio. Using the knelson tails and sands of the site "La Peña" located in the rural area of the municipality of Vetas, which are used as construction aggregate to make plaques traces. Four groups of specimens of type D concrete were prepared with 3 specimens each, through mixing, compaction and curing processes of 8, 15 and 28 days; where the only variable is the composition of the fine aggregate (Knelson tails + sand from the site "La Peña"). The test pieces were subjected to laboratory tests and verified in accordance with the ICONTEC NTC 673-10 standard.

---

\* Degree project (modality, research project)

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Advisers: Eng. Walter Pardavé Livia

## Introducción

El manejo de los residuos sólidos en la explotación minera en el país y en todo el mundo es un tema relevante para los organismos controladores, como también para las empresas legales debido que la minería causa impactos ambientales como paisajes físicamente alterados, pérdida de vegetación y contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Estos residuos son considerados como Pasivos Ambientales Mineros (PAM) (ARANGO, Marcela; OLAYA, Yris, 2012)

A partir de esta problemática observada en el distrito minero de Vetas, se planteó realizar una investigación para el desarrollo de subproductos partiendo de materias primas debido a la acumulación de muchos años, aproximadamente 38.500 toneladas ubicadas en el área aledaña a la planta de procesamiento pertenecientes a la empresa minera Reina de Oro en el municipio de Vetas – Santander. El cual realiza el beneficio y tratamiento de mineral auroargentífero, generando relaves sólidos cianurados. Estos PAM actualmente son almacenados en pilas a cielo abierto (ver Figura 1), surgiendo la necesidad de formular y analizar la factibilidad técnica de su procesamiento y aprovechamiento. Por ello se propuso obtener un agregado de construcción para uso como placa huella, dando una solución a esta problemática ambiental que existe.



*Figura 1.* Pasivo ambiental en la vereda Volcán del municipio de Vetas- Santander

## 1. Marco Referencial

Eliseo Curo (CURO & RASHUAMAN, 2015) define los relaves mineros como “Los residuos resultantes del proceso de recuperación selectivo de ciertos minerales. El relave está compuesto por material sólido de tamaño muy pequeño, incluso menor al de la arena, y agua formando un compuesto similar al lodo”. Existe diversidad de relaves y dependen directamente del mineral del cual provienen. Posterior a los procesos de disminución de tamaño, físico y químicos, los relaves son en su mayoría finos y húmedos estabilizados químicamente y almacenados en botaderos de residuos industriales donde normalmente no tienen utilidad (CURO & RASHUAMAN, 2015) (Lutz Benner, 1999).

En Colombia, la ANLA (Agencia Nacional de Licencias Ambientales) (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, s.f.) lo considera como “Obligación legal, presente, de una empresa o persona natural de hacer un gasto futuro, debido a la ejecución de una actividad, uso, vertimiento

o desecho de una sustancia en particular que afecta, daña o agota de manera peligrosa los recursos naturales y/o el ambiente”.

Los socavones, minas, botaderos (escombreras) y relaves o colas están involucrados como PAM de minas que casi siempre están en abandono, siendo estos últimos los que generan las siguientes posibles alteraciones en el medio físico (ROMERO, Alfonso; FLORES, Silvana, 2010):

- Contaminación de aguas superficiales y subterráneas.
- Contaminación de suelos de la zona de influencia de estos depósitos.
- Impacto visual negativo.
- Riesgo continuo de daños al ecosistema frente a los desastres naturales.
- Presencia de metales pesados en el medio físico.

Al finalizar el ciclo minero se afecta el ambiente y lo socioeconómico, ya que ambos están directamente relacionados. Generalizando, la manera en que los relaves impactan socioeconómicamente se debe a que se está alterando un bien necesario para la supervivencia humana como pueden ser el agua y suelo productivo (WORRALL, Rhys; NEIL, David; BRERETON, David; MULLIGAN, David, 2009).

En relación a las arenas de construcción contienen impurezas orgánicas que están presentes en los agregados finos, las cuales perjudican la hidratación del cemento y la resistencia del concreto descrita en la norma ASTM C 87-03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL, Standard Test Method for Effect of Organic Impurities in Fine Aggregate on Strength of Mortar, . West Conshohocken: ASTM C87 / C87M-17; 2017).

“El agregado fino debe estar compuesto de arena natural, arena triturada o una combinación de éstas.” Para el análisis granulométrico no debe suceder que en cualquier tamiz pase más del 45 % del agregado fino y quede retenido en el siguiente tamiz según lo mostrado en la Tabla 1. Los

módulos de finura deben estar (2,3 - 3,1) según NTC 174 (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Especificaciones de los agregados para concretos. NTC 174; 2000).

Tabla 1.

*Límites de clasificación del agregado fino*

N°	Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	% pasante
3/8	9,5 mm	100
4	4,75 mm	95 a 100
8	2,36 mm	80 a 100
16	1,18 mm	50 a 85
30	600 µm	25 a 60
50	300 µm	10 a 30 ó 5 a 30
100	150 µm	2 a 10 ó 0 a 5

Nota. Modificado de: norma NTC 174 del 2000

Para su empleo en las distintas clases de obra y de acuerdo con su resistencia mínima a la compresión (ver Tabla 2), determinada según la norma INV E-410 (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto. INV E-410-07; 2007), se establecen las siguientes clases de concreto:

Tabla 2.

*Resistencia a la compresión de concretos según el tipo, con un curado de 28 días.*

Tipo de concreto	Resistencia mínima a la compresión a 28 días en Psi
Concreto pre-tensado y post-tensado	
<b>A</b>	4978
<b>B</b>	4551
Concreto reforzado	

Tipo de concreto	Resistencia mínima a la compresión a 28 días en Psi
C	3982
D	3100
E	2489
Concreto simple	
F	1991
Concreto ciclópeo	
G	1991

Nota. Modificado de: norma INVIAS INV E-410

## 1.1 Antecedentes

Los relaves mineros dispuestos a la intemperie son pasivos ambientales, estos han sido estudiados en su mayoría con el fin de ser usados posiblemente como agregados de construcción. Con base en resultados de estos trabajos, se han realizado ensayos, observando su aplicación en procesos mencionados a continuación.

Teniendo en cuenta los resultados favorables, es relevante mencionar el trabajo ejecutado por Eliseo Curo (CURO & RASHUAMAN, 2015) quien evaluó el comportamiento de un tipo de mezcla cuyos componentes fueron: cemento, relaves mineros, agua, agregados finos y gruesos, donde el propósito fue reemplazar el mayor porcentaje posible de cemento por relaves mineros conservando la resistencia a la compresión para que fuera posible usarlo en transporte de bajo tránsito. Los resultados mostraron que fue posible optimizar el consumo de cemento en un 16.08% para dicha mezcla.

Mientras que Guillermo Lira y Hernán Osses (LIRA, Guillermo; OSSES, Hernán, 2013) determinaron el comportamiento de 24 probetas de hormigón, el primer grupo denominado

“Patrón” con 12 muestras y el segundo con otras 12 “De Estudio” (con arenas de relaves provenientes del beneficio del mineral de cobre que sustituyen la arena fina). Cada uno clasificado en 3 subgrupos con dosis de cemento (200,300 y 400 Kg/M<sup>3</sup>) respectivamente, compuestos además por agua, arena gruesa, gravilla, grava y arena fina o relaves. Al realizar pruebas de compresión se determinó que los valores del grupo con las arenas de relave fueron superiores un 8% al grupo patrón en todos los subgrupos, aportando una solución ambiental, económico y técnico en cuanto al desarrollo de un tipo de hormigón que ofrece mayor resistencia a la compresión.

Existen estudios relacionados con los posibles usos de los relaves mineros a nivel industrial sin tener en cuenta la calidad y limitaciones de estos, sin embargo, Alfonso y Silvana (ROMERO, Alfonso; FLORES, Silvana, 2010) de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima Perú, describen un proceso con buenos resultados experimentales para obtener agregados de construcción a partir de relaves mineros polimetálicos caracterizando y aplicando un procedimiento para encapsular e inmovilizar los metales pesados presentes. A su vez describen un proceso estándar para la fabricación de ladrillos y baldosas a partir de los agregados previamente encapsulados. Logrando un agregado de construcción proveniente de los relaves polimetálicos no contaminante, adecuado para ser usado en ladrillos y baldosas.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Obtener agregados de construcción a partir de mezclas de relaves gravimétricos de Minera Reina de Oro del municipio de Vetas.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar química, granulométrica y microscópicamente los relaves que se presentan como pasivos ambientales en la zona de influencia de la Minera Reina de Oro.
- Establecer variables operativas y procesos gravimétricos para separar y recuperar el oro que contienen los relaves que se presentan como pasivos ambientales en la zona de influencia de la Minera Reina de Oro.
- Obtener un agregado de construcción para realizar placas huellas a partir de arenas provenientes de los relaves producidos en la Minera Reina de Oro que cumpla con los estándares emitidos por INVIAS.

### 3. Metodología.

Para obtener resultados viables y alcanzar los objetivos planteados, fue necesario el uso de un conjunto de laboratorios, equipos, herramientas, ensayos y un diseño que permitiera caracterizar y comparar las arenas lixiviadas provenientes de la Minera Reina de Oro y arenas comúnmente usadas como agregados de construcción en la zona, tomadas del sitio “La peña” ubicado cerca al municipio de Vetas, Santander. Además, se definieron los parámetros de los métodos de concentración gravimétrica como el Knelson con el fin de recuperar la mayor cantidad de oro existente en las arenas lixiviadas. Posteriormente, con las colas del concentrador se construyeron 4 grupos de 3 probetas de concreto cada uno, cuya variable fue la proporción de arenas lixiviadas(relaves) y del sitio “La peña” en el agregado fino; donde se determinó la influencia de los relaves y el posible uso como agregados de construcción para producir un concreto tipo D que cumpliera con normas ICONTEC.

En la Figura 2 se describen las etapas realizadas en el proyecto.

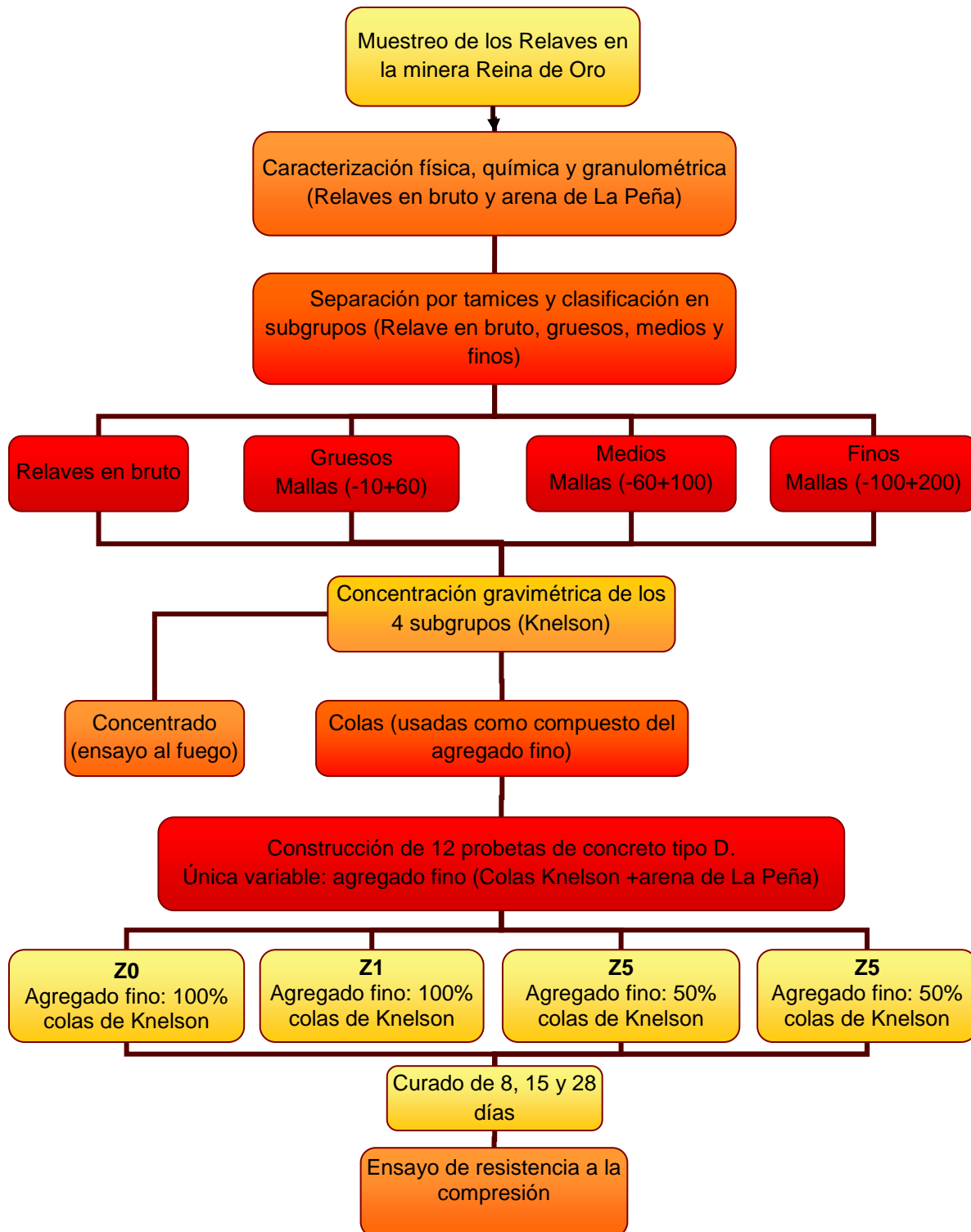


Figura 2. Descripción general de la metodología implementada

### 3.1 Materiales

Para los análisis de oro se utilizó litargirio (PbO), carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), harina común, sal, bórax, ácido nítrico, cemento blanco y polvo de hueso.

Para las pruebas se requirieron relaves, arena del sitio “la peña”. Además, cemento, agregado grueso y agua.

### 3.2 Equipos

Los ensayos al fuego fueron desarrollados en planta de aceros en el laboratorio de pirometalúrgica y se empleó una estufa de secado MEMMERT, mufla TERRIGENO D8 (ver Figura 3) con capacidad de 1100 °C, Plancha de secado ICA.CMEAG HS7, balanza digital METTLER PM460 y balanza analítica RADWAG XA210.3Y.

Para la obtención de arenas gravimétricas se usó el FLSMIDTH KNELSON KC-MD3 (ver Figura 3). Finalmente, para la prueba de resistencia a la compresión de las probetas fue realizada con una prensa hidráulica ALFRED J. AMSLER Y CIA. SUIZA (79/191) con capacidad máxima de carga de 400 KN.



Figura 3. Concentrador Knelson KC-MD3 y mufla Terrigeno usados para la concentración y ensayos al fuego respectivamente.

### 3.3 Procedimiento experimental

**3.3.1 Toma de muestras.** Comprendiendo los fundamentos teóricos del problema, fue necesario identificar y analizar las principales características de la materia prima, con el fin de buscar una solución viable.

Los relaves son colas provenientes del final de un circuito de beneficio de mineral auroargentífero de la minera Reina de Oro del municipio de Vetas Santander almacenadas improvisadamente en un depósito a cielo abierto.

Se realizó un muestreo sistemático a lo largo y ancho de la pila por parte de la empresa, basándose en estudios previos desarrollados por esta. Tomando 10 muestras de 0.5 Kg a 2 metros de profundidad e intervalos de 3 metros, con el fin de obtener una muestra homogénea y representativa teniendo en cuenta que sus componentes pueden variar debido a que fueron depositadas en diferentes épocas.

**3.3.2 Caracterización de los relaves.** Los relaves provenientes de la pila a cielo abierto fueron sometidos a una caracterización química, física y granulométrica. En esta última se comparó con arenas finas extraídas de la zona conocida como “La Peña”, el cual es un sitio ubicado cerca al municipio y usadas en el pasado como agregados finos para la construcción de placas huellas en la zona rural y que además cumplen con las normas NTC 174 e INV E410.

La mezcla de estos dos componentes es el agregado fino; el cual será mezclado con arena gruesa (triturado), cemento y agua para formar el concreto tipo D, con el cual se construyen placas huella.

**3.3.2.1 La caracterización química** que se realizó a las muestras de relaves del proceso gravimétrico, comprende tres tipos:

- Las muestras de relaves proporcionadas por la Empresa Minera Reina de Oro, fueron sometidas a un ensayo al fuego para determinar el contenido de oro. Además, se realizó una separación de los relaves en 4 grupos: relaves, gruesos (malla N° 10-60), medios (malla N° 60-100) y finos (pasante malla N° 100+200).

- Mediante el análisis de fluorescencia de rayos X a la muestra de relaves del proceso gravimétrico, se determinó el contenido de azufre(S), sulfatos, metales pesados.

- Las pruebas realizadas de SEM-EDS (Ver Anexo A) para determinar la existencia y cantidad de posibles elementos dañinos.

**3.3.2.2 En la caracterización física de los relaves** para efectos de realizar cálculos de flujo volumétrico y flujo másico de los relaves del proceso gravimétrico en la Figura 4 se muestra el ensayo para determinar de la densidad real o gravedad específica con el ensayo de la botella Le Chatelier, la cual arrojó un resultado de  $\rho = 2,73 \text{ g/cm}^3$



Figura 4. Ensayo para determinar de la densidad real en la botella Le Chatelier

**3.3.2.3 La caracterización granulométrica.** Los relaves o análisis por tamaños de partícula es uno de los más relevantes para establecer si los relaves del proceso gravimétrico se pueden comportar como agregado fino en el concreto tipo D para construcción de placas huella. Por ello se realizaron tanto a los relaves del proceso gravimétrico y a las arenas del sitio “la peña”; efectuando análisis granulométrico con tamices ASTM malla N° 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 y 200 para obtener una comparativa y además, sirviera de guía para escoger la composición y proporciones del agregado fino usado en el concreto tipo D.

### 3.3.3 Realización de pruebas experimentales

#### 3.3.3.1 Ensayos al fuego

Tabla 3.

Tenor de oro de las muestras posterior a la clasificación

	<b>Relaves en bruto</b>	<b>Gruesos -10+60</b>	<b>Medios -60+100</b>	<b>Finos -100+200</b>
<b>(g Au /Ton)</b>	3,66	2,33	4,33	5,66

**3.3.3.2 Analisis de fluorescencia de rayos X** Con los siguientes compuestos relevantes del análisis por fluorescencia de rayos X. SiO<sub>2</sub>: 66.51%, Fe: 2.59%, S: 1.96%, Cu: 0.01%

**3.3.3.3 Microscopía electrónica de barrido SEM** Mostró gran cantidad de silicio, además de trazas significativas de hierro, manganeso y titanio, que componen los óxidos y sulfuros.

### 3.3.3.4 Granulometría

- Análisis granulométrico de las arenas del sitio “La Peña”

La Figura 5 muestra las curvas % pasante vs tamaño de partícula (micrones) y la función de distribución de tamaños de partícula.

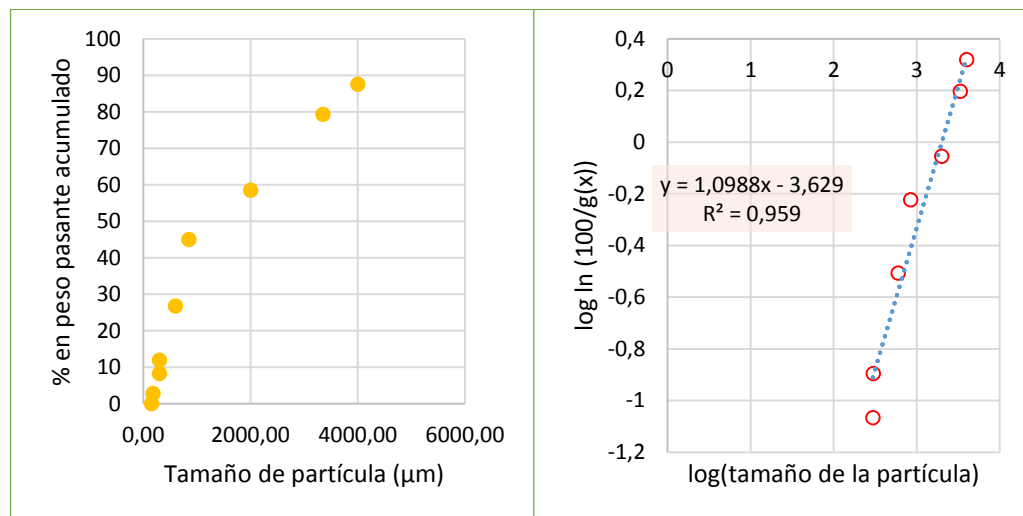


Figura 5. % pasante vs Tamaño de partícula (micrones) de las arenas del sitio “La peña”

Los resultados muestran un pasante 80 en la malla 8. Equivalente a 3350 micrómetros.

**Distribución según Modelo Buttlar Volmer:**

Ecuación 1:

$$F(X) = 100\left(\frac{X}{X_0}\right)^a$$

Tabla 4.

*Distribución según Modelo Buttlar Volmer.*

Parámetro	Valor	Unidad
<b>b</b>	-1,4842	
<b>log(100)</b>	2	
<b>X<sub>0</sub></b>	3439,8602	µm
<b>a</b>	0,9852	
<b>P<sub>80</sub></b>	80,00	%
<b>P<sub>80</sub></b>	2742,67916	µm
<b>malla 8</b>	3335	µm

**Distribución según Modelo Rosin-Rammler**

Ecuación 2:

$$F(X) = 100 - 100e^{-\left(\frac{x}{xr}\right)^m}$$

Tabla 5.

*Distribución según Modelo Rosin-Rammler.*

Parámetro	Valor	Unidad
<b>b</b>	-3,629	
<b>a</b>	1,0988	
<b>X<sub>R</sub></b>	2006,5658	µm
<b>P<sub>80</sub></b>	80,0	%

Parámetro	Valor	Unidad
<b>P<sub>80</sub></b>	2939,064429	μm
<b>malla 8</b>	3335	μm

- Análisis granulométrico de los Relaves cianurados de la Empresa Minera Reina de Oro.

La Figura 6 muestra las curvas % pasante vs tamaño de partícula (micrones) y la función de distribución de tamaños de partícula.

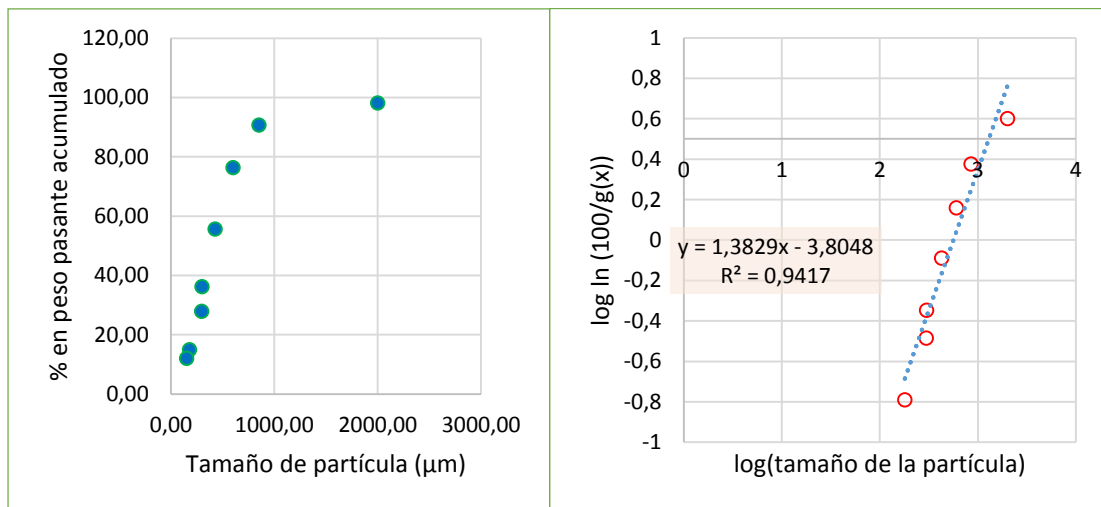


Figura 6. % pasante vs Tamaño de partícula (micrones) de los relaves almacenados.

Los resultados dan un pasante 80 en la malla 30. Equivalente a 600 micrómetros.

**Distribución según Modelo Buttlar Volmer:**

Ecuación 3:

$$F(X) = 100\left(\frac{X}{X_0}\right)^a$$

Tabla 6

*Distribución según Modelo Buttlar Volmer.*

Parámetro	Valor	Unidad
<b>b</b>	-0,4304	
<b>log(100)</b>	2	
<b>X<sub>0</sub></b>	1260,07	μm
<b>a</b>	0,7839	
<b>P<sub>80</sub></b>	80,00	%
<b>P<sub>80</sub></b>	947,915152	μm
<b>mallá 8</b>	850	μm

**Distribución según Modelo Rosin-Rammler**

Ecuación 4:

$$F(X) = 100 - 100e^{-\left(\frac{x}{xr}\right)^m}$$

Tabla 7.

*Distribución según Modelo Rosin-Rammler.*

Parámetro	Valor	Unidad
<b>b</b>	-3,8048	
<b>a</b>	1,3829	
<b>X<sub>R</sub></b>	564,0527	μm
<b>P<sub>80</sub></b>	80,0	%
<b>P<sub>80</sub></b>	656,4521173	μm
<b>mallá 8</b>	600	μm

**3.3.3.5 Pruebas de concentración gravimétrica en knelson.** Se ejecutaron 4 pruebas experimentales a nivel de laboratorio con un concentrador centrífugo Knelson KC-MD3 a gruesos (mallá N° 10-60), medios (mallá N° 60-100), finos (pasante mallá N° 100 y retenido 200) y relaves,

manteniendo fija la presión: 5 Psi y la fuerza centrífuga de 60 G's con el fin de determinar donde se encuentra la mayor recuperación del oro. Dentro de las variables a tener en cuenta son granulometría de liberación, porcentajes sólidos, caudal, de acuerdo con datos de literatura técnica.

**3.3.3.6 Preparación de mezclas para elaborar el concreto tipo D para construcción de placa huella.** Posterior a la concentración gravimétrica en Knelson, se usaron las colas de este y las arenas del sitio “La Peña” como componentes del agregado fino, que a su vez hace parte de los componentes del concreto tipo D.

Teniendo en cuenta que la composición del concreto tipo D es Agregado fino (colas del knelson + arenas del sitio “La Peña”), agregado grueso (Triturado), cemento y agua. y la elaboración de las probetas cilíndricas es basada en normas aCi 211.1. (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Práctica estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo. ACI 211.1; 1991) y NTC 92-95 (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería civil y arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC 92; 1995).

Las arenas provenientes del sitio “La Peña” cumplen con los parámetros descritos en las normas NTC 174 e INV E410 para ser usadas como agregados finos; por lo que se tomó la decisión de realizar probetas con composiciones del agregado fino para determinar principalmente el comportamiento de los relaves ciunarados en el concreto, con las siguientes composiciones: **Z0** con 100% Colas de Knelson, **Z1** con 10% colas y 90% arena de “La Peña”, **Z5** con 50% colas y **Z9** con 90% colas.

Con el fin de analizar el comportamiento de los relaves, se fijaron todas las cantidades que componen este tipo de concreto (ver Tabla 4).

Tabla 8.

*Composición de la mezcla Concreto Reforzado tipo D*

<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD</b>
Agua (ml)	200
Cemento (Kg)	375
Agregado fino (arena de peña y colas del Knelson) (Kg) En proporciones de 100, 10, 50 y 90% de colas	750
Agregado grueso o Triturado (Kg)	1050
Relación agua /cemento	0,53

Nota. Adaptado de: norma ACI 211.1

La proporción del agregado fino de cada una de las mezclas empleadas para la construcción de 12 probetas según la norma NTC 673 del 2010 (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. NTC 673; 2010), divididas en 4 grupos con 3 probetas cada uno, de dimensiones: 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, según norma NTC 550 DEL 2000 (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. NTC 550; 2000) . (ver Tabla 5)

Tabla 9.

*Composición del agregado fino para Concreto Reforzado tipo D.*

<b>AGREGADO FINO 750 Kg</b>			
<b>PROBETA</b>	<b>RELACIÓN MEZCLA</b>	<b>COLAS KNELSON (Kg)</b>	<b>ARENA DE PEÑA (Kg)</b>
Z0	-	750	0
Z1	1/9	75	675
Z5	1/1	375	375
Z9	9/1	675	75

- Método de prueba para el efecto de impurezas orgánicas del agregado fino en el esfuerzo del mortero ASTM C 87-03

Consistió en llenar dos recipientes de vidrio con la muestra de agregado fino y otro con la de la arena del sitio “la peña” a nivel de aproximadamente 130 ml. Luego, se añadió una solución de hidróxido de sodio al 3% hasta que el volumen total sea 200 ml. Se taparon los recipientes, se agitaron y se dejaron reposar por 24 horas. Al finalizar el periodo de 24 horas en reposo, se compararon el color de los líquidos entre ellos (ver Figura 7) y con una placa de colores estándar (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL, Standard Test Method for Effect of Organic Impurities in Fine Aggregate on Strength of Mortar, . West Conshohocken: ASTM C87 / C87M-17; 2017).



Figura 7. Ensayo de prueba de impurezas orgánicas. Mezclas agitadas y con 24 horas de reposo respectivamente.

**3.3.3.3 Curado y prueba de compresión de las probetas de concreto tipo D.** El tiempo de curado para las 3 probetas de cada grupo (ver Figura 8) fueron de 8, 15 y 28 días (NORMA

TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. NTC 1377; 1994).



*Figura 8.* Probetas del concreto posterior al curado en el Laboratorio de Caracterización de materiales.

Luego del curado realizado a las probetas según NTC 1377 del 2000 (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. NTC 1377; 1994), se efectuaron los ensayos de resistencia a la compresión siguiendo los parámetros de la norma NTC 673 del 2010 (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. NTC 673; 2010) (ver Figura 9)



*Figura 9.* Ensayo de resistencia a la compresión a probetas de concreto preparado con el componente relaves del proceso gravimétrico de Reina de Oro

#### **4. Resultados y Discusión**

##### **4.1 Ensayos al fuego posterior a la concentración gravimétrica con Knelson**

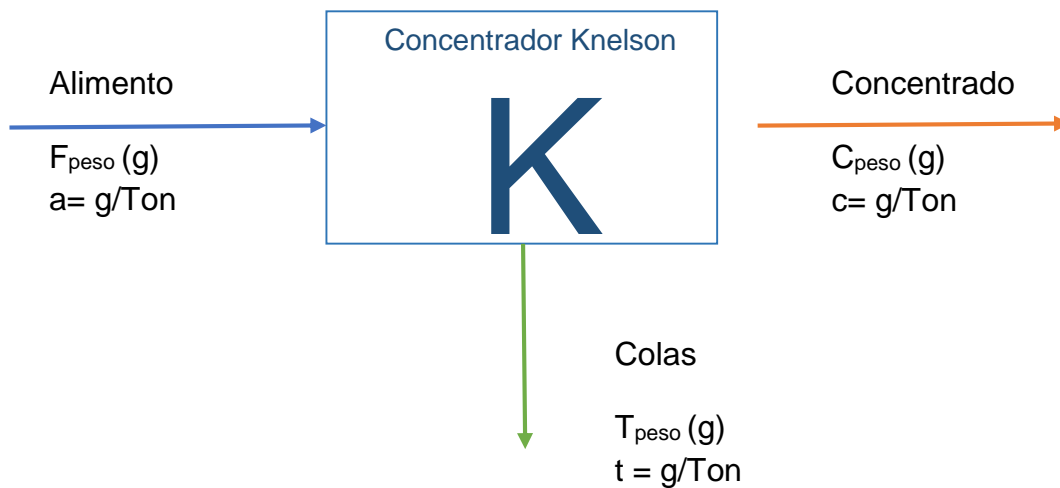
Posterior al proceso de concentración gravimétrica en Knelson, se determinaron los tenores de cada clasificación (ver Tabla 6), evidenciando como se esperaba el aumento del tenor de oro en todas las clasificaciones.

Tabla 10.

Tenores de oro de muestras después de realizarles la concentración en knelson KC-MD3.

	<b>Concentrado relaves en bruto</b>	<b>Concentrado relaves gruesos -10+60</b>	<b>Concentrado relaves medios -60+100</b>	<b>Concentrado relaves finos -100+200</b>
(g Au /Ton)	5,33	7	9	10

De acuerdo a su clasificación se halló el porcentaje de recuperación, la razón de concentración, el índice de selectividad y la razón de enriquecimiento (ver Tabla 7)



Ecuación tal:  $\% \text{recuperación} = \frac{C_{\text{peso}} * c}{F_{\text{peso}} * a} * 100$

Ecuación tal:  $\text{Razón de concentración} = \frac{F_{\text{peso}}}{C_{\text{peso}}}$

Ecuación tal:  $\text{Índice de selectividad} = \left(\frac{c}{t}\right)^{\frac{1}{2}}$

Ecuación tal:  $\text{Razón de enriquecimiento} = \frac{c}{a}$

Tabla 11.

*Porcentaje de recuperación, la razón de concentración, el índice de selectividad y la razón de enriquecimiento en relación a su clasificación*

	<b>Colas</b>	<b>Colas gruesos -10+60</b>	<b>Colas medios -60+100</b>	<b>Colas finos -100+200</b>
% de recuperación	14.02	35.62	30.95	13.60
Razón de concentración	10.39	8.43	6.72	12.99
Índice de selectividad	1.79	1.22	1.39	1.52
Razón de enriquecimiento	1.46	3	2.08	1.77

En las muestras de **gruesos** se encuentra el porcentaje de recuperación más alto, seguido de los **medios**; mientras que los **relaves** y **finos** tienen un porcentaje de recuperación más bajo en el Knelson.

Los porcentajes de recuperación son muy bajos puesto que el oro libre que es remanente en los relaves es mínimo, ya que proviene de un tratamiento en mesas Wilfley y una posterior cianuración por agitación en donde fue extraído casi en su totalidad.

#### 4.2 Resistencia a la compresión de las probetas de concreto tipo D

En la Tabla 8 se muestran los días de curado en relación a la proporción de las colas provenientes del Knelson en el agregado fino y su respectiva resistencia a la compresión.

Tabla 12.

*Resistencia a la compresión de las probetas en Psi*

DÍAS CURADO	GRUPO	Z0	Z1	Z5	Z9
		100% Colas	10% Colas	50% Colas	90% Colas
8		2025	2623,42	2912,71	3099,28
15		2594,85	2964,71	4528,71	5078,57
28		2956,71	3245,57	4927,14	5381

Se tuvo en cuenta solo la resistencia a la compresión de las probetas con tiempo de curado de 28 días como especifica la norma INV E410(ver Figura 10)



*Figura 10.* Resistencia a la compresión de las probetas de concreto tipo D a los 28 días de curado.

En relación con el concreto tipo D, la probeta que tiene un agregado fino compuesto del 100% colas la resistencia fue 2956,71 Psi, siendo esta la más baja y por lo tanto, no cumple con la resistencia a la compresión exigido por la norma INV E410, donde se especifica que para este tipo de concreto debe ser superior a 3100 Psi. Mientras que los resultados de la resistencia a la

compresión de las probetas Z1, Z5 y Z9 fueron en ascenso y superando el parámetro exigido como lo muestra la figura 10.

**4.2.1 Prueba de impurezas orgánicas** Al realizar la comparación visual se determinó que el color del líquido de la muestra “relaves” es semejante al color No. 1 de la placa orgánica de colores y mucho más claro que la muestra de arena del sitio “la peña”. Por lo tanto, el color claro del líquido de los relaves similar al No. 1 de la placa, indica que estas contienen bajo contenido de impurezas orgánicas y que son admisibles por la norma ASTM C87.

## 5. Conclusiones

- Se caracterizó la muestra proveniente de la zona de influencia minera Reina de Oro con ensayos de fluorescencia de rayos X (FRX) y microscopia óptica de barrido (SEM- EDS), no encontrando compuestos o elementos que superaran el límite de cantidad de sustancias dañinas permitidas por la NTC 174 para los agregados finos en la elaboración de concreto tipo D. De igual manera, la granulometría cumplió los parámetros de agregados finos exigidos por dicha norma. Además, los ensayos al fuego mostraron un tenor significativo de 3,66 g de oro/ Tonelada.
- Se concentró gravimétricamente el metal valioso con la realización de pruebas en un concentrador centrífugo KNELSON, teniendo como principales constantes: presión de 5 Psi, fuerza centrífuga de 60g y variando el tamaño de partícula, divididas en: relaves,

gruesos (malla N° -10+60), medios (malla N° -60+100) y finos (malla N° -100+200); donde el mayor porcentaje de recuperación está en los tamaños gruesos.

- Las colas provenientes del proceso de concentración gravimétrica en KNELSON hicieron parte de los agregados finos de construcción en proporciones de 10,50, 90 y 100% para producir concreto tipo D, donde la composición de Z0(100% colas) se rechaza debido a que la resistencia a la compresión es menor que 3100 Psi según la norma INVIAS INV E-410. Mientras que Z1(10% colas), Z5 (50% colas) y Z9 (90% colas) superaron este parámetro, haciéndolos aptos para ser usados en concretos reforzados tipo D, para la construcción de placas huella y solucionando en gran medida la problemática ambiental latente.

## 6. Recomendaciones

Se le solicita a la empresa relacionada con el proyecto y al municipio de Vetas (Santander) que realicen un tramo de placas huella teniendo en cuenta los resultados dispuestos.

**Referencias Bibliográficas**

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Práctica estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo. ACI 211.1; 1991. (s.f.).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL, Standard Test Method for Effect of Organic Impurities in Fine Aggregate on Strength of Mortar, . West Conshohocken: ASTM C87 / C87M-17; 2017. (s.f.).
- ARANGO, Marcela; OLAYA, Yris. (2012). PROBLEMÁTICA DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN COLOMBIA. *gestión y ambiente*, 15(3), 125-133.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (s.f.). *Autoridad Nacional de Licencias Ambientales*. Recuperado el 7 de abril de 2018, de <http://www.anla.gov.co/atencion-al-ciudadano/glosario>
- CURO, E., & RASHUAMAN, P. (2015). *DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO  $f_c = 175 \text{ kg/cm}^2$  ADICIONANDO RELAVE DE LA RELA VERA No 09 - ACCHILLA CCOCHACCASA, PARA TRÁNSITO LIGERO (METODO ACI), EN EL DISTRITO DE URCA Y PROVINCIA DE ANGARAES-HUANCAVEUCA*. Lircay - Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto. INV E-410-07; 2007. (s.f.).
- LIRA, Guillermo; OSSES, Hernán. (2013). Factibilidad del reemplazo del agregado fino por arena de relave en el hormigón. *Revista Científico Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles*, 3, 50-58.
- Lutz Benner, W. C. (1999). New Methods for Handling of Tailings. *International Mining and Environment Congress: Clean Technology: Third Millennium Challenge*. Lima- Perú.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. NTC 550; 2000. (s.f.).

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. NTC 673; 2010. (s.f.).

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Especificaciones de los agregados para concretos. NTC 174; 2000. (s.f.).

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería civil y arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC 92; 1995. (s.f.).

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. NTC 1377; 1994. (s.f.).

ROMERO, Alfonso; FLORES, Silvana. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 13(1), 75-82.

WORRALL, Rhys; NEIL, David; BRERETON, David; MULLIGAN, David. (2009). Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine land. *Journal of Cleaner Production*, 17, 1426–1434.

## Apéndices

## Apéndice A. Resultados de SEM-EDS

Figura 1. Imagen de SEM, composición química (cruz roja posición 1) y espectro EDS de la muestra de relaves respectivamente

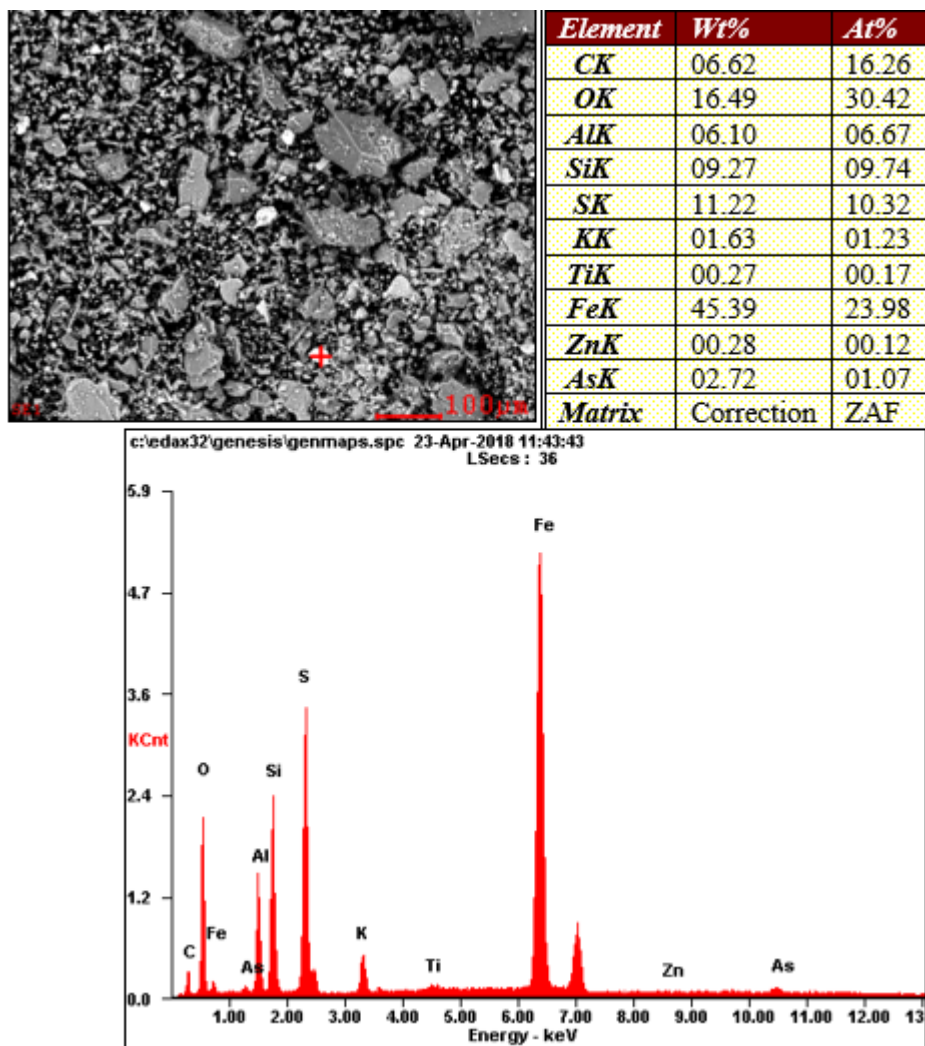


Figura 2. Imagen de SEM, composición química (cruz roja posición 2) y espectro EDS de la muestra de relaves respectivamente

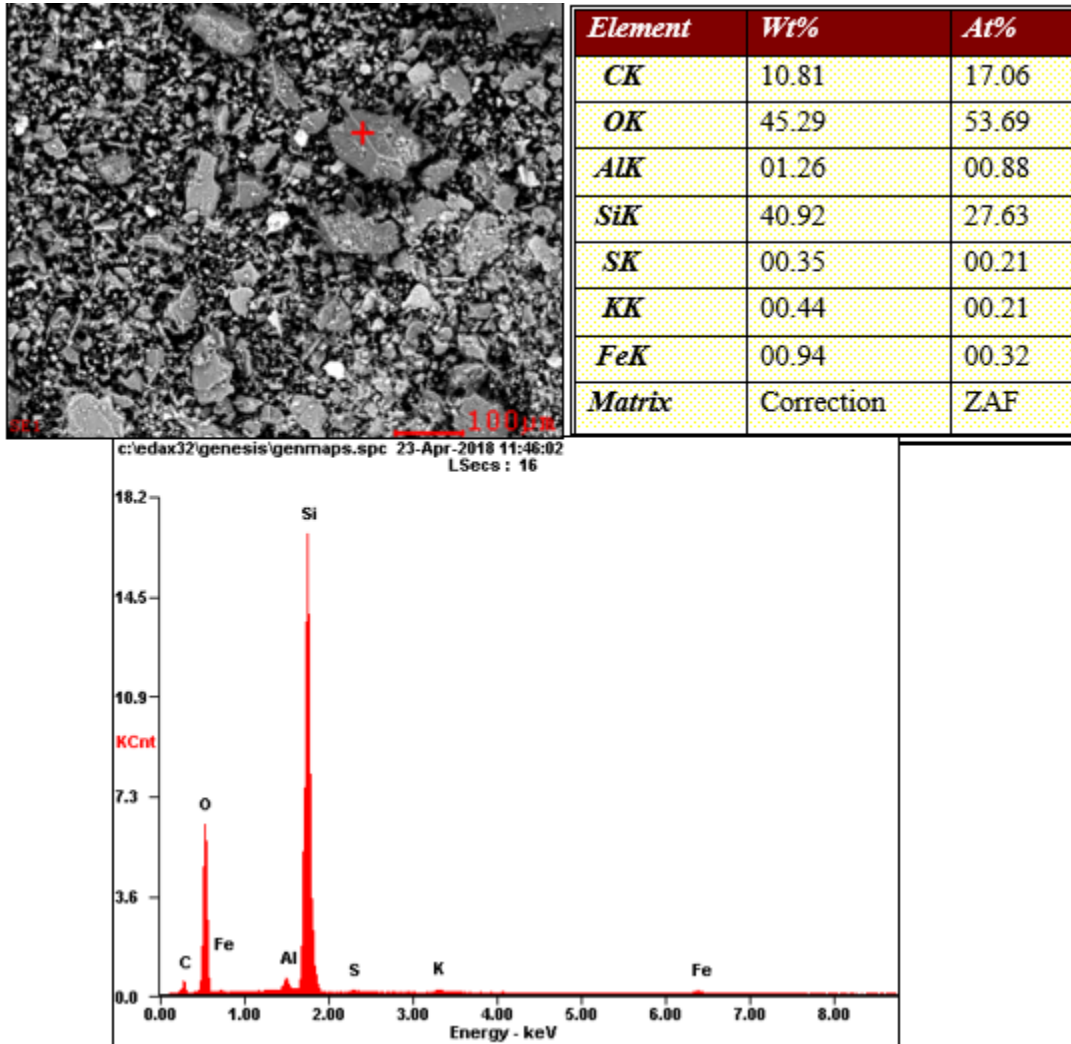


Figura 3. Imagen de SEM, composición química (cruz roja posición 3) y espectro EDS de la muestra de relaves respectivamente

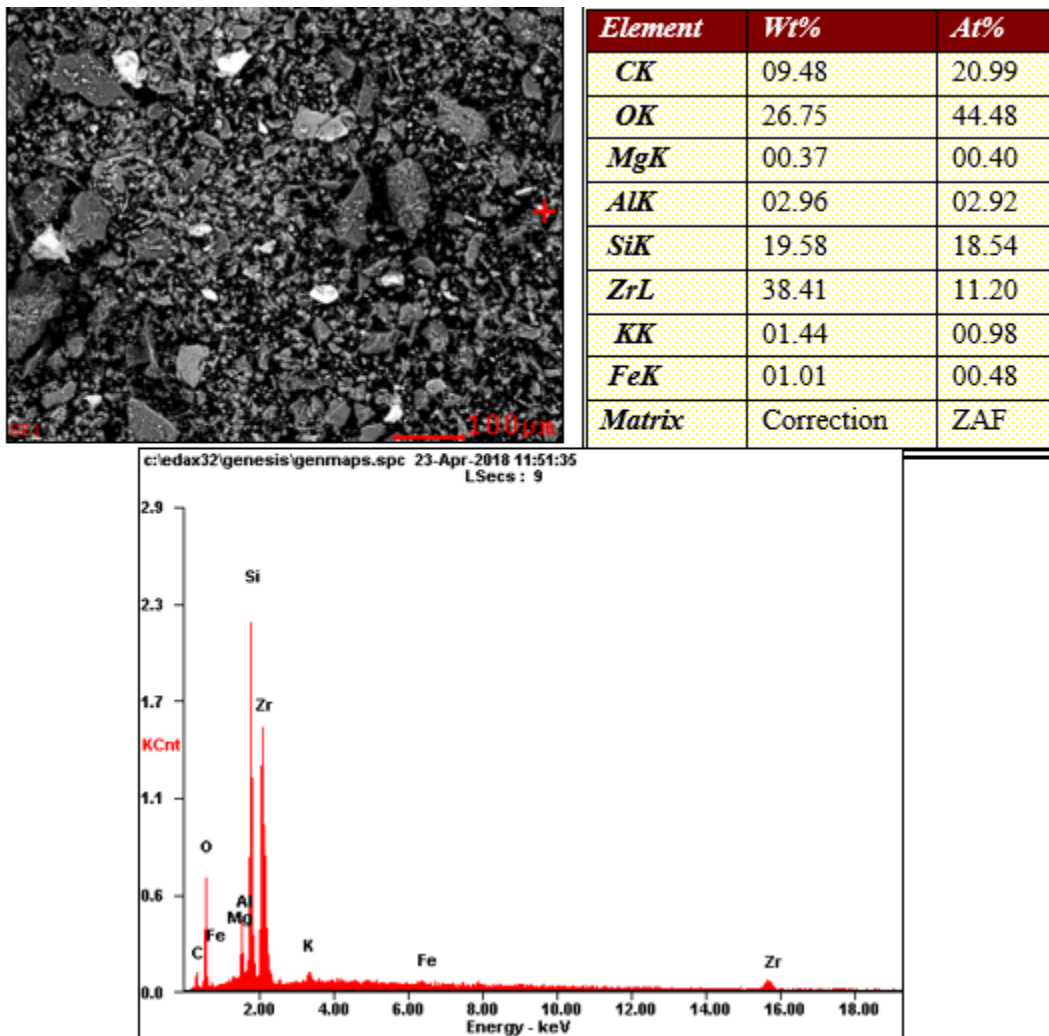


Figura 4. Imagen de SEM, composición química (cruz roja posición 4) y espectro EDS de la muestra de relaves respectivamente

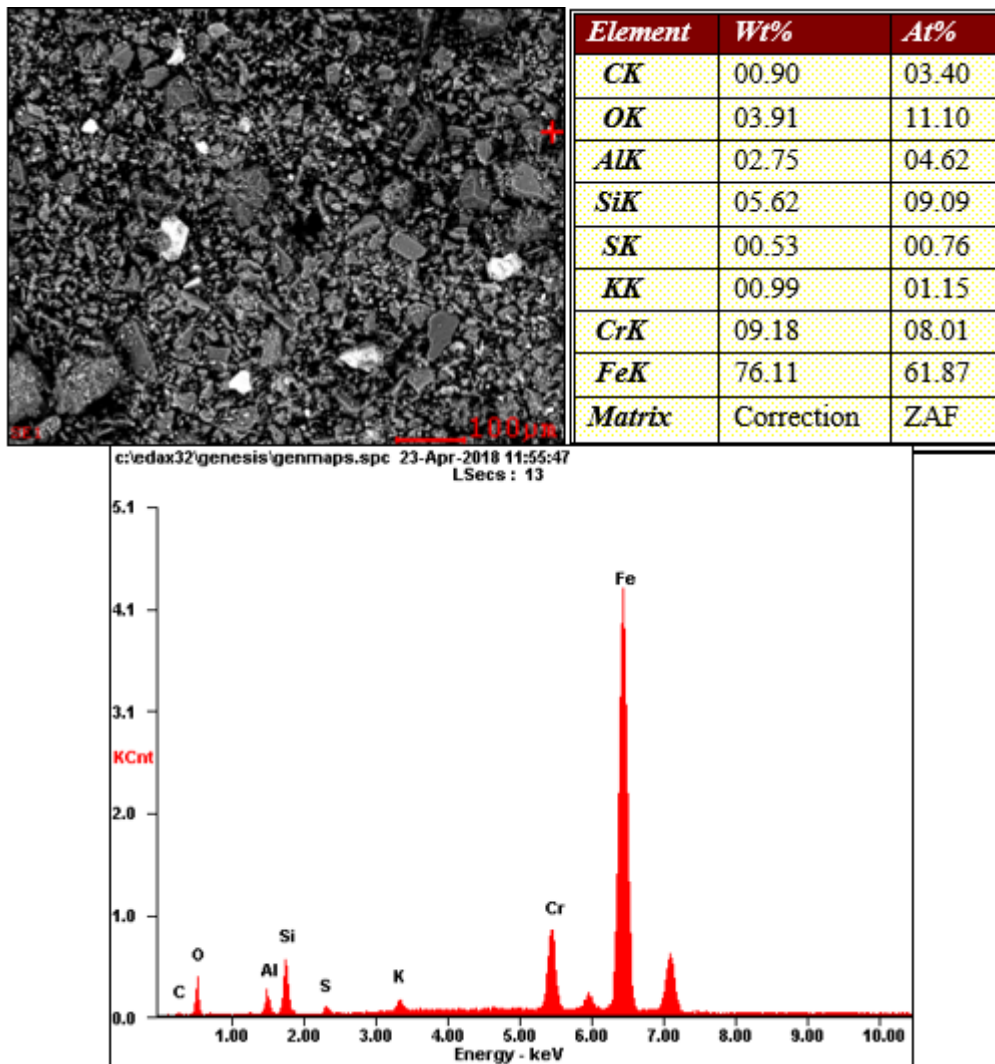


Figura 5. Imagen de SEM, composición química (cruz roja posición 5) y espectro EDS de la muestra de relaves respectivamente

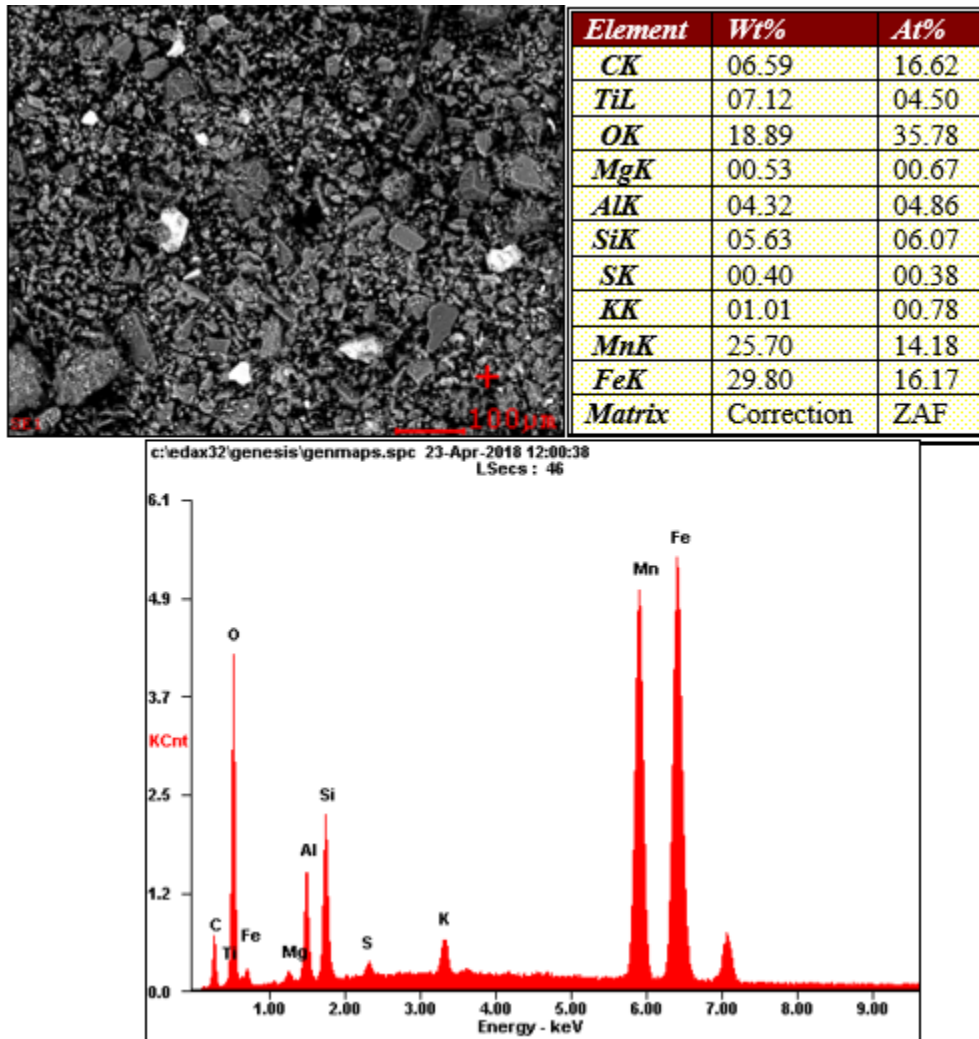


Figura 6. Imagen de SEM, composición química (cruz roja posición 6) y espectro EDS de la muestra de relaves respectivamente

