



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XVIII/ Volumen 18/ Edición N.36
Junio-Diciembre de 2021
Reia36004 pp. 1-12

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Arias Torres, S. M.; Córdova Castro,
J. D.; Gómez Botero, M. A. (2021).
Alternativas de aprovechamiento de
residuos de la industria minera de El
Bajo Cauca Antioqueño en el sector
de la construcción.
Revista EIA, 18(36), Reia36004.
pp. 1-12.
<https://doi.org/10.24050/reia.v18i36.1496>

 *Autor de correspondencia:*

Arias Torres, S. M. (Sandra Milena):
Magister en Ingeniería de Materiales.
Servicio Nacional de Aprendizaje
Correo electrónico:
smilena.ariastorres@gmail.com

Recibido: 18-01-2021
Aceptado: 18-04-2021
Disponible online: 01-06-2021

Alternativas de aprovechamiento de residuos de la industria minera de El Bajo Cauca Antioqueño en el sector de la construcción

 SANDRA MILENA ARIAS TORRES¹
JUAN DIEGO CÓRDOVA CASTRO¹
MARYORY ASTRID GÓMEZ BOTERO²

1. Servicio Nacional de Aprendizaje
2. Universidad de Antioquia

Resumen

La minería a pequeña y gran escala en el Bajo Cauca Antioqueño genera un aporte significativo a la producción de oro a nivel departamental, siendo motor de desarrollo e inversión social en el territorio (Camara de Comercio de Medellín, 2019). Sin embargo, la industria minera genera consigo una gran cantidad de desechos al ambiente, que son almacenados en estructuras de contención tipo presa a un alto costo y sin ningún valor agregado al proceso de minería (Beltrán-Rodríguez, Larrahondo, & Cobos, 2018). Por otro lado, los suelos degradados por la actividad minera del pequeño minero se han transformado en un problema para el desarrollo de la región, limitando la utilización de los recursos naturales que posee el territorio para potencializar las destrezas, conocimientos y habilidades de los habitantes del Bajo Cauca (Güiza, 2013). Estos daños generados a los suelos de la región se deben a los procesos de extracción rudimentarios y a la disposición de desechos no controlada posterior a la extracción minera por parte del pequeño minero.

De acuerdo a este panorama expuesto se hizo necesario crear alternativas de aprovechamiento de suelos degradados de la pequeña minería y relaves mineros de la gran minería de empresas presentes en la región en opciones productivas a través de su transformación y utilidad para la industria de la construcción.

Es por ello que, en esta investigación se presentan alternativas de aprovechamiento de suelos degradados y relaves mineros en el sector de la construcción a través de la fabricación de morteros de revoque y mezclas de concreto, representando con esto no solo una alternativa de reconversión laboral para los habitantes de la región sino también una alternativa de aprovechamiento de todo el material que queda como residuo posterior a la extracción minera, no solo de las empresas mineras en general sino también del pequeño minero, mitigando con ello el impacto ambiental generado con la minería a través de una alternativa productiva.

Palabras Claves: *relaves mineros; residuos mineros; suelos degradados; industria minera; construcción sostenible; colas de minería; mezclas de concreto; morteros de revoque; economía circular.*

Alternatives for the use of waste from the mining industry of El Bajo Cauca Antioqueño in the construction sector

Abstract

Small and large-scale mining in Lower Cauca Antioqueño generates a significant contribution to the production of gold at the departmental level, being an engine for development and social investment in the territory (Camara de Comercio de Medellín, 2019). However, the mining industry generates a large amount of waste into the environment, which is stored in dam-type containment structures at a high cost and without any added value to the mining process (Beltrán-Rodríguez et al., 2018). On the other hand, the soils degraded by the mining activity of the small miner have become a problem for the development of the region, limiting the use of the natural resources that the territory possesses to enhance the skills, knowledge and abilities of the inhabitants of the region Lower Cauca (Güiza, 2013). These damages generated to soils in the region are due to rudimentary extraction processes and the uncontrolled disposal of waste after mining extraction by the small miner.

According to this outlook, it was necessary to create alternatives for the use of degraded soils from small-scale mining and mining tailings from large-scale mining companies present in the region in productive options through their transformation and utility for the construction industry.

For this reason, this research presents alternatives for the use of degraded soils and mining tailings in the construction sector through the manufacture of plaster mortars and concrete mixtures, thus representing not only an alternative of labor reconversion for the inhabitants of the region but also an alternative to use all the material that remains as waste after mining extraction, not only from mining companies in general but also from small miners, thereby mitigating the environmental impact generated by mining through a productive alternative.

Key Words: *mining tailings; mining waste; degraded soils; mining industry; sustainable construction; mining queues; concrete mixes; plaster mortars; circular economy.*

Introducción

La minería es probablemente una de las actividades mundiales más importantes en la generación de desechos de alto volumen. Estos desechos, conocidos como colas o relaves, son almacenados durante tiempo indefinido por las empresas mineras utilizando opciones como filtrado, retrolenado, realce y disposición submarina (Beltrán-Rodríguez et al., 2018), generando con ello no solo contaminación ambiental sino un gran costo económico y ningún beneficio adicional que genere valor agregado al proceso de minería (Fedesarrollo, 2014)(M. de M. y Energía, 2017).

Se ha reportado que sólo en relaves de minas de carbón en China ya se tienen acumulados 3.800 millones de toneladas, aumentando a un ritmo de 0.2 billones de toneladas por año, con una tasa de aprovechamiento de menos del 7% (Beltrán-Rodríguez et al., 2018)(C. Li, Wan, Sun, & Li, 2010). Para La Unión Europea, en general, la industria extractiva tiene una producción de unos 3 mil millones de toneladas y de esta extracción se reporta que los desechos mineros y de canteras representan el 15% de residuos totales en Europa occidental y 31% en Europa oriental (J., John L. Provis

& Deventer, 2009) esto debido a que la cantidad de material de desecho en relaves a nivel mundial sobrepasa significativamente la cantidad de mineral valioso, llegando a ser en el caso de las minas de cobre de solo 0.25% y de 1 g de metal por tonelada de roca en minas de oro, solo en la Unión Europea o China (Beltrán-Rodríguez et al., 2018), representando una cantidad alarmante de producción de material de desecho.

Por otro lado, el almacenamiento incontrolado de estos residuos mineros ha generado a lo largo de la historia daños irreparables no solo al ambiente, sino que ha representado pérdidas en vidas humanas, tal como lo reportado en las minas de Aznalcollar en España (1998), del Parque Natural de Donana con lodo de pirita y la mina Baia Mare (2000) en Rumania donde se mostró que, a corto plazo y ambientalmente hablando, los desechos mineros representan un peligro claro y presente tan importante como las emisiones de gases de efecto invernadero, representando también con esto una amenaza importante para el cambio climático (J., John L. Provis & Deventer, 2009).

Adicionalmente, según lo establecido en el acuerdo de Copenhague suscrito en el 2009 por más de 120 países, es indispensable mantener el aumento de la temperatura promedio global por debajo de 2 °C como un objetivo urgente, dado que muchos científicos estiman que las concentraciones de CO₂ y otras sustancias que fuerzan el clima en la atmósfera ya exceden el nivel seguro (Van Deventer, Provis, & Duxson, 2012), por lo que se debe propender por generar acciones que permitan reducir las emisiones de CO₂ y entre estas acciones urgentes y necesarias, está el utilizar la gran cantidad de residuos que se generan a partir de diferentes industrias en nuevas alternativas productivas.

La minería a pequeña escala o minería informal, es un oficio que se ha desempeñado desde la antigüedad, principalmente en países en vía de desarrollo, que se caracteriza por un uso mínimo de maquinaria y tecnología, lo que hace que por esta implementación tan rudimentaria, se generen gran contaminación en los suelos, aguas subterráneas y personas de las regiones mineras, ya que ha sido la responsable de verter enormes cantidades de sustancias químicas peligrosas al medioambiente (Fedesarrollo, 2014)(J. Li & Wang, 2019) según datos suministrados por la OCDE Colombia Mayo 2017 y que determinan un gran impacto en el país, de acuerdo a datos suministrados por el Ministerio de Salud, donde reporta que el 87% de las minas no tenían título minero y solo 3% tenían licencia ambiental (MINSALUD, 2018). Con ésta problemática generada, se hace necesario buscar alternativas que permitan un modelo sostenible de aprovechamiento de estos materiales.

Una de las principales formas de disminuir la huella de carbono de las edificaciones es la sinergia con otros sectores económicos a través de la Economía Circular. A partir de este concepto, el reciclaje de residuos de diferentes sectores disminuye la necesidad de extraer recursos "vírgenes", lo que significa que se consume menos energía para fabricar materiales y como resultado, se generan menos emisiones de GEI (Heshmati, 2015). Teniendo en cuenta que el sector constructor es uno de los mayores consumidores de materiales en volumen y el concepto de EC, la vinculación con el sector minero resulta viable para disminuir los GEI de ambos sectores. Esta reducción se puede dar desde la reutilización de residuos mineros para la fabricación de materiales de construcción, debido a las grandes cantidades de residuos que se originan y los problemas ambientales que se pueden evitar (Barry A. Wills, 2015)(M. de I. y Energía, 1995).

Este tipo de aprovechamiento de residuos de la industria minera en el sector de la construcción se ha realizado anteriormente en fabricación de ladrillos, baldosas, adoquines para piso, sistema de relleno o utilizándolos para la obtención de agregados (Ames1, Mendieta2, Ampuero3, & Peñaranda, 2015; Cárdenas Tielavilca,

2019; Castillo, 2017; Romero & Flores, 2010; VALVERDE, 2019) en diferentes partes del mundo. Sin embargo, se hace necesario que este aprovechamiento de residuos se extienda a regiones como el Bajo Cauca Antioqueño y por ello, por medio de esta investigación, se exploró esta posibilidad.

Por medio de esta investigación se generaron alternativas de aprovechamiento de residuos de empresas mineras ubicadas en El Bajo Cauca Antioqueño, en la fabricación de mezclas de mortero de revoque y concreto estructural, concluyendo tras los análisis realizados que estos residuos de la industria minera efectivamente pueden aprovecharse en alternativas productivas en el sector de la construcción.

Materiales y métodos

Muestreo

Como muestras para la elaboración de morteros de revoque y mezclas de concreto, se contó con los residuos provenientes de la industria de minería de beta (relaves mineros) y minería aluvial (suelos degradados) de la región de El bajo Cauca Antioqueño.

Caracterización muestras

La caracterización física de los agregados que componen las muestras de relaves mineros y suelos degradados del pequeño minero, se realizó de acuerdo a las especificaciones generales de construcción de carreteras de Inviás (2014) (Inviás, 2014) utilizando las normas de las secciones 100 y 200 de acuerdo al tipo de muestra, tal como se describe a continuación: Reducción de muestras de agregados por cuarteo INV E-202, distribución de tamaño de partícula INV E- 213, gravedad específica y absorción INV E- 222 e INV E- 223 para las porciones finas y gruesas respectivamente, límites de Atterberg, INV E-125 e INV E-126 para los límites líquido y plástico respectivamente y contenido de materia orgánica INV E- 212. Otras pruebas adicionales realizadas solo a la muestra de relaves mineros fueron: pasante del tamiz de 75 micras INV E- 214, equivalente de arena INV E-133 y clasificación de la fracción fina INV E- 182, esto con el fin de garantizar la aplicación de los relaves mineros como mortero de revoque.

Diseño de mezcla de mortero

El diseño de mezcla para mortero de revoque a partir de relaves mineros se llevó a cabo de acuerdo a Salamanca (Correa, 1984) de acuerdo a las aplicaciones y características para morteros de revoque previstas por Asocreto (Asocreto, 2011), para una resistencia esperada de aproximadamente 60 kg/cm² y calculando la cantidad de cemento a adicionar con esta resistencia de diseño y un módulo de finura de 2.

Para el diseño de la mezcla, se estableció una relación Agua/Cemento de 1 y un volumen de aire incluido de 3,5%.

Para determinar las cantidades a adicionar de arena de relave y cemento, de la prueba de gravedad específica, se determinó el peso específico saturado y superficialmente seco de la arena, que fue de: 2,65 kg/m³ y la densidad del cemento utilizado fue de 3100 kg/m³. Con estos datos y el volumen de los moldes a utilizar, se determinaron las cantidades a adicionar de cada uno de los componentes de la mezcla de mortero.

Preparación y evaluación de probetas de mortero

La fabricación y evaluación de la resistencia a compresión de los morteros de revoque a partir de relaves mineros se realizó de acuerdo a lo establecido en la NTC 220 (Icontec, 2017). Se prepararon tres cubos de 5X5 para cada edad de curado: 7, 14 y 28 días y posterior a 24 horas en cámara húmeda se desmoldaron y se llevaron a un cuarto de curado, a una temperatura de: 23 ± 2 y una humedad relativa del 100%. Posterior a cada tiempo establecido, las probetas se extrajeron del cuarto de curado y se evaluó su resistencia a la compresión en un sistema de compresión y flexión Controls- Dirimpex CT- 2000/T exactitud: clase 1. Rango de 150kN a 2000 kN.

Diseño de mezclas de concreto

El diseño para la elaboración de mezclas de concreto se realizó para un metro cúbico de concreto, utilizando cemento Portland tipo I (de fraguado normal) de acuerdo a la metodología ACI 211.18 (American Concrete Institute) (ACI Committee, 2002) para una resistencia final de 210 kg/cm². Como agregados para la mezcla, se utilizaron las fracciones gruesas y finas extraídas de la muestra de suelos degradados. El cálculo de agua por metro cúbico de hormigón se determinó de acuerdo al tamaño máximo de agregado utilizado para un asentamiento de 15 mm con el cono de Abrams y un contenido de aire atrapado de 2,5%.

La relación agua / cemento de la mezcla se estableció de 0,53 para una resistencia media de 237 Kg/cm² a los 28 días de curado, de acuerdo al control establecido de 0,14 según la expresión de la ecuación 1. (A. M. Neville)

$$f'c = fm (1 - 1,65 * \sigma)$$

Donde:

$f'c$: Resistencia a la compresión de diseño

f_m : Resistencia de diseño a compresión de la mampostería

σ : Desviación estándar seleccionada de acuerdo al tipo de control

Se establece el volumen de agregado grueso de acuerdo al tamaño máximo del agregado y al módulo de finura encontrados posterior al análisis granulométrico de la muestra. A partir de estos datos, se calcula el volumen de cada uno de los componentes de la mezcla, utilizando las densidades arrojadas de la prueba de gravedad específica para el caso de los agregados gruesos y en cuanto al cemento, con la densidad proporcionada por el fabricante.

El cálculo de agregado fino, se realiza restando al metro cúbico de cemento los anteriores volúmenes determinados y posteriormente, con los datos generados en la prueba de gravedad específica se calculan las cantidades totales en peso a adicionar a la mezcla para el volumen de los moldes cilíndricos que se utilizaron.

Preparación y evaluación de probetas de concreto

Para la fabricación de las probetas de concreto, se utilizaron moldes de 10 cm de diámetro X 15 cm de altura y se prepararon tres cilindros para cada edad de curado: 7, 14 y 28 días, se dejaron durante 24 horas en cámara húmeda y concluido este tiempo, se desmoldaron y se llevaron a un cuarto de curado, a una temperatura de: 23 ± 2 y una humedad relativa del 100%.

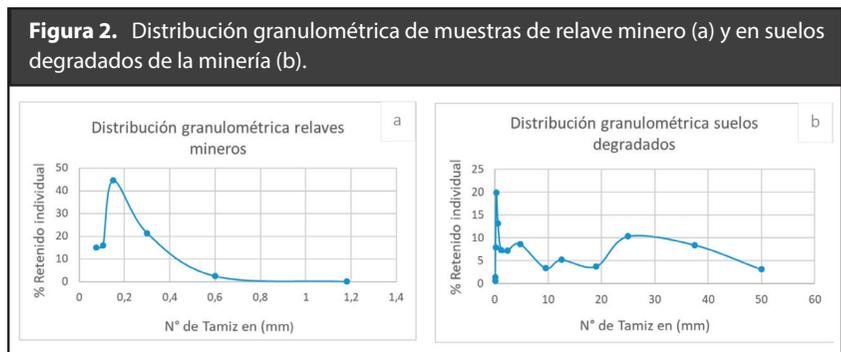
Posterior a cada tiempo establecido, las probetas se extrajeron del cuarto de curado y se evaluó su resistencia a la compresión de acuerdo a la norma NTC 673 (Icontec, 2010) en un sistema de compresión y flexión Controls- Dirimpex. Modelo: CT- 2000/T; CT-0150; 50-C20E84; 55- C0221/E, en un rango a compresión de: 0 kN a 2,000 kN con una exactitud de 1,62 kN/ 0,54%.

Resultados y discusión

Las zonas muestreadas de relaves mineros de la industria minera y suelos degradados del pequeño minero registran en la Figura 1 (a) y (b) a continuación.



Los resultados de la caracterización de análisis granulométrico de la muestra de relaves mineros y suelos degradados del pequeño minero registran en las figuras 2 (a) y (b) respectivamente.



En los gráficos de distribución granulométrica se puede observar como la muestra proveniente de los relaves mineros es una muestra muy homogénea, con una distribución de partículas pertenecientes a la fracción fina, iniciando el retenido desde el tamiz No. 16, que corresponde a un tamaño de partícula de 1,18 mm y con el mayor porcentaje de retenido en la malla No 100, que corresponde a un tamaño de partícula de 150 micras, permitiendo por su granulometría ser usado en aplicaciones como mortero de revoque.

Por otro lado, se observa que la muestra de suelos degradados es una muestra con una distribución de tamaño de partícula muy heterogénea, encontrándose tanto partículas gruesas, como finas, permitiendo también por estas características ser utilizados en aplicaciones como agregados, tanto finos como gruesos, para mezclas de concreto.

Los resultados de contenido de materia orgánica presente en muestras de relaves y suelos degradados registran en la Figura 3 (a) y (b) respectivamente, como uno de los resultados más determinantes para utilizar las muestras de relaves mineros y suelos degradados en la fabricación de materiales de construcción.



Como se observa en la Figura 3, posterior a 24 horas de asentamiento al realizarse la evaluación comparativa con la escala de color de Gartner, se determinó que la muestra evaluada no presenta contenido orgánico nocivo al ser utilizadas en la fabricación de materiales de construcción.

Adicionalmente, como resultados de los límites de Atterberg, se tiene que, al realizar las pruebas de límite líquido y límite plástico a las muestras de relaves mineros y suelos degradados por la minería, se determinó que ambas muestras correspondían a materiales no plásticos (NP), lo que constituye un requerimiento necesario para que puedan ser utilizados en elaboración de mezclas de concreto.

Los resultados extraídos de las pruebas de caracterización física de la muestra de relaves mineros que permitieron el diseño de la mezcla de mortero de revoque, registran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de pruebas a muestra de relaves mineros.

| Prueba realizada (norma) | Resultado |
|---|-----------|
| Módulo de finura (INV E- 213) | ~ 1 |
| Peso Específico (INV E- 222) | 2655,38 |
| Equivalente de arena promedio (INV E- 133) | 74% |
| Pasante malla 75 micras (INV E- 214) | 15,64% |
| Valor de azul de metileno (INV E- 182) | 2,50% |

La evaluación realizada con la prueba de contenido de materia orgánica sumado a las características de granulometría, no plasticidad y otras características como porcentaje de arena, valor de azul de metileno y pasante malla 75 micras permitió determinar que la muestra de relaves mineros podría ser utilizada en la fabricación de mezclas de mortero para revoque, de acuerdo a los estándares establecidos en el sector de la construcción.

El tamaño de los granos de la arena de la muestra de relaves mineros permitió que el acabado final de las probetas fuera muy prolijo, como se evidenció en los cubos una vez se extrajeron del cuarto húmedo para fallarlos y como registra en la Figura 4 (a). Adicionalmente, se muestra que los cubos de mortero fueron preparados por triplicado para cada edad de curado, como se muestra en la Figura 4 (b).



Los resultados de resistencia a la compresión realizados a las probetas de mortero registran en la Figura 5, a continuación:



Como se observa en la Figura 5, la resistencia de los cubos de mortero aumentó al incrementar los días de curado, finalizando a los 28 días de curado en 1 MPa por encima de la resistencia para la cual se diseñó de 6 MPa, lo cual permite que efectivamente estos morteros puedan ser utilizados en revoque de acuerdo al diseño de mezcla realizado.

Los resultados de las pruebas de caracterización física de suelos degradados por la minería que permitieron el diseño de mezclas de concreto utilizando sus agregados como agregados finos y gruesos registran en la Tabla 2 a continuación:

Tabla 2. Datos de caracterización de suelos para el diseño de mezcla de concreto.

| Agregado grueso | | Agregado fino | |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tamaño máximo del agregado grueso | 12,5 mm | Módulo de finura | 3,4 |
| Peso volumétrico aparente (incluidos los espacios vacíos) | 1540 kg/cm ³ | Densidad: | 2,68 gr/cm ³ |
| Densidad: | 2,43 gr/cm ³ | Humedad Natural | 6% |
| Humedad Natural | 5% | Porcentaje de absorción | 7% |
| Porcentaje de absorción | 5% | Módulo de finura | 3,4 |

Las cantidades de cada uno de los componentes de la mezcla de concreto, de acuerdo a los moldes cilíndricos a utilizar, registran en la Tabla 3, a continuación:

Tabla 3. Cantidades de componentes de la mezcla de concreto.

| Componentes | Cantidad |
|-------------|----------|
|-------------|----------|

Figura 6. Cilindros de concreto fabricados con agregados de suelos degradados por la minería.



Las probetas cilíndricas fabricadas con las cantidades mostradas a continuación de acuerdo a las especificaciones:

Los resultados con la evolución de la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto, registran en la Figura 7, a continuación:

Figura 7. Resultados de resistencia a la compresión de mezclas de concreto.



En la gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de concreto se puede observar como a los 28 días de curado, la resistencia encontrada supera la resistencia final de diseño que se estableció en 210 kg/cm^2 , mostrando que los cálculos realizados fueron correctos para alcanzar esta resistencia estructural y que adicionalmente, los agregados no generaron un efecto negativo en el curado de las probetas. Del mismo modo, se encontró que la mezcla desarrollo una resistencia temprana a la compresión alcanzando a los 7 días de curado el 76% de la resistencia para la que fue diseñada y a los 14 días el 86% de la misma.

De acuerdo a los resultados mostrados, se establece que los agregados seleccionados de la muestra de suelos degradados pueden ser aprovechables como agregados para fabricar mezclas de concreto para fines estructurales de acuerdo a los cálculos realizados en el diseño de mezcla mostrado y de este modo contribuir a reutilizar los suelos degradados por la minería en alternativas sostenibles de construcción en la región de El Bajo Cauca Antioqueño.

Conclusiones

Es posible generar otras alternativas de uso de los relaves mineros y suelos degradados de la minería como alternativas de aprovechamiento frente a la cantidad de residuos que quedan posterior a la extracción de minerales.

Las propiedades mecánicas de los morteros de revoque fabricados con relaves mineros, cumplen con el acabado y la resistencia mecánica final exigida.

Los suelos degradados por la minería pueden ser utilizados como agregados gruesos y finos para la fabricación de mezclas de concreto para aplicaciones estructurales ya que cumplen con la resistencia mecánica final requerida para ello.

Como trabajo futuro, se debe evaluar la lixiviación de estos materiales, para determinar que no presentarán ningún riesgo para la salud y el ambiente circundante una vez se encuentren en un uso determinado.

Referencias

ACI Committee. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. , Pub. L. No. ACI 211.18, 121 (2002).

- Ames¹, S. P. C., Mendieta², J. M. L., Ampuero³, J. A., & Peñaranda. (2015). Sistema de relleno con mortero de relave para mejorar la confiabilidad del sostenimiento en la minería subterránea. *Sinergia e Innovación*, 3(2), 17–41.
- Asocreto. (2011). *Técnicas de laboratorio de concreto: Ensayos especiales en obra y laboratorio*.
- Barry A. Wills, J. F. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology*, 8th Edition [Book]. Retrieved December 22, 2020, from <https://www.oreilly.com/library/view/wills-mineral-processing/9780080970547/>
- Beltrán-Rodríguez, L. N., Larrahondo, J. M., & Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (44), 5–20. <https://doi.org/10.15446/rbct.n44.66617>
- Camara de Comercio de Medellín. (2019). Perfil socioeconómico de la subregión del Bajo Cauca de Antioquia. Retrieved from www.camaramedellin.com.co
- Cárdenas Ticlavilca, F. J. (2019). "Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería - caso ex unidad minera Mercedes 3". UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS.
- Castillo, E. A. S. (2017). Reaprovechamiento de residuos industriales de la Minería - Metalúrgica y poliestireno expandido, en la elaboración de adoquines para Piso Rímac - 2017. Universidad César Vallejo.
- Correa, R. S. (1984). Dosificación de morteros: Diseño de mezclas de mortero (Universidad Nacional de Colombia). Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/22831/%0A>
- Energía, M. de I. y. (1995). Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica. In *RESIDUOS PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA MINERA DEL CARBÓN*.
- Energía, M. de M. y. PLAN NACIONAL DE DESARROLLO MINERO CON HORIZONTE A 2025 Minería responsable con el territorio. , (2017).
- Fedesarrollo. (2014). *Minería Informal Aurífera en Colombia*.
- Güiza, L. (2013). LA PEQUEÑA MINERÍA EN COLOMBIA: UNA ACTIVIDAD NO TAN PEQUEÑA SMALL SCALE MINING IN COLOMBIA: NOT SUCH A SMALL ACTIVITY. 80, 109–117.
- Heshmati, A. (2015). A Review of the Circular Economy and its Implementation.
- Icontec. CONCRETOS. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO. , (2010).
- Icontec. CEMENTOS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO A LA COMPRESIÓN, USANDO CUBOS DE 50 MM O 2 PULGADAS DE LADO. , (2017).
- Invias. (2014). *especificaciones_generales_de_construccion_de_carreteras_version_pdf-Sept14*. Retrieved January 14, 2021, from Invias website: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/2740-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-version-pdfsept14>
- J., John L. Provis, J. S., & Deventer, V. (2009). *Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications* (Woodhead P; J. L. P. And & J. S. J. van Deventer, Eds.). Boca Raton, FL 33487, USA.
- Li, C., Wan, J., Sun, H., & Li, L. (2010). Investigation on the activation of coal gangue by a new compound method. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1–3), 515–520. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.033>
- Li, J., & Wang, J. (2019). Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review. *Journal of Cleaner Production*, 239, 117946. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117946>
- MINSALUD. (2018). "EVALUACION DEL GRADO DE CONTAMINACIÓN POR MERCURIO Y
- Romero, A. A., & Flores, S. L. (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*, 13(1), 75–82. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/816/81619984010.pdf>
- VALVERDE, Y. E. S. (2019). ESTUDIO DEL RELAVE MINERO DE LA PLANTA DE BENEFICIO

SANTA LUCÍA CÓDIGO 191038 DEL SECTOR LA MARAVILLA DE LA PARROQUIA PUCARÁ, CANTÓN PUCARÁ, PROVINCIA DEL AZUAY, CON FINES DE UTILIZACIÓN EN MORTEROS DE PEGA DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.

Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.009>