



Universidad Santo Tomás Seccional Tunja
Facultad de Ingeniería Civil

RESIDUOS MINERALES, INDUSTRIALES Y DE SIDERURGIA, Y SU IMPLEMENTACIÓN EN
LA ELABORACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE
BOYACÁ DESDE EXPERIENCIAS A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL

Autor

Paula Juliana Orduz Pérez

Dubieth Dayana Ruiz García

Tutor

Geólogo PhD Javier Eduardo Becerra Becerra

Monografía

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

Tunja-Boyacá

2021

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por permitirnos culminar nuestros estudios de pregrado de manera satisfactoria y sin contratiempos, a nuestros padres por brindarnos su apoyo incondicional en nuestra formación como profesionales, a nuestra familia en general por hacer parte de este proceso de crecimiento tanto integral como personal. De igual manera agradecemos al Ingeniero Javier Becerra Becerra por la paciencia y dedicación brindada para la realización de esta monografía. A la facultad y todo su cuerpo de docentes y administrativos que nos guiaron y colocaron a nuestra disposición información necesaria para el desarrollo de esta monografía; y a todas aquellas personas que directa e indirectamente nos brindaron su apoyo tanto académico como emocional, gracias infinitas por su confianza.

NOTA DE ACEPTACIÓN



FIRMA DIRECTOR

FIRMA JURADO 1

FIRMA JURADO 2

Tunja, abril de 2021.

INDICE

Resumen.....	8
Abstract.....	9
Introducción	10
Problema de investigación	11
Descripción del problema	11
Pregunta de investigación	13
Justificación	13
Objetivos.....	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos.....	16
Descripción de tema.....	16
Metodología de la investigación	18
Tratamiento de la información.....	19
Análisis y Discusión	21
Utilización de los residuos minerales, industriales y de siderurgia en la fabricación de materiales de la construcción	21
Residuos de la Minería.....	21
Residuos industriales	33
Residuos de siderurgia	35
Residuos que se están produciendo en el departamento de Boyacá para ver su potencial uso en la elaboración de materiales de construcción.....	38
Residuos minerales	38

Residuos industriales	41
Residuos de Siderurgia	42
Oportunidades de investigación que se puedan generar en la facultad de ingeniería civil.	44
Conclusiones	47
Glosario de términos	49
Referencias.....	51

Lista de Tablas

Tabla 1 Tratamiento de la información.....	20
Tabla 2 Análisis de resultados de ensayos al estéril de carbón.....	22
Tabla 3 Uso de las rocas ornamentales	31

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1	Estériles tomados de la mina de carbón Los Arrayanes.	24
Ilustración 2	Tipos de granulometría y tamizaje de laboratorio	24
Ilustración 3	Resultados de pruebas de laboratorio	25
Ilustración 4	Resistencia del diseño de mezcla.....	26
Ilustración 5	Resultados del estudio de (Silva, 2017).....	28
Ilustración 6	Prospectos, manifestaciones y/o yacimientos de Carbón	39
Ilustración 7	Prospectos, manifestaciones y yacimientos de caliza en Boyacá	40
Ilustración 8	Prospectos, manifestaciones y/o yacimientos de Fosforita.....	41

Resumen

Temas relacionados con la construcción sostenible toman un alto grado de importancia, desarrollando metodologías para el aprovechamiento de residuos en la elaboración de materiales de construcción, siendo uno de los sectores que presenta niveles de crecimiento representativo por el aumento poblacional y las necesidades de infraestructura claramente identificables. El presente proyecto responde a la pregunta: ¿Cuáles residuos minerales, industriales y de siderurgia se pueden aprovechar para elaborar materiales de construcción en el departamento de Boyacá a partir del análisis de experiencias a nivel nacional e internacional?; además, aplica una metodología cualitativa de indagación documental de cobertura nacional e internacional, concretamente la aportada por centros académicos a nivel profesional, de maestría, doctorado e investigación, relacionados con el uso de residuos minerales, industriales y de siderurgia que podrían aprovecharse en la elaboración de materiales de construcción en el departamento de Boyacá, como objetivo principal planteado.

Desde el punto de vista del análisis y discusión del tema central del proyecto, se pudo establecer desde las experiencias nacionales e internacionales, que, los residuos minerales como los estériles de carbón y la ceniza volante, presentan grandes oportunidades para aumentar la consistencia y la resistencia en materiales de construcción como los de pavimentación y cemento; con relación a los residuos de minería industrial, el fosfoyeso es un residuo que favorece la dureza y calidad del cemento modificado; y en el caso de los residuos de siderurgia, se pudo establecer que ofrecen propiedades que favorecen la resistencia de hormigones. De lo anterior, se establece como principal resultado que los residuos de minería, industria y siderurgia, presentan características muy favorables para la fabricación de materiales de construcción.

Palabras Clave: Estériles de carbón, Cenizas volantes, Rocas ornamentales, Escorias, Construcción sostenible, Medio ambiente.

Abstract

Topics related to sustainable construction take a degree of importance, from the use of waste for the development of construction materials, in one of the sectors that presents representative growth levels by population increase and needs of clearly identifiable infrastructure. This project answers the question: What mineral, industrial and steel waste can be used to produce construction materials in the department of Boyacá based on the analysis of national and international experiences?; also, qualitative methodology of documentary investigation with national and international coverage is applied, specifically that provided by academic centers at the professional, master's, doctoral and research levels, to carry out a literature review of national and international experiences related to the use of mineral, industrial and steel waste that could be used in the production of construction materials in the department of Boyacá, as the main objective.

From the point of view of the analysis and discussion of the central theme of the project, it was possible to establish from national and international experiences, that of mineral residues such as sterile coal and flying ash, present great opportunities to increase consistency and strength in building materials such as paving and cement; as regards industrial mining waste, phosphogypsum is a waste that favors the hardness and quality of the modified cement and in the case of steel waste, it could be established that they offer properties that favor the resistance of concretes. The main result of the foregoing is that mineral, industrial and steel waste has very favorable characteristics for the manufacture of construction materials.

Key Words: Carbon sterile, Fly ash, Ornamental stones, Slag, Sustainable construction, Environment.

Introducción

Actualmente, el desafío de mantener el equilibrio entre el desarrollo y el cuidado del medio ambiente permite procesos como el aprovechamiento de los residuos que se generan, sin la necesidad de modificar sus métodos de producción, como en el caso del sector de la construcción. Materiales que se utilizan en la elaboración de productos para la construcción, como materias primas para fabricar bienes que permitan edificación y obra civil, como es el caso de la industria minera y de siderurgia, en sus procesos de explotación y extracción; donde generan residuos que en algunos casos contienen propiedades útiles que permiten su utilización en la fabricación de los materiales de construcción, dando así un manejo ambientalmente responsable. Algunos sufren un mínimo procesado, mientras otros, necesitan complejos procesos para la obtención del producto final usado en la construcción. Todos los procesos generan residuos que se pretende sean aprovechados con mezclas que permitan disminuir costos tanto ambientales como económicos.

Por otra parte, en el documento se evidencian los usos de los residuos identificados en el departamento de Boyacá, con la intención de dar a conocer su aprovechamiento y generar desarrollo sostenible en el sector de la construcción, el cual presenta alta demanda relacionada con el crecimiento demográfico y la búsqueda de calidad de vida de la población en general.

El documento se ha estructurado en cuatro capítulos. El primer capítulo presenta el problema de investigación, la pregunta de investigación, se justifica el proyecto, se plantean los objetivos y se realiza la descripción del tema a tratar; en el segundo capítulo, se presenta el diseño metodológico, en el que se justifica el tipo y método de investigación, se presenta la forma del tratamiento de la información y su adecuado manejo. En el tercer capítulo se desarrolla el análisis

y discusión del tema de estudio; en este, se presentan cada uno de los objetivos específicos, los resultados de la indagación documental para cada uno de los residuos identificados en los sectores de minería, industria y siderurgia para elaborar materiales de construcción, la ubicación de estos en el departamento de Boyacá y la oportunidad de investigación que este proyecto puede impulsar en la facultad de ingeniería civil de la Universidad Santo Tomás. En el capítulo cuarto se exponen las conclusiones del proyecto y las recomendaciones que se hacen para el fortalecimiento del tema de estudio. Se termina con el listado de términos utilizados en el desarrollo del proyecto y las referencias bibliográficas consultadas.

Problema de investigación

Descripción del problema

La protección del medio ambiente es un tema de gran importancia tanto en países desarrollados como en vía de desarrollo, que relacionados con el aumento poblacional, la expansión de la planeación urbana, el mantenimiento y la rehabilitación de viviendas existentes, entre otros, significan desafíos sociales y ambientales que incluyen contaminación, degradación de ecosistemas, variación de las condiciones climáticas, y por ende pobreza e inequidad (Michel, 2016), tal como el relacionado con el crecimiento urbano y del sector de la construcción.

Por su naturaleza, la construcción no ha sido amigable con el medio ambiente (Li, et al, 2010), específicamente en procesos de extracción de materias primas que causan daños a los ecosistemas, como la deforestación, la producción de polvo y ceniza, y la contaminación de cuerpos de agua por la extracción de gravilla para el concreto, entre otras afectaciones medioambientales tal como las evidencia Rocha (2011).

La industria de la construcción le aporta al medio ambiente alrededor del 40% de las emisiones que generan el efecto invernadero, un consumo alrededor del 70% de la energía

eléctrica, sin contar con la gran cantidad de eliminación de desechos y basuras (ONU, 2017), conocidos comúnmente como escombros; además, en los sistemas de extracción de minerales y de producción industrial y de siderurgia, los residuos que no son aprovechables, terminan “en las riveras de los ríos, lotes baldíos, parques, esquinas de calles en los barrios, como rellenos en los deterioros de las vías, para nivelación de lotes o en el mejor de los casos en escombreras” (Grupo ARGOS, 2020, p. 1). Esto, genera altos niveles de contaminación en los recursos naturales, problemas de salud pública y en algunos casos deslizamientos ocasionando tragedias humanas que podrían ser prevenibles.

En este sentido, normas gubernamentales de tipo nacional y local han adoptado lineamientos técnicos y ambientales para actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos en los procesos de construcción, tal como la resolución 1115 de 2012 (Secretaría Distrital del Ambiente, 2012), donde se describe la oportunidad de utilizar los residuos que se generen y la Resolución 472 de 2017 (Minambiente, 2017), que integra la reincorporación al ciclo económico del aprovechamiento de los residuos y de paso garantiza a los procesos de urbanización y construcción ser desarrollados desde el punto de vista sostenible.

Adicional a lo anterior, desde el punto de vista socioeconómico, el aumento del sector de la construcción, aunque dinamiza la ocupación laboral, las actividades económicas complementarias y la necesidad de la adquisición de bienes inmuebles para aumentar la calidad de vida de los individuos, debe garantizar estrategias para asegurar el uso de los residuos desde el punto de vista de mejoramiento del medio ambiente (Pacheco, et al, 2017) y cumplimiento de los estándares normativos vigentes para ello. Esta situación ha requerido la atención en las empresas de explotación de minerales y productoras de materiales de construcción, como se indica en Raut, et al (2011); el reciclaje de los desechos de materiales de construcción ya sea de procesos de

extracción o fabricación, se pueden convertir en una opción viable para el problema de la contaminación, tal como puede suceder con el uso de los residuos de minería, industrias y siderurgia, que por sus características se pueden utilizar en la elaboración de materiales de construcción.

Ahora bien, dado el aumento poblacional relacionado con el sector de la construcción, el uso de residuos minerales, industriales y de siderurgia, como los planteados por Van der Vorst (2003), se convierten en una oportunidad para sustentar propuestas que permitan identificar residuos que se puedan aprovechar en la elaboración de materiales de construcción. No obstante, los niveles del desarrollo de la construcción con precarios estándares de sostenibilidad ambiental, indican poca indagación de experiencias nacionales e internacionales para al aprovechamiento de los residuos generados por la minería, industria y siderurgia, como en el departamento de Boyacá, donde las industrias dedicadas a la explotación y fabricación de materiales relacionados con la construcción, generan residuos que pueden ser aprovechados; sin embargo, no existe información suficiente frente a las modalidades y materiales que surjan para su uso.

Pregunta de investigación

¿Cuáles residuos minerales, industriales y de siderurgia podrían aprovecharse en la elaboración de materiales de construcción en el departamento de Boyacá a partir de experiencias a nivel nacional e internacional?

Justificación

La grava, la piedra, la arena, el cemento, la madera y los metales son algunos de los materiales más comunes en la construcción civil. Sus residuos, además de tener una larga vida, representan aproximadamente entre el 10 y el 30 % en peso del total de desechos sólidos urbanos;

los cuales constituyen una alternativa de reutilización, y pueden llegar a ser una opción sostenible del sector de la construcción (Falcón & Sánchez, 2013).

Es imperioso destacar que, la producción sostenible y los esfuerzos del ser humano para encontrar alternativas de producción en el marco de la recolección y tratamiento de residuos provenientes de procesos productivos e industriales, han llevado al reciclaje de materiales como una perspectiva de crecimiento en sectores tan importantes como la construcción (Barra de Olivera & Vázquez, 1997). El rápido crecimiento y sostenido del sector de la construcción en Colombia como se menciona en Portafolio (2020), de acuerdo con cifras del gremio,

En 2019, se comercializaron 187891 unidades de vivienda nueva, lo que significó un crecimiento de 4,7%. A nivel de segmentos la vivienda social presentó una dinámica de crecimiento destacada con una variación anual de 9,1% llegando a un nivel de ventas de 118.988. (p. 1).

La demanda de materiales para la construcción crece y es necesario buscar alternativas sostenibles, creando valores agregados en consecuencia de los cambios sociales y segmentos de mercado encaminados al sector de la construcción. Entre los muchos residuos que actualmente se producen, se ha evidenciado a partir de diferentes estudios la reutilización de los mismos, entre los que se tienen residuos provenientes del aprovechamiento del carbón, roca fosfórica, rocas ornamentales y de industria siderúrgica; siendo importante proponer alternativas que mitiguen el aumento en la vulnerabilidad y las condiciones de riesgo ambiental (CEPAL, 2017).

El almacenamiento de residuos minerales, industriales y de siderurgia hoy en día merece especial atención desde el punto de vista medioambiental, por lo que se busca el uso alternativo de estos debido a su composición.

La generación de residuos es inevitable en todas las etapas de una construcción, desde los trabajos iniciales de acondicionamiento de suelos hasta las demoliciones; las cuales producen materiales sobrantes que deben ser gestionados de forma adecuada (Hildebrandt Group, 2016). De igual forma, residuos producidos por minería, industria y siderurgia, relacionados con el sector de la construcción, son utilizados con uso similar del cual han sido concebidos inicialmente, y resulta favorable en términos de sostenibilidad, ya que se está alargando su vida útil y reducen emisiones de afectación negativa hacia el medio ambiente (Quijano, et al, 2017).

Los desastres naturales tales como inundaciones, terremotos, incendios forestales y huracanes, producto del efecto invernadero y en aumento significativo, han llamado la atención desde el punto de vista legislativo, académico y organizacional; que para el sector de la construcción se enfoca en el uso de materiales a través de residuos de minería, industria y siderurgia, como una opción para seguir documentando experiencias que permitan sustentar con mayor certeza el beneficio en doble sentido de elementos, que, considerados como residuos pueden favorecer el medio ambiente y la sostenibilidad de uno de los sectores con mayor influencia negativa en los ecosistemas, tal como se evidencia en Espejel & Flores (2015) .

A lo largo de los últimos diez años (2010-2020) la evolución del sector de la construcción y su efecto en el medio ambiente, social y económico, han sido temas de interés en proyectos y estudios relacionados con el impacto de ecosistemas de forma negativa, algunas publicadas en repositorios de tipo académico y de investigación; sin embargo, no se conocen gran cantidad de alternativas de forma específica del uso de residuos de minería, industria y siderurgia para fabricación de materiales de construcción en el departamento de Boyacá, ya que las prácticas en el sector de la construcción y en los procesos de almacenamiento y disposición de los residuos

mencionados se mantienen, por ello muchas políticas de protección del medio ambiente no se hacen realidad.

Objetivos

Objetivo General

Identificar residuos minerales, industriales y de siderurgia para la elaboración de materiales de construcción, que, a partir de experiencias nacionales e internacionales, podrían aprovecharse en el departamento de Boyacá.

Objetivos Específicos

Reconocer que experiencias nacionales e internacionales se han desarrollado con la utilización de los residuos minerales, industriales y de siderurgia en la fabricación de materiales de construcción.

Identificar qué residuos son los que se están produciendo en el departamento de Boyacá para analizar su potencial uso en la elaboración de materiales de construcción.

Establecer las oportunidades de investigación que se puedan generar en la facultad de ingeniería civil de la Universidad Santo Tomás.

Descripción de tema

El sector de la construcción, considerado uno de los principales causantes de contaminación medioambiental de forma directa o indirecta, se ha convertido en uno de los sectores económicos más representativo a nivel mundial (Zolfagharian, et al, 2012). Con la indagación de expertos en el manejo de contaminación ambiental, se pudo establecer que factores relacionados de manera directa con el transporte de materiales, la generación de ruido en el proceso de construcción, así como la manipulación de materiales que generan polvos, son los principales contaminantes; adicional a esto, evaluaciones de impacto ambiental que han sido recomendadas

por organismos internacionales y reconocidas para la preservación de los recursos naturales y la defensa del medio ambiente, en sus procesos de toma de decisiones y tal como lo menciona Maury (2010), se fundamenta en la participación pública, de carácter preventivo para hacer los proyectos compatibles con respecto al medio natural.

El análisis del sistema que afecta la construcción incluye el manejo de los materiales directos en el proceso y las transformaciones que se involucran para su consecución, como es el caso de los que provienen de la minería, la industria y la siderurgia. En este sentido, y como lo muestra Arenas (2018), parte de los materiales utilizados en la industria de la construcción proceden de la corteza terrestre, alrededor de 450 millones de toneladas de residuos de la construcción y demolición, se generan en la Unión Europea, esto es, más de una cuarta parte del total de estos, y aumenta la necesidad de nuevos vertederos y por ende mayores procesos de extracción de materias primas.

Adicional a lo anterior, existen materiales que son producto de la extracción minera y son utilizados como materiales de construcción, que incluyen piedra (caliza, laja, mármol, etc.), arena, arcilla, tiza, y se utilizan en la producción de cemento, ladrillo, cerámica, y otros productos. En América Latina, su extracción tuvo un crecimiento relativamente fuerte (3,5%/año) en el período de 1970 a 2008 (PNUMA, 2010). El uso de minerales en la construcción aumentará consecuentemente para satisfacer las necesidades de vivienda e infraestructura y de forma paralela la contaminación producto del manejo inadecuado de los residuos generados.

Procesos de conservación del medio ambiente se realizan para permitir la gestión de los sectores económicos como los de la minería, la industria y la siderurgia con una visión racional e integradora, aportando al beneficio de sectores secundarios como el de la construcción; por lo cual, a través del aprovechamiento integral de las materias primas, el reciclado de los materiales de

desecho, la utilización eficiente de la energía, la explotación racional de los yacimientos, la planificación del abastecimiento de los minerales y el cumplimiento de la legislación ambiental, entre otros (PNUMA, 2010), hacen parte del ecosistema de desarrollo territorial.

La industria metalúrgica produce enormes cantidades de desechos sólidos que se han convertido en un problema. El principal desecho es la escoria, un material fundido que se origina durante el refinado del metal (Sánchez, 2014); además, para eliminar ese tipo de residuos se generan gastos en su transporte, transformación, almacenaje, disposición final y un alto costo ambiental a largo plazo. Por lo anterior, se buscan alternativas para su reutilización o disposición sin perjuicio al medio ambiente. Algunas empresas han tratado de buscar soluciones, específicamente en lo relacionado con el almacenaje de estos, ya que cada vez ocupan más espacio y en la mayoría de las veces lleva a disponerlos en terrenos que requieren ser modificados en su contexto natural, situación que ha llevado a tirarlos o disponerlos en lugares alejados, con claro deterioro ambiental (Arroyo, 2016).

Metodología de la investigación

De acuerdo con el planteamiento del problema y los objetivos trazados, el tipo de investigación es cualitativo, debido a que permite un análisis en profundidad del tema objeto de estudio, y se soporta en el enfoque documental, que, desde la indagación, y la aplicación teórica se basa en la evidencia, “busca encontrar las características, comportamiento y propiedades del objeto de estudio” (Ríos , 2017, p. 85).

El análisis documental y siguiendo la metodología de Barbosa, et al (2013), se desarrolla en cuatro etapas como se describen a continuación:

Rastreo e inventario de los documentos existentes y disponibles: Una vez seleccionado el tema objeto de estudio, se seleccionan las palabras clave o unidades de análisis, y se indagan en

los repositorios académicos y de investigación en el área de conocimiento de la ingeniería civil a nivel nacional e internacional.

Clasificación de los documentos identificados: El área de conocimiento relacionada con el sector de la construcción, su impacto en el medio ambiente y uso de residuos en la elaboración de materiales de construcción, se convierten en el factor de clasificación primario para la indagación documental.

Selección de los documentos más pertinentes para los propósitos de la investigación: La etapa de selección corresponde en primera instancia a documentos de proyectos de investigación, se sigue con tesis de doctorado, de maestría y de grado. Desde el punto de vista del enfoque documental, la monografía sobre el aprovechamiento de residuos minerales, industriales y de siderurgia en la elaboración de materiales de construcción a partir del estudio de experiencias nacionales e internacionales, se desarrolla con base en informes de proyectos de investigación o de tipo académico, artículos, revistas y páginas webs, recopilando la información necesaria para adquirir conocimientos y poder desarrollar el posterior análisis (Dobón, 2017); tomados de bases de datos como Science Direct, Dialnet, Redalyc, entre otras, repositorios académicos de universidades de Brasil, Perú, México, España, Costa Rica y Colombia.

Lectura en profundidad del contenido de los documentos seleccionados: Una vez seleccionados los documentos, se realiza su lectura desde el punto de vista del aporte frente al tema elegido.

Tratamiento de la información

Por ser el presente proyecto de tipo cualitativo con enfoque documental, el tratamiento de la información se desarrolla de acuerdo con el protocolo que se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1*Tratamiento de la información*

Protocolo de búsqueda de fuentes de información			
Idioma: Español – Inglés		Periodo de tiempo: 2000 – 2020	
Términos (Variables de análisis)	Individuales	Residuos minerales	
		Residuos Industriales	
		Residuos de siderurgia	
		Materiales de construcción	
	Combinación	Construcciones sostenibles	
Recursos de información	• Bases de datos (Science Direct, Science Sliever, Proquest, Dialnet, Redalyc; entre otras). • Repositorios facultades de ingeniería • Repositorios Centro de investigación. • Publicaciones Institucionales (Ministerio de Minas y Energía, Ministerio del medio ambiente, Servicio Geológico Colombiano, ANM, Secretaría de Minas de Boyacá, Gobernación de Boyacá).		
	Protocolo de revisión de fuentes de información		
	Normas de revisión	• Revisión de estudios que relacionen el uso de residuos minerales para la elaboración de materiales para la construcción. • Revisión de estudios que relacionen el uso de residuos industriales para la elaboración de materiales para la construcción. • Revisión de estudios que relacionen el uso de residuos de siderurgia como materiales de construcción • Estudios que permitan ubicar empresas que generen residuos minerales, industriales y de siderurgia, como parte de la construcción.	
		Criterios de Inclusión	• Documentos que traten el tema de estudio

Criterios de
Exclusión

- Publicaciones que traten sobre el manejo de generen residuos minerales, industriales y de siderurgia en sectores diferentes al de la construcción.
 - Publicaciones que traten sobre el uso de residuos diferentes a los del objeto del presente estudio en la construcción.
-

Nota. Construcción propia siguiendo los lineamientos de (Barbosa, Barbosa, & Rodriguez, 2013)

Análisis y Discusión

Utilización de los residuos minerales, industriales y de siderurgia en la fabricación de materiales de la construcción

En el actual contexto del desarrollo territorial y las implicaciones que se genera en el impacto ambiental, el sector de la minería, la industria y la siderurgia, viene afrontando un gran reto frente a la disposición y almacenamiento de los residuos que se generan. En el presente capítulo, se exponen publicaciones relacionadas con el uso de residuos minerales en la construcción y que se encuentran en Colombia.

Residuos de la Minería

Estériles de carbón

En el Congreso XIII CILA - Ibero Latinoamericano de Asfalto en Costa Rica en 2005 los autores Rondón & Rodríguez, (2005), presentaron los resultados de los análisis de muestra de estériles de carbón proveniente del municipio de Paz del Río (Boyacá, Colombia), recomendadas por las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías — INVIAS, para caracterización de capas de base y subbase, y determinar si estos materiales cumplen con los requisitos mínimos exigidos para conformar dichas capas.

Como resultado el estudio ha sido de carácter positivo frente a las exigencias del INVIAS para ser utilizado como material de subbases granulares para pavimentos, “reduciendo

afectaciones producidas por la disposición final de estos materiales en las escombreras, tales como alteración del paisaje, impacto visual, contaminación de acuíferos por lixiviados y aguas acidas, peligrosidad y ocupación del terreno” (p. 12).

Tabla 2

Análisis de resultados de ensayos al estéril de carbón

Ensayo	Requisitos		Resultados
	Sub-base	Base	
Porcentaje de caras fracturadas (E-227)	-	50% mín.	85,8%
Pérdida en solidez de sulfato de sodio (E-220)	12% máx.	12% máx.	10,0%
Desgaste Los Ángeles (E-218)	50% máx.	40% máx.	47,0%
Índice de alargamiento (E-230)	-	35% máx.	30,4%
Índice de aplanamiento (E-230)	-	35% máx.	34,0%
CBR (E-148)	20-40% mín.	80% mín.	34,0%
Índice plástico (E-125, 126)	≤ 6	≤ 3	N.P*
Equivalente de arena (E-133)	25% mín.	30% mín.	87,0%

*N.P: no presentó plasticidad.

Nota. Construcción propia siguiendo los lineamientos de (Rondón & Rodríguez, 2005).

El Ministerio del Medio Ambiente de España, a través del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 2011), publica la ficha técnica para el uso de los

Estériles de Carbón en la construcción y como resultado de los estudios desarrollados en este tema. Se destacan además de las propiedades físicas, químicas y mecánicas como resultado de las pruebas de laboratorio; los resultados satisfactorios de las pruebas experimentales en la aplicación de estériles de carbón, como material en los procesos de subbases granulares para todo tipo de tráfico, en terraplenes y rellenos de carreteras, y como materiales estabilizados con cemento. En la actualidad estos resultados han sido aprovechados en Alemania, Reino Unido y Francia.

Estudios desarrollados en Colombia y específicamente en el departamento de Boyacá, como parte del desarrollo de los semilleros de investigación, se encuentra el estudio de caso presentado por Vargas & Rodríguez (2012), de la Universidad Santo Tomás; en el que se tiene en cuenta el estéril de carbón. Se logró determinar que sirve en las vías como material de afirmado dado que presenta un desgaste de 41.1% y la norma para aceptación por el INVIAS acepta el material siempre y cuando tenga un desgaste menor al 45%; en cuanto a las pruebas para ser utilizado el estéril como base y sub base, en la estructura del pavimento, se determinó que el material por sí solo no es apto, en este caso a la poca cantidad de finos presentes en el material, no cumple con los ensayos correspondientes a límite líquido, plástico y equivalente de arena.

Siguiendo con lo anterior, el proyecto desarrollado por Edna Shirley Ávila Amézquita, Andrés David Soto Rubio, y Héctor M. Sánchez Abril, en el 2013, específicamente en el municipio de Samacá, permitió utilizar el estéril como porcentaje del agregado grueso y fino en mezclas de concreto hidráulico; se evaluó su resistencia a la compresión y así predecir su resistencia a flexión para ser utilizado en las losas de los pavimentos rígidos (Ávila, et al, 2013). De igual forma, se hallaron características físicas para la obtención del diseño de mezcla, “las mezclas con estéril en general cumplen con la resistencia de diseño y generan mayor economía al implementar este material” (p. 375).

En la Ilustración 1, se muestra parte de los estériles tomados de la mina de carbón Los Arrayanes para el análisis del laboratorio.

Ilustración 1

Estériles tomados de la mina de carbón Los Arrayanes.



Nota. Tomado de (Ávila, Soto, & Sánchez, 2013).

Para el desarrollo de los estudios de laboratorio, se hace el análisis de la granulometría, como se muestra en la Ilustración 2, la muestra de algunas granulometrías seleccionadas y el tamizaje realizado.

Ilustración 2

Tipos de granulometría y tamizaje de laboratorio



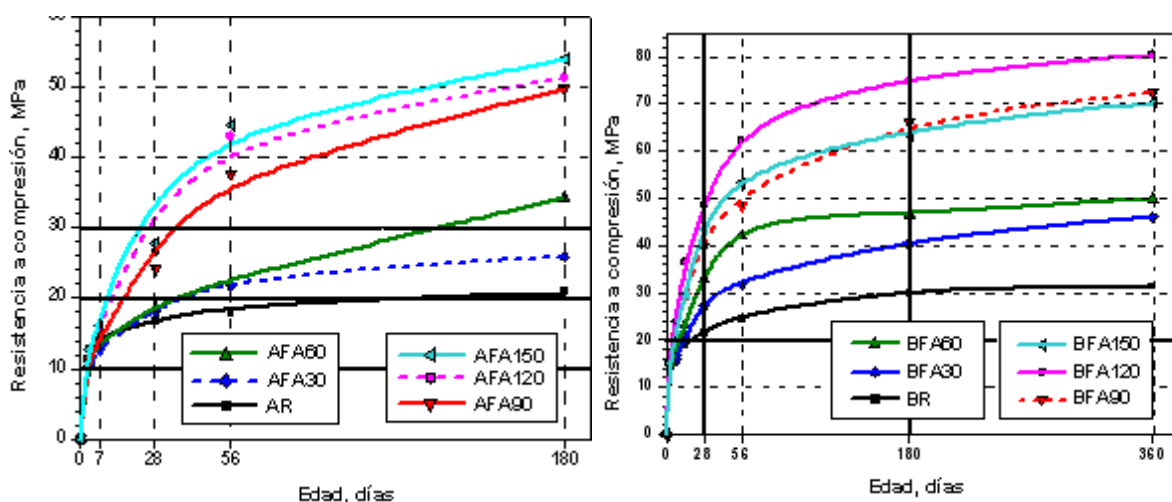
Nota. Tomado de (Ávila, Soto, & Sánchez, 2013).

Ceniza Volante

Valdez, et al, (2007), muestran los resultados obtenidos del proyecto de investigación desarrollado como un programa experimental de aplicación de ceniza volante en la fabricación de concreto, tomando la consistencia como principal factor a controlar, y aplicando la prueba de revenimiento ASTM C 143 y la mesa DIN, como principales métodos en el estudio; de esto, se pudo demostrar “incrementos significativos en la resistencia a la compresión después de los 28 días de edad” (p. 56). Para determinar la resistencia a la compresión, “se fabricaron tres especímenes cilíndricos por cada edad establecida con dimensiones nominales de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, utilizando el método ASTM C 192” (p. 53). Se logra como resultado para la serie A, la mayor resistencia a la compresión con un valor de 53.8 MPa a una edad de 180 días y con adición de 150%; por otra parte, en la serie B, se obtiene la mayor resistencia a la compresión con un valor de 80.4 MPa a una edad de 360 días y con una adición de 120%, como se muestra en la Ilustración 3.

Ilustración 3

Resultados de pruebas de laboratorio



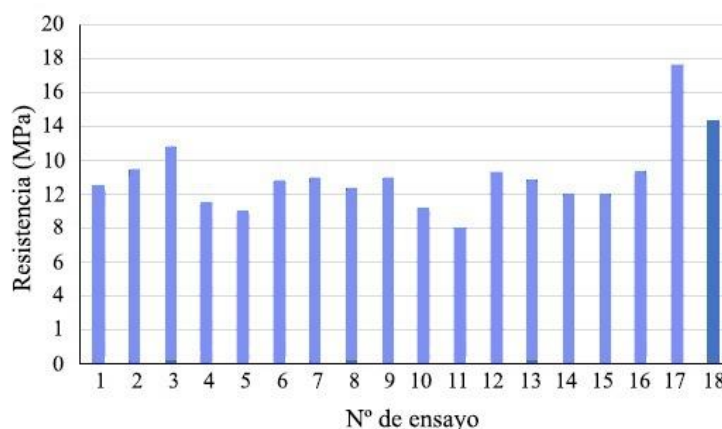
Nota. Tomado de (Valdez, Durán, Rivera, & Juárez, 2007)

En el 2008, y luego de conocer los resultados de un experimento desarrollado sin rigurosidad en la empresa Indural S.A. de la ciudad de Medellín Colombia, Cristina Lamb y Cristina Ramírez, fabricaron bloques de concreto de 15x20x40 R10 con materiales como cemento producido por la empresa, ceniza volante propia de la quema de carbón bituminoso, agregado fino de tipo común propio de demoliciones y agua. Para la mezcla en el método experimental, “la ceniza se empleó como reemplazo del cemento en un intervalo de 0 a 20%” (p. 10), se tomaron diferentes proporciones y se realizaron catorce ensayos llegando a un modelo matemático cúbico especial. Como resultados se obtienen factores de resistencia mayores a los obtenidos en las pruebas experimentales iniciales de la empresa, empleando un 15% de ceniza volante como parte de los materiales del cemento, economizando dinero en el costo de materias primas y garantizando calidad en el producto terminado (Lamb & Ramírez, 2008).

Los resultados del experimento desarrollado se muestran en la Ilustración 4, donde la muestra con el mejor resultado fue la N° 18.

Ilustración 4

Resistencia del diseño de mezcla



Nota. Tomado de (Lamb & Ramírez, 2008)

Siguiendo la línea de investigación en el tema del uso de ceniza volante como residuo mineral y su aporte en la construcción, en el proyecto denominado obtención y caracterización de geo polímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto (González, et al 2012); se pudo establecer que, una vez desarrolladas las pruebas de laboratorio en donde se adiciona el residuo mineral al concreto y luego de pasar niveles de resistencia por 7, 14 y 28 días, se observaron características cementantes de los geopolímeros que afectaron de forma considerable la resistencia del concreto.

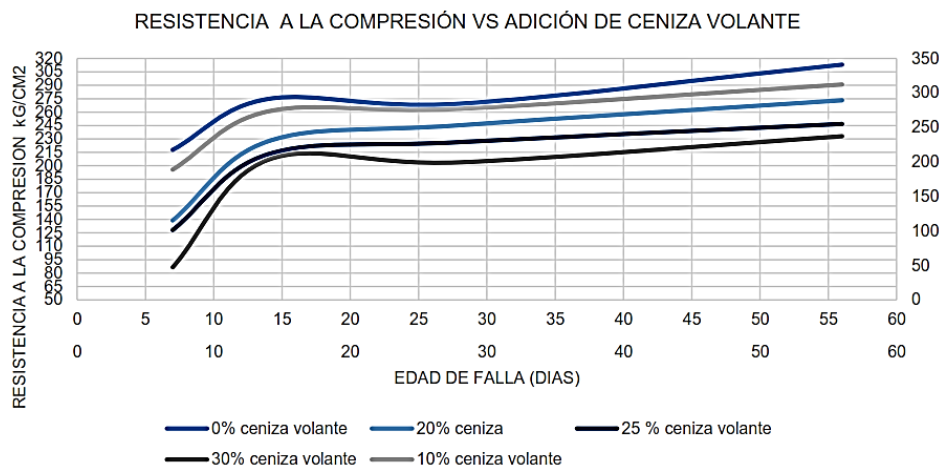
En el proyecto desarrollado por Silva (2017), se plantea investigar la influencia “de los residuos del carbón de Termotasajero en la resistencia a la compresión de mezclas de concreto, cuando se usan como reemplazo parcial del cemento Pórtland, en las mezclas de hormigón, mediante el uso de técnicas microscópicas y petrográficas” (p. 13). Realiza pruebas de ensayo como microscopía óptica y electrónica a 20 muestras de concreto con contenidos de ceniza y edades de falla de manera diferente.

Permitió identificar el contenido de agregados, el estado de la pasta de cemento, el porcentaje de vacíos, la composición mineralógica de los agregados usados en la mezcla de concreto, la presencia de cenizas e inquemados y de microgrietas en las uniones entre la pasta y el agregado (p. 115).

Como principales resultados, se obtiene que, al aumentar la ceniza volante en la mezcla de concreto se presenta una reducción de la resistencia a la compresión de las muestras analizadas, esto indica que hay una relación directa entre el porcentaje de reemplazo de cemento por ceniza volante y el incremento de microgrietas en las uniones entre la pasta y el agregado (Silva, 2017), tal como se muestra en la Ilustración 5.

Ilustración 5

Resultados del estudio de (Silva, 2017)



Nota. Tomado de (Silva, 2017)

En el año 2018, el estudio utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento, desarrollado por Huaquisto & Belizario (2018), analiza el proceso de una Central Térmica que, al generar electricidad a base de carbón, produce ceniza volante, residuo que se convierte en material contaminante del medio ambiente. Este estudio, utiliza la ceniza volante como adición al cemento para la fabricación de concreto, con el fin de no disminuir la resistencia y ayudar a mitigar el daño al medio ambiente. A los 28 días de fraguado, los resultados indican que se logra una resistencia para concreto estándar de 221 kg/cm^2 ; con una adición de 2.5% de ceniza volante su resistencia aumenta a 223 kg/cm^2 , y con el 5.0% a 231 kg/cm^2 . Cuando la adición de ceniza se aumenta al 10.0%, la resistencia baja a 200 kg/cm^2 y a 192 kg/cm^2 cuando la ceniza se adiciona al 15%. Finalmente, se concluye que la ceniza volante puede sustituir parcialmente al cemento, específicamente en un rango menor al 10%; por el contrario, un rango mayor puede disminuir la resistencia del concreto, resultando perjudicial a la hora de controles de calidad.

Una de las preocupaciones de contaminación ambiental en la industria ladrillera y de refractarios en países como Colombia, se presenta en el proceso de combustión del carbón en la fabricación de ladrillos y en la mala disposición de los residuos que se generan; por esta razón, el proyecto desarrollado por Aguilar (2019), analizó “la inclusión de ceniza de carbón (CDC) como sustituto parcial de arcilla (Ar) en la elaboración de ladrillos cerámicos” (p. 13), con el fin de reutilizar un material considerado como desecho dentro de los procesos industriales de la ladrillera Bella Vista ubicada en la ciudad de Tunja-Boyacá. Para la caracterización mineralógica de las materias primas se usa la técnica de difracción de rayos X (DRX), de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana (NTC) 296, en la que se lleva a cabo un proceso de cocción (950°C). Como resultado de la caracterización mineralógica, se obtiene que los materiales pueden ser empleados en la fabricación de ladrillos, dónde la adición de CDC se utiliza como material fundente, ayudando a reducir la temperatura de cocción y a minimizar la cantidad de arcilla a utilizar. Esta investigación demuestra el aprovechamiento de la ceniza de carbón, en el proceso de cocción de mampostería no estructural de la ladrillera, cumpliendo con los estándares de calidad exigidos.

Rocas ornamentales

El proyecto Unidades Geológicas con Potencial para Rocas Ornamentales en los Departamentos de Boyacá, Cundinamarca y sur de Santander, desarrollado por Becerra, Montaña, & Escobar, en el año 2011 y patrocinado por el Servicio Geológico Colombiano; dan cuenta de la ubicación de Rocas Ornamentales en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Santander, haciendo referencia al inventario de uso de materiales pétreos en la arquitectura contemporánea y el patrimonio histórico. Así mismo, enfatiza en aspectos relacionados con la textura, la mineralogía y la estructura de las rocas.

La evaluación geológica se acompaña de muestreo sistemático de rocas para análisis petrográfico, químico, mineralógico e industrial, entendiéndose este como la aptitud de la roca para ser utilizada como material ornamental y de revestimiento, tanto como material para obras civiles como para trabajos de restauración patrimonial (p. 12).

Siguiendo los lineamientos de (CEDEX, 2015), en el tratamiento, corte y pulido de la piedra ornamental, se producen principalmente residuos de lodos que, dependiendo de su naturaleza, ya sea de mármol, granito o pizarra, presenta características estables. Los estudios desarrollados y que dan como resultado la ficha técnica para el uso de residuos de rocas ornamentales en la construcción en España, muestran los resultados de las pruebas de laboratorio para el análisis de las propiedades físicas y químicas. Desde el punto de vista técnico, y según las materias primas, el reciclado de los residuos es viable y presenta un amplio rango de potencialidades en la producción de cemento y hormigón, la industria cerámica y de productos prefabricados de hormigón y en la fabricación de piedra artificial para su uso en jardineras especialmente. Además, se incluye el uso de estos residuos en la fabricación de productos relacionados con los sectores del plástico, la pintura y el papel; sin embargo, el sector de la construcción se visualiza como el sector potencial para un mayor consumo de estos residuos.

Teniendo en cuenta lo mencionado por Becerra y Pulido, (2019), en la industria de rocas ornamentales, la roca natural se emplea tanto en obras de restauración y remodelación de edificios patrimoniales, como en construcciones modernas para exteriores e interiores. Del mismo modo, se usan en ornamentación, siendo combinadas con materiales como el vidrio y el aluminio. Las rocas naturales se caracterizan por su belleza, la valorización de las construcciones donde se utilizan y su alta durabilidad, en comparación con otros materiales. “Las rocas ornamentales se emplean generalmente para decorar interiores y exteriores, y su uso es tanto industrial como residencial”

(Becerra & Pulido, 2019, p. 97). De acuerdo con lo anterior, los siguientes son algunos de los usos que tienen las rocas ornamentales para la construcción:

Tabla 3

Uso de las rocas ornamentales

Tipo	Uso de las rocas ornamentales
Recubrimiento de fachadas o exteriores	Proporciona elegancia a la edificación en general y, a la vez, protege los elementos estructurales de las construcciones.
Recubrimiento de techos	El material más usado en esta parte de las construcciones, generalmente residenciales, son las pizarras (denominadas de manera coloquial pizarras de techar), que son dispuestas a manera de tejas.
Recubrimiento de interiores	Tiene aplicación en los interiores de los grandes edificios, bancos, palacios, oficinas, centros comerciales, centros religiosos, hoteles y grandes residencias.
Recubrimiento de pisos	En los grandes centros comerciales es común utilizar placas de granitos por su resistencia al tráfico intenso. En casas, algunos edificios, oficinas y locales se emplean baldosas de mármol; aquí se pueden incluir los peldaños de escaleras y pasamanos, que también usan granitos y mármoles.
Usos domésticos	Se utilizan cada vez más en las residencias, sobre todo como mesones de cocina, comedores, mesas de centro, lavamanos y otros.
Muros y cercas de roca	En este tipo de uso se aprovechan grandes bloques, cantos y guijos de piedra natural, al igual que algunos desechos de la misma industria de piedras ornamentales que se emplean para construir barreras, muros, cercas delimitantes de terrenos, terraplenes y pedraplenes.

Nota. Elaboración propia con información de (Becerra & Pulido, 2019)

Como complemento a lo anterior, Becerra (2011), enfatiza en la carencia de laboratorios especializados en Colombia para la ejecución e interpretación de resultados de ensayos de materiales rocosos y agregados pétreos, y atender así mismo las necesidades de la industria de la construcción.

Castillo (2015), en el proyecto denominado “Evaluación de la arcilla calcinada de Pontezuela como aditivo extendedor en lechadas de cemento portland”, desarrolla ensayos de fluido libre y reología, para lechadas con arcillas calcinadas y lechadas con zeolita, con sustituciones de 5,10, 20 y 30%, de cemento portland; adicional, calcula su resistencia mecánica. Así mismo, Castillo pudo determinar que, al aumentar el porcentaje de sustitución de cemento por arcilla, se presenta “disminución de fluido libre, un aumento del punto de cedencia y viscosidad plástica, así como de la resistencia mecánica” (p. 4). Al mantener de forma paralela la sustitución de arcilla por cemento, se pudo establecer que los niveles de fluido libre y viscosidad plástica se reducían; mientras que, el punto de cedencia y resistencia de gel aumentaron. Analizando los valores obtenidos de resistencia mecánica, se concluye que el valor más bajo se obtiene con un 10% de sustitución de cemento por arcilla calcinada de Pontezuela; para un 5 y 20%, los valores de resistencia mecánica son similares, obteniéndose el mayor valor con un grado de sustitución de un 30% de arcilla calcinada de Pontezuela.

En el 2015, Savazzini dos Reis, Della, & Valenzuela, publicaron los resultados del estudio donde plantean la adición de residuos de piedra dimensional a la masa arcillosa, para que el sector de la piedra dimensional sea más sostenible y así, minimizar el impacto generado en el medio ambiente por la eliminación inadecuada de sus residuos; y del mismo modo, reducir el consumo del material arcilloso como materia prima. El objetivo de esta investigación fue estudiar la viabilidad técnica de la adición de dicho residuo a la masa arcillosa utilizada en la producción de

tejas, analizando muestras de desecho y arcillas para caracterizarlas física, química, mineralógica y micro estructuralmente. El estudio contempló el procedimiento industrial para la fabricación de tejas, ensayos de granulometría, de fluorescencia de rayos X (XRF), de difracción de rayos X (XRD), de microscopía electrónica de barrido (SEM), de análisis de tamaño de partícula por difracción laser y de plasticidad utilizando los límites de consistencia de Atterberg. En los resultados de esta investigación se determina que las muestras con desechos en un porcentaje de hasta el 60%, se pueden usar en la producción de cuerpos cerámicos. Las muestras con más del 60% de desechos, no pudieron llenar los intersticios restantes entre los granos de arcilla para densificar el cuerpo cerámico, debido a que los dos materiales tienen un tamaño similar; además, del exceso de sílice por el aumento de desechos, el cual genera fracturas y disminuye su resistencia a la flexión.

Residuos industriales

Fosfoyeso

Según (Tayibi, et al., 2011) el material fosfoyeso contiene mayor concentración de radiactividad que los materiales utilizados en la construcción, tales como hormigón, ladrillos, piedras, entre otros (citado en Kovler, K, 2007). Este estudio toma en cuenta una serie de estudios en los cuales la mayoría revela que el fosfoyeso se usa en la obtención de cementos, paneles para paramentos y otros materiales de construcción en Europa, Japón y Australia; mientras que, en Estados Unidos se prohibió su uso desde 1992. Además, el fosfoyeso, presenta contenido de impurezas que influyen significativamente en la dureza y calidad del producto final; y, emana Radón generado en la desintegración del Radio. Motivo por el cual, este trabajo estudia la posibilidad de incorporar el fosfoyeso en una matriz formada con azufre y un polímero de azufre, con el objetivo de obtener un nuevo material (cemento modificado) para su uso en ingeniería civil,

teniendo en cuenta la legislación y normativa vigentes. Concluye que el cemento modificado elaborado presenta menor nivel de concentración de radionucleidos naturales que el fosfoyeso original, debido al efecto de dilución con otros materiales.

En el año 2013, Rus & Andara, publicaron en el artículo “La investigación aplicada como medio para promover relaciones con la industria. Caso fosfoyeso – logros y desafíos” el proyecto de investigación y desarrollo realizado por Tripoliven (empresa productora de sodio a partir de roca fosfórica y ácido sulfúrico) de Venezuela y el Instituto de Ingeniería en el año 2001. Plantearon como objetivo elaborar un proceso de adecuación de planta y fabricar un material de uso en la industria del cemento y de la construcción; dicho proceso, se desarrolló de manera físico-química teniendo en cuenta las características del proceso de planta y así reprocesar su mismo desecho. Como conclusión, se logró un proceso de bajo costo y de diferentes propuestas tecnológicas ya existentes, conllevando a la obtención de una patente norteamericana en el año 2009.

El estudio desarrollado por Savazzini dos Reis, Della, & Valenzuela, en el año 2014, propone la aplicación del fosfoyeso como un modificador del betún para pavimentos de carreteras flexibles; siendo una manera de obtener un aglutinante bituminoso que mejora el rendimiento a alta temperatura en comparación con el betún original ya que aumenta su rigidez. Para el desarrollo de esta investigación se realizaron pruebas de flujos viscoso a 60°C y barridos dinámicos de temperatura de corte en diferentes muestras bituminosas modificadas con fosfoyeso; así mismo, se realizaron pruebas simultáneas de DTA/TG (permite determinar simultáneamente la pérdida de masa y los eventos térmicos en un sistema abierto) y DSC modulada (Calorimetría diferencial de barrido modulada), y escaneos FTIR (espectroscopia infrarroja por transformada Fourier). De esta investigación se concluye, que al usarse una pequeña parte de ácido sulfúrico (0.5% en peso), la

adición de 10% del peso de fosfoyeso genera una mejora notable en la respuesta reológica del material resultante a altas temperaturas. Por lo tanto, el fósforo (contenido en el fosfoyeso) indica ser la sustancia “modificadora” a la que se le atribuye el aumento de viscosidad observado a 60°C.

La investigación de Lin Yang, Yunsheng Zhang y Yun Yan publicado en el año 2016, presenta la posibilidad de reciclar el fosfoyeso original como materia prima para la fabricación de morteros autonivelantes; dado que, no solo actúa como relleno, sino que también participa en la hidratación de los cementos y reduce el costo del mortero autonivelante convencional. La investigación, se desarrolló con pruebas para determinar la fluidez, la contracción, la resistencia al desgaste y la resistencia de la unión del mortero autonivelante; al igual que, pruebas de resistencia a la flexión y resistencia a la compresión. Se concluye que, se puede utilizar el fosfoyeso como materia prima para la preparación de morteros autonivelantes, incluso cuando el contenido de fosfoyeso alcanza el 55%; además, se logró determinar que dicho mortero es de menor costo que el mortero tradicional a base de cemento.

Residuos de siderurgia

Escorias de acería

En el año 2001, Vázquez & Barra, desarrollan un proyecto en el que indican que la escoria de acero de horno de arco eléctrico presenta propiedades adecuadas para usarse como árido; contiene MgO siendo el principal causante de expansiones que afectan, en función de la rigidez del sistema en que están integradas. Además, se identifica hidraulicidad, la cual se traduce en la “formación de CSH, un silicio aluminato cálcico y materia amorfa que actúa como aglomerante débil, aumentando así la resistencia de hormigones que las contienen” (p. 137).

En Colombia en el año 2003, se presenta el proyecto denominado efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares, desarrollado por Reyes & Camacho (2003);

quienes estudiaron opciones de mejoramiento de las propiedades de bases y subbases granulares determinadas por el INVIAS, llegando a la conclusión que los residuos generados en el alto horno de la empresa Siderúrgia de Boyacá, incrementaron la densidad seca y la resistencia de las bases y subbases granulares. Adicionalmente, en los ensayos realizados en los laboratorios de la Universidad Militar, se pudo establecer que al cambiar materiales con diferentes tamaños (tamices de 10, 40, 200 y fondo), se presentó incremento de la densidad y resistencia, mediante el análisis de ensayos en laboratorio de Proctor y C.B.R.

En el año 2010, y como proyecto de grado, Parra & Sánchez, (2010), desarrollaron en la empresa siderúrgica DIACO del municipio de Tuta en Boyacá, el proyecto que permitió obtener resultados positivos con base en las características físicas y mecánicas de dos tipos de escoria, para ser usados como agregado grueso en la mezcla de concreto; teniendo en cuenta que, sus límites de gradación dados por la NTC 174 para la escoria gruesa, se asemeja a la granulometría ideal otorgando una mejoría en las cualidades del concreto que la escoria fina. En cuanto al peso específico de la escoria fina se limita su uso, ya que, se incrementa de forma significativa la densidad del concreto, característica que lo convierte en un material no recomendable para su uso en estructuras de gran altura. En cuanto al desgaste de la escoria gruesa, se obtiene un valor del 16%, siendo bajo en comparación con los del agregado grueso convencional, que se encuentran entre el 30 y 50%, convirtiéndolo en un material altamente recomendable para ser usado en obras con altos niveles de resistencia a la abrasión (pisos, vías, andenes y estructuras que se encuentren expuestas a condiciones de erosión climática).

En la industria metalúrgica se han identificado cantidades de desechos sólidos que generan grandes problemas de contaminación, especialmente en las regiones en las que se produce, (INME, 2012); uno de los principales desechos es la “escoria, un material fundido que se origina durante

el refinado del metal” (p. 46). El grupo de investigación INME, desarrolló el proyecto titulado “Escoria para agregados de concreto, una solución sólida”, desarrollado en dos etapas. La primera llevó a la caracterización del material, esto permitió dosificar la materia prima o la mezcla y determinar las proporciones a utilizar en los componentes o agregados; además, permitió caracterizar el concreto obtenido desde varias perspectivas. En la segunda etapa, se logran propuestas específicas de elementos para construcción (adoquines, tabletas, ladrillos) (INME, 2012); como principales resultados se obtuvo “la caracterización de las propiedades físico-mecánicas del concreto fabricado con escoria de horno de cubilote (EHC), que se utilizó para reemplazar al agregado fino (arena) de la mezcla en diferentes proporciones: 0, 10 %, 15 % y 20 %” (p. 48). Esto ha permitido ensayos y pruebas de tipo específico como “resistencia a la compresión, módulo de rotura, absorción, módulo de elasticidad y densidad de material endurecido para diferentes resistencias de diseño” (p. 48), a una resistencia de 14 MPa del concreto modificado con escoria. Asimismo, pruebas para lograr un concreto de tipo liviano requiere dosificaciones de manera proporcional, tal como sucede para un concreto que se comporte acústicamente, y de tipo estructural.

En el año 2014, en el marco del V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, desarrollado en la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, se presentó el proyecto “Estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos”, desarrollado por (Sánchez, 2014). El cual hace referencia a tres alternativas viables para el uso de estos residuos, en la industria cementera (aporte de hierro en la fabricación del clinker), en capas de rodadura (la escoria hace parte del ligamiento bituminoso de las capas asfálticas de las carreteras) y en la utilización como terraplenes, bases y subbases de carreteras (este uso corresponde al relleno de terrenos y restauración de espacios degradados).

El proyecto de tesis desarrollado por Pérez (2019), busca analizar la viabilidad técnica para reemplazar el cemento con residuo de siderurgia como la escoria, para la producción de hormigón y de lechada cementosa. Existen factores que se involucra, tales como las propiedades de tipo mecánico y de durabilidad del producto resultante, en correlación con las características de la escoria utilizada y su proporción. Luego de los diferentes ensayos realizados con tres tipos de muestra de escoria, se concluye que, las escorias producto del alto horno (GGBFS), son convenientes y recomendables para fabricar una lechada sostenible; y como sustituto del cemento, dado que, se pudo comprobar mejoras considerables en sus características. En relación con los otros dos tipos de mezclas con escorias de arco eléctrico, LFS1 y LFS2, se concluye que, su uso se da para lechadas con exigencias mecánicas menores, como las usadas en albañilería; para aplicaciones no estructurales evitaría el consumo de materia prima (Pérez, 2019).

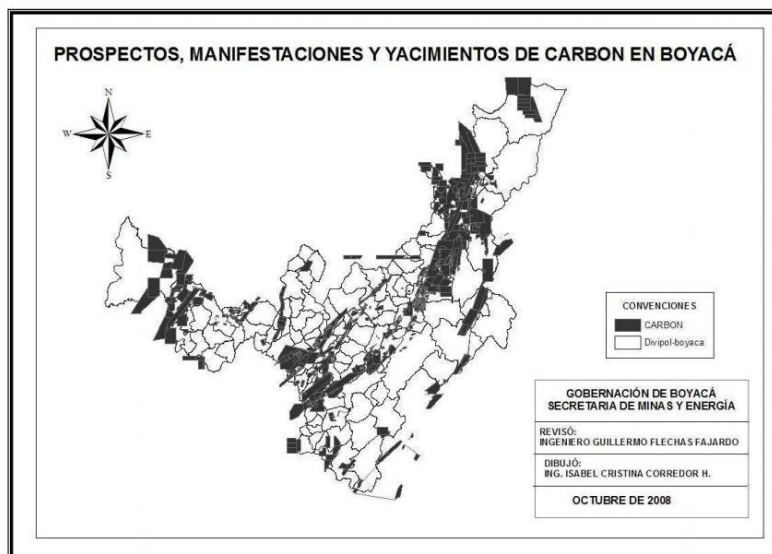
Residuos que se están produciendo en el departamento de Boyacá para ver su potencial uso en la elaboración de materiales de construcción.

Residuos minerales

Según Higuera (2015) “el departamento de Boyacá es el cuarto productor de carbón en Colombia, pero la informalidad de su actividad minera no le ha permitido desarrollar todo su potencial” (p. 1); situación que se ha caracterizado por ser una economía de carácter informal, dado que el 50% de las Unidades de Producción Minera se caracteriza por ser de menor escala. Por las condiciones geológicas del departamento, la minería de carbón es de carácter subterráneo, los procesos de excavación, extracción y disposición generan afectaciones al medio ambiente (Rocha L. , 2018), y más aún, por el alto nivel de expansión en el departamento, tal como se evidencia en la Ilustración 6.

Ilustración 6

Prospectos, manifestaciones y/o yacimientos de Carbón



Nota. Tomado de (UPTC - Secretaría de Minas de Boyacá, 2013, p. 8)

La producción de estériles en la minería del carbón es realmente muy alta y contamina de manera significativa los suelos, el agua y el medio ambiente en general. Se calcula que la producción de este material equivale a más de treinta por ciento del material del carbón explotado y que va a parar a la vera del camino (Perico, 2012).

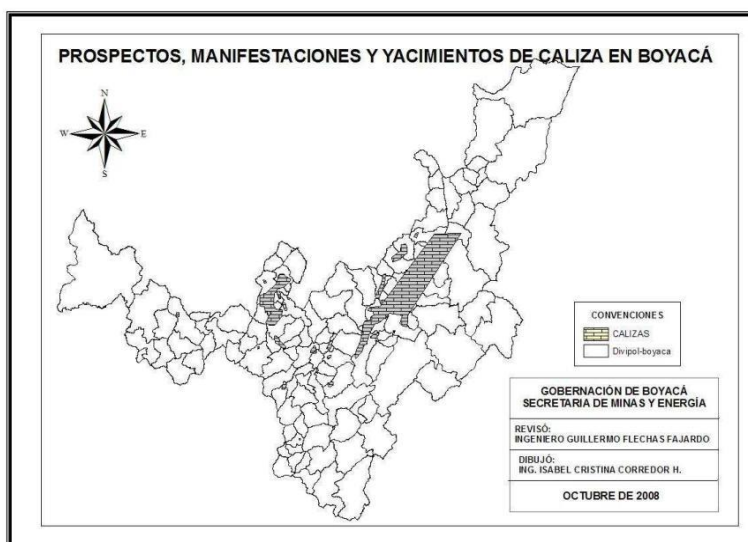
En cuanto a las opciones que se presentan para un desarrollo sostenible en el sector de la construcción, con el uso de los residuos en este caso los generados en la minería de carbón, el departamento de Boyacá presenta condiciones con iniciativas que pueden ser contempladas desde la economía circular para el sector minero de carbón.

La explotación de piedra caliza en Colombia se caracteriza por estar a cargo de empresas dedicadas a la fabricación de cemento y sus derivados, representando cerca del 98% en el país. El 2% restante se emplea como material fundente en la industria siderúrgica, fabricación de cal y como roca ornamental en la industria de la construcción, tal como se muestra en (ANM, 2017). En

el departamento de Boyacá, la mayor presencia de los yacimientos de piedra caliza se encuentra ubicados en la zona central (UPTC - Secretaría de Minas de Boyacá, 2013) como se muestra en la Ilustración 7. Se “caracteriza por su contenido de un mínimo de 50% de carbonato de calcio (CaCO_3) en su composición. Los componentes menores incluyen arcilla, hierro, feldespato y cuarzo” (p. 10).

Ilustración 7

Prospectos, manifestaciones y yacimientos de caliza en Boyacá



Nota. Tomado de (UPTC - Secretaría de Minas de Boyacá, 2013, p. 10)

Adicional a lo anterior y como base para nuevas investigaciones, Becerra, et al (2011), en el proyecto Unidades Geológicas con Potencial para Rocas Ornamentales en los Departamentos de Boyacá, Cundinamarca y sur de Santander, dan a conocer el potencial que presenta el país en la producción de rocas ornamentales en virtud de su complejidad geológica. Se hace un recorrido general por los Departamentos de Boyacá y Cundinamarca y la zona limítrofe con Boyacá del Departamento de Santander.

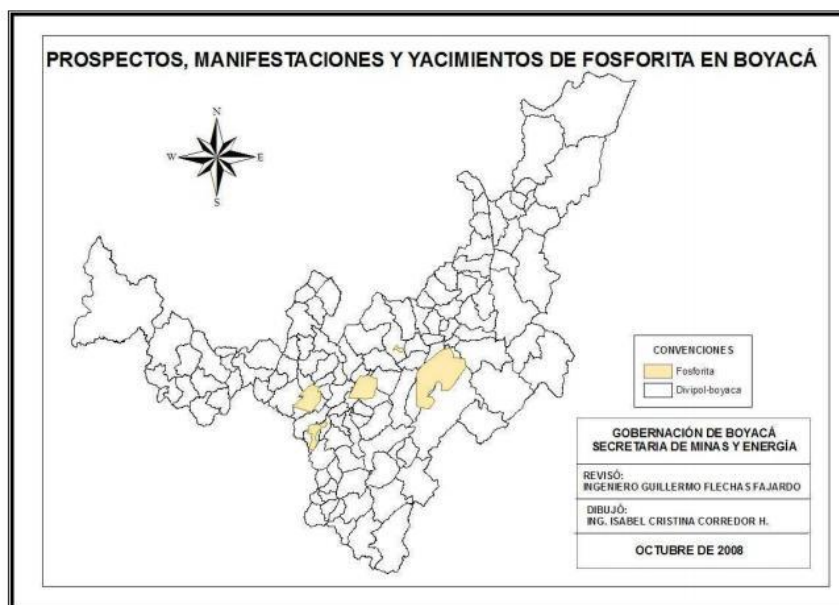
Residuos industriales

Los trabajos de reconocimiento geológico, desarrollados por (Becerra, 2010), muestran de forma detallada el “reconocimiento geológico, muestreo y levantamiento de columnas estratigráficas en unidades de roca potencialmente productoras de fosfatos, realizados en el Departamento de Boyacá” (p. 16); permitiendo establecer el potencial de Roca Fosfórica y por ende de sus residuos en el Departamento de Boyacá, como unidades productoras y satisfacer las demandas en sectores de la agricultura y de paso para posibles proyectos relacionados con la construcción.

Siguiendo la línea de ubicación de residuos industriales para la elaboración de materiales para la construcción en Boyacá, el proyecto (UPTC - Secretaría de Minas de Boyacá, 2013), muestra en la Ilustración 8 los prospectos, manifestaciones y/o yacimientos de Fosforita.

Ilustración 8

Prospectos, manifestaciones y/o yacimientos de Fosforita



Nota. Tomado de (UPTC - Secretaría de Minas de Boyacá, 2013, p. 11).

Como empresa representativa en el departamento de Boyacá, se encuentra la empresa de Fosfatos de Boyacá S.A., la cual tiene como domicilio principal de su actividad la dirección, vía Sogamoso km 2 en el municipio de Pesca, Boyacá. Constituida como Sociedad Anónima, que se dedica a la fabricación de abonos y compuestos inorgánicos nitrogenados (FOSFATOS DE BOYACÁ, 2018); explota la roca fosfórica y se aplica en la agricultura. El fósforo es un elemento nutritivo esencial para las plantas y su deficiencia reduce severamente los rendimientos de los cultivos (FAO, 2007); y como parte de los procesos de explotación, se identifican residuos que pueden utilizarse de acuerdo con la información de análisis del presente proyecto.

Residuos de Siderurgia

Boyacá es un departamento que por sus condiciones de tipo geológica lo ubican como uno de mayor fortaleza para el desarrollo de capacidades de tipo siderúrgico y de paso como el segundo departamento más contaminado del país; en este sentido, y para identificar oportunidades en el uso de residuos de siderurgia en el sector de la construcción, (Sánchez, 2014), identifica claramente cómo la producción de escorias en Colombia y en el departamento de Boyacá es importante. Empresas como PAZ DEL RÍO, DIACO y SIDENAL, todas ubicadas en Boyacá, en el año 2012, tuvieron niveles de producción de acero entre 350.000; 480.000 y 190.000 toneladas respectivamente, por lo cual se hace necesario proponer acciones para un uso adecuado y sostenible a la industria y los residuos que se generan con posibilidades de aprovechamiento en el sector de la construcción.

De acuerdo con la indagación realizada, se pudo establecer que en Boyacá se identificaron 205 empresas que tienen alguna relación con el sector siderúrgico y por ende con los residuos que se generan, las cuales están ubicadas en 26 municipios de la zona central del departamento (El Economista, 2020).

De acuerdo con el análisis realizado en el grupo de investigación Poder y como parte del macroproyecto titulado “Empresariado y dinámicas de la cadena productiva siderúrgica en el corredor industrial de Boyacá” (Grupo de Investigación Poder, 2019), se pudo establecer que el sector siderúrgico en Boyacá es competitivo y que tiene todas las opciones para seguir creciendo; que, aunque cuenta con recursos minerales, recurso de conocimiento, recurso de mano de obra e infraestructura, aún se hace necesario procesos de reconversión tecnológica para un mejor aprovechamiento de los procesos y de paso para el uso adecuado de sus residuos, qué, cómo se ha podido establecer tiene grandes bondades en su uso como material de construcción.

Como empresas representativas en Boyacá para el sector de la siderurgia se encuentra DIACO S.A., la cual es una compañía industrial colombiana, dedicada a la producción de aceros bajo las normas internacionales de calidad establecidas por la ISO 9001:2000. Es una siderúrgica semi-integrada, es decir, “que su materia prima base para la producción de acero es la chatarra de hierro y acero reciclable” (p. 26). Esta característica influye significativamente, ya que la empresa realiza estrategias para comprometerse con el medio ambiente, tanto es la recolección de las materias primas, como en el proceso productivo; de igual manera, se involucra indirectamente al apoyar a las personas que se dedican a la recolección de material reciclable (Parra Araque & Sánchez García, 2010).

DIACO S.A. se origina con la integración de algunas empresas del sector siderúrgico de Colombia, producto del empuje y empeño de diversas culturas como la Vallecaucana, Boyacense, Bogotana, Antioqueña y Costeña, entre otras. Es así como; entre los años 1997 y 2001 las siderúrgicas del Muña, Boyacá, Caribe, Medellín, Armaduras Heliacero, y la Distribuidora de Aceros Colombianos, se unieron para conformar la compañía “Grupo Siderúrgico Diaco S.A.”.

Cabe resaltar que la planta de Diaco-Tuta se encuentra ubicada en el departamento de Boyacá, en el km 27 vía Tunja-Paipa (Parra Araque & Sánchez García, 2010).

Acerías Paz del Río, es una planta industrial ubicada en la Hacienda Belencito, siendo el frente de trabajo más grande, donde laboran cerca de 1.800 personas. Creada en 1948, por el gobierno colombiano, con el nombre de “Empresa Siderúrgica Nacional de Paz de Río”; en los años 60, Acerías Paz del Río se convierte en la única siderúrgica integrada del país y siendo la responsable de más del 30% de la producción nacional de acero (Paz del Rio Votorantim, 2014). Para el año 2010, Acerías Paz del Río entró a formar parte de la unidad Votorantim Siderurgia, siendo accionista en un 52.1%; y de esta manera cambia su imagen corporativa fusionando el logo (Paz del Rio Votorantim, 2014).

Por último y como tercera empresa siderúrgica nacional, está SIDENAL S.A., dedicada a la elaboración de productos de acero con características de resistencia a sismos para el sector de la construcción y la industria metalmecánica. Cuenta con dos plantas, una ubicada en la ciudad de Sogamoso, en el departamento de Boyacá, y otra en el municipio de Tocancipá, en el departamento de Cundinamarca. SIDENAL S.A., fue fundada en 1981 y tiene su sede en Bogotá, Colombia.

Oportunidades de investigación que se puedan generar en la facultad de ingeniería civil.

Desde el punto de vista documental, el proyecto realizado hace una aproximación para proponer alternativas efectivas con respecto al control de la contaminación del medio ambiente, y nuevas opciones que logren un mejoramiento del sector de la construcción con el uso de residuos para la elaboración de materiales ambientalmente amigables.

Como se muestra en Universidad Santo Tomás (2017), la facultad de Ingeniería Civil sustenta el desarrollo de la investigación en cada uno de los grupos integrados por estudiantes,

tanto de pregrado como posgrado, y docentes, desarrollando una cultura de generación de conocimiento hacia el beneficio de la sociedad.

Por lo anterior, la indagación documental desarrollada en el presente proyecto ha permitido identificar las siguientes oportunidades de investigación para la facultad de Ingeniería Civil.

- Caracterización fisicoquímica de residuos minerales, industriales y de siderurgia del Departamento de Boyacá, y su uso en la elaboración de materiales de construcción.
- Diseño de sistema de fabricación de materiales de construcción en Boyacá, a base de residuos minerales, industriales y de siderurgia.
- Impacto medio ambiental de la utilización de residuos minerales, industriales y de siderurgia, como parte de la fabricación de materiales de la construcción en el departamento de Boyacá. Una aproximación de gestión empresarial.
- Evaluación socioeconómica en la fabricación de materiales de construcción a base de residuos minerales, industriales y de siderurgia en el departamento de Boyacá. Estudio de caso proyecto de construcción.
- Sistemas de gestión medioambiental en el departamento de Boyacá, por disposición y uso de residuos minerales, industriales y de siderurgia en la fabricación de materiales de la construcción.
- Propuesta de políticas públicas de protección del medio ambiente desde los sectores de la minería, la industria, la siderurgia y la construcción hacia el uso de residuos en la fabricación de materiales de la construcción.

De lo anterior, se pueden establecer grandes oportunidades de proyectos de investigación relacionados con el tema objeto de estudio, ya que, la facultad de Ingeniería Civil, cuenta con

grupos de estudiantes y docentes a nivel de pregrado y posgrado; que en alianza con otras facultades, puede ampliar las áreas de cobertura del conocimiento relacionado con el uso de residuos de minería, industria y siderurgia como parte de la fabricación de materiales de la construcción en el Departamento de Boyacá.

Conclusiones

Los residuos de la minería, la industria y la siderurgia, han sido estudiados desde hace más de veinte años, especialmente en países europeos; lo que refleja la gran preocupación por atender las inquietudes presentes en el impacto al medio ambiente.

En Latinoamérica, en países como Brasil, Perú, Venezuela y Colombia de gran tradición minera, industrial y siderurgia, se presentan estudios relacionados con el análisis de sus residuos y su incidencia en el sector de la construcción desde inicio del presente siglo.

Como principales instituciones patrocinadoras de estudios relacionados con el manejo de los residuos mineros, industriales y de siderurgia en el sector de la construcción están las Universidades y sus grupos y semilleros de investigación, desde el punto de vista institucional se destacan los Ministerios de Medio Ambiente y sus entes relacionados, para el caso colombiano se destaca, la Agencia Nacional Minera, Secretarías de Minas y Energía, Servicio Geológico Colombiano, entre otros.

Los residuos generados en el sector de la minería como los estériles, son empleados principalmente como material de subbases; también como material de afirmado y como sustituto en la elaboración de mezclas de concreto hidráulico. Por otra parte, la ceniza volante se utiliza como sustituto parcial del cemento en la mezcla de concreto, y a su vez, como sustituto de la arcilla para ladrillos cerámicos.

Las rocas ornamentales son utilizadas como material ornamental y de revestimiento, con uso tanto industrial como residencial. En cuanto a los residuos de las rocas ornamentales, su uso se basa en la producción de tejas y como material aditivo extendedor para lechadas de cemento portland.

Con relación a los residuos industriales como el fosfoyeso, las experiencias presentadas concuerdan en una gran oportunidad, para dar un buen uso a estos residuos y un beneficio al medio ambiente con el aporte al sector de la construcción, específicamente con un cemento modificado con menor nivel de concentración de radionucleidos naturales que el fosfoyeso original.

Los residuos como la escoria generada en la industria siderurgia, ha sido tratada en investigaciones que han permitido a través de ensayos y pruebas de laboratorio, demostrar el incremento de la densidad y resistencia cuando se utiliza en materiales de construcción específicamente para pavimentación.

El departamento de Boyacá ha sido catalogado como uno de los departamentos más contaminados del país, específicamente por las prácticas inadecuadas que se aplican en el manejo de los residuos generados en sectores como la minería, la industria y la siderurgia; por lo tanto, el sector de la construcción plantea oportunidades para el uso de los residuos mencionados como alternativas de mejoramiento para la elaboración de materiales, ya sea para edificaciones o pavimentos.

Desde el punto de vista del acceso documental, el proyecto realizado, hace una aproximación para el desarrollo de proyectos relacionados con experimentación directa, que permitan proponer alternativas efectivas para el control de la contaminación del medio ambiente y nuevas opciones para el mejoramiento del sector de la construcción con el uso de residuos para la elaboración de materiales ambientalmente amigables.

Por parte de las autoras del proyecto, el conocimiento adquirido en el manejo del tema, permite ser parte activa de equipos de investigación como investigadores activos de proyectos.

Glosario de términos

Carbón: Es una roca sedimentaria utilizada como combustible fósil, de color negro y muy rico en carbono (Energía y minería, 2017. p. 1). Es el resultado final de una serie de transformaciones sobre restos vegetales acumulados en lugares pantanosos. Se trata de un producto fosilizado de la descomposición de los bosques tropicales que crecieron en condiciones pantanosas (Ambientum, 2019, p. 1).

Ceniza Volante: son residuos de carbón bituminoso ardiendo y son lo suficientemente finos para ser llevados por el gas que sale del horno. Debido a que las cenizas volantes se originan de la combustión del carbón, las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las cenizas volantes dependen directamente del tipo de carbón del cual provienen y de la calidad del proceso de su proceso de combustión (Roa, 2016).

Escorias: las escorias son subproductos de industrias de acero formados por calcio, hierro y silicato de magnesio obtenidos a partir de las reacciones químicas que se realizan en sus procesos. Pueden ser de dos tipos: Oxidantes (negras) por medio de fusión y reductoras (blancas) por afino (CEDEX, 2011, p. 1).

Estériles de carbón: Material que se encuentra recubriendo el manto de carbón en el interior del yacimiento. Contiene compuestos que contaminan el aire, como lo son el dióxido de silicio, óxido ferroso y aluminio (CEDEX, 2011, p. 1)

Fosfoyeso: material resultante de la producción industrial de ácido fosfórico partiendo del ácido sulfúrico y roca de fosfato natural. El ácido fosfórico se produce generalmente por vía húmeda, donde se mezclan ácido sulfúrico y roca fosfática de origen sedimentario, formándose un lado que contiene ácido fosfórico y fosfoyeso, los cuales son separados posteriormente (CEDEX, 2010, p. 1).

Minerales industriales: son aquellos minerales que se caracterizan por tener varias propiedades que los hacen útiles para las diferentes industrias que además van a ser muy usados en la vida diaria (Boual, 2015, p. 1)

Rocas ornamentales: son aquellas que, después de un proceso de tratamiento, pueden usarse como materiales nobles de construcción, para la elaboración de elementos de ornamentación, de arte funerario y escultórico, de objetos artísticos variados, conservando integralmente su composición, textura y características físico-químicas (López, 1996, como se citó en Becerra, et al., p. 95).

Referencias

- Aguilar, J. (2019). Proyecto de grado. *Elaboración de ladrillos mediante la inclusión de ceniza de carbón proveniente de la ladrillera bella vista de Tunja - Boyacá*. Tunja, Boyacá: Universidad Santo Tomás. Obtenido de <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/20011/2019jessicaaguilar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ambientum. (2019). *Enciclopedia Energía*. Obtenido de El Carbón: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/el_carbon.asp
- Andalucía Información . (26 de 06 de 2012). *Huelva*. Obtenido de Técnica para Reutilizar los Fosfoyesos como Material de Construcción: <https://andaluciainformacion.es/andalucia/233975/inventan-tecnica-para-reutilizar-los-fosfoyesos-como-material-de-construccion/#!>
- ANM. (2017). Ficha Técnica. *Calizas*. Bogotá: Agencia Nacional de Minería. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ficha_calizas_es.pdf
- Arenas, F. (2018). Los materiales de construcción y el medio ambiente. *Estudios*.
- Arroyo, R. (2016). Proyecto de maestría. *Problemas en la gestión de la cadena de suministro en las pymes de la construcción: una revisión de la literatura*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ávila, E., Soto, A., & Sánchez, H. (2013). Estériles del carbón y su uso en concreto hidráulico para pavimentos. *Revista Colombiana de Materiales*, 375-381. Obtenido de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/19626>

- Barbosa, J., Barbosa, J., & Rodriguez, M. (2013). Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de la sistematización de experiencias educativas. *BIBLIOTECOLÓGICA*, 83 - 102.
- Barra de Olivera, M., & Vázquez, E. (1997). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado. *Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=243846>
- Becerra, J. (2010). *Exploración geológica para fosfatos en la cordillera oriental – departamento de Boyacá*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Javier_Becerra2/publication/317275146_EXPLORACION_GEOLOGICA_PARA_FOSFATOS_EN_LA_CORDILLERA_ORIENTAL_-_DEPARTAMENTO_DE_BOYACA/links/592f74a0aca272fc55e103e9/EXPLORACION-GEOLOGICA-PARA-FOSFATOS-EN-LA-CORDILLERA-ORIENTAL-
- Becerra, J. (2011). Investigación en caracterización tecnológica y alterabilidad una necesidad en Colombia para el desarrollo de la industria de la piedra natural. En E. Berrenzueta, & M. Dominguez, *Técnicas aplicadas a la caracterización y aprovechamiento de recursos geológico mineros Procesos experimentales volumen II* (págs. 210 - 221). Bogotá: CYTED.
- Becerra, J., & Pulido, O. (2019). Rocas Ornamentales. En S. G. Colombiano, *Recursos minerales de Colombia, vol. 1* (pág. 95 125). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Becerra, J., Montaña, J., & Escobar, I. (2011). *Unidades geológicas con potencial para rocas ornamentales en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y sur de Santander / Servicio Geológico Colombiano (SGC)*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Boual, J. (2015). *Vial*. Obtenido de Los áridos y los minerales industriales: <https://revistavial.com/los-aridos-y-los-minerales-industriales/>

- Castillo, A. (2015). Proyecto de grado. *Evaluación de la arcilla calcinada de pontezuela como aditivo extendedor en lechadas de cemento portland*. Santa Clara: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Obtenido de https://1library.co/document/zpnv08vy-evaluacion-arcilla-calcina-pontezuela-aditivo-extendedor-lechadas-portland.html?utm_source=related_list
- CEDEX. (2010). Catálogo de residuos utilizables en construcción. *Fosfoyeso*. Obtenido de <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/8618C7F6-8603-4EB7-A190-496EC0A8A3B7/119940/FOSFOYESO1.pdf>
- CEDEX. (2011). Catálogo de residuos utilizables en construcción. *Estériles de Carbón Ficha Técnica 1.1*. España: CEDEX. Obtenido de http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_ESTERILESDECARBONDIC2011.pdf
- CEDEX. (2015). Catálogo de residuos utilizables en construcción. *Piedras Ornamentales Ficha técnica*. España: CEMEX. Obtenido de http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_LODOSPROCEDENTESDELCORTEYTRATAMIENTODELAPIEDRAORNAMENTALNOV2015.pdf
- CEPAL. (2017). *Documentos de proyectos Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: dinámicas y desafíos para el cambio estructural*. Alemania: CEPAL. Obtenido de Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: dinámicas y desafíos para el cambio estructural: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/42141>
- CONSTRUMÁTICA. (s.f.). *Portal de arquitectura ingeniería, y construcción*. Obtenido de El carbón: <https://www.construmatica.com/>

- Dobón, B. (2017). Trabajo Final de Grado. *Materiales de construcción reciclados y reutilizados para la arquitectura sostenible*. España: Univaersidad Politécnica de Valencia.
- El Economista. (2020). *Industria Siderúrgica en Boyacá*. Obtenido de <https://empresite.eleconomistaamerica.co/Actividad/INDUSTRIA-SIDERURGICA/departamento/BOYACA/>
- Energía y minería. (2017). *Publicaciones*. Obtenido de Naturaleza y origen del carbón: <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/naturaleza-origen-carbon.html>
- Espejel, A., & Flores, A. (2015). Conocimiento y percepción del calentamiento global. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1277-1290.
- Falcón, J., & Sánchez, A. (2013). Hacia un reciclaje de materiales de la construcción. Principios fundamentales. *Ingeniería civil sostenible y urbanismo*, 65 - 80.
- FAO. (2007). *Utilización de las Rocas Fosfóricas para una agricultura sostenible*. FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/y5053s/y5053s00.pdf>
- FOSFATOS DE BOYACÁ. (2018). *La empresa*. Obtenido de www.fosfatosdeboyaca.com
- GEOLOGIAWEB. (s.f.). *Minerales*. Obtenido de Minerales Industriales: <https://geologiaweb.com/>
- González, Á. (2014). Proyecto de grado. *Estabilización mecánica de suelos cohesivos a través de la utilización de cal - ceniza volante*. Guatemala.
- González, C., Montaña, Á., & Castro, D. (2012). Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez,. *El Hombre y la Máquina*, 59-65. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/478/47823946007.pdf>
- Grupo ARGOS. (2020). *360 en Concreto*. Obtenido de Qué hacer con los residuos de construcción y demolición (RCD) para lograr una construcción responsable:

- <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoria/sostenibilidad/que-hacer-con-los-residuos-de-construccion-y-demolicion-rcd-para-lograr-una-construccion-responsable>
- Grupo de Investigación Poder. (2019). Empresariado y dinámicas de la cadena productiva siderúrgica en el corredor industrial de Boyacá. *Competitividad en el sector siderúrgico en el departamento de Boyacá*. Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1441/2/TGT-190.pdf.pdf>
- Higuera, R. (2015). Minería del carbón en Boyacá: entre la informalidad minera, la crisis de un sector y su potencial para el desarrollo. *Revista ZERO*, 33. Obtenido de <https://zero.uexternado.edu.co/mineria-del-carbon-en-boyaca-entre-la-informalidad-minera-la-crisis-de-un-sector-y-su-potencial-para-el-desarrollo/>
- Hildebrandt Group. (2016). *Construcción*. Obtenido de Materiales reutilizables y reciclables de la construcción de edificios: <http://www.hildebrandt.cl/materiales-reutilizables-y-reciclables-de-la-construccion-de-edificios/>
- Huaquisto, S., & Belizario, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 225 - 234. doi:<http://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- INME. (2012). Escoria para agregados de concreto, una solución sólida. *SIDER INNOVA* (págs. 46 - 50). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Obtenido de <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/nuestrosResultados/documentos/3escoriaAgregadosConcreto.pdf>
- Instituto Tecnológico y Geominero de España, "Manual de Reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica. (2011). Estériles de Carbón. Madrid.

- Obtenido de <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/96CD0E4C-E6FB-4548-9C17-C82CF62559A7/119854/ESTERILESDECARBON.pdf>
- Lamb, C., & Ramírez, C. (2008). Elaboración industrial de bloques de concreto empleando ceniza volante. *Investigaciones Aplicadas*, 8-15. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2884890>
- Lin, Y., Zhang, Y., & Yan, Y. (2010). An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment*, 46(3), 766 - 775.
- Madías, Jorge; Gerente de empresa Metallon, Argentina. (s.f.). Reciclado de escorias de acería. *SUSTENTABILIDAD DE LA INDUSTRIA*. Obtenido de file:///C:/Users/kadam/Downloads/reciclado_de_escorias_de_aceria.pdf
- Maury, A. (2010). Construcción y medio ambiente. *Revista Módulo*, 105 - 114.
- Michel, N. (2016). Construcciones sostenibles: incentivos para su desarrollo en la ciudad autónoma de Buenos Aires. *Cuaderno Urbano. Espacio, Cultura, Sociedad*, 20(20), 119-138.
- Minambiente. (2017). Resolución 472. *Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RCD y se dictan otras disposiciones*. Bogotá, Colombia: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/3a-RESOLUCION-472-DE-2017.pdf>
- Ministerio de Minería - Gobierno de Chile. (25 de Noviembre de 2020). *Glosario Minero*. Obtenido de Relave: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-r/relave/>

- O. I. Molina Bas, A. Moragues Terrades, & J. C. Gálvez Ruiz. (s.f.). La Influencia de las Cenizas Volantes como Sustituto Parcial del Cemento Portland en la Durabilidad del Hormigón: Propiedades Físicas, Difusión del Ión Cloruro y del Dióxido de Carbono. *Caminos, Canales y Puertos*. Obtenido de file:///C:/Users/kadam/Desktop/Trabajo%20de%20Grado%20Paula/La_influencia_de_las_cenizas_volantes_como_sustitu.pdf
- ONU. (2017). *Programa para el Medio Ambiente*. Obtenido de Medio ambiente para revisión: <https://www.unenvironment.org/es/explora-los-temas/medio-ambiente-bajo-revision>
- Pacheco, C., Fuentes, L., Sánchez, E., & Rondón, H. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión. *Ingeniería y Desarrollo*, 533-555. Recuperado el 2020, de <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v35n2/2145-9371-inde-35-02-00533.pdf>
- Parra Araque, L., & Sánchez García, D. (2010). Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá. Bogotá, Colombia. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1024&context=ing_ambiental_sanitaria
- Parra, L., & Sánchez, D. (2010). Proyecto de grado. *Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá*. Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1024&context=ing_ambiental_sanitaria

- Paz del Río Votorantim. (2014). *Quienes Somos*. Obtenido de Historia Paz del Río:
<https://www.pazdelrio.com.co/es-es/Institucional/Paginas/default.aspx>
- Pérez, F. (Mayo de 2019). Tesis Doctoral. *Utilización de de Residuos Siderúrgicos para el Diseño y Dosificación de Diferentes Tipos de Material Cementante de Estructuras Sostenibles*. Málaga, España: Universidad de Málaga. Obtenido de
<https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=ZUU3qCWnRac%3D>
- Perico, N. (2012). *Estudios preliminares de Ingeniería civil con responsabilidad ambiental*. Tunja: Universidad Santo Tomás. Obtenido de http://www.ustatunja.edu.co/site/images/01-USTATunja/05-USTA-Tunja-ProgramasAcademicos/Pregrado/IngenieriaCivil/2017/Documentos/Estudios_Preliminares_Com.pdf
- PNUMA. (2010). Minerales de construcción. *Flujos de Materiales y Productividad de Recursos en América Latina*. Obtenido de <http://www.ces.csiro.au/forms/form-mf-la-start.aspx>
- Portafolio. (16 de Febrero de 2020). Economía. *El sector edificador rompería tendencia y crecería 2% en 2020*. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/el-sector-edificador-romperia-tendencia-y-creceria-en-2020-538159>
- Quijano, L., Díez, H., Montes, M., & Castro, H. (2017). Implementación de procesos sostenibles vinculando industrias regionales. *Rev. esc.adm.neg*, 82 - 103.
- Raut, S., Ralegaonkar, R., & Mandavgane, S. (2011). Desarrollo de material de construcción sostenible utilizando residuos sólidos industriales y agrícolas: una revisión de los ladrillos que crean residuos. *Materiales de construcción y construcción*, 25(10), 4037-4042.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038>

- Reyes , O., & Camacho , J. (2003). Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 25 - 29. Obtenido de <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1322/1052>
- Roa, O. (2016). Proyecto de grado. *Las mezclas de concreto hidráulico con aditivos inclusores de aire “cenizas volantes”*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Rocha, E. (2011). Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA. *Revista nodo*, 6(11), 99-116. Obtenido de <http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/151>
- Rocha, L. (2018). Proyecto de grado. *Minería del carbón en Boyacá y sus impactos ambientales*. Tunja, Boyacá, Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/21316/1049635152.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rondón, H., & Rodríguez, E. (2005). Empleo de estériles de carbón como material para conformar capas de sub-base granular para pavimento. *XIII Congreso CILA*. Costa Rica: Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <file:///C:/Users/kadam/Downloads/Empleodeestriyledecarbncomomaterialparaconformarcapasdesub-basegranularparapavimentos.pdf>
- Rus, J., & Andara, M. (2013). La investigación aplicada como medio para promover relaciones con la industria. Caso fosfoyeso Logros y desafíos. *Gestión y Gerencia*, 67-88. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5301136>
- Sánchez, H. (2014). Estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. *V Congreso Internacional de Ingeniería Civil* (págs. 1 - 14). Tunja: Universidad Santo Tomás. Obtenido de <http://www.ustatunja.edu.co/cong/images/Articulos/->

ESTADO%20DEL%20ARTE%20SOBRE%20LAS%20ESCORIAS%20NEGRAS%20D
E%20HORNO%20DE%20ARCO%20ELECTRICO%20Y%20SUS%20APLICACIONE
S%20EN%20PAVIMENTOS.pdf

Sanjeev Kumar, Blessen Thomas, Vinayak Gupta, Prarthita Basu, & Sandeep Shrivastava. (2018).

Residuos de Arenisca como Agregado y su Utilidad en el Homrmigón de Cemento: Una
Revisión Completa. Elsevier. Obtenido de
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117311942>

Savazzini dos Reis, A., Della, V., & Valenzuela, F. (2015). Analysis of Dimension Stone Waste
Addition to the Clayey Mass Used in Roof Tile Production. *Investigación de materiales*,
18(2), 63 - 69. doi:<https://doi.org/10.1590/1516-1439.346714>

Secretaría Distrital del Ambiente. (2012). Resolución 1115. *Por medio de la cual se adoptan los
lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y
tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital*. Bogotá,
Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá. Obtenido de
[https://www.habitatbogota.gov.co/resolucion-
1115#:~:text=Descripci%C3%B3n%3A,demolici%C3%B3n%20en%20el%20Distrito%20Capital.](https://www.habitatbogota.gov.co/resolucion-1115#:~:text=Descripci%C3%B3n%3A,demolici%C3%B3n%20en%20el%20Distrito%20Capital.)

Servicio Geológico Colombiano. (2019). *Recursos Minerales de Colombia Vol 1*. Bogotá:
Publicaciones Geológicas Especiales n.º 40.

Silva, I. (2017). Tesis de maestría. *Estudio petrográfico para explicar la reducción de la
resistencia a la compresión de especímenes de concreto con diferentes porcentajes de
reemplazo de cemento por ceniza volante de Termotasajero*. Bogotá, Colombia:
Universidad Santo Tomás.

- Steven Kosmatka, Beatriz Kerkhoff, William Panarese, & Jussara Tanesi. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. EE.UU.: Portland Cement Association. . Obtenido de file:///C:/Users/kadam/Desktop/Trabajo%20de%20Grado%20Paula/Diseno_Y_Control_De_Mezclas_De_Concreto.pdf
- Taguchi , S., Santos , J., Gomes , T., & Cunha , N. (2014). Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. *Cerâmica*, 291-296. doi:10.1590/S0366-69132014000200020
- Tayibi, H., Gascó, C., Navarro, N., López, A., Álvarez, A., Yagüe, L., . . . López, F. (2011). Valorización de fosfoyeso como material de construcción: aspectos radiológicos. *Materiales de construcción*, 503-515. doi:10.3989/mc.2010.58910
- Universidad Santo Tomás. (2017). *Pregrado en Ingeniería Civil*. Recuperado el enero de 2021, de Investigación: <https://facultadingenieriacivil.usta.edu.co/index.php/investigacion-pregrado1>
- UPTC - Secretaría de Minas de Boyacá. (2013). Proyecto de Investigación. *Aprovechamiento de recursos mineros - energeticos y generación de un modelo de planeación para la prospección y explotación de minerales estrategicos del departamento de Boyacá*. Tunja, Boyacá, Colombia: Gobernación de Boyacá. Obtenido de http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/admon_grupo_bienes/contratacion/2014/inv_publicas/INVITACION_PUBLICA_No._016_DE_2014/9._ANEXO_8._PROYECTO_DE_INVESTIGACION.pdf
- Valdez, P., Durán, A., Rivera, J., & Juárez, C. (2007). Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante. *CIENCIA UANL*, 49 - 58. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/1817/1/CENIZAVOLANTE.pdf>

- Van der Vorst, M. (2003). Developing sustainable products and services. *Cleaner Prod*, 883 - 895.
- Vargas, Y., & Rodríguez, J. (2012). Proyecto de grado - estudio de caso. *Estéril del carbón Socotá Boyacá*. Tunja: Universidad Santo Tomás. Obtenido de http://www.ustatunja.edu.co/site/images/01-USTATunja/05-USTA-Tunja-ProgramasAcademicos/Pregrado/IngenieriaCivil/2017/Documentos/Estudios_Preliminares_Com.pdf
- Vázquez, R., & Barra, M. (2001). Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción. *Materiales de Construcción*, 137 - 148. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/234613986.pdf>
- Yang, L., Zhang, Y., & Yan, Y. (2016). Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. *Journal of Cleaner Production*, 2004 - 2013. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.054>
- Yimmy Silva, & Silvio Delvasto. (2013). Concreto Autocompactante con Diferentes Niveles de Ceniza Volante y Escoria de Combustión de Carbón. *Revista Colombiana de Materiales N.5pp1-9*. Obtenido de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/19249/16535>
- Zhou, J., Gao, H., Shu, Z., Wang, Y., & Yan, C. (2012). Utilization of waste phosphogypsum to prepare non-fired bricks by a novel Hydration–Recrystallization process. *Construction and Building Materials*, 114 - 119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.045>
- Zolfagharian , S., Nourbakhsh , M., Irizarry , J., Ressang , A., & Gheisari , M. (2012). Evaluación de impactos ambientales en sitios de construcción. *Congreso de Investigación en Construcción*, (págs. 1750-1759). Malasya.