

CONCLUSIONES

A partir del proceso de caracterización realizado a las materias primas, se identificó que el material arcilloso usado en la región está predominantemente formado por cuarzo y fases del grupo de la arcilla como la moscovita y la caolinita. Debido a la composición establecida, se puede clasificar a este material como una arcilla caolinítica.

Los residuos de cisco de café y cascarilla de arroz son ricos en materia orgánica. Las pérdidas asociadas a fases como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina identificadas por TG/DSC alcanzan el 93% y el 80% respectivamente. La fase residual (ceniza) de la cascarilla de arroz es rica en silicio. En el caso del cisco de café, también se observa la presencia de silicio; sin embargo, se evidenciaron concentraciones importantes de potasio, calcio y magnesio, los cuales por sus capacidades fundentes podrían llegar a explicar el mejor comportamiento obtenido en cuanto a la resistencia mecánica a la flexión se refiere dentro del grupo de cerámicos evaluados.

En lo referente a los residuos de la combustión del carbón mineral, se evidenció por TG/DSC que ambos compuestos aún son ricos en materia orgánica. Para el caso de la ceniza de termoeléctrica, se observó que cerca de un 7,0% de la pérdida de masa corresponde a materia orgánica, mientras que para las cenizas del horno este valor puede superar el 70%. Este último hecho muestra la ineficiencia del proceso de combustión actual. Los componentes de tipo inorgánico hallados en

estos materiales son ricos en silicio y aluminio, los cuales se encuentran en fases amorfas y cristalinas como el cuarzo y la mullita.

En relación con el efecto de la concentración de los nutrientes en la pasta sobre las propiedades macroscópicas del cerámico, dos aspectos pueden mencionarse:

1. El más significativo fue la identificación de fenómenos de reducción química dentro de las probetas cerámicas (corazón negro en la jerga de los ceramistas). Esta característica fue evidenciada macroscópicamente en las probetas, incluso en temperaturas de cocción arriba de los 1.000 °C, en contraste con el material residual puro, donde la oxidación total no superó los 800 °C.
2. Los cerámicos elaborados con residuos agroindustriales presentaron mayores defectos estéticos respecto al uso de los cerámicos obtenidos con los residuos del proceso de combustión del carbón. Una rápida y excesiva formación de fase gaseosa pudo estar asociada a este comportamiento, puesto que se evidenció principalmente en los cerámicos con mayor concentración de residuo agroindustrial y cuando este se encontraba en menor tamaño de grano (caso de la pasta con cascarilla de arroz pasante malla 200).

Todos los residuos usados permiten reducir la contracción de secado de las probetas respecto al cerámico patrón (contracción del 8,21). Sin embargo, cada material presenta un comportamiento diferente a medida que se incrementa la concentración del residuo en la pasta. Al tomar el tamaño de grano “pasante malla 80 Tyler” en todas las pastas, se evidenció que no hay variaciones significativas al aumentar la concentración del residuo en la pasta. En la ceniza de termoeléctrica la contracción estuvo cercana al 5,6%.

Los inquemados de carbón tampoco mostraron variaciones significativas al incrementar la concentración de residuo. El valor de contracción de secado en este caso estuvo cercano al 7,0%, mientras que, en el caso del cisco de café, estuvo cercano al 6,6%, y en la cascarilla de arroz, al 5,2%. Cuando se modifica el tamaño de grano de la cascarilla de arroz, se evidenciaron cambios importantes en la contracción de secado. Al usar un tamaño de grano mayor (pasante malla 16), se observó una relación inversamente proporcional entre la concentración de cascarilla y el valor de contracción, llegando este a reducirse hasta 3,1% empleando 20% de residuo en la pasta.

Por otro lado, al usar un tamaño de grano muy fino (pasante malla 200) se evidenció un mayor grado de contracción respecto a los otros dos tamaños de grano, alcanzando un valor cercano al 7,4%, el cual se mantuvo sin variaciones significativas entre las diferentes concentraciones de nutriente.

En relación con la contracción lineal de cocción, solo los cerámicos con presencia de residuos de ceniza mostraron una menor reducción en el valor de esta variable respecto al dato obtenido para el material de referencia (3,71 en 1.200 °C). Este comportamiento en los cerámicos con residuos de café y arroz estaría asociado a la alta tasa de oxidación de la materia orgánica presente en estos residuos, que implica que los espacios dejados por estos materiales luego de combustión sean rellenados en parte por la fase vítrea formada a alta temperatura.

La porosidad del material correlacionada con la prueba de porcentaje de absorción de agua evidencia el comportamiento característico de disminución a medida que se incrementa la temperatura de cocción. Se observó que la porosidad aumenta a medida que se adiciona mayor cantidad de residuo en la pasta cerámica, tendencia similar a la expresada para la contracción de cocción, es decir, se da una mayor porosidad para los cerámicos elaborados con los residuos agroindustriales.

Con respecto a la velocidad de densificación en los materiales, se evidencia que en temperaturas entre 900 y 1.100 °C no hay diferencias tan significativas entre la absorción de agua del material cerámico de referencia y la de los obtenidos con baja presencia de residuo. Sin embargo, arriba de los 1.100 °C la densificación del material de referencia se ve muy favorecida, alcanzando un valor de absorción de agua de solo 1,86% en 1.200 °C, comparado con el 5,2% obtenido con el cerámico con inquemados de horno colmena (5% en la pasta), el cual obtuvo la absorción más baja entre los sustitutos usados con un valor de 5,19%. Un aspecto importante por resaltar aquí es el potencial del cisco de café, el cual alcanzó un valor de absorción de agua de 7,54% en 1.200 °C. Este dato es mucho más bajo que los obtenidos con todas las pastas preparadas con cascarilla de arroz (incluso modificando la granulometría), aun cuando las pérdidas de calcinación son mucho más elevadas en el cisco.

El seguimiento de la resistencia mecánica a la flexión con el incremento de la temperatura mostró varios aspectos importantes. En términos generales, una mayor concentración de residuo contribuye a disminuir la resistencia a la flexión.

En bajas temperaturas (debajo de 1.000 °C) se observó que la resistencia mecánica a la flexión se ve favorecida por la presencia de hasta 10% de residuos provenientes de la combustión del carbón, incluso superando el valor obtenido por el material cerámico de referencia. Un aspecto muy importante observado fue la presencia de un punto de inflexión para la resistencia a la flexión arriba de 1.150 °C; después de superada esta temperatura, la resistencia empieza a descender. A pesar del mayor grado de porosidad generado por el cisco de café, la presencia de hasta 10% de sustitución permite obtener los valores más altos de resistencia a la flexión dentro del grupo de pastas (con presencia de residuo) y rango de temperaturas evaluadas (30,09 N/mm² para el material de referencia y 25,6% para el cerámico

con 10% de cisco de café en la temperatura de 1.150 °C). En relación con el efecto granulométrico del cisco de café, el tamaño de grano intermedio (pasante malla 80) parece ser el más adecuado para obtener los valores más altos de resistencia mecánica a la flexión.

La resistencia a la abrasión profunda se evidenció en muchos de los resultados obtenidos, sobre todo a una temperatura entre 1.150 °C y 1.200 °C. No se evidencia una clara tendencia sobre la influencia de la concentración del residuo sobre esta variable. Por debajo de 1.000 °C la presencia del residuo parece favorecer el valor de resistencia a la abrasión, incluso superando el valor obtenido para el cerámico de referencia.

La comparación de los diferentes cerámicos elaborados permitió establecer que las pastas con 10% de ceniza volante (CT10) y 5% de cisco de café (CC5) son las que muestran el mejor comportamiento en cuanto a las variables físico-cerámicas evaluadas y cumplen con la gran mayoría de requisitos mínimos reportados en la literatura. La pasta CT10 fue seleccionada como la más adecuada en caso de ser llevada a un proceso aplicado real, ya que no es necesario realizar ningún proceso de molienda al residuo.

El análisis de conductividad térmica de CT10, CC5 y el material de referencia MA a las diferentes temperaturas de cocción dejó ver aspectos importantes en cuanto a la modificación de este parámetro debido a la presencia del nutriente. La formación de porosidad por consumo de la materia orgánica parece ser el factor relevante en este comportamiento, hecho que se hace más evidente con el incremento de la temperatura, haciendo que los materiales con presencia de residuo tengan un menor valor de conductividad. La microestructura parece tener influencia sobre la conductividad en bajas temperaturas, especialmente en el cerámico elaborado con ceniza volante. A su vez, la presencia de cuarzo y fase amorfa rica en silicio parece tener correlación con el resultado obtenido.

El análisis microestructural y topográfico realizado a los cerámicos elaborados con la pasta CT10 mediante DRX y MEB permite inferir que existen diferencias en el proceso de reacción a altas temperatura en comparación con el material de referencia. El aspecto más representativo identificado es la velocidad de transformación de la fase amorfa hacia fases cristalinas de alta temperatura como la cristobalita y la mullita. Este proceso de recristalización modifica el material, conllevando a reducir la densificación de este en temperaturas superiores a los 1.150 °C, lo que explica la reducción en los valores de resistencia mecánica a la flexión presentados en la sección de análisis físico-cerámico.

El análisis de la pasta CT10 mediante TG/DSC dejó ver que la presencia de ceniza de termoelectrónica en la pasta cerámica modifica la capacidad de absorción/

adsorción física de la pasta en comparación con la pasta de referencia MA. Este hecho trae consigo un menor consumo energético para la evaporación de dicha agua. De igual forma, la sustitución permite reducir el contenido de caolinita en la pasta, lo cual hace posible disminuir el calor requerido para la deshidroxilación de esta fase. Por otro lado, se evidenció que el carbono residual en la ceniza puede aportar energía al sistema acorde con el resultado de DSC. Todo ello trae consigo ahorro de combustible respecto a las condiciones de operación inicial.

La viabilidad medioambiental del uso de cenizas volantes en la fabricación de productos cerámicos queda demostrada a partir del análisis de huella de carbono y energía embebida llevado a cabo.

Es importante destacar en este punto que otros aspectos de interés medioambiental y positivos para la economía circular no han sido analizados de manera comparativa al ser claramente favorecedor el uso de cenizas volantes. Tal es el caso de aspectos como el tratamiento de residuos o la extracción de recursos naturales. Tomando en consideración estos factores, la mejora medioambiental que se produce con el desarrollo del proceso innovador de uso de cenizas volantes es aún mayor que lo determinado y cuantificado en el presente estudio.

Económicamente, el uso del nutriente tecnológico supone un ahorro, a partir de un menor uso de combustible en el proceso de fabricación de los productos cerámicos.

El proceso innovador descrito, validado de manera positiva tecnológica, medioambiental y económicamente, puede suponer una oportunidad para el sector cerámico de Norte de Santander de posicionarse en ventaja respecto de la competencia.

En conclusión, la mejora que supone el proceso innovador descrito y validado, en los tres ejes de la sostenibilidad (económica, social y medioambiental), certifica que el uso del nutriente tecnológico como materia prima en la fabricación de cerámicos contribuye de manera positiva al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible de Colombia.

FUTURAS INVESTIGACIONES

Los resultados del estudio llevado a cabo contribuyen a despejar incógnitas sobre el uso de nutrientes tecnológicos en la fabricación de cerámicos en la región de Norte de Santander, al mismo tiempo que genera hipótesis y abre nuevas vías de trabajo e investigación.

A continuación se relacionan algunas líneas de investigación que se han detectado y que pueden ser objeto de interés, atendiendo al trabajo desarrollado en esta tesis:

- Producto de los resultados obtenidos en el presente trabajo, es recomendable seguir el estudio de los residuos en la industria cerámica. Un aspecto importante que debería ser considerado es el uso de ceniza de cisco de café en vez del cisco como tal, debido a los resultados de composición química y resistencia mecánica a la flexión obtenidos.
- Otra posibilidad con el cisco de café es evaluar el efecto de la granulometría a fin de identificar si hay alguna influencia, tal como se realizó con la cascarilla de arroz.
- El uso de atmósfera reductora podría ser otro aspecto que podría llegar a ser de interés en el estudio del uso de residuos en la industria cerámica.
- También podría ser de interés la realización del mismo estudio, pero empleando el método de conformado por prensa. Este aspecto se propone ya que se han evidenciado diferencias en las propiedades tecnológicas de los

cerámicos obtenidos al usar ambas técnicas de moldeo empleando la misma pasta cerámica.

- Producto del proceso de caracterización de los inquemados del horno colmena, se evidenció un alto nivel de ineficiencia del proceso de combustión actual (pérdidas de calcinación por materia orgánica muy elevadas acorde con el análisis de TG/DSC); por tanto, se recomienda la realización de estudios que conlleven a hacer más eficiente este proceso.
- La metodología de trabajo propuesta es susceptible de ser utilizada en otras líneas de investigación que consideren el impacto ambiental de la edificación a partir del análisis del impacto asociado a los materiales de construcción.
- Profundizar en el estudio de las diferentes alternativas existentes de uso de nutrientes tecnológicos en la fabricación de cerámicos permitirá el desarrollo de productos con mejores prestaciones, con miras a cumplir los requisitos medioambientales que se establecerán a corto y medio plazo para los productos de construcción.

REFERENCIAS



- Abu-Ghunmi, D.; Abu-Ghunmi, L.; Kayal, B. & Bino, A. (2016). Circular Economy and the Opportunity Cost of Not 'Closing the Loop' of Water Industry: The Case of Jordan. *Journal of Cleaner Production*, 131: 228-236.
- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (2003). *Factores de emisión de los combustibles colombianos*. Disponible en: http://www.siamе.gov.co/siamе/documentos/documentacion/mdl/HTML/18_FECOC.htm
- Acchar, W. & Dultra, E. (2015). *Ceramic Materials from Coffee Bagasse Ash Waste*. Brasil: SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology.
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36: 327-363.
- Ahumada, L.M. & Rodríguez-Páez, J.E. (2006). Uso del SiO₂ obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicatos de calcio. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 30(117): 581-594. ISSN 0370-3908. Disponible en: http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_30/117/581%20a%20594.pdf.
- Alonso-Santurde, R.; Coz, A.; Viguri, J.R.; Andres, A. (2012). Recycling of Foundry Byproducts in the Ceramic Industry: Green and Core Sand in Clay Bricks. *Constr. Build Mater*, 27: 97-106.
- Amell, A.; Chejne, F.; López, D.; Forero, C.; Herrera, B.; Alvarado, P.; Ceballos, C.; Giraldo, S.; Porras, J.; Mejía, A.; González, D. & Velasco, F. (2016). *Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos-FECOC*. Disponible en: http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/Informe_Final_FECOC.pdf.
- American Coal Ash Association Educational Foundation. (s.f). *Sustainable Construction with Coal Combustion Products*. Disponible en: [https://www.aaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/Sustainability_Construction_w_CCPs\(Consolidated\).pdf](https://www.aaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/Sustainability_Construction_w_CCPs(Consolidated).pdf).
- American Society for Testing and Materials (2012). *ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- American Society for Testing and Materials (s.f). *ASTM C326-03. Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays*.

- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(1): 133-140.
- Araújo Ibarra & Asociados S.A. (2006). *Quinientos nuevos productos y servicios, para nueve regiones de Colombia, con gran potencial de mercado en Estados Unidos*.
- Argiz, C. G. (2014). *Estudio de la utilización de cenizas de cenicero de centrales termoeléctricas de carbón como adición del cemento portland, análisis comparativo con las cenizas volantes*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: http://oa.upm.es/30411/1/Cristina_Argiz_Lucio.pdf.
- Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos (ASCER) (s.f.). *Cerámica para la arquitectura, fundamentos*. Disponible en: <http://www.ascer.es/verFotoHD.ashx?id=36>.
- Bartoňová, L. (2015). Unburned carbon from coal combustion ash: An overview. *Fuel Processing Technology*, 134: 136-158.
- Boltakova, N. V.; Faseeva, G. R.; Kabirov, R. R.; Nafikov, R. M. & Zakharov, Y. A. (2016). *Utilization of Inorganic Industrial Wastes in Producing Construction Ceramics. Review of Russian Experience for the Years 2000-2015*. Waste Management.
- Bovea, M. D.; Díaz-Albo, E.; Gallardo, A.; Colomer, F. J. & Serrano, J. (2010). Environmental Performance of Ceramic Tiles: Improvement Proposals. *Materials & Design*, 31(1): 35-41.
- Burgos, C. H. (2011). *Propuesta para el control y seguimiento del proceso de empaquetado de la empresa Arrocería Gelvez S.A. Prácticas industriales: ingeniería industrial*. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería.
- Caballero, L. & Médico, O. (2013). *Caracterización y posible uso de cenizas resultantes de la combustión del carbón, en la futura termocentral de lecho fluidizado*. Río Turbio, Argentina. Recuperado el 29 de julio de 2016. Disponible en: <http://www.redisa.uji.es/artSim2013/CaracterizacionDeResiduosSolidos/Caracterizacion%20Cenizas%20Combustion%20Carbon.pdf>.
- Café de Colombia (s.f.). *Un producto especial: post-cosecha*. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/post-cosecha/.

- Carrasco, J. (2014). *Factores de emisión considerados en la herramienta de cálculo de la huella de carbono corporativa*. CAEM.
- Castells, E. & Cadavid, C. (2011). El análisis del ciclo de vida: una herramienta para medir la eficiencia en el sector cerámico. *Residuos: Revista técnica*, 122: 36-45.
- Chur, G. (2012). *Evaluación del uso de la cascarilla de arroz como agregado orgánico en morteros de mampostería*. Trabajo de grado. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3173_C.pdf.
- Colegio Territorial de Arquitectos de Castellón (s.f.). *Guía de la baldosa cerámica*. Disponible en: http://www.g2arquitectos.es/enlacesinteres/archivos/004_guia_baldosa_ceramica.pdf.
- Contreras, H. (2008). *Análisis del mejoramiento del análisis de secado de la arrocera Gelvez S.A.* Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente.
- Cultrone, G. & Sebastián, E. (2009). Fly Ash Addition in Clayey Materials to Improve the Quality of Solid Bricks. *Construction and Building Materials*, 23: 1178-1184.
- DANE (febrero, 2016). *Boletín técnico: Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado II Semestre de 2015 (Datos definitivos)*. Bogotá, D.C. Recuperado el 12 de mayo de 2016. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol_arroz_IIsem15.pdf.
- De los Ríos, I. C. & Charnley, F. (2016). Skills and Capabilities for a Sustainable and Circular Economy: The Changing Role of Design. *Journal of Cleaner Production*. En prensa.
- Demir, I. (2006). An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Build Environ*, 41: 1274-8.
- Díaz, C. X. (2014). *Elaboración y caracterización de un material compuesto, de matriz polvos de arcilla atomizados y refuerzo residuos de la combustión del carbón, conformado por prensado uniaxial*. Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales. Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Francisco de Paula Santander.
- Díaz, I. (2015). *Informe de resultados. Análisis comparativo de las propiedades del conjunto de arcillas del proyecto: Fortalecimiento a 10 empresas del Clúster de la*

cerámica de Norte de Santander a través de la estandarización de sus principales productos a la Norma Técnica Colombiana.

Dondi, M.; Guarini, G.; Raimondo, M. & Zanelli, C. (2009). Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles. *Waste Manage (Oxford)*, 29(6): 1945-51.

Dorado Guerra, H. F. (2015). *Uso de subproductos de la industria de café y caña de azúcar como fundente y formador de poros en la manufactura de ladrillos de arcilla roja*. Proyecto de grado Ingeniería de Materiales. Universidad del Valle.

Echeverría, M. & López, O. (2010). *Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica*. Proyecto de grado de Ingeniero Mecánico. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2058/1/CD-2863.pdf>. Eliche, D. & Corpas, F. A. (2014). Utilisation of spent filtration earth or spent bleaching earth from the oil refinery industry in clay products. *Ceramics International*, 40: 16677-16687.

Eliche, D.; Martínez, S.; Pérez, L.; Iglesias, F. J.; Martínez, C. & Corpas, F. A. (2012). Valorization of biodiesel production residues in making porous clay brick. *Fuel Processing Technology*, 103: 166-173.

Eliche, D.; Martínez, C.; Martínez, M. L.; Cotes, M. T.; Pérez, L.; Cruz, N. & Corpas, F. A. (2011). The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Applied Clay Science*, 52: 270-276.

Ellen Macarthur Foundation. (2013). *Ellen Macarthur Foundation*. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/>.

European Environment Agency (2016). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016*. ISSN 1977-8449.

Enrique, J. (s.f.). *Requisitos técnicos de baldosas cerámicas para usos concretos*. Disponible en: <http://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdf/9411060s.pdf>.

Esmaeilian, B.; Behdad, S. & Wang, B. (2016). The Evolution and Future of Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing Systems*, 39: 79-100.

European Commission (mayo de 2014). *Report on Critical Raw Materials for the EU: Report of the AdHoc Working Group on Defining Critical Raw Materials*. Disponible en: <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10010/attachments/1/translations>.

- European Environment Agency. (2016). *Circular Economy in Europe: Developing the Knowledge Base*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.
- Fang, Y.; Côté, R. P. & Qin, R. (2006). Industrial Sustainability in China: Practice and Prospects for Eco-Industrial Development. *Journal of Environmental Management*, 83(3) : 315-328.
- Fauzi, A.; Nuruddin, M. F.; Malkawi, A. B.; Abdullah, M. M. (2016). Study of Fly Ash Characterization as a Cementitious Material. *Procedia Engineering*, 148: 487-493.
- Federación Nacional de Cafeteros en Colombia (2014). *Informe de comités departamentales. Por la caficultura que queremos*. LXXX Congreso Nacional de Cafeteros 2014. Disponible en: https://www.federaciondefcafeteros.org/static/files/Informe_Comites_2014p.pdf.
- Földvári, M. (2011). *Handbook of Thermogravimetric System of Minerals and its Use in Geological Practice*. Geological Institute of Hungary.
- García, E. G. & Mendiola, L. L. (2016). Evaluación de las propiedades físico mecánicas de ladrillos de arcilla recocida, elaborados con incorporación de residuos agrícolas, caso Chiapas, México. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 19(2): 91-101.
- García-Ubaque, C. A.; Giraldo, L. & Moreno-Piraján, J. C. (2013). Quality Study of Ceramic Bricks Manufacture with Clay and Ashes from the Incineration of Municipal Solid Wastes. *Afinidad*, 70(561).
- García-Ubaque, C. A.; Moreno-Piraján, J. C.; Giraldo-Gutiérrez, L. & Sapag, K. (2007). Stabilization/Solidification of Ashes in Clays Used in the Manufacturing of Ceramic Bricks. *Waste management & research*, 25(4): 352-362.
- García-Ubaque, C. A., González-Hässig, A., & Vaca-Bohórquez, M. L. (2013). Ceramic Bricks Made from Municipal Solid Waste Incineration-Derived Clay and Ashes: a Quality Study. *Ingeniería e Investigación*, 33(2): 36-41.
- Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N. & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143: 757-768.
- Gelves, J. F.; Monroy, R.; Sánchez, J. & Ramírez, R. (2013). Estudio comparativo de las técnicas de extrusión y prensado como procesos de conformado de productos cerámicos de construcción en el área metropolitana de Cúcuta. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y vidrio*, 52(1): 48-54.

- Ghisellini, P. ; Cialani, C. & Ulgiati, S. (2016). A Review on Circular Economy: the Expected Transition to a Balanced. *Journal of Cleaner Production*, 114: 11-32.
- Gobernación Norte de Santander, Sistema de información subregional (s.f.). *Caracterización Norte de Santander*. Disponible en: http://www.sisubregionalns.gov.co/files/sid_Ordenamiento_territorial/Caracterizacion_Dpo/Aspectos_Economicos_I_parte.pdf.
- Gómez, F. (2011). *Aprovechamiento de cenizas de carbón mineral producidas en la industria local como material conglomerante en la construcción*. Tesis de maestría. Universidad de Medellín, Facultad de ingeniería. Disponible en: <http://repository.udem.edu.co/handle/11407/65?locale-attribute=en>.
- Gómez, T. & Mantilla, J. (1993). *Aprovechamiento del aserrín y la cascarilla de arroz en la fabricación de tabletas tipo cerámica*. Trabajo de grado en Tecnología Química. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Gómez, P. P.; Hincapié, C. M. B. & Rivera, A. R. (2011). Estimación de los parámetros cinéticos y tiempo de vida de la cáscara de arroz y arcilla mediante la técnica de análisis termogravimétrico (tga). *Dyna*, 78(165): 207-214.
- González, D. R.; Pérez, L.; Santa, A. & Ramírez, J. H. (2014). Producción y caracterización de zeolita obtenida a partir de ceniza volante mediante DRX. *Momento*, 48E: 52-60.
- Greenberg, A. (2014). *How Coffee Works: 10 Steps from Shrub to Mug (infographic)*. Recuperado el 8 de septiembre de 2016. Disponible en: <https://tazzadiluna.com/2014/05/02/how-coffee-works/>.
- Guzmán, Á.; Delvasto, S.; Sánchez, E. & Amigó, V. (2013a). Cenizas del tamo de arroz como sustituto del feldespatos en la fabricación de cerámica blanca. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(1): 25-30.
- Guzmán, Á.; Torres, J.; Cedeo, M. & Delvasto, S. (2013b). Fabricación de gres porcelánico empleando ceniza de tamo de arroz en sustitución del feldespatos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(6): 283-290.
- Ha, J.; Chae, S.; Chou, K. W.; Tyliszczak, T. & Monteiro, P. J. M. (2016). Characterization of Class F Fly Ash Using STXM: Identifying Intraparticle Heterogeneity at Nanometer Scale. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials*, Article ID 8072518: 1-7.
- Iglesias, I.; Acosta, A. & García, E. (2013). Recycling of Residual IGCC Slags and their Benefits as Degreasers in Ceramics. *Journal of Environmental Management*, 129: 1-8.

- Iglesias, I.; Acosta, A.; García, E. & Rincón, J. M. (2015). *Mejora de las propiedades cerámicas de arcillas comunes por adición de ceniza volante GICC*. XXIV Reunión de la Sociedad Española de Arcillas 2015 (pp. 31-32). Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/125217>.
- Illic, M. & Nikolic, M. (2016). Drivers for Development of Circular Economy. A case Study of Serbia. *Habitat International*, 56: 191-200.
- IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. ISBN 92-9169-320-0.
- Jawahir, I. S. & Bradley, R. (2016). Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 40: 103-108.
- Jeskar, Ltda. (2000). *Inventario geológico minero, ambiental, tecnológico y empresarial de los minerales no energéticos del Norte de Santander*. San José de Cúcuta, Colombia: Jeskar Ltda.
- Kisella, A. M.; Czaka, K. M.; Moron, W.; Ryback, W. & Andryjowicz C. (2016). *Unburned carbon from lignite fly ash as an adsorbent for SO2 removal*.
- Kockal, N. (2012). Utilization of different types of coal fly ash in the production of ceramic tiles. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 51(5): 297-304.
- Leal, E. J. (2012). *Propuesta de mejora en el proceso de despolvamiento para las etapas de prelimpieza y secamiento del arroz paddy verde en la empresa arrocería Agua Clara S.A.S. ubicada en la ciudad de San José de Cúcuta*. Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería.
- Lett, L. A. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Revista Argentina de Microbiología*, 46(1): 1-2.
- Lieder, M. & Rashid, A. (2016). Towards Circular Economy implementation: A Comprehensive Review in Context of Manufacturing Industry. *Journal of Cleaner Production*, 115(1): 36-51.
- Lombana, C. (2011). *Diseño de explotación a cielo abierto de la mina cerámica Murano, en el municipio de El Zulia vereda La Alejandra*.
- López, J. L.; Tarantino, C. & Aranguren, S. (2010). Metodología para la selección de los instrumentos que mayor impacto de fallas presentan en el generador de vapor de la empresa Termotasajero Colgener. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas*, 1(15): 112-19.

- Madurwar, M. V.; Ralegaonkar, R. V. & Mandavgane, S.A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 38: 872-878.
- Manals-Cutiño, E.; Penedo-Medina, M. & Giralt-Ortega, G. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnología Química*, 31(2): 36-43.
- Mann, H. S.; Brar, G. S.; Mann, K. S. & Mudahar, G. S. (2016). *Experimental Investigation of Clay Fly Ash Bricks for Gamma-Ray Shielding*, *Nuclear Engineering and Technology*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2016.04.001>.
- Martínez, J. D. & Becerra, N. A. (2007). *Elaboración de un manual de procedimientos operativos basado en la norma ISO 9000:2000 para las áreas agroindustriales de recepción de café pergamino, trillado, tostado, molido y empaque en la comercializadora Gonlo Ltda.* Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente.
- Martínez, C.; Cotes, T. & Corpas, F. A. (2012). Recovering Wastes from the Paper Industry: Development of Ceramic Materials. *Fuel Processing Technology*, 103: 117-124.
- McDonough, W.; Braungart, M.; Anastas, P. T. & Zimmerman, J. B. (2003). Peer Reviewed: Applying the Principles of Green Engineering to Cradle-to-Cradle Design. *Environmental Science & Technology*, 37: 434A-441A.
- Mehment, B. & Kizgut, S. (2016). Modeling of Unburned Carbon in Fly Ash and Importance of Size Parameters. *Fuel Processing Technology*, 143: 7-17.
- Mejía, L. V. & Montes, A. Y. (2013). *Rediseño técnico para la línea de producción del café molido en la empresa Cafecrisol, Villa del Rosario-Norte de Santander.* Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente.
- Mejía, J. M.; Rodríguez, E. D. & Mejía, R. (2014). Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros. *Ingeniería y Universidad*, 18(2): 309-327.
- Mendoza, I. & Mantilla, T. (1994). *Estudio para la elaboración de ladrillos de construcción a partir de las cenizas volantes de carbón.* Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Menezes, R. R.; Ferreira, H. S.; Neves, G. A.; Lira, H. D. L. & Ferreira, H. C. (2005). Use of Granite Sawing Wastes in the Production of Ceramic Bricks and Tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(7): 1149-1158.

- Ministerio de Minas y Energía & UPME (2012). *Cadena del carbón*. Colombia. ISBN: 978-958-8363-12-7. Recuperado el 29 de julio de 2016. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf.
- Minminas (s.f.). *Precios de combustibles*. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/precios-de-combustible>.
- Molina, J. S. & Díaz, J. F. G. (2012). Caracterización tecnológica y del talento humano de las empresas fabricantes de cerámica roja ubicadas en el área metropolitana de Cúcuta. *Respuestas*, 17(2): 71-80.
- Montilla, J.; Arcila, J.; Aristizábal, M.; Montoya, E.; Puerta, G.; Oliveros, C. & Cadena, G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafe*, 59(2): 120-142. Disponible en: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc059\(02\)120-142.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc059(02)120-142.pdf).
- Mora, R. L. (2015). *Caracterización de arcillas provenientes de la mina Murano del municipio del Zulia, Norte de Santander, Colombia*. Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona. Facultad de ciencias básicas. Maestría en Química.
- Naciones Unidas (1998). *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- Naustdalslid, J. (2014). Circular Economy in China – the Environmental Dimension of the Harmonious Society. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 21(4): 303-313.
- O'Neill, B. C. & Oppenheimer, M. (2002). Dangerous Climate Impacts and the Kyoto Protocol. *Science*, 296(5575): 1971-1972.
- Palacios, L. & Betancurt, E. (02 de agosto de 2005). *Caracterización de propiedades fluidodinámicas de lechos fluidizados en frío con mezclas de carbón-biomasa, usados en procesos de co-gasificación*. Medellín, Colombia.
- Panwar, N. L.; Kaushik, S. C. & Kothari, S. (2011). Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3): 1513-1524.
- Pedroza, A. (1996). *Formación León y Grupo Guayabo: Fuentes de provisionadoras de arcillas en el área de Cúcuta, Norte de Santander*. Texto conferencia. Cúcuta.
- Peña, G. & Ortega, L. (2014). Caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes. *Revista I +D*, 14(2): 14-19.

- Pérez, L.; Corpas, F. A.; Martínez, S.; Artiaga, R. & Pascual, J. (2012a). Manufacturing New Ceramic Materials from Clay and Red Mud Derived. *Construction and Building Materials*, 35: 656-665.
- Pérez, L.; Eliche, D.; Iglesias, F. I.; Martínez, C. & Corpas, F. A. (2012b). Recycling of Ash from Biomass Incinerator in Clay Matrix to Produce Ceramic Bricks. *Journal of Environmental Management*, 95: S349-S354.
- Pinzón, A. L. (2008). *Diseño del sistema de monitoreo y supervisión del proceso de trillado de café en la empresa Almacafé de Cúcuta*. Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ingeniería.
- Portillo Rodríguez, A. (2015). *Efectos de la adición de polvos de cascarilla de arroz en las propiedades mecánicas y térmicas de un material compuesto a base de polvos de aluminosilicatos atomizados, elaborado por proceso de extrusión*. Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Preston, F. (1 de marzo de 2012). *Research: A Global Redesign? Shaping the Circular Economy*. Disponible en: <https://www.chathamhouse.org/publications/papers/view/182376>.
- Quiceno, D. (2010). *Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Rajamannan, B.; Sundaram, C. K.; Viruthagiri, G. & Shanmugam, N. (2013). Effects of Fly Ash Addition on the Mechanical and Other Properties of Ceramic Tiles. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2(1): 486-491. ISSN (Online):2278-5299.
- Ramírez, Y. (2012). *Determinación de las fases presentes en pisos y revestimientos cerámicos a base de arcilla cocidos a diferentes temperaturas y su influencia en las propiedades técnicas*. Maestría en Ingeniería, Materiales y Procesos. Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional de Colombia.
- Ríos, C. (2009). *Uso de materias primas colombianas para el desarrollo de baldosas cerámicas con alto grado de gresificación*. Tesis de maestría. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Rivera, R. & Rodríguez, H. (1992). *Estudio de la ceniza del carbón en la elaboración de ladrillos refractarios*. Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Ruiz, J. M.; Alonso C.; Cambroner, L. E.; Corpas, F.; Alfonso, M. & Moraño, A. J. (2000). Aprovechamiento de las cenizas volantes, clase F, de centrales térmicas

- para la fabricación de materiales cerámicos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 39(3): 229-231.
- Sánchez, J. (2014). *Caracterización físico química de las arcillas rojas del área metropolitana de Cúcuta*. Facultad de ciencias básicas. Departamento de Química. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Sánchez, J. & Ramírez, P. (2013). *El clúster de la cerámica del área metropolitana de Cúcuta*. Editorial Universidad Francisco de Paula Santander. ISBN: 978-958-8489-37-7.
- Sánchez, J. & Rozo, S. (2013). *Evaluación de los cambios en las propiedades térmicas y mecánicas del bloque # 5 fabricado en la región, según las mezclas entre arcilla y residuos industriales*. Informe final presentado a Colciencias convocatoria. Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica, Universidad Francisco de Paula Santander.
- Schell, C. (2016). Beyond sustainability. Transforming industrial zero-valued residues into increasing economic returns. *Journal of Cleaner Production*, 131: 376-386.
- Segerson, K. & Miceli, T. J. (1998). Voluntary Environmental Agreements Good or Bad News for Environmental Protection? *Journal of Environmental Economics and Management*, 36(2): 109-130.
- Senneca, O. (2008). Burning and physico-chemical characteristics of carbon in ash from a coal fired power plant. *Fuel*, 87: 1207-1216.
- Shen, X. & Qi, C. (2012). Countermeasures towards Circular Economy Development in West Regions. *Energy Procedia*, 16: 927-932.
- Sistema de Información Eléctrico Colombiano (2015). *Evolución variables de generación: Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano de diciembre de 2015*. Recuperado el 29 de julio de 2016. Disponible en: <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generaci%C3%B3n/Estad%C3%ADsticasyvariablesdegeneraci%C3%B3n/tabid/115/Default.aspx>.
- Smykatz-Kloss, W. (1974). *Differential Thermal Analysis, Application and Results in Mineralogy*. Berlín: Springer-Verlag.
- Soltani, N.; Bahrami, A.; Pech, M. I. & González, L. A. (2015). Review on the Physicochemical Treatments of Rice Husk for Production. *Chemical Engineering Journal*, 264: 899-935.

- Souza, A. E.; Teixeira, S. R.; Santos, G. T.; Costa, F. B. & Longo, E. (2011). Reuse of Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) to Produce Ceramic Materials. *Journal of Environmental Management*, 92(10): 2774-2780.
- Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S.; Fetzer, I.; Bennett, E. & Sörlin, S. (2015). Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*, 347(6223): 1-15.
- Su, B.; Almas, H.; Geng, Y. & Yu, X. (2013). A Review of the Circular Economy in China: Moving from Rhetoric to Implementation. *Journal of Cleaner Production*, 42: 215-227.
- Sutcu, M. & Akkurt, S. (2009). The Use of Recycled Paper Processing Residues in Making Porous Brick with Reduced Thermal Conductivity. *Ceramics International*, 35(7): 2625-2631.
- Teixeira, S. R.; Santos, G. T.; Souza, A. E.; Alessio, P.; Souza, S. A. & Souza, N. R. (2011). The Effect of Incorporation of a Brazilian Water Treatment Plant Sludge on the Properties of Ceramic Materials. *Applied Clay Science*, 53: 561-565.
- Temuujin, J.; Rickard, W. & Riessen, A. (2013). Characterization of Various Fly Ashes for Preparation of Geopolymers with Advanced Applications. *Advanced Powder Technology*, 24: 495-498.
- Termotasajero S.A. E.S.P. (2008). *Sistemas de planta*.
- Termotasajero S.A. E.S.P. (s.f.). *Proceso industrial*. Disponible en: http://www.termotasajero.com.co/page/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=36.
- Tikul, N. & Srichandr, P. (2010). Assessing the Environmental Impact of Ceramic Tile Production in Thailand. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 118(1382): 887-894.
- Tiles & Bricks Europe (2014). *TBE PCR for Clay Construction Products Guidance document for developing an EPD*. Tiles & Bricks Europe. Disponible en: www.tiles-bricks.eu/publications/.
- Torres, P.; Hernández, D. & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3): 145-154.
- Tukker, A. (2015). Product Services for a Resource-Efficient and Circular Economy-a Review. *Journal of Cleaner Production*, 97: 76-91.

- UNESA (s.f.). *Central térmica convencional de carbón*. Disponible en: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1351-central-termica>.
- Universidad de los Andes, Centro de estudios de Fronteras e Integración (CEFI), (Venezuela) (s.f.). *Propuesta de definición y delimitación de la zona de integración fronteriza: área Norte de Santander (Colombia)–Táchira (Venezuela)*. Corporación Universidad Libre de Colombia, Seccional Cúcuta, Colombia. Universidad Francisco de Paula Santander.
- UPME. (2010). *Proyección de demanda de energía en Colombia*. Bogotá.
- UPME (2017). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano*.
- Valencia, N. Y. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé* 393: 8.
- Vargas, S. & Cristancho, L. (1986). *Aplicación de los desechos industriales, cenizas volantes y escorias de carbón en la elaboración de ladrillos de construcción*. Trabajo de grado. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Vásquez, O. (2015). *Etanol lignocelulósico, a partir de cascarilla de café, por medio de hidrólisis química-enzimática y fermentación*. Tesis de grado: Maestría en Ingeniería Energética. Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/41986/1/VazquezMoralesOscar.pdf>.
- Velásquez, L. F.; De La Cruz, J. F.; Sánchez J. F. & Marín, M. A. (2007). Remoción de carbón inquemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión de carbón. *Revista Energética*, 38: 107-108.
- Winans, K.; Kendall, A. & Deng, H. (2017). The History and Current Applications of the Circular Economy Concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(11): 825-833.
- World Coal Association (2016). *Statistics: Coal Facts 2015*. Recuperado el 29 de julio de 2016. Disponible en: <http://www.worldcoal.org/resources>.
- Wua, H.; Shi, Y.; Xiaa, Q. & Zhu, W. D. (2014). Effectiveness of the Policy of Circular Economy in China: A DEA-Based Analysis for the Period of 11th Five-Year-Plan. *Resources, Conservation and Recycling*, 83: 163-175.
- Xinan, L. & Yanfu, L. (2011). Driving Forces on China's Circular Economy: From

Government's perspectives. *Energy Procedia*, 5: 297-301.

Yap, N. U. (2005). Towards a Circular Economy: Progress and Challenges. *Green Management*, 50: 11-24.

Yu, J.; Li, X.; Fleming, D.; Meng, Z.; Wang, D. & Tahmasebi, A. (2012). Analysis on Characteristics of Fly Ash from Coal Fired Power Stations. *Energy Procedia*, 17: 3-9.

Zhang, L. (2013). Production of Bricks from Waste Materials-A Review. *Construction and Building Materials*, 47: 643-655.

Zhang, K. M. & Wen, Z. G. (2008). Review and Challenges of Policies of Environmental Protection and Sustainable Development in China. *Journal of Environmental Management*, 88(4): 1249-1261.

Este libro fue compuesto en caracteres Minion a 11 puntos, impreso sobre papel Bond de 75 gramos y encuadernado con el método hot melt, en diciembre de 2018, en Bogotá, Colombia.