

## CAPÍTULO I

# INCORPORACIÓN DE LOS NUTRIENTES TECNOLÓGICOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA

## **1. La industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta**

Las principales arcillas explotadas en el departamento de Norte de Santander se encuentran en el área metropolitana de Cúcuta, la cual cuenta con una superficie de 2.196 km<sup>2</sup>, que ocupa el 10,1% de la extensión departamental. De todo el departamento, la zona metropolitana de Cúcuta es el área donde mayoritariamente se encuentran yacimientos arcillosos, además de ser el lugar donde se concentra casi la totalidad de la industria dedicada a la explotación y transformación de este material. “En vecindades de la ciudad de Cúcuta se explotan las arcillas estratificadas de la parte superior del Grupo Guayabo y la Formación León, de edad Neógena, de origen continental (Ngc) y de excelente calidad como un gres típico” (Sánchez, 2014).

Estas arcillas se encuentran formando parte de la litología de las formaciones terciarias de León y Guayabo. En algunos sectores de Cúcuta los estudios sobre la composición mineralógica y química de las arcillas de Cúcuta las muestran como materiales de primera calidad, desde el punto de vista cerámico (Pedroza, 1996).

El sector está representado por 49 empresas legalmente establecidas en el sector de la arcilla y la cerámica ubicadas en el área metropolitana de Cúcuta (Díaz, 2015). Estas se pueden clasificar con base en su producción según lo establecido en la

Ley 905 de 2004 de la siguiente manera: un 59% son pequeñas empresas, un 20% son microempresas, un 16% corresponde a medianas, y el 5% restante pertenece a grandes empresas; es decir, solo Cerámica Italia clasifica como gran empresa, y en las microempresas y pequeñas empresas clasifican los artesanos y los chircales. Geográficamente, las empresas legalmente constituidas están distribuidas en un 28,57% en San José de Cúcuta, 20,41% en Villa del Rosario, 30,61% en El Zulia y el 20,41% en Los Patios (Díaz, 2015).

Todas las empresas anteriormente mencionadas se dedican a la fabricación de materiales de la construcción, dentro de los cuales se destacan: tableta vitrificada, tableta esmaltada, tejas, tejas rústicas hechas a mano, bloques, ladrillos, tabelón, productos artesanales (decorados y enchapes), entre otros. Esto las convierte en una de las principales alternativas de desarrollo para la región; por ello, es de gran importancia mejorar constantemente la calidad de los productos ofertados, con el fin de alcanzar la competitividad necesaria para mantenerse en los mercados actuales e incursionar en otros a nivel internacional (Sánchez & Ramírez, 2013).

### **1.1 Distribución geográfica de las industrias cerámicas**

- Municipio de Cúcuta (Sánchez, 2014). Está localizado sobre las estribaciones de la cordillera Oriental, en el macizo de Santander. Se ubica al este del departamento Norte de Santander, en límites con la República de Venezuela. El municipio de Cúcuta tiene una extensión de 1.119 km<sup>2</sup>, que equivalen al 4,11% de la superficie departamental (27.217 km<sup>2</sup>), ocupando el séptimo lugar por superficie entre los municipios del departamento.

Las principales plantas de cerámicas, tejares y ladrilleras de Cúcuta son:

- Tejar de Pescadero.
  - Arcillas del Oriente.
  - Ladrillera Casablanca S.A.S.
  - Tejar San Gerardo Ltda.
  - Ladrillera Arcigres Ltda.
  - Tejar Santa Rosa Ltda.
  - Ladrillera Colbee S.A.S.
  - Tejar Santa Teresa.
- Municipio del Zulia (Sánchez, 2014). Tiene una superficie de 48.979 ha, equivalente al 0,22% del área total de Norte de Santander, y está situado en la subregión oriental del departamento. El municipio del Zulia limita: al norte con el municipio de Cúcuta, al sur con los municipios de San Cayetano y Santiago, por el oriente con el municipio de Cúcuta y por el occidente con los municipios de Gramalote y Sardinata.

El plan de ordenamiento territorial del municipio de El Zulia presenta la siguiente información en el tema de la arcilla: en la actualidad no se tienen cuantificadas las reservas de arcillas existentes en el municipio; sin embargo, de acuerdo con el porcentaje de distribución de las formaciones portadoras en

el área territorial (15,4% para las formaciones León y Guayabo), se estima que los volúmenes de material son importantes.

Los principales tejares y ladrilleras de El Zulia son:

- Arcillas Castilla.
  - Ladrillera Merkgres de Colombia Ltda.
  - Tejar Santa María Ltda.
  - Ladrillera El Pomar.
  - Cerámica Murano.
  - Ladrillera Arcigres Ltda.
  - Arcillas Zuligres.
- Municipio de Villa del Rosario. Se encuentra situado en la parte noreste de Norte de Santander y tiene una extensión de 228 km<sup>2</sup>. Los límites generales son: al norte con el municipio de San José de Cúcuta, al oriente con el río Táchira, al sur con el municipio de Ragonvalia, y al occidente con el municipio de Los Patios.
  - Las principales ladrilleras de este municipio son:
    - Ladrillera Cúcuta.
    - Margres S.A.
    - Ladrillera Norsan Ltda.
    - Ladrillera Patiño.
    - Tejar Cerámica Babilonia.
    - Arcillas San Felipe Ltda.
    - Ladrillera el Topacio.
    - Arcillas del Rosario.

Estratificadamente, se observan en el área estratos pertenecientes a la unidad litoestratífuga del Terciario, denominada Formación Guayabo (Tmg), conjunto arcilloso, la cual consta principalmente de estratos arcillosos de espesor variable interestratificados con rocas areniscas de dureza media y grano medio cementadas en óxido de hierro.

- Municipio Los Patios (Sánchez, 2014). Está localizado al oriente de Norte de Santander, haciendo parte de la subregión oriental del departamento, junto con los municipios de Cúcuta, El Zulia, San Cayetano, Villa del Rosario y Puerto Santander, los cuales, excepto el último, conforman el área metropolitana de Cúcuta.

El plan de ordenamiento territorial del municipio de Los Patios presenta la siguiente información en el tema de la arcilla: las arcillas que se extraen en el municipio de Los Patios son reconocidas a escala nacional por su excelente calidad en la elaboración de productos cerámicos, esmaltados y no esmaltados. Así mismo, el procesamiento de las arcillas tiene marcada incidencia en la vida económica de la comunidad, con un alto índice de empleo a través de la industria mecanizada y artesanal; esto debido a las características físico-químicas de estos materiales, óptima para la elaboración de productos cerámicos.

Las principales unidades productivas se encuentran ubicadas sobre la carretera que de Cúcuta conduce al municipio de Pamplona, en el sector denominado Los Vados, a 5 km de la ciudad de Cúcuta, en el nororiente del departamento. Entre las principales ladrilleras de este municipio se encuentran:

- Cerámica Támesis S.A.
- Cerámica La Española.
- Ladrillera Sigma Ltda.
- Tejar Los Vados.
- Cerámicas América.

Los terrenos evaluados en este municipio hacen parte de un área ampliamente reconocida por la calidad de las arcillas existente en su corteza terrestre y perteneciente principalmente al Grupo Guayabo.

- Municipio de San Cayetano (Sánchez, 2014). Este municipio está situado en la subregión oriental del departamento, en el área metropolitana y en la zona de influencia fronteriza con la República de Venezuela. El municipio tiene una superficie de 14.198 ha, equivalente al 0,06% del área total de Norte de Santander. Limita por el norte con el municipio de El Zulia, al oriente con el municipio de Santiago, al sur con los municipios de Bochalema y Durania, y al occidente con el municipio de Cúcuta.

El plan de ordenamiento territorial del municipio de San Cayetano presenta la siguiente información en el tema de la arcilla: en la actualidad no se tienen cuantificadas las reservas de arcillas existentes en el municipio. Sin embargo, de acuerdo con el porcentaje de distribución de las formaciones portadoras en el área territorial (35,3% para las formaciones León y Guayabo), se estima que los volúmenes de material son importantes.

Las principales ladrilleras de este municipio son:

- » Cerámica Andina Ltda.
- » Arcillas los Ángeles Ltda.
- » Ladrillera Mejía & Mora Cía. Ltda.
- » Chircal el Zafiro.
- » Tejar La Esperanza de María.

## **2. Economía circular**

### ***2.1 Generación de residuos industriales y el rol de la economía circular***

Los sistemas industriales modernos del siglo XX se fundamentaban en energía generada por carbón, excesiva explotación y consumo no sostenible de los

recursos naturales, y producción de enormes cantidades de residuos, lo que genera graves incidencias en indicadores ambientales tales como cambio climático, acidificación de los océanos, disminución de la biodiversidad, ciclo inestable del nitrógeno, tierras áridas y ríos contaminados (Schell, 2016). Además, estos sistemas convergen en graves problemas sociales y económicos, pues los residuos, considerados generalmente de bajo valor, suelen permanecer en los sitios de producción o extracción sin generar ninguna ventaja económica o social, y en otros casos su disposición se da en ríos, tierra y aire, o en zonas de población pobre.

De estos argumentos emergen proyectos sostenibles que buscan revertir o minimizar el impacto ambiental generado por la industrialización y transformar la huella ecológica actual en activos valiosos. Se busca que tales activos sean capaces de ofrecer importantes beneficios económicos y sociales al reducir las emisiones de GEI, disminuir la generación de residuos e incluirlos dentro de procesos industriales de los distintos sectores productivos, convirtiéndolos en ecosistemas de valor, lo que adicionalmente incrementa el valor de los productos y permite nuevas oportunidades de crecimiento económico y empleo (Illic & Nikolic, 2016; European Environment Agency, 2016). En este sentido, la economía circular será una realidad cada día más presente, impulsando a los sectores productivos, el Gobierno y la sociedad en general a plantearse alternativas que promuevan la conservación del medio ambiente y afrontar la escasez de recursos productivos y energéticos (Lieder & Rashid, 2016).

Existen varias definiciones de lo que es la economía circular (Steffen et al., 2015; Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016; Ellen Macarthur Foundation, 2013). Sin embargo, esta es, en esencia, una alternativa al modelo económico lineal, no sostenible, en el que se supone que los recursos naturales están disponibles, abundantes, fáciles de proveer y desechar. La economía circular plantea minimizar la necesidad de nuevos insumos de materiales y energía, así como los efectos ambientales generados por la extracción de recursos, las emisiones y los residuos, gestionando los recursos naturales de manera eficiente y sostenible a lo largo de su ciclo de vida (transformando los desechos en un recurso). Por tanto, su creación requiere cambios fundamentales en toda la cadena de valor, desde el diseño y la tecnología de los productos hasta los nuevos modelos de negocio (European Environment Agency, 2016).

## ***2.2 Principios y aplicación de la economía circular***

EL modelo de economía circular les otorga valor a los residuos, sin importar si son de naturaleza orgánica o tecnológica, sustentándose en la reutilización inteligente de estos en un modelo cíclico, convirtiéndolos en materia prima para la fabricación de nuevos productos tecnológicos (Lett, 2014). Este nuevo modelo ha

ido llamando la atención alrededor del mundo en la última década, de manera que se encuentran revisiones, publicaciones y casos de estudio al respecto (Yap, 2005; Fang, Côté & Qin, 2006; Preston, 2012; Su et al., 2013; Lett, 2014; Naustdalslid, 2014; Abu-Ghunmi et al., 2016; Shen & Qi, 2012), especialmente en China, país que parece estar comprometido con su implementación (Xinan & Yanfu, 2011).

La economía circular surge principalmente en la literatura a través de dos principios, llamados 3R (Reducir, Reutilizar y Reciclar) (Wua et al., 2014) y 6R (Reutilizar, Reciclar, Rediseñar, Remanufacturar, Reducir y Recuperar) (Jawahir & Bradley, 2016; Geissdoerfer et al., 2017; Winans, Kendall & Deng, 2017). Con base en las diferentes contribuciones teóricas, los principios de la economía circular pueden definirse así:

- Reducir el uso de materias primas, energía, materiales y otros recursos durante la fabricación, las emisiones y la generación de residuos.
- Reutilizar productos finales, o de sus componentes, después de su primer ciclo de vida, en la fabricación de nuevos productos y componentes, con el fin de reducir el uso de materiales vírgenes.
- Reciclar se refiere el proceso de convertir residuos en nuevos materiales o productos.
- Recuperar implica la recolección de productos al final de la etapa de uso, desmontaje, clasificación y limpieza para su utilización en ciclos de vida posteriores del producto.
- Rediseñar implica el diseño de nuevos productos que utilizarían componentes, materiales y recursos recuperados de un ciclo de vida anterior.
- Remanufacturar implica restaurar productos a su estado original o similar a través de la reutilización de tantas partes como sea posible sin que este pierda su funcionalidad.

De lo anterior se puede deducir que la economía circular permite ofrecer productos fabricados con menos recursos, utilizando materiales reciclados, ya sea por el rediseño de productos basados en mejoras incrementales a los productos existentes, o por el diseño de nuevos productos eficientes en recursos que pueden ser reparados, mejorados y reciclados (European Environment Agency, 2016).

### **2.3 La economía circular en la industria manufacturera**

Como resultado de la producción masiva de bienes con alta disponibilidad y bajo costo, soportada por una sociedad consumista, se generan grandes emisiones al medio ambiente y cantidades muy significativas de residuos sólidos. Además, debido al crecimiento de la población mundial y la expansión de los mercados,

se prevé el aumento en la demanda de los recursos naturales, que no podrá ser satisfecha debido a que los recursos del planeta son limitados (Lieder & Rashid, 2016; European Commission, 2014). Por tal motivo, la industria manufacturera no solo enfrenta actualmente la presión de regulaciones ambientales, sino que encuentra riesgos en su posicionamiento por el suministro de recursos, amenazado por la competencia entre industrias (De los Ríos & Charnley, 2016). Tal como lo expone la literatura (Illic & Nikolic, 2016; Lieder & Rashid, 2016; Esmaeilian, Behdad & Wang, 2016), la economía circular se considera una solución para armonizar estas necesidades de crecimiento económico y protección del medio ambiente.

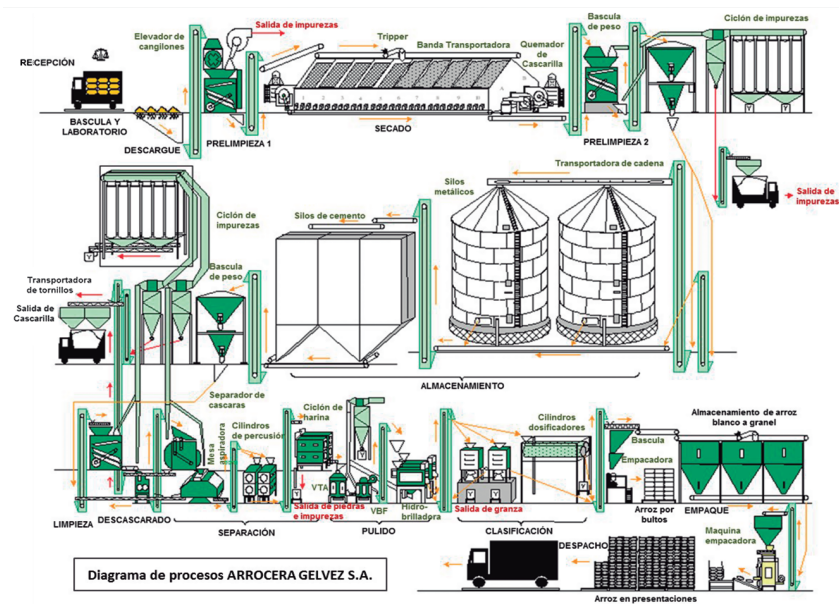
## ***2.4 Nutrientes tecnológicos en la industria cerámica***

Algunos de los proyectos propuestos por varios autores, especialmente dentro del principio del Reciclaje, plantean la creación de zonas especiales de almacenamiento de residuos, para que estos sean recirculados y usados como aditivos para la fabricación de nuevos productos en lugar de usar materias primas naturales, considerándolos como nutrientes tecnológicos (McDonough et al., 2003). Residuos como cenizas de incinerador de biomasa (Pérez et al., 2012b), residuos maderables (Eliche et al., 2012), tierra blanqueada de la industria del petróleo (Eliche & Corpas, 2014), lodos de aguas residuales urbanas (Teixeira et al., 2011), bagazo de caña de azúcar, lodos de la industria cervecera, aguas residuales del molino de aceituna, residuo de café molido (Eliche et al., 2011), cenizas de cisco de café (Acchar & Dultra, 2015), cascarilla de arroz (Soltani et al., 2015), ceniza de la cascarilla de arroz (Guzmán et al., 2013a; Guzmán et al., 2013b), residuos de la industria del papel (Martínez, Cotes & Corpas, 2012), residuos de producción de biodiésel (Eliche et al., 2012), lodo rojo derivado de la industria del aluminio (Pérez et al., 2012a), cenizas volantes de la combustión del carbón (Ahmaruzzaman, 2010; Cultrone & Sebastián, 2009), entre otros, han sido utilizados para la fabricación de nuevos materiales cerámicos, con el fin de aprovechar dichos residuos y/o modificar propiedades físicas y/o mecánicas.

### 3. Procesos industriales de donde se generan los nutrientes tecnológicos empleados

#### 3.1 Proceso productivo del arroz

Figura 1. Diagrama de procesos de una arrocera (Burgos, 2011)



Inicia con el ingreso del vehículo cargado con arroz paddy proveniente de los cultivos. Se toman muestras directamente del vehículo para establecer la existencia o no de grano ambarino (dañados por el calor) mediante la limpieza, descascarado y pulido de la muestra en laboratorio. Antes de proceder con el descargue del vehículo se realizan análisis de humedad e impurezas, con lo que se valoriza el arroz. Una vez aceptado el arroz, se descarga en las tolvas de recibo y es dirigido por medio de bandas transportadoras y elevadores de cangilones al proceso de prelimpieza, donde se retiran impurezas como: pedazos de palos, tallos, hojas, espigas, semillas de otras plantas, terrones, piedras, etc., que son posteriormente desechados.

El arroz prelimpiado se lleva por medio del elevador de cangilones al triper, el cual lo deposita en los silos de secado, donde se apila en capas de 70-90 cm de alto sobre mallas perforadas que permitan el paso forzado de aire caliente a 35-40 °C durante 24 a 30 horas. Este proceso garantiza rendimiento del arroz en el proceso de trillado y la calidad del producto final, por lo que deben realizarse pruebas de humedad constantemente a partir de las 12 horas de secado, hasta lograr una humedad de 12-16%. El arroz seco se descarga y, por medio de bandas



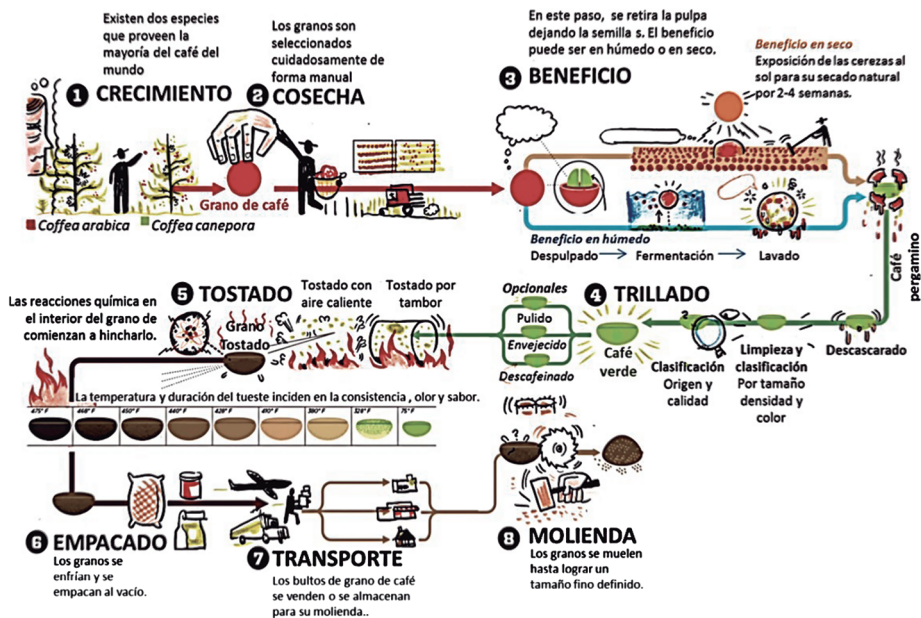
transportadoras y elevadores de cangilones, se almacena en silos (Leal, 2012; Contreras, 2008).

De acuerdo a las necesidades de producción, el arroz seco almacenado pasa al proceso de trillado, iniciando con el descascarado por medio de rodillos que giran a gran velocidad. Del efecto del choque del arroz seco con los rodillos se obtienen dos subproductos: la cascarilla de arroz y el arroz integral. El arroz proveniente de la descascaradora pasa a una aventadora que separa el grano de la cascarilla, la cual es atrapada por ciclones y conducida por tuberías hacia silos de almacenamiento, de donde posteriormente se realiza el descargue para su venta. Los granos obtenidos son una mezcla de arroz paddy y arroz integral, los cuales se separan por densidad en una mesa densimétrica, de donde los granos integrales pasan al proceso de blanqueamiento, mientras que los granos de paddy (con cáscara) regresan al proceso de descascarado y las porciones de mezcla retornan al proceso de separación (Leal, 2012; Contreras, 2008).

En el proceso de blanqueamiento se remueve el salvado del grano de arroz. De este modo se obtiene el arroz blanco entero y partido y, como subproducto, la harina de pulimento. La blancura del grano se define en el proceso de pulimento, donde se fricciona el arroz (sin salvado) con piedras en pulidores verticales VTA y se rocía con agua en polichadores verticales VBF. Posteriormente es separado y clasificado como: arroz entero, arroz partido (granza) y harina de arroz (durante este proceso también se eliminan impurezas o granos de arroz defectuosos). Finalmente, el arroz se empaca según los requerimientos del mercado (Leal, 2012; Contreras, 2008).

### 3.2 Proceso productivo del café

Figura 2. Proceso productivo del café (Greenberg, 2014)



Las prácticas de poscosecha, conocidas en muchos lugares como beneficio y secado, varían de acuerdo con el país, el tipo de cultivo y la especie de café. En todo caso, transforman la cereza en un producto seco (separando el mesocarpio y el endocarpio), listo para el proceso de trilla. El beneficio puede ser en húmedo o en seco; el primero consiste en la exposición de las cerezas al sol durante varios días hasta alcanzar cierto grado de humedad, mientras que el segundo incluye: el despulpado, la fermentación, donde se retira el mucilago, el lavado del grano para retirar totalmente el mucilago y el secado del grano al sol o en secadores mecánicos. Para ambos métodos, al resultado del café seco se le denomina café pergamino (Café de Colombia, s.f.).

El café pergamino, almacenado en bultos de fique, se recibe en planta y se le verifica por inspección visual su color, aroma, uniformidad, tamaño y color, además de algunos análisis de laboratorio para verificar su calidad (Martínez & Becerra, 2007). Posteriormente, se lleva por medio de elevadores de cangilones hacia el silo de almacenamiento, donde, dependiendo del programa de producción, se descarga al monitor de café para eliminar todo tipo de impurezas resultado del beneficio, almacenamiento y transporte, y proceder con el proceso de trillado (Pinzón, 2008). En la máquina de trillado se elimina el pergamino o cisco para obtener el café almendra o café verde, al rozar el café pergamino con los rodillos del tambor (Martínez & Becerra, 2007). Los extractores de cisco se encuentran en

diversos puntos del proceso y transportan todo el cisco a un silo (Pinzón, 2008). El cisco constituye alrededor del 12% del peso del grano en base seca. Una vez trillado, el grano verde se selecciona y clasifica cuidadosamente, teniendo en cuenta su tamaño, peso, color y apariencia física (defectos) (Café de Colombia, s.f.; Pinzón, 2008).

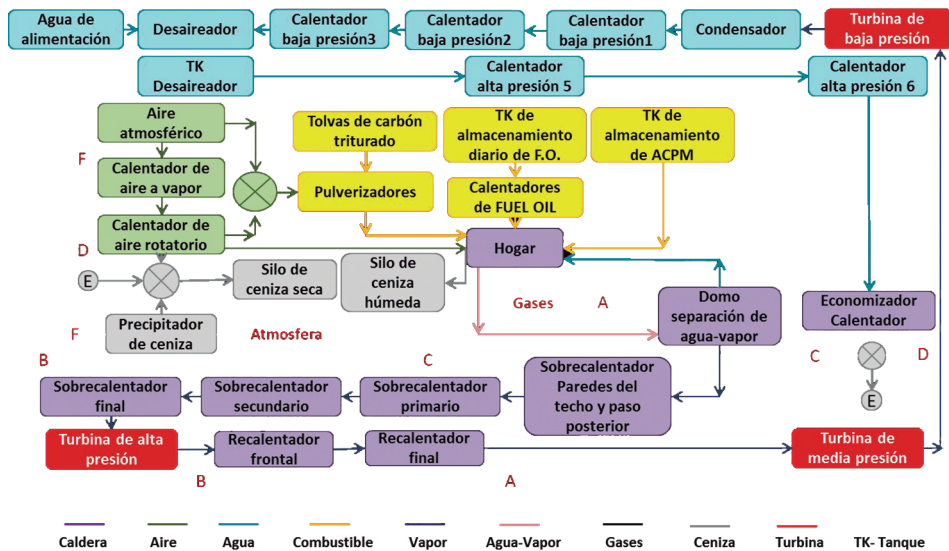
El café verde o almendra es el insumo para la elaboración del café tostado en tostadores a base de gas o electricidad, que inicialmente secan el café verde a temperaturas entre 125-187 °C y luego lo tuestan hasta que este empieza a reventar a temperaturas superiores a 200°C, generando cambios físico-químicos que desarrollan el aroma y sabor del café (Café de Colombia, s.f.; Pinzón, 2008). El grado de tueste define el color, el aroma y el sabor del café, por lo que depende del tipo de producto que se vaya a obtener (Martínez & Becerra, 2007).

El café tostado se deja reposar por 20-30 min (Martínez & Becerra, 2007) o se enfría haciendo pasar una corriente de aire frío alrededor de los granos hasta alcanzar temperaturas por debajo de 150 °C min (Mejía & Montes, 2013), para pasarlo al proceso de molido, donde se reduce el tamaño del grano tostado hasta obtener un polvo fino, que será almacenado en silos desgasificadores para eliminar los gases que se generan en las anteriores etapas del proceso, lo que puede llevar entre 3 y 12 horas dependiendo de si el café está en movimiento o no (Pinzón, 2008). Por último, el café molido es empacado al vacío en bolsas de polipropileno biorientado metalizado para proteger al producto tanto de los factores ambientales, químicos o físicos como de la manipulación, el transporte y el almacenamiento (Martínez & Becerra, 2007; Mejía & Montes, 2013).

### ***3.3 Proceso productivo de la central termoeléctrica***

El proceso de producción de electricidad de la central termoeléctrica está representado en la figura 3 y se explica a continuación.

**Figura 3. Diagrama funcional del generador de vapor de la central termoeléctrica (López, Tarantino & Aranguren, 2010)**



El combustible primario de la central termoeléctrica es el carbón bituminoso, el cual es recibido en volquetas de 10 a 12 toneladas de capacidad neta y se almacena en un patio con área de 2,84 hectáreas (llegando a almacenar la cantidad suficiente que permita la operación continua hasta por 60 días). Posteriormente, es conducido mediante una cinta transportadora a través de alimentadores vibratorios hacia la cámara de triturado, donde en principio se remueven los residuos metálicos que pueda contener el carbón con un separador electromagnético, para ser triturado a tamaños inferiores de 20 mm, con el fin de aumentar la superficie de combustión y así mejorar la eficiencia de su combustión. Al salir de la cámara de trituración, el carbón se pasa por medio de bandas transportadoras hacia los alimentadores gravimétricos que suministran el carbón a los pulverizadores, y a su vez a los quemadores de la caldera, donde se mezcla con aire caliente ( $127 \text{ kg/cm}^2$  a  $538 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para su combustión (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008; Termotasajero S.A. E.S.P., s.f.; UNESA, s.f.).

La caldera está formada por numerosos tubos pertenecientes a los sistemas del tambor de vapor, hogar, sobrecalentadores, recalentador y economizador, por donde circula agua, que es convertida en vapor a alta temperatura. En el hogar de la caldera se disponen los ignitores o antorchas, quemadores de ACPM, quemadores de fuel oil y quemadores de carbón, los cuales en reacción con el aire crean un remolino de fuego. Las cenizas generadas por la combustión se manejan de dos formas: (1) la ceniza pesada cae al fondo del hogar de la caldera, y es transportada por bandas transportadoras a un silo que posee una tolva cónica en su parte inferior, por donde se descarga a volquetas para almacenarlas en el

patio de cenizas, y (2) la ceniza volante de los gases producidos por la combustión se deposita en tolvas que están debajo del economizador, los calentadores y los precipitadores electrostáticos, y son transportadas por alimentadores presurizados hasta el silo de almacenamiento, que cuenta con descargadores rotatorios, donde la ceniza se humedece con agua para evitar que se disperse en el ambiente en el trayecto hacia el patio de cenizas (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008). Estas últimas reciben el nombre de cenizas volantes, siendo el subproducto mayoritario, con un porcentaje que varía entre 80-90% (Argiz, 2014).

El vapor de agua generado (495 toneladas/hora de vapor a 538 °C y 127 kg/cm<sup>2</sup>) entra a la turbina de alta presión y se recalienta para entrar a la turbina de presión media y posteriormente a la de presión baja, de donde sale a 42,5 °C y 63,4 mm Hg, y pasa finalmente al condensador, haciendo girar el eje de estas turbinas, que se mueve solidariamente con el rotor del generador eléctrico. Allí la energía mecánica rotatoria es convertida en electricidad de media tensión y alta intensidad, la cual es elevada al transformador y se envía a la red general de transmisión (subestaciones de Bucaramanga, Belén y San Mateo) mediante cables trenzados de aluminio endurecido (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008).

El agua requerida para el enfriamiento y operación de la planta se toma del río Zulia mediante bombas de tornillos, las cuales envían el agua a un desarenador encargado de retirar las partículas en suspensión de tamaño superior a 0,12 mm. El agua desarenada pasa al tanque de carga, donde es succionada por bombas de circulación hacia la estación secundaria. Esta agua se usa para el enfriamiento del condensador, el sistema de enfriamiento, la planta de tratamiento de agua, el sistema contra incendio, el sistema de manejo de cenizas, el lavado de los tamices rotatorios y la lubricación de las bombas de agua de circulación (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008).

### **3.4 Proceso de fabricación de productos cerámicos**

La fabricación de productos cerámicos parte de una serie de procesos que permiten aprovechar uno de los recursos naturales más abundantes e importantes de la región del Norte de Santander, como lo es la arcilla. Se realiza la transformación de este recurso natural en materiales de mampostería de gres que posteriormente se convertirán en insumos para el sector de la construcción a nivel regional, nacional e internacional (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).

- **Materias primas:** A partir de la caracterización del material de los diferentes frentes de explotación de arcilla (figura 4), materia prima necesaria para el proceso de producción de materiales cerámicos y de gres, se realiza la mezcla apropiada de estos materiales arcillosos, según las características de color, textura y demás componentes físicos y mineralógicos. Así se obtiene el insumo principal para iniciar con el proceso de producción.

La mezcla necesaria de la materia prima incluye diferentes tipos de arcilla. Estas son almacenadas según sus características químicas en silos metálicos de almacenamiento con capacidades adecuadas para tener un stock de trabajo. Posteriormente, y luego de ser dosificadas por medio de tolvas básculas digitales en la medida exacta que se necesite, se realiza la mezcla de estas arcillas, que dan paso a una arcilla compuesta (pasta) adecuada para el posterior proceso de fabricación: trituración y molienda.

**Figura 4. Frente de explotación de la materia prima**



- **Trituración y molienda:** En esta etapa del proceso, y después de la recepción y almacenamiento de materias primas, el objetivo fundamental es disminuir el tamaño de partícula para su manejo en las etapas posteriores (figura 5). Por medio de un molino de martillos, se tritura la arcilla hasta un tamaño de grano lo suficientemente pequeño (hasta un aproximado de 2 mm o malla 10) para darle acabados superficiales al producto final. Se inicia con una tolva alimentadora, que es un silo metálico en forma de embudo que contiene una banda transportadora en su parte inferior, la cual transporta la arcilla contenida en el silo. Este equipo se encarga de almacenar/alimentar la arcilla mezclada en tamaños que van desde los 2 cm hasta los 15 cm de diámetro (en esta etapa se registra la cantidad de materia prima que se va a utilizar a lo largo de todo el proceso). Luego esta pasa por una banda transportadora que alimenta un triturador primario por medio de un rompeterrones (desintegrador de mandíbulas), que se encarga de bajar el tamaño hasta máximos de 2 cm. Seguidamente, viene un sistema de bandas transportadoras que alimentan los molinos con capacidades adecuadas para la producción, el cual baja el tamaño de partículas entre 1,5 y 2 mm. Por último, la arcilla ya molida se almacena en una serie de silos metálicos que posteriormente alimentarán al proceso de moldeo.



**Figura 5. Trituración y molienda de la materia prima (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**

- **Humectación y moldeo:** Luego de ser triturada y molida la arcilla, se sigue con la preparación para darle la forma requerida según el producto que se desee producir. Se toma la arcilla del silo de almacenamiento del área de molienda y se hace llegar a una mezcladora o amasadora de doble eje, la cual le agrega un porcentaje de agua de forma manual (17% al 20% de agua) para brindarle maleabilidad y darle la forma requerida por medio de la extrusión. Luego de ser humectada y amasada (figura 6), se hace pasar la arcilla por medio de laminador. Con este equipo lo que se busca es darle una trituración final y preparar la arcilla humectada en forma de láminas para mejorar comportamiento en la extrusión. Finalmente, y después del laminado y por medio de una banda transportadora, pasa a extrusora por vacío, la cual le da forma final al producto requerido. Para ese fin, hace pasar la arcilla por medio de un tornillo que termina en un molde que da la forma al producto. Luego de extruido, se hace el corte del producto por medio de una cortadora automática que se programa según el tamaño requerido. Seguidamente, el material pasa por medio de un mecanismo automático que se encarga de apilarlo y transportarlo.

**Figura 6. Humectación y moldeo (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**

- **Secado:** En esta etapa se recibe el producto con la forma requerida y con las condiciones de humedad dadas en la etapa de humectación. Esta humedad (contenido de agua en la arcilla) debe ser retirada para posteriormente pasar al proceso de cocción. Luego de que se ha descargado el producto sobre una estantería (en el proceso de moldeo), se traslada hasta el secadero tipo túnel de cámaras (figura 7), el cual funciona con calor residual de la etapa de cocción (este proceso es conocido como cogeneración). En este punto lo que se hace es retirar el agua agregada en el proceso anterior (moldeo) por medio de ventilación forzada al interior de los túneles de secado y variando la temperatura a lo largo de este. Este secadero es operado de forma automática por medio de controladores lógicos programables o similares, que a su vez controlan compuertas con mecanismos automáticos para regulación de temperaturas y caudales requeridos según la curva de Bigot que se tenga estandarizada. También contienen variadores de velocidad para regular la velocidad de ventilación y regímenes de vientos dentro del secadero.

En la etapa de cogeneración se reutiliza cerca del 90% del calor residual de la etapa de cocción, lo que implica un uso menos intensivo del combustible en esta etapa, que para nuestro caso es el carbón, lo que conlleva a menos emisiones de gases a la atmósfera, haciendo el proceso amigable con el medio ambiente.

**Figura 7. Secado (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)**

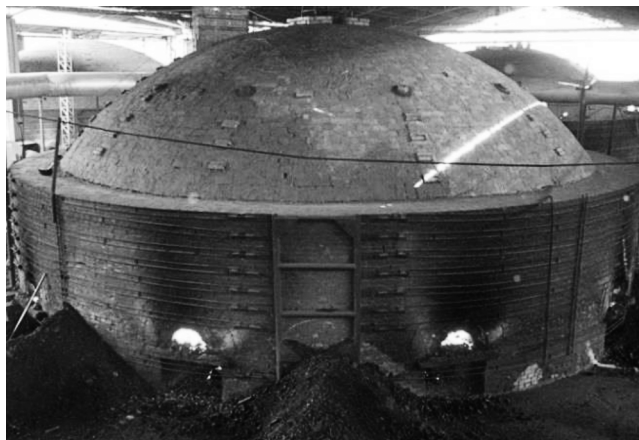


- **Cocción:** Es la última etapa, que consiste en aumentar la temperatura del producto, el cual está seco, para darle propiedades mecánicas aptas para su uso como la resistencia a la rotura, resistencia a la abrasión, entre otras. El material que viene del secadero se dispone dentro del horno colmena o de llama invertida (figura 8), utilizados para la quema de productos especiales. En este punto se puede vitrificar, es decir, darle a la arcilla una especie de vidriado superficial utilizando NaCl. Sin embargo, el Na reacciona con la arcilla, dejando el Cl libre para que, con la humedad del ambiente, forme HCl, lo que convierte



este tipo de hornos en uno de los más contaminantes en su tipo. Aun así, su uso es muy extendido en Norte de Santander y en general en la zona de la cordillera Oriental (en el país existen más de 625 hornos de llama invertida), y se observa que cumplir con las normas ambientales en estos casos resulta muy costoso debido a los procesos y equipos adicionales que hay que utilizar para controlar el proceso de combustión de forma adecuada.

**Figura 8. Cocción en el horno colmena**



- **Embalaje y empaque:** Luego de que el producto sale de la etapa de cocción y tiene todas las propiedades requeridas para su uso, se procede a empacarlo para su despacho. El material proveniente del horno se descarga de las vagonetas y se organiza de tal manera que sea fácilmente transportable por medio de bandas transportadoras, en las cuales están dispuestas personas para hacer el control de calidad final al producto y luego apilarlo en unidades de metros cuadrados para su posterior empaque, el cual se realiza mediante el recubrimiento de plástico del producto por metro cuadrado. Finalmente, el producto es almacenado en las bodegas según tamaño, forma, color y texturas, y queda listo para ser despachado.

## **4. Nutrientes tecnológicos producidos en la región**

### **4.1 Residuos orgánicos**

- **Cascarilla de arroz:** En el departamento se siembra arroz en nueve de los cuarenta municipios que lo componen: Cúcuta, El Zulia, Tibú, San Cayetano, La Esperanza, Puerto Santander, Villa del Rosario, Los Patios y Santiago, agrupando un área de producción de 14.200 hectáreas cultivadas por el sistema de riego (DANE, 2016). En la tabla 1 se muestran las empresas productoras de arroz de la ciudad de Cúcuta.

**Tabla 1. Empresas productoras de arroz de Cúcuta**

Nombre	Ubicación
Arrocera Agua Clara S.A.S.	Calle 7 N.º 5A-66 Zona Industrial
Arrocera San Valentín	Calle 6N 4-102 Zona Industrial
Arrocera La Palestina S.A.	Avenida 4 7N-185 Zona Industrial
Arroz Gelvez S.A.S.	Autopista Aeropuerto Av 7ª N.º 18N-87
Arrocera Agua Blanca S.A.	Avenida 4 7N-185 Zona Industrial
Arroz Zulía	Avenida 6 N.º 13-06 El Salado
Federación Colombiana de Arroceros	Avenida 5 1ª-53 Cúcuta
Molinos Roa S.A.	Avenida 10 26 B-68 Cúcuta

La cascarilla de arroz tiene forma de canoa y superficie rugosa, y presenta un color amarillento. Su longitud depende de la variedad, y está entre 8 a 10 mm de largo por 1 a 2 mm de ancho, que corresponde del 30 al 40 % de su longitud. De acuerdo con su tamaño, una cascarilla pesa entre 2,5 y 4,8 mg (Quiceno, 2010).

La cascarilla y la cutícula o polvillo de arroz son dos desechos agroindustriales subproductos del procesamiento de arroz, de los cuales la primera representa aproximadamente el 20% (Ahumada & Rodríguez-Páez, 2006). La cascarilla de arroz tiene diversos usos a nivel industrial, tales como: producción de ácido acético y acetona por destilación, producción de butanol, acetona y etanol por hidrólisis, combustible alternativo, adición en mezclas para materiales de construcción, ladrillos refractarios, abono, plásticos linóleos, producción de materiales abrasivos y silicatos alcalinos.

Chur (2012) resalta entre los porcentajes más significativos de la cáscara de arroz la cantidad de cenizas y su elevado contenido de materia volátil, comparándolo con los carbones (tabla 2).

**Tabla 2. Parámetros de los diferentes tipos de arroz**

Parámetros (%)	Tipos de arroz			
	Canadá	California, USA	China	Colombia
Material volátil	66,4	63,5	52,0	65,6
Carbono fijo	13,2	16,2	25,1	17,9
Ceniza	20,0	20,3	16,9	16,7

Fuente: Chur (2012, p. 10).

Es importante recordar que el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible del material (Echeverría & López, 2010). Las tablas 3 y 4 resumen las caracterizaciones física y química de la cascarilla de arroz.

**Tabla 3. Caracterización física de la cascarilla de arroz**

<b>Propiedades y características físicas</b>	
Estado físico	Sólido granulado
Color	Beige
Olor	Olor característico
Longitud (mm)	4-14
Ancho (mm)	2-4
Espesor promedio ( $\mu\text{m}$ )	50
Peso específico (mg)	2.944-3.564
Solubilidad en el agua	Insoluble
Granulometría sobre malla #4 (%)	0
Granulometría sobre malla #8 (%)	4
Granulometría sobre malla #10 (%)	18,6
Granulometría sobre malla #20 (%)	74,6
Densidad verdadera ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,42
Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,65
Densidad a granel ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,10
Porosidad del combustible (%)	54
Fracción de espacios libres (%)	85
Fase gaseosa teórica (%)	93

Fuente: Echeverría y López (2010, p. 73).

**Tabla 4. Caracterización química de la cascarilla de arroz**

<b>Propiedades y características químicas</b>	
Humedad (%)	7,41
Cenizas (%)	19,39
Materia volátil (%)	57,09
Carbono fijo (%)	16,11

Propiedades y características químicas	
pH a 25 °C	7,1
Fibra: celulosa (%)	45,38
Proteínas (%)	3,59
Extracto con éter: grasa (%)	0,4
Carbohidratos totales (%)	69,23

Fuente: Echeverría y López (2010, p. 73)

• **Cisco de café:** La Federación Nacional de Cafeteros del departamento de Norte de Santander (2014) expone que el departamento está conformado por 36 municipios cafeteros que tienen sembradas 37.996 hectáreas de café, con una producción anual estimada de 15 millones de café pergamino seco. El 87% de esta área presenta cultivos tecnificados, y el 13% cuenta con cultivos tradicionales. La población cafetera está conformada por pequeños productores cuyas fincas tiene un área promedio en café de 0,5 a 3,0 hectáreas. La caficultura de la región está ubicada en la zona óptima para café entre los 1.200 m.s.n.m. y los 1.800 m.s.n.m.

Vásquez (2015) expone que la cascarilla de café (también conocida como cisco o pergamino de café), proveniente del grano de café, se obtiene del proceso de trillado (descascarado) y constituye alrededor del 12% del peso del grano en base seca. Palacios y Betancurt (2005) exponen que es una envoltura cartilaginosa de color blanco amarillento de aproximadamente 100 micrómetros de espesor y que corresponde al endocarpio (pergamino) del fruto, cuya semilla se encuentra en una forma suelta dentro de esta.

El endocarpio del fruto, constituido por la cascarilla (cisco) y la película plateada, es un subproducto con excelentes propiedades combustibles. El cisco representa en peso el 4,2% del fruto seco (Montilla *et al.*, 2008).

Vásquez (2015) expone que en promedio la humedad de la cascarilla de café corresponde al 13,56% del peso, en base seca. Este resultado fue comparado con el de varios autores que mencionan un nivel mínimo de humedad del 10% hasta un máximo de 12,5%, variación que se debe principalmente a la variedad de café de donde proviene el residuo.

La cascarilla de café tiene la siguiente composición química: contenido de humedad de un 5 a 8%, materia seca (92,8%), extracto etéreo (0,6%), nitrógeno (0,39%), cenizas (0,5 a 0,6%), densidad aparente promedio de 0,33 g/cm<sup>3</sup>, y contenido de celulosa del 57% de cada 50 g obtenidos por kilogramo de café cereza (Montilla *et al.*, 2008).

De acuerdo a estudios realizados por Palacios y Betancurt (2005), el cisco o cascarilla de café presenta las siguientes propiedades:

- » Poder calorífico de aproximadamente 4.245,8 kcal/kg.
- » Porcentaje de cenizas de aproximadamente 0,6%.
- » Humedad promedio de 5,4%.
- » Material volátil de 87,7%.
- » Densidad aparente promedio de 0,33 g/cm<sup>3</sup>.
- » Tamaño de las partículas que oscila entre 0,425 y 2,36 mm de diámetro.

En la tabla 5 se observan los residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1.000 g de café cereza según Valencia (2010).

**Tabla 5. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización del café**

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (en gramos)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucilago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Cisco y película plateada	42
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	22
Pérdida acumulada		924

Tomando una producción promedio nacional de siete millones de sacos de café pergamino de trilla, equivalentes a 420.000 toneladas, 25.000 toneladas corresponderían a cisco de café. En Colombia no se le ha dado a la cascarilla o cisco de café un uso diferente al de combustible para alimentar hornos. Sin embargo, se han realizado investigaciones en donde se encontró que de este material se pueden obtener plásticos, cartones, baldosines, rayón y viscosa; además, si se combina con la pulpa, se podría obtener acetona, alcohol metílico, amoniaco, carbón, alquitrán, abonos y ácido acético. En la tabla 6 se muestra la composición química del cisco de café (Valencia, 2010).

**Tabla 6. Composición química del cisco de café**

%	Café Arábica (%)	Café Robusta (%)
Extracto etéreo	0,40	-
Proteínas totales	1,50	2,20

%	Café Arábica (%)	Café Robusta (%)
Celulosa bruta	50,20	60,20
Hemicelulosa	11,60	7,60
Azúcares	21,30	-
Pentosa	26,00	-
Cenizas	1,00	3,30
Silicio	15,70	-
Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,40	-
Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	13,60	-
Calcio	19,60	-
Magnesio	12,20	-
Sodio	3,40	-
Potasio	18,00	-
Grasas	0,60	-

## 4.2 Residuos inorgánicos

- **Cenizas volantes:** La Asociación Mundial del Carbón reportó en 2015 que el carbón se ha usado como combustible en la generación de más del 41,1% de la electricidad del mundo y en más del 70% de acero a nivel mundial, alcanzando un uso de 8.022,5 toneladas métricas (Mt) en 2014. En este panorama, Colombia se encuentra en el top diez de los productores de carbón de vapor con 83,5 Mt (World Coal Association, 2016), de las cuales se exportan más del 90%. El Ministerio de Minas y Energía y la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia) (2012) han reportado por su parte que las reservas de carbón en Colombia en 2012 eran de 16.436 millones de toneladas, lo que representa 92,44 años más de explotación. El 95% de dichas reservas se ubica en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca.

La combustión de este mineral genera diferentes subproductos o desechos, como cenizas de fondo, escoria, cenizas volantes, entre otros. En particular, las cenizas volantes corresponden a la parte inorgánica del carbón, son ricas en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y se obtienen entre los 1.200 y 1.700 °C (Mejía, Rodríguez & Mejía, 2014) durante la precipitación electrostática o mecánica del polvo suspendido en los gases de la combustión (Caballero & Medico, 2013). En el caso de las termoeléctricas, este residuo se genera por la combustión de carbón en la producción de energía (Peña & Ortega, 2014; Rajamannan *et al.*, 2013). Por otro lado, Ruiz *et al.* (2000) exponen que en la industria cerámica se

han usado cenizas volantes clase F, para elaborar ladrillos refractarios y pisos, cementos geopoliméricos de alta temperatura y en la producción de zeolitas por procesos hidrotermales”.

Ruiz *et al.* (2000) anotan que, en las centrales térmicas, “un mínimo del 70%-75% de la ceniza presente en el carbón se recoge en forma de cenizas volantes, y por término medio se producen alrededor de 700 toneladas anuales de cenizas volantes por MW de potencia instalada”. Esto se anuda con los resultados del informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano de diciembre de 2015 (Sistema de Información Eléctrico Colombiano, 2015), que indica que en Colombia anualmente se producen 946.400 toneladas de cenizas volantes, y 229.600 toneladas en Norte de Santander. Caballero y Médico (2013), por su parte, señalan que la producción de cenizas volantes representa hasta un 80% del total de cenizas generadas y, en esa misma línea, Yu *et al.* (2012) afirman que cerca del 80% de los minerales del carbón se convierten en cenizas volantes durante el proceso de combustión.

Por su parte, la escoria o cenizas de hogar son aquellas que, por gravedad, caen al fondo durante la combustión y se diferencian de las volantes principalmente por el tamaño de partícula.

Varios estudios reportan el desarrollo de nuevos materiales de construcción a partir de residuos, entre ellos las cenizas volantes, para la mejora de propiedades de los materiales de construcción; sin embargo, muy pocos se enfocan en las baldosas cerámicas (Kockal, 2012). Es importante resaltar que, tal como lo afirma Ahmaruzzaman (2010), las características químicas de las cenizas volantes varían dependiendo del tipo y composición mineralógica del carbón (antracita, bituminoso, subbituminoso, lignito) y de las variables del proceso de combustión donde son generadas, tales como temperatura, tiempo de residencia del carbón, entre otras, y su color varía de gris a negro dependiendo de su contenido de inquemados de carbón.

Según la ASTM C618 (American Society for Testings and Materials, 2012), otras de las variables que inciden sobre las características físico-químicas de este residuo son el grado de pulverización del carbón, los aditivos utilizados para ayudar a los procesos de combustión o poscombustión y los métodos de recolección, almacenamiento y transporte. En la tabla 7 se expone la composición química de varias cenizas volantes analizadas por diversos autores.

Tabla 7. Composición química de diferentes cenizas volantes

Óxido	(%)peso)											
	Eraring Power (Australia) (Yu et al., 2012)	Angang No 2 (China) (Yu et al., 2012)	Collie (Australia) (Temujon, Rickard & Riessen, 2013)	Eraring (Australia) (Temujon et al., 2013)	Tarong (Australia) (Temujon et al., 2013)	Bagannur (Mon-golia) (Temujon, Rickard & Riessen, 2013)	Shivee ovo (Mon-golia) (Temujon, Rickard & Riessen, 2013)	Termoelectrica (Colombia) (González et al., 2014)	Tunchilek (Turquia) (Kockal, 2012)	Seytomer (Turquia) (Kockal, 2012)	Perak (Malasia) (Fauzi et al., 2016)	Terengganu (Malasia) (Fauzi et al., 2016)
SiO2	60,0	61,6	51,38	65,47	73,68	55,2	33,85	51,49	60,19	52,12	20,7	55,23
Al2O3	29,0	24,5	26,9	23,0	22,4	14,15	12,15	26,37	18,11	14,06	9,01	25,95
Fe2O3	3,3	5,4	13,2	4,03	0,64	10,55	9,89	9,37	10,28	12,64	32,0	10,17
CaO	1,4	3,5	1,74	1,59	0,08	15,0	30,8	0,63	2,63	6,41	27,1	1,32
K2O	0,93	1,2	0,9	1,68	0,53	1,31	0,73	1,05	1,61	2,03	2,51	1,59
TiO2	1,1	1,0	1,47	0,84	1,28	0,25	0,35	1,08	0,91	0,75		
MgO	1,4	0,7	1,41	0,51	0,17	1,56	6,41	0,32	3,57	4,76	2,05	0,31
Na2O	0,4	0,4	0,41	0,56	0,09	-	-		0,10	0,66	1,00	1,59
P2O5	0,03	0,03	1,09	0,27	0,08	-	-	0,13	0,26	0,14		
SiO			0,23	0,05	0,001	0,25	0,44					
MnO						0,34	1,185		0,14	0,11		
SO3	1,0	0,1				1,23	3,65		1,41	3,02	1,61	0,18
V2O5	0,04	0,04						0,13				
Cr2O3								0,03	0,11	0,09		
*PF			0,44	1,37	0,79	1,05	0,30	9,23	0,77	3,00	2,97	5,25
ASTM C618-12			F	F	F	C	C	F	F	F	C	F
Tipo de carbón	B	L				L	L					



Como se puede observar, las cenizas volantes están compuestas en su mayoría por compuestos de sílice, alúmina, hierro y calcio, tal como lo expone la American Coal Ash Association Educational Foundation (s.f.). El contenido de estos compuestos está influenciado por el tipo de carbón de origen, y se puede determinar tal como lo expone Ahmaruzzaman (2010) (tabla 8).

Las cenizas provenientes de carbón bituminoso tienen como componentes principales sílice, alúmina, óxido de hierro, y calcio, con cantidades variables de carbono, que se mide por las pérdidas por fuego, mientras que las cenizas de carbones lignitos y subbituminosos se caracterizan por concentraciones más altas de calcio y óxido de magnesio, y menor contenido de sílice, óxido de hierro y carbono. Las cenizas de carbón antracita son muy poco comunes, ya que este tipo de carbón no suele usarse en calderas.

**Tabla 8. Rangos normales de la composición química de las cenizas volantes producidas por diferentes tipos de carbón**

Componente (% peso)	Bituminoso	Subbituminoso	Lignito
SiO <sub>2</sub>	20-60	40-60	15-45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-35	20-30	10-25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO <sub>3</sub>	0-4	0-2	0-10
Na <sub>2</sub> O	0-4	0-2	0-6
K <sub>2</sub> O	0-3	0-4	0-4
PF	0-15	0-3	0-5

Fuente: Ahmaruzzaman (2010, p. 330).

La composición química de este residuo no solo permite identificar el tipo de carbón del cual se originó, sino que permite clasificarlo bajo la norma ASTM C618 como cenizas clase C o clase F (ver tabla 9), lo cual determina su aptitud como material puzolánico. Las cenizas clase F, generalmente originadas por carbones bituminosos o antracitas, contienen más de 70% en peso de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y tienen bajo contenido en cal, además de caracterizarse por tener alta actividad puzolánica (endurecimiento cuando se hace reaccionar con Ca(OH)<sub>2</sub> y agua), mientras que las cenizas clase C, caracterizadas por poseer propiedades cementantes (autoendurecimiento cuando se hace reaccionar con agua) e hidráulicas, tienen una relación SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre el 50 y el 70% en peso y alto contenido de cal, que se produce normalmente a partir

de la combustión de carbones lignitos o subbituminosos (Kockal, 2012; Ahmaruzzaman, 2010; American Society for Testing and Materials, 2012; Temuujin *et al.*, 2013; González *et al.*, 2014; Fauzi *et al.*, 2016; Arguiz, 2014). En cuanto a su composición mineralógica, las cenizas bajas en Calcio están compuestas principalmente de cuarzo, mulita y magnetita (Ha *et al.*, 2016; Gómez, 2011), y las cenizas con alto contenido de Ca están compuestas de cuarzo, C<sub>3</sub>A, CS y C<sub>4</sub>AS (Ahmaruzzaman, 2010).

**Tabla 9. Especificaciones para las cenizas según norma ASTM C618**

	<b>Clase C (%)</b>	<b>Clase F (%)</b>
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>50	>70
CaO	>10	<10
SO <sub>3</sub>	<5	<5
Álcalis disponibles como NaO <sub>2</sub>	<1,5	<1,5
Pérdidas por fuego	<6	<6
Humedad	<3	<3

Fuente: ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2012).

• **Inquemados de carbón:** La combustión del carbón en los hornos colmena genera grandes cantidades de ceniza como residuo, las cuales contienen carbón sin quemar que comúnmente se denomina *inquemado*. Este tiene un tamaño de partícula mayor que el material mineral y, por lo tanto, se puede separar en un porcentaje considerable para su uso como combustible o como precursor para la producción de carbón activado, y para la utilización del material mineral en la industria de la construcción ya que se le ha retirado la materia orgánica que imposibilita su uso (Velásquez *et al.*, 2007). La disposición final de estos desechos resulta siendo un grave problema medioambiental para la industria cerámica de la región.

Bartoňová (2015) expone que, si bien los niveles de inquemados de carbón en las cenizas es muy variado, se puede establecer que será por lo menos del 1%. Otros autores exponen contenidos entre 1-12% (Mehment & Kizgut, 2016), el 23% (Senneca, 2008) e incluso hasta el 50% (Velásquez *et al.*, 2007). En cualquier caso, se ha establecido que el contenido de inquemados en las cenizas está determinado por diversos factores que pueden clasificarse dentro de dos grupos:

- » Características del carbón: tipo de carbón, granulometría del carbón, contenido de materia volátil, humedad, porosidad, fragmentación, superficie específica, cocombustión de carbón (mezcla con combustibles alternativos) (Velásquez *et al.*, 2007; Bartoňová, 2015).

» Diseño del sistema de combustión y las condiciones de funcionamiento: tipo de unidad de combustión, tipo y número de quemadores, tecnología de la combustión, temperatura de combustión y presión, tiempo de residencia, disponibilidad de oxígeno, velocidades de flujo de calor, patrones irregulares de llama (Bartoňová, 2015; Mehment & Kizgut, 2016).

La separación de los inquemados del carbón de las cenizas volantes se puede realizar por procedimientos en húmedo (como separación por densidad, flotación de la espuma y de aglomeración de aceite) o en seco (como tamizado, fluidización incipiente y separaciones triboelectrostáticas). Estos últimos no representan ningún riesgo en cuanto se trata de contaminación de la muestra, contrario a las técnicas en húmedo (Bartoňová, 2015).

En la literatura se evidencia que uno de los métodos utilizados para trabajar con inquemados supone la separación de estos por tamizado de las cenizas en diversas mallas. A cada retenido se le realiza un análisis próximo para determinar la cantidad de inquemados en cada uno, y con ello se identifica la malla que retiene la mayor cantidad de partículas inquemadas, la cual es usada para separar la muestra total. De este modo se obtienen buenos porcentajes de recuperación (Velásquez *et al.*, 2007).

Las partículas de inquemados están compuestas por porciones variables de materiales inorgánicos (principalmente minerales de cuarzo, anhidrita, caolinita, mica, calcita, óxido de calcio, magnetita, hematita y anatasa) y componentes orgánicos (Kisella *et al.*, 2016). En la tabla 10 se presentan diversas caracterizaciones de inquemados en cenizas de carbón de diversas fuentes.

**Tabla 10. Características de los inquemados**

	<b>Planta de energía (Polonia) (Castells &amp; Cadavid, 2011)</b>			<b>Ladrillera (Colombia) (Panwar <i>et al.</i>, 2011)</b>	<b>Cervecería (Colombia) (Panwar <i>et al.</i>, 2011)</b>
<b>Diámetro (mm)</b>	<b>&lt;1</b>	<b>1-1,5</b>	<b>&gt;1,5</b>	<b>0,212-0,417</b>	<b>0,295-0,417</b>
<b>% Humedad</b>	4,1	6,0	7,9	7,2	8,4
<b>% Cenizas</b>	57,3	44,6	12,8	32,2	20,8
<b>% Volátiles</b>	6,0	5,5	8,3	15,0	6,4
<b>% Carbono fijo</b>	32,6	43,9	71,0	45,6	64,5
<b>C</b>	34,2	43,8	69,1	-	-
<b>H</b>	0,5	0,7	1,3	-	-

	Planta de energía (Polonia) (Castells & Cadavid, 2011)			Ladrillera (Colombia) (Panwar <i>et al.</i> , 2011)	Cervecería (Colombia) (Panwar <i>et al.</i> , 2011)
N	0,3	0,3	0,4	-	-
S	1,2	1,1	1,6	-	-
O	2,4	3,5	6,9	-	-

## 4.3 Importancia del uso de residuos como nutrientes tecnológicos en la industria cerámica

### 4.3.1 Residuos orgánicos

- **Cascarilla de arroz:** Eliche *et al.* (2011) diseñaron mezclas de arcilla con adiciones de varios residuos industriales, entre ellos el cisco de café (3% en peso), seco y molido con tamaño de partícula 150  $\mu\text{m}$ , para evaluar su influencia sobre la contracción lineal, la densidad aparente, la absorción de agua y las propiedades mecánicas y térmicas en ladrillos. Entre los residuos estudiados, la incorporación de café molido fue una de las más beneficiosas, con valores de resistencia a la compresión y absorción de agua similares a los ladrillos sin residuos y 19% de mejora en la conductividad térmica. La absorción de agua y las micrografías SEM indicaron que los cambios en los resultados se debían al tipo de porosidad que forman la cantidad y el tipo de residuo. Esta investigación contribuirá al análisis y comparación de los resultados obtenidos en la investigación propuesta, en relación con uno de los materiales seleccionados para el diseño de las mezclas cerámicas.

### 4.3.2 Residuos inorgánicos

- **Cenizas volantes:** Es posible inferir que el uso final de las cenizas volantes difiere según las propiedades requeridas de estas y del producto final. Aunque son numerosos los estudios realizados para la utilización de cenizas clase F y clase C en productos de concreto, en esta sección se referenciarán solo los enfocados en la utilización de cenizas volantes para la fabricación de materiales cerámicos.

Ahmaruzzaman (2010) ha recopilado numerosos estudios sobre la utilización de cenizas volantes en diferentes industrias. En particular, en cuanto a su uso con materiales cerámicos, ha revelado que se puede llegar a fabricar ladrillos livianos, lo que representa un ahorro económico para el fabricante, asociado a los costes de transporte de envío del producto acabado, cuando el peso es un factor relevante. Dependiendo del tipo de arcilla, la ceniza volante puede

ser utilizada en proporciones de 20-50% para producir ladrillos 40-50% más porosos. Este autor también afirma que recientemente se ha demostrado que las cenizas volantes podrían mejorar la resistencia a la compresión de los ladrillos y hacerlos más resistentes a las heladas; incluso pueden llegar a mejorar el índice de plasticidad de la mezcla para facilitar el proceso de extrusión de ladrillos.

Peña y Ortega (2014) citan a Rajamannan *et al.* (2013) y a škvára, Jílek y Kopecký (2005) para exponer que las cenizas volantes clase F se han utilizado en la industria cerámica para elaborar ladrillos refractarios y pisos, así como cementos geopoliméricos de alta temperatura, y en la producción de zeolitas por procesos hidrotermales.

Rajamannan *et al.* (2013) han expuesto algunos efectos del uso de cenizas volantes en las propiedades de los productos cerámicos con mezclas de dos tipos de cenizas en proporciones de 0-30% en peso a la pasta de una baldosa, molida en húmedo, secada por pulverización, y moldeada y cocida a 900, 1.000, 1.050 y 1.100 °C. Así se encontraron dos combinaciones óptimas para la máxima resistencia a la flexión y compresión y porosidades más bajas: 30% de ceniza clase A, y 20% de ceniza clase B, cocidas a 1.050 °C; la diferencia entre ambas cenizas radica en el alto contenido de CaO y SO<sub>3</sub> de la ceniza B. Los autores describen una correlación lineal entre el desarrollo de la resistencia y la formación de mullita, favorecida por la presencia de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> en las cenizas.

Iglesias, Acosta y García (2013) estudiaron la adición de cenizas volantes como residuos de una central térmica GICC (gasificación integrada en ciclo combinado) en materiales cerámicos prensados, con lo que revelaron que, debido a sus propiedades térmicas y físico-químicas, los granos de escoria se adhieren a la matriz cerámica, aumentando la cohesión y disminuyendo la porosidad del material; por lo tanto, la adición de cenizas volantes de GICC no aumenta la absorción de agua, ni disminuye la resistencia mecánica, como ocurre con la adición de otros materiales de desengrase tales como el cuarzo o las arenas de carbonatos. Igualmente, Iglesias *et al.* (2015) realizaron este mismo estudio para materiales cerámicos extruidos, y concluyeron que la adición de un 10 % de cenizas volantes GICC permite aumentar la resistencia mecánica, en verde y en cocido, al tiempo que reduce la absorción de agua y el coeficiente de saturación en el producto final, sin deformación de las piezas ni variación significativa del color, y disminuye la temperatura de sinterización, lo que repercute en un ahorro energético y económico.

Mann *et al.* (2016) analizaron el efecto de las cenizas volantes en ladrillos con una alta relación de sustitución de arcilla en la protección contra la radiación, y revelaron que ladrillos con un contenido de cenizas volantes de 50% son capaces de detener los rayos gamma en el intervalo de 93,1%, 86,2% y 84,1%

de las radiaciones gamma incidentes de energías de 661,6 keV, 1.173,2 keV, y 1.332,5 keV, respectivamente.

- **Inquemados de carbón:** Sánchez, J y Rozo, S (2013) reportaron que los quemados de carbón durante el proceso de amasado de bloques presentan un comportamiento similar al de la arcilla, por lo que no necesitan adicionar mayor contenido de agua (ver tabla 11). Sin embargo, su comportamiento en secado muestra una alta contracción, lo que puede dar lugar a roturas de las piezas en este proceso. Las pérdidas por calcinación indican que con la adición de este material se incrementa el poder aligerante de los prototipos, lo que se evidencia en la disminución de la densidad aparente y el aumento de la absorción de agua en comparación a la muestra patrón. Además, la resistencia a la compresión se ve bastante afectada, al mostrar una disminución del 28,28% y 30,74% para adiciones de 10% y 15% de quemados, respectivamente.

**Tabla 11. Comportamiento físico mecánico de bloques de arcilla con adición de quemados**

Adición	%Humedad en crudo	%Contracción en secado	%Pérdidas por fuego	%Contracción en cocido	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>	%Absorción de agua	Conductividad térmica K/m*K	Resistencia a la compresión Kgf/cm <sup>2</sup>
<b>0%</b>	18,3	4,1	6,3	2,9	2,0	8,3	0,072	203,9
<b>10%</b>	19,8	6,2	11,8	2,5	1,9	9,7	0,067	149,5
<b>15%</b>	19,6	6,5	9,4	3,3	2,8	9,8	0,067	148,2

La revisión bibliográfica realizada en las bases de datos de ScienceDirect, Proquest, Scielo, Elsevier y Scopus con palabras claves como “unburned carbon”, “unburned in fly ash”, “unburned residues in fly ash”, “ceramic tiles”, “bricks” y “masonry”, con el fin de indagar acerca del comportamiento de las propiedades, físicas, mecánicas y/o térmicas de productos cerámicos con la adición de quemados de carbón, no arrojó ninguna coincidencia. Sin embargo, se encontraron varios estudios que relacionan el comportamiento de estas propiedades en materiales puzolánicos.

## 5. Investigaciones realizadas en el entorno internacional y nacional

La producción de materiales cerámicos de construcción se ha realizado desde tiempos muy antiguos. En la actualidad siguen siendo uno de los materiales más

empleados dentro del sector de la construcción alrededor del mundo (Sánchez, 2014; Pedroza, 1996).

El aumento de la actividad antropogénica ha causado impactos significativos sobre la biosfera. El cambio climático y la contaminación de las fuentes hídricas son dos de los aspectos más relevantes que se evidencian en la actualidad (O'Neill & Oppenheimer, 2002). Esta problemática ha conllevado a que desde los Gobiernos de los diferentes territorios se generen medidas cada día más estrictas que permitan reducir los impactos negativos de la actividad humana. Legislación menos permisiva, así como campañas de concientización, se ven a diario en los informes de los diferentes medios de comunicación (Sánchez & Ramírez, 2013). Temas como producción limpia, desarrollo sostenible y economía circular han surgido a partir de las tendencias en pro de la protección de la biosfera. En el caso particular de la industria cerámica, estos temas anteriormente mencionados han ganado interés por los empresarios del sector, a fin de reducir costos, generar nuevos materiales o tener una mejor imagen en el mercado (Sánchez & Ramírez, 2013).

La utilización de residuos de diferentes industrias como material sustituto del mineral arcilloso en la pasta cerámica es una de las áreas de trabajo donde se ha venido realizando investigación. Como este tema es el centro de interés de este trabajo, se presentan a continuación los aspectos más relevantes que permiten conocer cuál es el estado de la investigación en el entorno internacional, nacional y regional.

Dentro de las principales instituciones, destaca el liderazgo de la Universidad de Jaén (España) en este campo de investigación. Asimismo, es importante resaltar la gran cantidad de instituciones brasileñas dedicadas hacer investigación en este campo. La revisión de la literatura permite observar la existencia de trabajos que incluyen la utilización de residuos orgánicos e inorgánicos, conformados tanto por extrusión como por prensado. También se observan variaciones en las temperaturas de cocción, aunque resaltan los valores cercanos a los 1.000 °C ya que en la gran mayoría de los casos se pretende su aplicación como ladrillo de construcción. La tabla 12 presenta los principales trabajos encontrados.

Tabla 12. Principales investigaciones evidenciadas en el entorno internacional

Ref.	Residuos empleados	Condiciones de elaboración	Propiedades tecnológicas evaluadas	Otros análisis realizados	Observaciones
Souza <i>et al.</i> (2011)	Ceniza de bagazo de caña	Sustituciones de 0%, 20%, 40% y 60 %. Conformado por prensado, con temperaturas de cocción de 500, 800, 900, 1000, 1100 y 1200 °C	Absorción de agua, resistencia a la flexión, contracción de cocción	DRX, FRX, TG/DSC	Hasta 20 % de cenizas y en temperaturas arriba de 1.100 °C se logra obtener una absorción de agua por debajo del 12%. En 1.200 °C se alcanza un porcentaje de absorción de agua del 6%, con una resistencia a la flexión de 30 MPa. El trabajo hace seguimiento de la microestructura (DRX) a medida que se incrementa la temperatura
García y Mendiola (2016)	Cascarilla de café, cáscara de coco y desecho de la mazorca del maíz	0%, 4%, 8% y 12% en peso, a temperaturas de cocción de 800, 900 y 1.000 °C. Moldeo manual	Resistencia a la compresión y absorción	No disponibles	Hasta un 4% de adición de residuo de café y maíz permite obtener materiales cerámicos con propiedades tecnológicas aceptables en la industria de la construcción. La cáscara de coco no permitió obtener resultados satisfactorios. No se hace caracterización estructural del material cocido
Menezes <i>et al.</i> (2005)	Desechos de aserrado de granito	Sustitución entre el 15 y 40%. Conformado por extrusión y temperaturas de cocción de 800, 900 y 1.000 °C	Absorción de agua y resistencia mecánica a la flexión	FRX, TG, MEB, DRX	Hasta un 20 % de residuo permite obtener una absorción de agua similar al material de referencia. Sin embargo, la resistencia mecánica se vio mejorada por la presencia de residuo
Sutcu y Akkurt (2009)	Residuos de producción de papel	Hasta un 30 % de residuo de papel fue utilizado. Conformado por prensa y cocción a 1.100 °C	Absorción de agua, contracciones, resistencia a la compresión	MEB,FRX,-DRX, TG/DSC	La presencia de este residuo contribuye a disminuir las contracciones de cocción. La resistencia a la compresión se reduce con la adición del residuo (m10%), el valor obtenido para esta variable se redujo en 60% respecto a la muestra patrón. Un caso similar se da para la absorción de agua. La conductividad térmica se redujo hasta en un 50%



Ref.	Residuos empleados	Condiciones de elaboración	Propiedades tecnológicas evaluadas	Otros análisis realizados	Observaciones
Demir (2006)	Residuos de té	0%, 2,5% y 5% de sustitución. Cocción hasta 900 °C. Conformado por extrusión	Absorción de agua, resistencia a la compresión	MEB, FRX	La adición del residuo conlleva una mayor cantidad de agua para el moldeo, así como un incremento en las contracciones de secado y cocción. No se observó corazon negro. La adición del residuo aumentó la resistencia mecánica a la compresión
Dondi <i>et al.</i> (2009)	Vidrio de Tv/PC	Cocción entre 900, 950 y 1.000 °C. Conformado por extrusión. Reemplazos hasta del 5%	Absorción de agua, resistencia a la flexión	FRX, DRX	La granulometría del residuo afecta significativamente en las propiedades obtenidas, y granulometría muy fina favorece el proceso. Sustituciones inferiores al 3% presentan resultados similares a la muestra patrón
Alonso-Santurde <i>et al.</i> (2012)	Arenas de fundición	850, 950 y 1.050 °C. Conformado por extrusión. Sustitución hasta del 50%.	Resistencia a la flexión, absorción de agua	FRX, TG/DSC, DRX	Hasta 30% de residuo puede ser usado para obtener materiales con aplicación en la industria de la construcción. Se disminuye la contracción de cocción, pero se ven afectadas la absorción de agua y la resistencia mecánica
Iglesias <i>et al.</i> (2013)	Cenizas volantes	Conformado por extrusión. Sustitución del 10%	Resistencia mecánica, absorción de agua	No disponibles	Las volantes provienen de una central térmica GICC, en materiales cerámicos prensados. Los granos de escoria se sueldan a la matriz cerámica, aumentando la cohesión y disminuyendo la porosidad del material
Boltakov <i>et al.</i> (2016), Zhang (2013)	Residuos industriales inorgánicos		Resistencia final, la absorción de agua		Se evaluaron tamaños de partículas, residuo adicionado, porcentajes de adición, tipo de moldeo y temperaturas de cocción

En relación con el entorno nacional, se evidenciaron pocos trabajos en la literatura. Se destacan investigadores de la Universidad del Valle, la Universidad de Los Andes, la Universidad Tecnológica de Pereira y la Universidad Nacional de Colombia. Las principales características de los trabajos realizados se presentan en la tabla 13.

**Tabla 13. Principales investigaciones evidenciadas en el entorno nacional**

Ref.	Residuos empleados	Condiciones de operación	Propiedades tecnológicas evaluadas	Otros análisis realizados	Observaciones
García-Ubaque, González-Hässig y Vaca-Bohórquez (2013), García-Ubaque et al. (2007), García Ubaque, Giraldo y Moreno-Piraján (2013)	Cenizas de incineración de residuos municipales	1%, 5%, 10%, 20%, 40% de sustitución. El material usado fue pasante malla 200 Tyler. Moldeo por extrusión. Cocción hasta 1.100 °C	Absorción de agua, resistencia mecánica a la compresión	DRX, FRX, MEB, TG	La resistencia mecánica se ve favorecida hasta un 10% de sustitución, pero siempre se da un aumento en el porcentaje de absorción de agua. No hay caracterización microestructural del material cocido.
Torres, Hernández y Paredes (2012)	Lodos de tratamiento de agua potable	Reemplazo hasta del 25% en la pasta cerámica (sustituto de arena). Cocción a 900 °C	Absorción de agua, resistencia mecánica a la compresión	DRX	Hasta un 2,5% de sustitución permite obtener resultados favorables para la fabricación de cerámicos de construcción no estructurales. No hay caracterización microestructural del material cocido
Guzmán et al. (2013a), Guzmán et al. (2013b)	Ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo de feldespato	Conformado en prensa. Cocción entre 1.000 y 1.400 °C. Sustitución entre 11 y 22% de la materia prima	Densidad aparente, porosidad, absorción, resistencia mecánica a la flexión	MEB, DRX, FRX	Fabricación de gres porcelánico. Sustitución del 11% permite obtener unas propiedades tecnológicas similares a las obtenidas con materias primas naturales. No se estudian los cambios en la microestructura con el incremento de la temperatura

La revisión de la literatura en el entorno local dejó en evidencia la presencia de algunos trabajos realizados a nivel de pregrado, muchos de los cuales han sido desarrollados bajo la dirección del autor de este trabajo (Dorado Guerra, 2015; Vargas & Cristancho, 1986; Gómez & Mantilla, 1993; Rivera & Rodríguez, 1992; Mendoza & Mantilla, 1994). La experimentación de inquemados del carbón, así como de cenizas volantes, fue evaluada para la fabricación de ladrillos cerámicos de construcción y de tipo refractario.

Adicionalmente, se evidenciaron dos trabajos de maestría en Ciencia y Tecnología de los materiales (Portillo Rodríguez, 2015). En el primero se utilizó la cascarilla de arroz en una pasta cerámica, evaluando la conductividad del material y resistencia mecánica después de un proceso de cocción a 1.000 °C. Este trabajo en particular se llevó a cabo mediante moldeo por extrusión empleando un copolímero durante el proceso de humectación.

En el siguiente trabajo Díaz (2014) presenta los resultados obtenidos en el desarrollo de probetas prensadas conformadas con polvos cerámicos atomizados y cenizas volantes de la combustión del carbón de la central termoeléctrica Termotasajero S.A. Realizó la caracterización físico-cerámica de las muestras según norma técnica NTC y caracterización estructural mediante técnicas de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, con el fin de validar la posibilidad de sustituir la materia prima de arcilla hasta en un 20% en peso por este subproducto de la combustión de carbón. Se evidenció que, a medida que se aumenta el contenido de ceniza, disminuyen la compactación, el grado de sinterización, las pérdidas por calcinación, la resistencia mecánica a la flexión y la compresión, y se aprecia la aparición de eflorescencias y la mejora a la abrasión profunda. El estudio revela que las mezclas más aceptables a nivel industrial serían las que tienen adiciones del 10% y 20% de cenizas volantes.

En el trabajo desarrollado en un proyecto de investigación del Grupo de Investigación en Tecnología cerámica GITEC (Sánchez & Rozo, 2013), se evaluó el comportamiento de las propiedades físico-cerámicas, mecánicas y térmicas de prototipos cerámicos fabricados con arcilla de la Formación Guayabo y residuos industriales (cisco de café, cascarilla de arroz, fibra de palma, bagazo de caña de azúcar, inquemados de carbón, cenizas volantes) en adiciones de 10% y 15%. Los especímenes fueron moldeados, secados y cocidos. Se compararon los resultados de propiedades físicas (densidad aparente, porosidad, absorción, entre otras) y mecánicas (resistencia a flexión) de los especímenes. La mezcla más óptima fue aquella con adición del 10% cisco de café, en comparación con la mezcla de 100% arcilla.

Después de haber hecho una revisión del estado del arte, se evidenció que la utilización de residuos como materia prima (nutrientes tecnológicos) presenta

potencial para la fabricación de materiales cerámicos, especialmente aquellos asociados a la industria de la construcción. Sin embargo, se evidencia también que gran parte de los trabajos no presentan resultados de correlación entre las propiedades tecnológicas obtenidas y la microestructura del cerámico elaborado. De igual forma, no se aprecian seguimientos de los cambios estructurales del material a diferentes temperaturas de cocción, sobre todo en temperaturas superiores a los 1.100 °C.