

**MÉTODOS PARA EL MANEJO Y LA MITIGACIÓN AMBIENTAL GENERADA
POR RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA ARCILLA Y SU POSIBLE
APLICACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA.**

MARIA CAMILA ROMERO GAMARRA

DARIO ESTEBAN SALGUERO QUIMBAYO

LEONARDO AUGUSTO FONSECA BARRERA



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C., NOVIEMBRE DE 2020**

MÉTODOS PARA EL MANEJO Y LA MITIGACIÓN AMBIENTAL GENERADA
POR RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA ARCILLA Y SU POSIBLE
APLICACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA.

MARIA CAMILA ROMERO GAMARRA

DARIO ESTEBAN SALGUERO QUIMBAYO

LEONARDO AUGUSTO FONSECA BARRERA



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C., NOVIEMBRE DE 2020

Nota aceptación

Firma de tutor

Firma de jurado 1

Firma de jurado 2

Bogotá D. C., noviembre de 2020

DEDICATORIA

Dedicamos de manera especial el presente trabajo a nuestros padres y hermanos por sus consejos, paciencia y apoyo incondicional. Personas a las cuales les debemos todo.

A nuestros amigos y todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de nuestros objetivos.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por su apoyo incondicional y su esfuerzo por formarnos como personas éticas y responsables; que a lo largo de nuestras vidas nos han brindado su compañía y motivación en cada una de las decisiones que tomamos para nuestro futuro.

A nuestros hermanos por brindarnos su cariño y por estar presentes en todos aquellos momentos alegría y tristezas.

Al Ingeniero Leonardo Augusto Fonseca por su dedicación y tiempo al brindarnos de su experiencia, por orientarnos y apoyarnos en el desarrollo de este proyecto de investigación.

Por último a nuestros profesores por todos los conocimientos impartidos a lo largo del desarrollo de nuestra formación académica.

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	1
1. PROBLEMA	3
1.1 Identificación	3
1.2 Descripción	3
1.3 Planteamiento	4
2. DELIMITACIÓN	4
2.1 Conceptual	4
2.2 Geográfica	4
2.3 Cronología	4
3. OBJETIVOS	5
3.1 Objetivo general	5
3.2 Objetivos específicos	5
4. ANTECEDENTES	6
5. JUSTIFICACIÓN	10
6. MARCO REFERENCIAL	12
6.1 Marco teórico	12
6.1.1 Economía Circular	12
6.1.2 Arcilla	15
6.1.3 Cemento	20
6.1.4 Concreto	22
7. MARCO LEGAL	24
8. METODOLOGÍA	25
9. ECONOMÍA CIRCULAR	27
9.1 Industria de la arcilla en Colombia	27
9.2 Modelos de gestión de residuos sólidos en Colombia	29
9.3 Modelo de producción lineal en la industria de la arcilla	32
9.4 Modelo de producción enfocado en la economía circular	34
10. ALTERNATIVAS DE UTILIZACIÓN	39
11. METODOS DE APROVECHAMIENTO	45

11.1	Aprovechamiento del material mediante su reciclaje	45
11.1.1	Recolección y transporte	47
11.1.2	Trituración.....	48
11.1.3	Tamizado o Cribado	50
11.1.4	Almacenamiento y manipulación del material resultante	51
11.2	Mitigación ambiental	52
12.	PROPUESTA PARA EL USO DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA ARCILLA EN COLOMBIA	53
12.1	Formación Guaduas	55
12.2	Batolito de Ibagué	56
12.3	Formación Amagá – Medellín	57
12.4	Stock de arcillas Altavista – Itagüí	58
12.5	Propuestas de uso del residuo	62
12.5.1	Material filtrante para sistemas de drenaje.....	62
12.5.2	Material filtrante para tratamiento de agua residuales.....	63
12.5.3	Subbases granulares	64
12.5.4	Ladrillos, bloques y otros productos cerámicos.....	67
12.5.5	Morteros	68
12.5.6	Mezclas de concreto para elaboración de prefabricados	69
13.	CONCLUSIONES	74
14.	RECOMENDACIONES	76
	REFERENCIAS	1

INDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Beneficios de la economía circular.</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 2. CO₂ y energía consumida en la elaboración de materiales</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 3. Residuos de ladrillo de arcilla</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 4. Proceso de fabricación de ladrillos.</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 5. Ciclo funcional en centros de tratamiento y aprovechamiento.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 6. Resumen alternativas de uso</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 7. Modelo de Economía Circular aplicado al aprovechamiento de los residuos de la industria de la arcilla.....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 8. Cajas estacionarias para el transporte de los residuos arcillosos. ...</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 9. Esquema de plan de aprovechamiento del material reciclado.....</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 10. Principales zonas con actividad minera de arcillas en Colombia....</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 11. Diagrama de fases.....</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 12. Formaciones que se han identificado como idóneas. Ubicación en el mapa geológico colombiano.....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 13. Material filtrante para tratamiento de agua residuales</i>	<i>64</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Centros de aprovechamiento y tratamiento de residuos.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2. Resumen componentes químicos (%) para las alternativas</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3. Comparación de los requisitos químicos formación Guaduas</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 4. Comparación de los requisitos químicos Batolito Ibagué.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5. Comparación de los requisitos químicos Formación Amagá Medellín</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6. Comparación de los requisitos químicos Stock de arcilla Altavista-Itagüí</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 7. Propuestas de utilización de acuerdo con la granulometría del material reciclado</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 8. Requerimientos de calidad para material granular en drenajes</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 9. Clasificación de las capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 10. Granulometría para subbases granulares.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 11. Requisitos de calidad del material granular para la composición de subbases granulares.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 12. Ensayos de muestreo y calidad para mampostería, tejas, adoquines. ..</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 13. Características físicas del cemento para morteros.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 14. Dosificación del material para elaboración de morteros con adición de polvo de ladrillo.....</i>	<i>69</i>

GLOSARIO

- **Absorción:** Atracción desarrollada por un sólido sobre un líquido con el objetivo de que las moléculas de este logren penetrar.
- **Agregados:** Materiales como arena, grava o roca triturada de distintos tamaños en su estado natural o procesado.
- **Agregado fino:** Material natural como la arena, pasa el 100% el tamiz 3/8" y queda retenido en el tamiz 200.
- **Agregado grueso:** Material natural como la grava, es retenido el 100% en el tamiz N° 4.
- **Arcilla:** Roca sedimentaria compuesta por una mezcla de silicatos de aluminio hidratados provenientes de rocas que contienen feldespato.
- **Cemento:** Material de construcción formado por la combinación del producto de resultante de la caliza y arcilla (Clinker) y yeso.
- **Chamote:** Material granular resultado de la pulverización o trituración de los ladrillos de arcilla.
- **Concreto:** Material empleado en la construcción compuesto por un aglomerante (cemento), agregados (grava-arena), agua y aditivo. También conocido como hormigón.
- **Demolición:** Proceso de destrucción de manera planificada de un edificio o una construcción.
- **Economía circular:** Estrategia que tiene como objetivo reducir la producción de residuos dándoles un nuevo valor y uso a estos materiales.

- **Escombros:** Fragmentos de materiales provenientes de los residuos de una construcción, remodelación o demolición de estructuras.
- **Fraguado:** Proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad.
- **Industria:** Actividad económica y técnica que altera las materias primas en productos que satisfagan las necesidades del hombre.
- **Ladrillo:** Pieza de arcilla calcinada con forma de prisma rectangular utilizada en la construcción de muros, paredes, etc.
- **Mitigación:** Reducción de daños potenciales sobre la vida y bienes producidos por eventos ambientales y humanos.
- **Mortero:** Material aglomerante utilizado en la construcción, compuesto por un aglomerante, agregados finos, agua y aditivos.
- **Porosidad:** Espacios vacíos de un material respecto superficie.
- **Reciclar:** Proceso en el cual materiales usados o desperdicios son convertidos en materia prima o nuevos productos.
- **Residuos:** Fragmento que resulta de la descomposición o destrucción de un material.
- **Resistencia a la compresión:** Capacidad o esfuerzo máximo que posee un material cuando es sometido bajo una acción de carga por aplastamiento.
- **Reutilizar:** Acción de volver a utilizar un material o producto el cual ha sido desechado.
- **Sostenibilidad:** Característica que permite satisfacer las necesidades actuales sin afectar las futuras.

RESUMEN

Se realiza una revisión bibliográfica donde se analizan todas las posibles alternativas y aplicaciones de los residuos cerámicos resultantes de la industria arcillera en Colombia. Tomando como referente diversos estudios realizados a nivel internacional, nacional y regional; que impulsan la utilización de estos residuos como recurso estratégico de la innovación de materiales de construcción. Para finalmente desarrollar una propuesta que evalúe aspectos técnicos y ambientales que permita la reducción y mitigación de los impactos generados por los residuos de la industria arcillera en Colombia. Vinculando la propuesta en estrategia nacional de economía circular como un nuevo modelo de desarrollo económico que brinda un valor agregado al cierre de ciclos de material, agua y energía.

INTRODUCCIÓN

La creciente contaminación ambiental generada por los desechos de materiales de construcción defectuosos de la industria arcillera a nivel mundial motivan la constante búsqueda de alternativas que permitan el aprovechamiento de estos residuos de una manera sustentable y con valor agregado.

En el mundo la producción de ladrillos se estima en alrededor de 1500 billones de unidades por cada año, donde 87% de esta producción corresponde a lo producido en países asiáticos. Gran parte de esta producción corresponde a la fabricación de ladrillos artesanalmente, así por ejemplo, en países como China, con una producción de alrededor de 1000 billones de unidades, apenas un 12.5% se fabrican con procesos automatizados y con rigurosos controles de calidad [1] [2]. El restante volumen de producción y la poca supervisión del producto terminado trae como consecuencia la generación de altos volúmenes de residuos que junto a los derivados de las actividades de construcción y demolición suman una cantidad considerable de materiales no reciclados. En la mayoría de los casos estos residuos no son reutilizados ni integrados de nuevo en el ciclo productivo de los materiales de construcción, por lo general los residuos son utilizados como relleno de baches en vías o son desechados sin ninguna clase de tratamiento o disposición especial del material, afectando así gravemente el medio ambiente.

Teniendo en cuenta el constante crecimiento productivo de la industria arcillera y el papel fundamental que esta juega en la construcción civil, se tiene como desafío integrar su actividad productiva con las condiciones de conducir al

desarrollo sostenible y menos agresivo con el medio ambiente [3]. Por tal motivo, alrededor del mundo se vienen desarrollando diversos trabajos de investigación que tienen como objetivo encontrar posibles aplicaciones y soluciones amigables con el medio ambiente que brinde un valor agregado a la reutilización de residuos de la industria de la arcilla. En países latinoamericanos como en Brasil se han encontrado numerosas investigaciones que caracteriza el materia conocido como Chamote resultado de la trituración de ladrillos de arcilla roja horneada y su posible aplicación en la fabricación de productos cerámicos, Morais realizo una caracterización del material mediante la difracción de rayos x, microscopia óptica y electrónica de barrido de desechos generados por la albañilería de Santa Cecilia en Brasil encontrando como resultado mejoras en las propiedades finales en la fabricación de bloques cerámicos con un 20% de agregado de Chamote [4] al igual Manuel Brito en Cuba encontró que la adición de un 20% de residuos sólidos de construcción en la producción de ladrillos cerámicos representan una mejora en sus propiedades físico-mecánicas para su empleo en la industria de los materiales de construcción [5].

Estas premisas y los grandes volúmenes de residuos cerámicos que se producen a nivel mundial y la creciente demanda de materiales de construcción son pruebas para determinar la competitividad de los residuos de la industria de la arcilla como material base en el reciclaje y reutilización que permita el aprovechamiento sostenible de los residuos industriales, permitiendo su reconocimiento como material amigable ambientalmente.

1. PROBLEMA

1.1 Identificación

Actualmente los residuos de la industria de la arcilla en Colombia no son empleados en la fabricación de materiales de construcción. Lo que conlleva a que gran parte de este material desechado sea utilizado como relleno de baches presentes en vías cercanas a las zonas de generación del material, sean transportados por empresas que generan un cobro por la disposición o simplemente que sean arrojados en predios baldíos y quebradas. Generando un gran impacto ambiental y paisajístico [6].

1.2 Descripción

En un estudio realizado en el Centro de Diseño de la Universidad del Instituto Real de Tecnología de Melbourne, se estima que el ladrillo en unos años seguirá siendo el segundo material más usado en la construcción después del hormigón [7]. Además, considerando el constante crecimiento del sector de la construcción lo cual implica la demanda de más materiales y por ende de la generación de mayor cantidad de residuos, se hace necesario implementar la mejor alternativa para el aprovechamiento de estos residuos que constituyen un aspecto importante a nivel mundial, dado que representan un gran beneficio económico y ambiental por la incorporación de materiales de desecho al proceso productivo de la construcción y al mismo tiempo promueve la preservación de los recursos naturales no renovables [8].

1.3 Planteamiento

El presente trabajo se basa en la recolección de información teórica sobre el uso de residuos generados por la industria de la arcilla y su posible aplicación en materiales de construcción en Colombia.

2. DELIMITACIÓN

El presente trabajo se delimita en comprender las diferentes investigaciones sobre el uso de arcillas recicladas, correlacionando las características genéticas del mismo con posibles aplicaciones a materiales de construcción.

2.1 Conceptual

Recopilar y analizar información relacionada con el tema de la generación de residuos de arcillas y su aprovechamiento en la creación de materiales de construcción.

2.2 Geográfica

Establecer la posibilidad de emplear un aprovechamiento del residuo de la industria de la arcilla en el contexto colombiano.

2.3 Cronología

Desarrollar una revisión bibliográfica de investigaciones y trabajos desarrollados en los últimos 15 años con los cuales se realizará una propuesta de aprovechamiento de los residuos de la industria arcillera con base a la información consultada en ese lapso.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Identificar los diferentes métodos de aplicación y mitigación ambiental que pueden ser aplicados en la industria de la arcilla en Colombia para la elaboración de materiales de construcción.

3.2 Objetivos específicos

- Entender el funcionamiento de la economía circular en la gestión de residuos sólidos de la industria de la arcilla.
- Identificar los posibles métodos para aprovechar los residuos de la industria de la arcilla de manera que sean sustentables y generen valor agregado.
- Evaluar diversas alternativas aplicadas a nivel mundial que impulsen la utilización de los residuos de la industria de la arcilla como recurso estratégico en la innovación de materiales de construcción.
- Desarrollar una propuesta que involucre métodos y alternativas que reduzcan y mitiguen los impactos ambientales generados por los residuos de la industria de la arcilla en Colombia.

4. ANTECEDENTES

La primera implementación del ladrillo triturado con cemento Portland se remonta a 1860 en Alemania para la elaboración de productos de hormigón [9], no obstante, se le da un uso significativo después de la Segunda Guerra Mundial para la reconstrucción [10].

En el mundo se han realizado investigaciones donde se evidencia que inadecuados procesos fabricación de materiales arcillosos como los ladrillos o tejas dan como resultados materiales defectuosos que se deterioran de manera acelerada los cuales pueden ser reutilizados después de un proceso de limpieza en la construcción de drenajes, bases para carreteras, pistas de tenis, agregado para ladrillos, agregado para hormigón, entre muchas más aplicaciones [11][12].

Gran parte de las investigaciones encontradas de ladrillos de arcilla triturada se enfocan en la comparación de las propiedades mecánicas del hormigón reciclado y el convencional [13]. Mansur et al [14] encontró que los valores de la gravedad específica y absorción del agua con una sustitución del 100% de ladrillos de arcilla triturada fueron de 1,93% y el 11,2% respectivamente, determinando de esta forma valores que oscilaban entre los 13,8 y 34,5 MPa para la resistencia compresión; considerando como favorable con relación al hormigón convencional. Akhtaruzzaman y Hasnat [13] notaron, que al utilizar ladrillo triturado como agregado mejora el rendimiento en la resistencia a tracción en aproximadamente un 11%, sin embargo, se refleja una disminución en la

resistencia a compresión y en el módulo de elasticidad del 30% al del hormigón normal.

Otros estudios como los de Cachim [15] evidencian muestras con un 15% de agregado de ladrillo triturado en mezclas de hormigón las cuales no presentan alteración alguna en la resistencia a compresión, pero al aumentar el porcentaje en un 30% se presenta una reducción de la resistencia de hasta un 20% dando como resultado limitaciones a la producción de tan solo elementos prefabricados en hormigón como mobiliario urbano. Cabral et al. [16] determinaron que las propiedades mecánicas de elementos en hormigón con agregados de arcilla roja reciclada aumentaban la resistencia del hormigón. Codinalesi y Morconi [17] realizaron el reemplazo del material fino en morteros con ladrillo triturado obteniendo como resultado beneficios en su utilización. Los resultados de las investigaciones de Poon et al. [18] demuestran que con niveles de reemplazo de 25% y 50% de ladrillos y bloques se presentaba poco efecto en la resistencia a compresión respecto a la muestra patrón, sin embargo, mayores niveles de reemplazo de estos materiales reducen la capacidad de resistencia. Ravindrajah et al [19] encontró que la deformación del hormigón reciclado realizado por agregados reciclados gruesos era de un 30-60% más alta que la del hormigón normal.

Con el pasar de los años la preocupación por la creciente generación de residuos de los sectores de la fabricación de materiales de construcción y demolición de obras existentes se hace más notable dado que este volumen

aumenta año tras año. la Cámara Colombiana de la Energía (CAEM) realizó en el año 2015 la actualización del inventario nacional del sector ladrillero donde se identificaron 1.508 unidades productivas en todo Colombia con una producción anual de 12 millones 700 mil toneladas [20]. Esta gran producción se debe al desarrollo económico del país el cual va ligado en gran medida tanto al desarrollo de infraestructura de transporte como a la construcción de vivienda. Estructurando indicadores confiables para considerar las características generales de una sociedad, siendo el grado de su construcción un indicador que determina de manera directa el desarrollo económico de la nación. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) para las principales ciudades capitales del país la demanda de materiales de construcción de la industria de la arcilla tendrá un crecimiento esperado para el 2023 del 48% respecto al año 2013 alcanzando una producción anual en gran parte del país de 45 millones 999 mil toneladas [21].

Dado lo anterior se hace de vital importancia la implementación de procesos y tratamientos fisicoquímicos de estos residuos para su reutilización cumpliendo ciertos estándares de calidad. En el país a la fecha solo Bogotá cuenta con un plan piloto, el cual inicia partir de la creación de un marco normativo dentro del actual Plan de Desarrollo que impulsa la aplicación de estrategias productivas como la economía circular basada en la necesidad de repensar, reutilizar, reparar, restaurar, Re manufacturar, reducir, Re proponer, reciclar y recuperar los residuos y materiales.

Uno de los factores que influyen en la reutilización de materiales cerámicos es la calidad de estos residuos, basándose principalmente en las características físicas como químicas que ofrecen estos materiales. Por tanto, implementar tecnologías como la activación alcalina o la geo polimerización son importantes para utilizar estos recursos que no son funcionales para las industrias ni el medio ambiente.

En Tunja, en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia se estudió la posibilidad de fabricar elementos constructivos (bloque, adoquín y teja) a partir de residuos de ladrillo de arcilla roja mediante la técnica de activación alcalina. La producción de estos materiales se apoyó en la creación de un mortero híbrido de 48,61 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días de curado a temperatura ambiente (25°C). Utilizaron un porcentaje de adición de cemento portland (OPC) del 10% en peso con respecto a la arcilla roja. Para la activación alcalina usaron hidróxido de sodio (NaOH) grado industrial y silicato sódico comercial (Na_2SiO_3). Como resultado de este análisis, obtuvieron que los bloques fueron clasificados como “bloques estructurales de clase alta” con resistencia a la compresión de 17,09 MPa, los adoquines con 4,42 MPa y las tejas clasificadas como tejas de alto perfil (tipo I). Comparando con la Norma Técnica Colombiana (NTC), es viable utilizar los residuos de arcilla roja como material complementario en la creación de morteros. Producción de elementos constructivos a partir de residuos de ladrillo activados alcalinamente [22].

5. JUSTIFICACIÓN

Investigaciones han demostrado que el 75% de los residuos por construcción y demolición está constituido por ladrillos [5][6], por tanto, la necesidad de reducir la cantidad de desechos generados por algunos sectores industriales para la elaboración de materiales necesarios en la construcción de proyectos ingenieriles es una problemática que se genera desde hace mucho tiempo. Actualmente muchas normativas obligan a estas industrias a cumplir con estándares de emisión, consumo energético, reducción de emisiones de material particulado y gases tóxicos [25]. Por otro lado, la reducción de residuos sólidos inertes los cuales son constituidos por los escombros cerámicos provenientes de los productos rechazados por rotura o deficiente cocción [26]. Con el único fin de disminuir el efecto nocivo para el medio ambiente. Pero que lastimosamente ante la gran demanda de materiales de construcción a nivel mundial esto se convierte en una tarea difícil de llevar a cabo. Por eso es importante incentivar la necesidad de repensar, reutilizar, reparar, restaurar, Re manufacturar, reducir, proponer, reciclar y recuperar los residuos y materiales.

En el mundo se han llevado a cabo innumerables estudios que demuestran cómo la implantación de estos residuos puede llegar a ser viable. Dichos estudios realizados han permitido determinar que el uso de este tipo de materiales reciclados varía poco dependiendo de las características mecánicas del hormigón pero que al ser agregadas de una forma controlada pueden no tener cambios significativos frente a una muestra patrón de hormigón convencional. Sin embargo,

en Colombia el uso e incentivo de estas nuevas técnicas de conservación y reutilización de materiales no suele ser aplicadas.

El presente trabajo pretende dar a conocer todos los posibles usos y aplicaciones en la elaboración de materiales de construcción incorporando desechos de la industria de la arcilla con el objetivo de mitigar el impacto ambiental que se genera por la mala disposición y manejo de estos en Colombia.

6. MARCO REFERENCIAL

En relación con los objetivos del trabajo, el siguiente capítulo expondrá una breve investigación de los temas abarcados dentro de este estudio.

6.1 Marco teórico

6.1.1 Economía Circular

Los primeros registros en Colombia acerca de la economía circular surgen en el año 1997 con la Política de gestión integral de residuos y la Política de producción más limpia, para el año 2000 con la expedición de la Política de parques industriales ecoeficientes por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. La economía circular inicia como respuesta a la alta demanda de materias primas y recursos naturales como reacción del crecimiento poblacional, el cambio climático y la generación de residuos de materiales.

Cuando se habla de economía circular existen varios aspectos sobre lo que es, por tanto, no es posible encasillarla con una única definición, la Estrategia nacional de economía circular emplea la definición basándose en la propuesta por la Fundación Ellen MacArthur, la cual es reconocida en el ámbito académico a nivel global. Para efectos de esta propuesta, la economía circular es entendida como:

“Sistemas de producción y consumo que promuevan la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil a través de la

implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible [27].”

La principal característica de la economía circular se enfoca en el carácter sistémico y holístico, por tanto, pretende optimizar los sistemas considerando todos sus componentes. Esta definición se basa en un sistema productivo que se auto restaura y autogenera ya que dispone de un diseño interconectado e inteligente que se asemeja a como ocurre en la naturaleza donde los residuos de un organismo son la materia prima de otro.

Park et al. [28] exponen diferentes tipos de iniciativas de innovación acerca de la economía circular representándolos como modelos de negocios:

- **Valoración de residuos:** Los residuos o materiales que son desechados por un usuario, puede ser utilizado como materia prima para otro.
- **Reutilización de materiales para el cierre del ciclo:** El producto es reutilizado con su misma aplicación o con un nuevo uso.
- **Ecodiseño de productos:** extender la vida útil de los productos, disminuir su uso e incluir incorporar residuos recuperados en producto nuevos.
- **Transformación en el sistema de productos por servicios:** sustituir de productos individuales por sistemas colectivos.

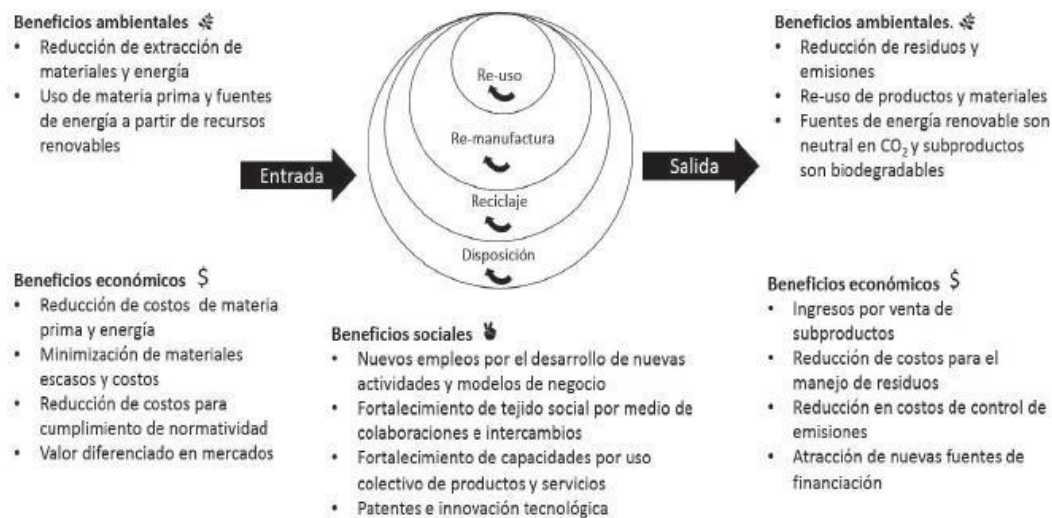
- **Herramientas digitales:** identificar las alternativas y procesos más efectivos para la recuperación de materiales.

- **Beneficios de la economía circular**

La economía circular ha sido promovida por el gobierno y varias empresas del país como un modelo económico regenerativo, brindando importantes beneficios económicos, ambientales y sociales que permiten que su proceso y desarrollo siga en avance.

El modelo que permite identificar los beneficios de la economía circular se basa en un esquema de entradas y salidas del modelo de transformación; esta iniciativa permite que generen eficiencias en ambos sentidos. Cuando se habla de beneficios económicos del modelo circular se parte desde la optimización en la entrada (menor uso) y de la salida (menor disposición del proceso de transformación). Asimismo, al reutilizar materiales, agua y energía se producen beneficios económicos otorgándole mayores oportunidades de uso a un mismo recurso.

Implementar menos materiales por producto y servicio producido otorga ahorros significativos en la adquisición y administración de las materias primas. Estos modelos reducen los costos para acceder a materiales escasos, asociado con los costos de contingencia relacionados con interrupciones en el abastecimiento y la gestión del cumplimiento de la normatividad ambiental.



*Ilustración 1. Beneficios de la economía circular.
Fuente: (Korhonen, Honkasalo, & Seppala, 2018)*

6.1.2 Arcilla

El termino arcilla comprende de varios significados, clasificado por tener tamaño menor a 2 micras, $< 2\mu$, es un material heterogéneo (fragmentos de rocas, óxidos hidratados, geles y sustancias orgánicas) compuesto por minerales propios. Producto de la meteorización. Se compone de materiales sedimentarios con granulometría fina y mineralógicamente poco definidos; con propiedades plásticas y refractarios. En términos químicos se define como una sustancia con presencia de caolín, con composición variable de Sílice (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), elementos alcalinos y alcalinotérreos.

El desarrollo de la arcilla a través de los años es de considerable interés debido a las cualidades de resistencia frente a la descomposición química [29].

- **Propiedades Fisicoquímicas**
 - **Capacidad de absorción**

Gran parte de las arcillas se encuentra en el sector de los absorbentes puesto que logran absorber agua, esta capacidad se relaciona específicamente con las características texturales (superficie específica y porosidad). Existen dos tipos de procesos que poco se dan de forma aislada:

Absorción: Se basa específicamente de procesos físicos como la retención por capilaridad.

Adsorción: se refiere a la interacción tipo químico entre el adsorbente (arcilla) y el líquido adsorbido (adsorbato).

- **Capacidad de intercambio de catión**

Las arcillas tienen la capacidad de intercambiar los iones fijados en el plano exterior de sus cristales, en los espacios interiores de la estructura o interlaminares, a la suma total de los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH se le conoce como intercambio catiónico.

- **Hidratación y expansión**

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades específicas de la esmécticas, cualidad que es de vital importancia para uso industrial. El grado de hidratación depende directamente de la naturaleza del

cación interlaminar y la carga de la lámina. A este espacio interlaminar se conoce como expansión ya que permite la separación entre laminas.

- **Plasticidad**

Esta propiedad se le atribuye puesto que el agua forma una capa sobre las partículas laminares generando un lubricante que proporciona deslizamiento entre partículas cuando se aplica fuerza sobre ellas.

- **Tixotropía**

Se reduce a la pérdida de resistencia de un coloide al ser amasado y recuperar su estructura con el tiempo. Las arcillas al ser amasadas se transforman en líquido, posteriormente dejadas en reposo recobran la cohesión y de paso su estado sólido.

- **Proceso de fabricación del ladrillo**

A continuación, se da una breve descripción de cada uno de los procesos productos llevados a cabo en la industria de la arcilla para la elaboración de productos cerámicos como los ladrillos.

- **Extracción de la materia prima**

Se extrae y traslada la materia prima (arcilla) necesaria para la elaboración de ladrillos desde la zona de origen hasta las zonas de fabricación.

- **Maduración**

Primeramente, antes de incorporar la arcilla a la productiva, esta se somete a una cadena de tratamientos (tritución, homogeneización, reposo) con el propósito de alcanzar una apropiada consistencia y uniformidad de las características físicas y químicas deseadas.

- **Tratamiento mecánico previo**

Radica en una sucesión de operaciones con el fin de purificar y refinar la arcilla. Las herramientas aplicadas en esta etapa son los siguientes:

- Eliminador de piedras
- Desintegrador:
- Laminador refinador
- Depósito de materia prima procesada

Se sitúa la materia prima en silos especiales y techados para que el material se homogenice definitivamente en características físico-químicas.

- **Humidificación**

Se transporta la materia prima a un laminador refinador para seguidamente desplazarlo a un mezclador humedecido, en el cual se adiciona agua para conseguir la humedad precisa para el moldeado.

- **Moldeado**

Se pasa la arcilla a través de un orificio para obtener la forma del objeto deseado. Este proceso se realiza a altas temperaturas, utilizando vapor saturado ($\pm 130^{\circ}\text{C}$) y a presión reducida, con este proceso se obtiene una humedad más uniforme y una masa más compacta.

- **Secado**

Esta etapa es delicada en el proceso de producción, ya que aquí se ve el buen resultado y calidad del material. El secado tiene el propósito de eliminar el agua agregada en la fase de moldeado.

- **Cocción**

Se ejecuta en hornos de túnel de hasta 120m de longitud bajo altas temperaturas de cocción (900°C - 1000°C), dentro del horno la temperatura se trabaja de forma continua y uniforme. En esta etapa se produce la sinterización que determina la resistencia del ladrillo.

- **Almacenamiento**

Previamente al embalaje, se procede a la formación de paquetes sobre pallets, lo cual permitirá facilitar su transporte con carretillas. El embalaje consiste en envolver los paquetes con cintas de plástico o metal, con el propósito de poder ser depositados en lugares de almacenamiento.

6.1.3 Cemento

Material aglutinante en forma de polvo que presenta características de adherencia y cohesión permitiendo la liga de fragmentos minerales entre sí. Se obtiene de la calcinación bajo temperaturas aproximadamente de 1450°C, se comprende de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El Clinker (principal ingrediente del cemento) es el resultado del proceso de calcinación, el cual es molido finamente con yeso y aditivos químicos.

De acuerdo con varios estudios, el cemento se utilizó desde finales del siglo XVIII y desde entonces ha sido el principal material de construcción empleado por los humanos, ya que a través de los años el uso del cemento ha ido evolucionando.

- **Componentes**

Varios elementos componen químicamente la materia prima para la fabricación del cemento:

- Óxido de calcio (CaO) aportado por la cal.
- Dióxido de silicio (SiO_2), Aluminio (Al_2O_3) y Óxido de hierro (Fe_2O_3) aportado por la arcilla.
- Trióxido de azufre (SO_3) aportado por la adición del regulador del fraguado que es el yeso.

- **Proceso de fabricación del cemento**

- **Extracción de materia prima**

Se extrae la materia prima (calizas y arcillas) de la cantera, se transporta a la planta y se tritura.

- **Trituración y prehomogenización**

En una banda se transporta el material, el cual es analizado por un dispositivo de rayos gamma para después trasladarlo a la zona de prehomogenización.

- **Almacenado y dosificación**

La materia prima es almacenada para recibir minerales de hierro y caliza el cual es dosificado dependiendo del tipo de cemento.

- **Molienda de harina cruda**

El material pasa por un molino de crudo para ser pulverizado y tener una textura fina (harina), posteriormente se pasa a un silo de homogenización.

- **Fabricación del Clinker**

A altas temperaturas, la harina se convierte en Clinker (piedra pequeña cristalizada, redonda, gris, enfriada con rapidez). Después es pasado a un molino de rodillos.

- **Molienda de cemento**

El Clinker es molido con yeso y en este paso se determina el tipo de cemento a realizar.

- **Empaque y despacho**

6.1.4 Concreto

El concreto, también conocido como hormigón, es un material compuesto por la mezcla de un aglomerante (cemento), grava, arena, aditivos, aire y agua. Usado como material de construcción el concreto es de fácil y rápida preparación, presenta maleabilidad en estado líquido y aporta resistencia en su forma sólida.

- **Propiedades fisicoquímicas del concreto**

- **Impermeabilidad**

El concreto en estado endurecido trabaja como un sistema poroso, por tal no será completamente impermeable, sin embargo, si se mantiene una relación baja agua- cemento y se incorporan aditivos impermeabilizantes se consigue una mayor impermeabilización. La permeabilidad depende de:

- Finura del cemento
 - Cantidad de agua
 - Compacidad

- **Durabilidad**

El concreto es capaz de resistir al exterior, a los productos químicos y al desgaste bajo a la acción de fuerzas. La durabilidad del concreto depende directamente de que la pasta y los agregados sean de buena calidad, permitiendo de esta forma que los agregados no se separen de la pasta, esta combinación se refleja en las zonas de interacción interfacial, conocida como ITZ.

- **Resistencia**

La resistencia a compresión es la condición de carga en la que el concreto exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos, se simboliza con f'_c y se expresa generalmente en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) a una edad temprana de 28 días.

La resistencia a tensión se ve reflejado en la adherencia de cementos y agregados, produciéndose contracciones de esfuerzo en los bordes del elemento, una discontinuidad en el material representa relación de vacíos haciendo que el elemento sea frágil. El valor de la resistencia a tensión es $\pm 8\%$ al 12% de su resistencia a compresión.

7. MARCO LEGAL

- Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
- Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y se dictan otras disposiciones.
- Resolución 541 del 14 de diciembre de 1994 Ministerio del Medio Ambiente, por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación.
- Ley 1259 del 19 de diciembre de 2008, por medio de la cual se instaure en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 2981 de 2013 del 20 de diciembre de 2013, por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo.
- CONPES 3874 del 21 de noviembre de 2016. Política Nacional para la Gestión Integral De Residuos Sólidos.

8. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación “Métodos para el manejo y la mitigación ambiental generada por residuos de la industria de la arcilla y su posible aplicación en materiales de construcción en Colombia” corresponde a una de investigación por naturaleza cualitativa debido a que se encarga de analizar el problema, mediante la interpretación y comprensión de los procesos e investigaciones realizadas en la actualidad con el propósito de ser aplicado en Colombia. Por los objetivos se tratará de un estudio descriptivo y explicativo. El cual será trabajado de la siguiente manera:

- El capítulo 9 mediante una revisión bibliográfica de fuentes académicas, pretende entender el funcionamiento de la economía circular en la gestión de residuos sólidos de la industria de la arcilla.
- El capítulo 10 tiene como objetivo evaluar las diversas alternativas aplicadas a nivel mundial que impulsan la utilización de los residuos de la industria de la arcilla como recurso estratégico en la innovación de materiales de construcción, con base en investigaciones previas.
- El capítulo 11 mediante una revisión bibliográfica de fuentes académicas, pretende identificar los posibles métodos de aprovechamiento de los residuos de la industria de la arcilla de manera que sean sustentables y generen valor agregado.

- El capítulo 12 busca desarrollar una propuesta que involucre los métodos y alternativas que reduzcan y mitiguen los impactos ambientales generados por los residuos de la industria de la arcilla en Colombia.

9. ECONOMÍA CIRCULAR

9.1 Industria de la arcilla en Colombia

En Colombia y en el mundo la demanda de producción de ladrillos, tejas, y demás materiales elaborados en arcilla cocida representan un volumen de producción de grandes proporciones; así, por ejemplo, en países asiáticos como China con una producción total de ladrillos del orden de 1.000 billones de unidades, de la cuales gran parte de su fabricación se lleva acabo de manera artesanal con procesos no controlados y tan solo un 12,5% hace uso de procesos automatizados y controlados [1][2]. La carencia de procesos industriales no controlados apropiadamente trae consigo problemáticas como la alta la generación de volúmenes de residuos sólidos que se suman a los derivados de las actividades de construcción y demolición (RCD) [22]. En algunos casos estos residuos llegan a ser aprovechados como material de relleno, pero aun así esto no iguala la generación del desecho [30].

Sumado a lo anterior, el bajo costo de producción, su facilidad de uso y su relativa buena resistencia hace de estos materiales de construcción como uno de los más usados en la industria. Aunque el gasto energético y la huella de carbono es relativamente baja en comparación con otros materiales como el aluminio o los plásticos. Sin embargo, el volumen requerido de materiales elaborados en arcilla cocida como en el caso de los ladrillos representa para el sector de la industria de la arcilla un gran aporte como emisor de CO₂ en el medio ambiente.

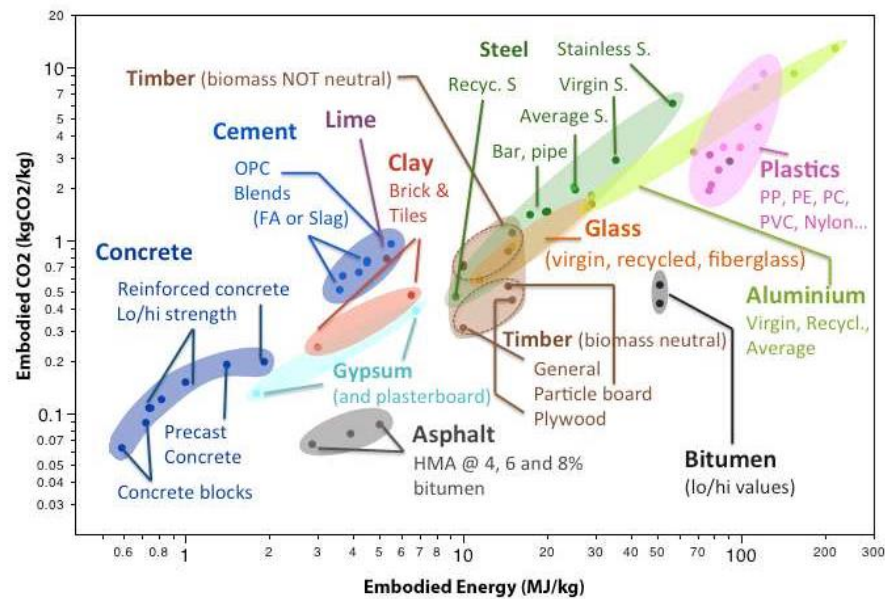


Ilustración 2. CO₂ y energía consumida en la elaboración de materiales
Fuente: Adaptado de [31].

En Latinoamérica en los últimos años países como Brasil y México han venido implementando paulatinamente diversos procesos de aprovechamiento enfocados específicamente a la producción de agregados reciclados [32]. En Colombia se presenta ausencia de información estadística. Sin embargo, en Bogotá se cuenta con una guía para la elaboración de un plan de gestión de residuos de construcción y demolición; donde se reporta que, en ciudades de gran crecimiento demográfico, como Bogotá, se generan hasta 15 millones de toneladas de RCD por año, de las cuales aproximadamente el 54% de estos materiales se tratan de ladrillos, azulejos, tejas y otros y un 12% se trata de concreto [32][33].

Es por esto por lo que se hace necesario aplicar conceptos como la economía circular como parte de la solución de búsquedas de alternativas que

permitan un mayor aprovechamiento y valor agregado a estos altos volúmenes de residuos generados por el sector de la construcción.



Ilustración 3. Residuos de ladrillo de arcilla
Fuente: Revistas SENA

9.2 Modelos de gestión de residuos sólidos en Colombia

Actualmente, en Colombia se ha desarrollado un modelo de gestión de residuos sólidos tomando como referente los modelos económicos de producción y consumo lineal. Lo cual supone una alta generación de residuos sólidos dado que los productos se desarrollan sin pensar en una posible reutilización al final de su ciclo de vida. Es decir que los bienes producidos a base de materias primas no renovables en su mayoría son vendidos al consumidor final, quien es el que descarta el producto cuando está ya no funciona o ya no cumple el propósito por el cual fue adquirido.

Este modelo representa grandes pérdidas tanto económicas y de recursos en las diversas etapas y se vuelve insostenible ante la generación de residuos a

largo plazo [34]. Por esta razón es importante implementar un modelo de mucho mayor eficiencia con valor agregado donde los materiales puedan ser incorporados en cualquier etapa de su ciclo de vida logrando así un uso más eficiente de los recursos y lo más importante protegiendo el medio ambiente.

En 1997, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo formuló la Política para la Gestión Integral de residuos Sólidos la cual tenía como objetivo plantear un modelo que permitiera la reducción de la cantidad o peligrosidad de los residuos sólidos generados, haciendo una recuperación de esto permitiendo una reducción del 30% en su disposición final en cinco años y desechándolos en el sistema de disposición final más adecuados en un 50% de los municipios colombianos dentro de un plazo de cinco años. Esta política se convirtió referente a nivel nacional al momento de orientar acciones ambientales en materia de manejo y control de residuos sólidos dado que plateaba planes de acción relevantes. Entre ellos se encuentra la minimización de consumo de materia prima en el origen, vinculados a programas de producción limpia, modificación de patrones de consumo y producción insostenible y fortalecimiento de cadenas de reciclaje. Posterior a esto se lograron avances en la gestión de residuos sólidos como el artículo 181 de la resolución 1096 del 2000, en la cual se regula los efectos ambientales por la actividad de recolección de residuos sólidos. Para el 2010, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible propuso una política nacional que se enfocaba en la producción y el consumo sostenible el cual propone una transformación productiva de sector industrial enlazando y promoviendo el mejoramiento

ambiental en diferentes líneas de acción dentro de esos sistemas de aprovechamiento de residuos, la regulación del manejo de residuos de los sectores de la construcción, manufactura, alimentos, transporte y empaque y envases.

Todos estos modelos planteados en su mayoría se constituyen con el fin de garantizar un control y manejo a aquellos residuos sólidos generados, pero ninguno enfocado específicamente a la gestión de residuos de construcción y demolición, actualmente no existen lineamientos a nivel nacional que expidan un paso a paso que contemple el aprovechamiento de este tipo de material de forma sistemática permitiendo la constitución de políticas que garanticen una solución viable y con valor agregado tanto para el desarrollo social como para el desarrollo sostenible. Siendo el principal motivo de esta falta de legislación la insuficiente información para el seguimiento, evaluación y toma de decisiones ya que no existe información sistemática relacionada a las cantidades de residuos orgánicos que sufren procesos de transformación o de residuos de construcción y demolición generados y aprovechados [34]. A pesar de esto a partir de información existente recopilada por organizaciones privadas, algunas autoridades y ONG'S a través de diversos estudios de consultoría e investigación se logró calcular una tasa nacional de aprovechamiento el cual relaciona en toneladas el total de residuos sólidos aprovechados y el total de residuos sólidos generados, el cual fue de un 17% para el año 2013 [35].

9.3 Modelo de producción lineal en la industria de la arcilla

Como se mencionó anteriormente Colombia constituye su modelo económico de producción y consumo lineal el cual incide en grandes pérdidas de recursos innecesarios. La Fundación Ellen MacArthur define todos aquellos desechos resultados del modelo de producción lineal donde se contempla desde los residuos generados en la cadena de producción de un bien hasta la energía consumida para la elaboración de este [27].

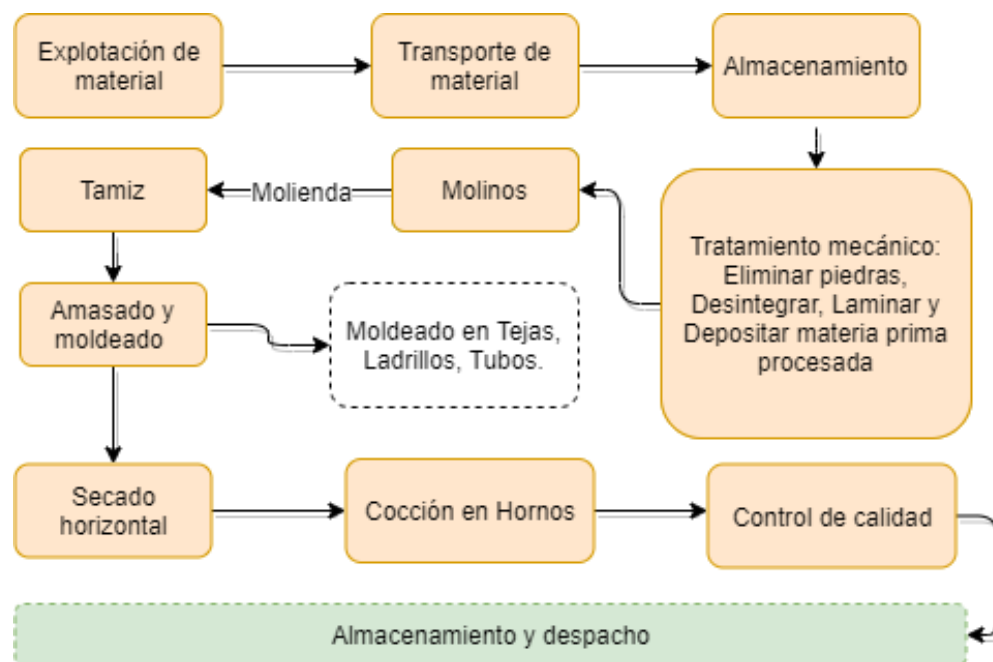
El modelo lineal representa pérdidas desde la cadena de producción donde en la producción de bienes, por lo general se pierden inmensas cantidades durante el proceso de extracción y la elaboración final; materiales que al final de la cadena productiva no son incorporados físicamente en los mismos productos.

Desperdicios a lo largo de la cadena de valor en los mercados, es la etapa donde gran parte de los bienes fabricados por falta de control de calidad o un mal proceso de fabricación sufren daños en la etapa de almacenaje, transporte o utilización.

Otro factor que aporta en la generación de residuos es el fin del ciclo de vida del material, donde la mayoría de los materiales poseen bajas tasas de aprovechamiento a diferencia de las tasas de fabricación. En Europa para el 2010 se generaron 2,7 billones de toneladas de residuos donde tan solo una 40% de este total fue reutilizado, aprovechado y tratado. Entre un 20% y 30% de todos los residuos de construcción y demolición fueron aprovechados o reutilizados [34]. Lo

que traduce a una pérdida de materiales fundamentales dentro del sistema productivo, dado que son materiales con alto potencial al poder ser incorporados dentro del ciclo productivo lo cual permitiría una disminución significativa en el uso de recursos vitales como el agua y reducción de costos de extracción y otros necesarios para su transformación y posterior aprovechamiento.

Finalmente se da importancia a la energía residual que se pierde cuando un producto deja de hacer parte del ciclo productivo por la eliminación de este. Es decir que no se le da un aprovechamiento mediante un tratamiento de incineración que permita recuperar una pequeña porción de la energía usada al momento de la conformación del bien.



*Ilustración 4. Proceso de fabricación de ladrillos.
Elaboración propia*

La ilustración 4 representa esquemáticamente el actual modelo productivo para la elaboración de ladrillos en la industria de la arcilla, el cual no contempla un instrumento normativo que reglamente el manejo de los residuos resultantes de la fabricación de este tipo de materiales de construcción. Esto supone que en la mayoría de los casos los residuos resultantes del proceso de fabricación sean desechados sin tratamiento alguno y en el peor de los casos que no se lleve a cabo ningún tipo de beneficio del material.

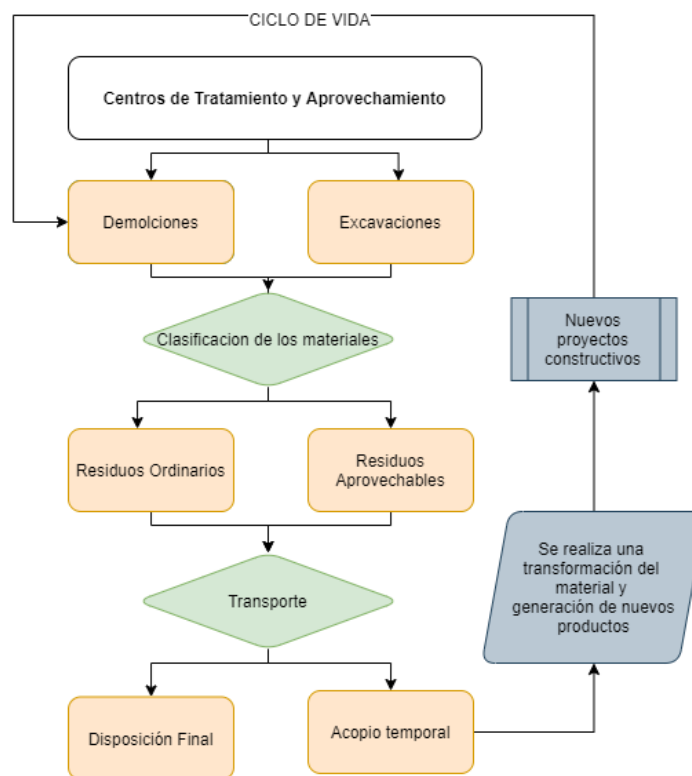
9.4 Modelo de producción enfocado en la economía circular

Colombia en la actualidad pretende aplicar una Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos como punto clave para el desarrollo social, ambiental, económico y productivo, medida liderada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. La cual tiene como objetivo principal gestionar el ciclo de vida de residuos no peligrosos en función de un desarrollo sostenible y la mitigación de la contaminación medio ambiental. Dentro de esta Política Nacional se promueve el avance gradual del actual modelo de economía lineal a un modelo de economía circular, el cual se fundamenta en la disminución de generación de residuos y la optimización del uso de los recursos para que estos permanezcan la mayor cantidad de tiempo dentro del ciclo económico y se aproveche al máximo su potencial energético y sobre todo su materia prima. Para esto la Política Nacional plantea una jerarquía de los residuos, donde las acciones estarán dirigidas principalmente a prevenir, reutilizar y aprovechar la mayor cantidad posible de residuos sólidos generados en la

industria de la arcilla tratando los materiales desechados como objeto de valorización y valor agregado que permita optimizar la operación de los rellenos sanitarios y en caso de que no sea posible la reutilización y aprovechamiento, garantizar la disposición final o eliminación del desecho cumpliendo con todos los estándares medio ambientales.

En este sentido, lo que se quiere es adecuar los incentivos e instrumentos existente en el actual modelo económico y generar los que sean necesarios para promover la implementación de la economía circular dentro del sector productivo de los desechos generados por los materiales de construcción y cualquier otro desecho no peligroso.

Principalmente la implementación de sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos sostenibles e inclusivos en por lo menos las trece principales ciudades del país, implementando esquemas operativos de aprovechamiento donde gran parte del material sea separado en la fuente y así mismo incrementando la tasa de aprovechamiento. Claro ejemplo de esto se da en centros de tratamientos y disposición, sitios destinados a la realización de procesos de separación, clasificación, almacenamiento de todos los residuos de construcción y demolición.



*Ilustración 5. Ciclo funcional en centros de tratamiento y aprovechamiento.
Elaboración propia*

Los centros de tratamiento y aprovechamiento son lugares autorizados por la autoridad ambiental local competente para la recolección y acopio de material residual donde se realizan actividades de separación, clasificación, tratamiento y almacenamiento temporal para posteriormente la transformación de este y la elaboración de nuevos productos. En Colombia, Bogotá y Cundinamarca son las zonas donde más se encuentran centros de tratamiento y aprovechamiento con aproximadamente ocho (8) centros que se dedican al aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición. Donde tan solo uno de esos centros realiza la transformación de estos en nuevos materiales como concretos, morteros, relleno, drenante, bases y subbases.

Nombre	Municipio	Ubicación	Tipo de material autorizado para disponer en el sitio
Maquinas Amarillas SAS	Bogotá	N/a	Aprovechamiento y Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).
AMCON Colombia SAS	Bogotá	N/a	Tratamiento y aprovechamiento de residuos de origen pétreo (concreto, arcilla, asfalto, piedra, sobrante de mortero), de manera in situ, para transformarlos en (concreto, mortero, relleno, drenante, bases /sub – bases).
INCOMINERIA	Mosquera	Kilómetro 3.5 Zona Industrial Balsillas	Aprovechamiento y Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).
CICLOMAT	Cota	Autopista Medellín Kilómetro 1.2 vía Siberia -Bogotá entrada Parque Industrial La Florida 600 metros al sur de la calle 80	Aprovechamiento y Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).
CICLOMAT - CODEOBRAS	Cota	Autopista Medellín Kilómetro 1.2 vía Siberia -Bogotá entrada Parque Industrial La Florida 600 metros al sur de la calle 80	Aprovechamiento y Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).
Granulados Reciclados de Colombia GRECO SAS	Cota	Vereda Siberia, sector La Florida, en la zona agroindustrial	Aprovechamiento y Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).
RECICLADOS INDUSTRIALES	Cota	Vereda Siberia, sector La Florida, en la zona agroindustrial	Aprovechamiento y Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).
Centro de Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición - CARCD	Mosquera	Vereda Balsillas	Aprovechamiento y Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

*Tabla 1. Centros de aprovechamiento y tratamiento de residuos
Elaboración propia*

La implementación de estos centros de tratamiento y aprovechamiento refleja como gradualmente se está migrando del antiguo modelo económico lineal a un nuevo modelo económico circular más eficiente, inteligente y que brinda un valor agregado al reciclaje y reutilización de materiales.

10. ALTERNATIVAS DE UTILIZACIÓN

En el mundo existe una gran variedad de prácticas que con el pasar de los años han permitido cada vez más la utilización de residuos de la industria arcillera, numerosos estudios e investigaciones demuestran que su implementación es viable ante distintos ámbitos. Una de las grandes ventajas de darle nuevos usos a estos materiales es principalmente reducir el impacto ambiental que se genera al ser desechados o descartados por no tener un buen terminado en su ejecución. A continuación, se describen opciones que se han llevado a cabo en diferentes países en cuanto a la posible aplicación de desechos cerámicos como materiales de construcción.

En el 2008, en Australia un grupo de fabricantes de adoquines y ladrillos estuvo encargado de realizar una evaluación del ciclo de vida de los ladrillos de arcilla, teniendo en cuenta desde la extracción de materia prima hasta la disposición final de este. Ellos sugerían que los ladrillos podían reciclarse de tres distintas maneras, como primera opción evalúan la conservación y durabilidad de edificaciones construidas con ladrillo las cuales pueden ser modificadas para darles un uso diferente y de esta forma disminuir el efecto que genera construir un edificio nuevo. Los ladrillos pueden ser recuperados, limpiados y ser utilizados nuevamente para construir nuevas edificaciones. Los ladrillos viejos, se pueden reciclar en nuevos ladrillos o en diferentes materiales para uso en la construcción como agregado para el concreto o subbase para pavimentos o carreteras [36].

La organización Tiles and Bricks of Europe (TBE), en el 2011 emitió un informe sobre el Ciclo de Vida de la arcilla. El capítulo 5 (Demolición y reciclaje) expresa que los ladrillos de arcilla poseen un alto potencial en su vida útil (por encima de 100 años) sin embargo estos son demolidos mucho antes de cumplir su ciclo, por tanto, un proyecto de investigación realizado por la TBE en 1990 evaluó varias alternativas para la reutilización de arcilla reciclada en materiales de construcción. Entre estas, se encuentra como material de relleno y estabilización carreteras secundarias, principalmente para zonas húmedas. En Suiza, Holanda, Reino Unido y Dinamarca se pueden utilizar ladrillos de arcilla triturada, tejas y otra mampostería como material de base no consolidado para la construcción de carreteras más grandes. Este material es apto para el tráfico pesado debido a su bajo riesgo de deformación en reemplazo de materiales naturales como arena y grava. Los residuos generados por la arcilla y otras mamposterías son aprovechadas para nivelar y rellenar zanjas de tuberías. El agregado más fino es utilizado como material de zanjas de tubería, mientras que las partículas más gruesas son utilizadas como agregados para morteros y hormigón. La arena empleada como superficie de pistas de tenis es producida por tejas y ladrillos rojos la cual se realiza por medio de trituración, la calidad del material brinda una cantidad de beneficios como es, un mejor drenaje del agua, mayor densidad del material (menos dispersión con el viento) y no presenta problemas con musgos. Otra cualidad de los desechos de ladrillo triturados es que pueden ser usados para formar los sustratos en cultivos de plantas. Este material tiene la capacidad de mezclarse con otras sustancias utilizadas en la producción vegetal como material

orgánico de composta. Son implementados en techos verdes los cuales presentan una capa densa de polímero y posterior a esta una capa entre 10 a 30 cm de ladrillo triturado. En Europa central se emplearon los residuos de arcilla como aditivos biogénicos. Se dieron cuenta que la implementación de estos ofrece varios beneficios, entre estos, aligerar los productos, aumentar el rendimiento aislante y generar energía adicional reduciendo el consumo de combustibles fósiles lo que a su vez genera menos emisiones de CO₂ [37].

En Brasil, se utiliza los residuos de construcción para fabricar nuevos bloques y ladrillos, pero ecológicos. Realizan una mezcla entre los escombros y residuos de demolición con cemento, con proporciones entre un 20% al 40% y 20% respectivamente, dando como resultado ladrillos con altas cualidades de durabilidad y resistencia [36]. Otras investigaciones elaboradas en este país muestran la implementación del chamote de tejas como material reutilizable en la creación de nuevos ladrillos. Hicieron uso del chamote en proporciones del 0%, 5%, 10%, 15%, y 20% como material de reemplazo en la masa cerámica, en consecuencia, los resultados mostraban que era factible utilizar dichos materiales y que las propiedades evaluadas mejoraron para ciertos casos [3].

Debido a la alta producción de piezas de arcilla en Brasil, y a su vez el descarte de las piezas defectuosas, sugirieron realizar estudios con estos residuos (chamote) y encontrarles un correcto uso, demostrando que en un reemplazo del 20% y 30% de ladrillo en mezclas patrón y comparadas con los requerimientos del

DNIT Paving Manual de Brasil, el chamote alcanzaba a ser altamente útil para ser utilizado en pavimentos de carreteras [38].

Se ha demostrado que el chamote presenta altas cualidades en su implementación. Un estudio evaluó la posibilidad de utilizar las propiedades del chamote en morteros de usos múltiples, dando como resultado que los morteros que incorporan chamote presentaban buen rendimiento en el endurecimiento pudiéndose utilizar en edificaciones generales, esto comparado principalmente con las normas establecidas en Brasil [39].

En la Universidad Técnica de Ambato se evaluó el uso de ladrillo triturado como material filtrante de un prototipo de biofiltro de agua residual, donde se determinó que el ladrillo triturado como material filtrante presenta buenas condiciones, demostradas en la reducción de contaminación en base a los análisis químicos realizado a las muestras de agua residual filtrada por medio de parámetro como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Totales (ST). Donde se encontró además que el material filtrante no presenta cambios importantes en sus características físicas luego de llevar a cabo el proceso de filtrado [43].

En el 2017, la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, publicó un artículo el cual involucra el uso de polvo de ladrillo como material complementario en morteros y hormigones. Evaluaron las propiedades físicas y mecánicas que presenta el polvo de arcilla en reemplazo del 8%, 24% y 40% del cemento

portland. Los resultados muestran que en los morteros el uso de polvo de arcilla no es relevante debido a la fluidez, sin embargo, expone leves aumentos en la absorción de agua. El hormigón por su parte, con un reemplazo del 24% presenta valores similares de resistencia respecto a la muestra patrón [40].

De lo anterior hay que mencionar que, en Colombia al igual que en Argentina se estudió la posibilidad de implementar el polvo de ladrillo, ya que notaron que este material presentaba propiedades cementantes. Partieron de hacer varios ensayos mecánicos para determinar las cualidades que debe poseer el cemento para ser utilizado en la construcción, basándose en las características de fraguado, resistencia de morteros, resistencia a la compresión de cilindros de concretos, entre otros. Así mismo, realizaron ensayos químicos entre los cuales se encontraban Fluorescencia de Rayos X (XRF), Análisis Termogravimétrico (TGA) y Granulometría Laser. Entre los resultados, el reemplazo más factible en cuanto a ganancia de resistencia para prefabricados de concreto se dio a partir de la comparación de un cemento con 0% de reemplazo de escombros, frente a un 75% en cemento y un 25% de adición del polvo de ladrillo [41].

Por otra parte, en la Universidad Nacional de Colombia en Medellín en el año 2015 se elaboró un concreto usando reciclados a partir de escombros de concreto y mampostería, evaluando aspectos como resistencia a la compresión a los 3, 7, 14, 28, 56, y 91 días; porosidad, carbonatación, velocidad de pulso ultrasónico y costos en comparación de un concreto convencional. En últimas, determinaron la posibilidad de fabricar concretos estructurales y no estructurales,

con sustituciones de agregados naturales por agregados reciclados finos y gruesos en porcentajes del 25, 50 y 100 %. La resistencia a compresión y los valores de velocidad de pulso ultrasónico en algunas mezclas fueron del orden del 98 % de la muestra patrón; además la mezcla elaborada con 100 % de agregados reciclados, presentó una diferencia en cuanto a la profundidad de carbonatación de 0.7 mm en relación con la mezcla de referencia para una edad simulada de 27 años [42].



*Ilustración 6. Resumen alternativas de uso
Elaboración propia*

11. METODOS DE APROVECHAMIENTO

Indiscutiblemente lo mencionado a lo largo de esta investigación parece confirmar positivamente que utilizar los residuos producidos por la industria arcillera son viables para ser contemplados como nuevos materiales en la construcción. Sin embargo, cabe aclarar que existe una gran diferencia entre reutilizar y reciclar dichos desechos.

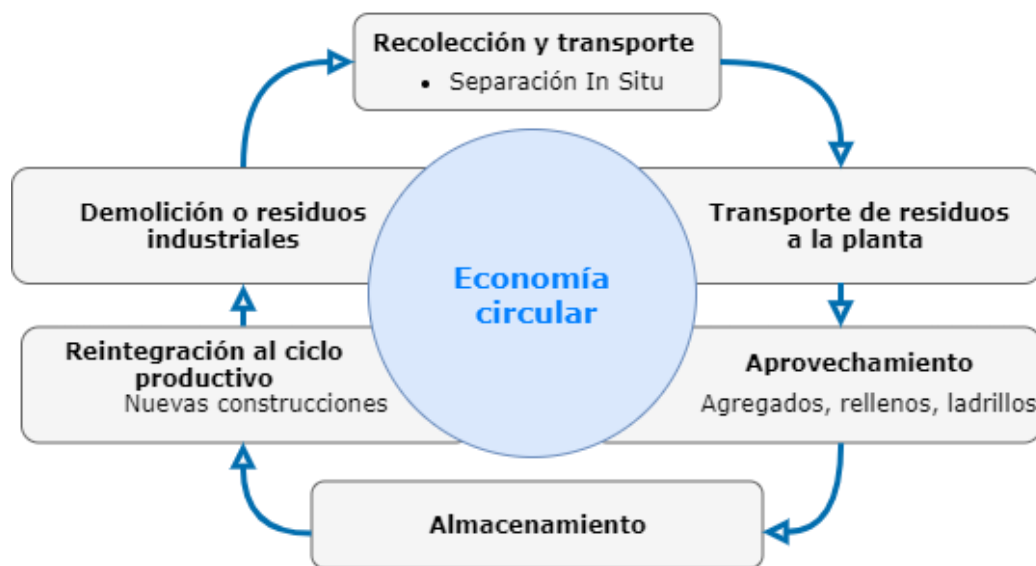
Así pues, se entiende como reutilización al proceso mediante el cual se vuelve a utilizar el componente en sí, sin adquirir transformación alguna. Por otra parte, se le conoce como reciclaje cuando el material es tratado mediante algún proceso físico o químico para ser reintegrado a su ciclo productivo [44]. De acuerdo con esto se propone un método de aprovechamiento que puede ser llevado a cabo al momento de querer hacer uso de estos residuos generados por la industria arcillera el cual es el reciclaje. No es posible hacer una reutilización sin reciclar primero el material, puesto que este material es resultado de los desechos de la industria arcillera los cuales pueden ser ladrillos, tejas, tuberías y otros con patologías que comprometen su funcionalidad o capacidad estructural.

11.1 Aprovechamiento del material mediante su reciclaje

Cualquier material proveniente de la industria de la construcción que contenga como materia prima la arcilla puede ser reciclado, teniendo en cuenta que la definición del término reciclar, este proceso inicia desde la recolección del material desechado por la industria ya sea por defectos en su fabricación, malas

prácticas al momento de elaborar el producto como reducción en la capacidad mecánica del elemento por defectos en la cocción de la arcilla, exfoliaciones, roturas frágiles en el material y otros casos en que los materiales son almacenados durante largos periodos de tiempo en la intemperie causando patologías originadas por agentes atmosféricos.

El material recolectado debe ser transportado a centros de aprovechamiento y tratamiento de residuos donde se lleven a cabo procesos de clasificación, limpieza y tratamiento de los materiales para su posterior almacenamiento temporal y finalmente reintegración al ciclo productivo (reutilización).



*Ilustración 7. Modelo de Economía Circular aplicado al aprovechamiento de los residuos de la industria de la arcilla
Elaboración propia*

A continuación, se llevará a cabo la explicación de cada uno de los procesos y tratamientos necesarios para el reciclaje y aprovechamiento del material.

11.1.1 Recolección y transporte

La recolección y transporte del material depende directamente de la industria generadora del residuo ya sea un pequeño o gran generador.

Para los pequeños generadores donde se lleva a cabo un proceso de fabricación más artesanal y por ende menor producción, se dispondrá de puntos de acopio donde ellos mismos sitúen estos residuos previamente separados y libres de cualquier contaminante o materia orgánica que dificulte el aprovechar en su totalidad la mayor cantidad posible de residuos. Estos serán depositados en cajas estacionarias las cuales son contenedores metálicos que cumplen la función de almacenar temporalmente los residuos sólidos.

Por otra parte, la gran industria arcillera con procesos automatizados de fabricación dispondrán de cajas estacionarias dentro de sus instalaciones, cuando estas estén completamente llenas por los desechos serán transportadas por camiones que lleven los residuos hasta los centros de aprovechamiento y tratamiento del material desechado para posteriormente mediante una serie de procedimientos realizar la transformación del residuo.



*Ilustración 8. Cajas estacionarias para el transporte de los residuos arcillosos.
Fuente: Ecoequipos de Colombia*

Para lograr una correcta separación y disposición del residuo por parte del generador es necesario brindar un acompañamiento y llevar a cabo campañas que permitan ofrecer los conocimientos técnicos necesarios para un correcto aprovechamiento del material, así mismo reducir el impacto ambiental y aumentar la cantidad total de residuos potencialmente aprovechables.

11.1.2 Trituración

Una vez se disponga del residuo limpio y libre de materia orgánica en el centro de aprovechamiento y tratamiento, se hace uso de máquinas trituradoras primarias, secundarias y terciarias que se encargaran de realizar una transformación mecánica para luego ser clasificadas o tamizadas en diferentes granulometrías en función de cuál sea el aprovechamiento que se le quiera dar al material, desde agregados gruesos y finos para concretos o morteros, material de lecho filtrante, materiales para subbases y bases, hasta material más fino como polvo de ladrillo para elaboración de nuevos ladrillos y bloques cerámicos, mobiliario urbano y entre otros.

Para esto se debe disponer del residuo en la máquina trituradora de mandíbulas la cual lleva acabo la trituración primaria del residuo de arcilla. Esta debe ser ajustada de forma tal que se adapte a los tamaños máximos del material reciclado para lograr la mayor eficiencia posible. El criterio más importante al momento de elegir la abertura de la trituradora es asegurar que el residuo con mayor tamaño que ingrese a la maquina no supere el 80% de la dimensión de la abertura de la trituradora. El material triturado producido deberá resultar con tamaños máximos de 3" hasta 1" que facilitan su traslado en bandas transportadoras las cuales alimentan la trituradora secundaria. El material con granulometría mayor a 3" es material de rechazó por lo cual no se le hace una trituración primaria y se lleva directamente a la trituración secundaria con el fin de aumentar la productividad y evitar la pérdida de energía al someter al residuo a una trituración primaria.

La trituración secundaria es llevada a cabo en una trituradora de cono con movimiento excéntrico con la cual se logran tamaños intermedios y finos. Al igual que en la trituración primaria se trabaja con el mismo criterio para la selección de la abertura de la máquina trituradora. El material triturado producido oscila en tamaños máximos de 3/4" a 3/8" por ejemplo agregados para terraplenes o balastro.

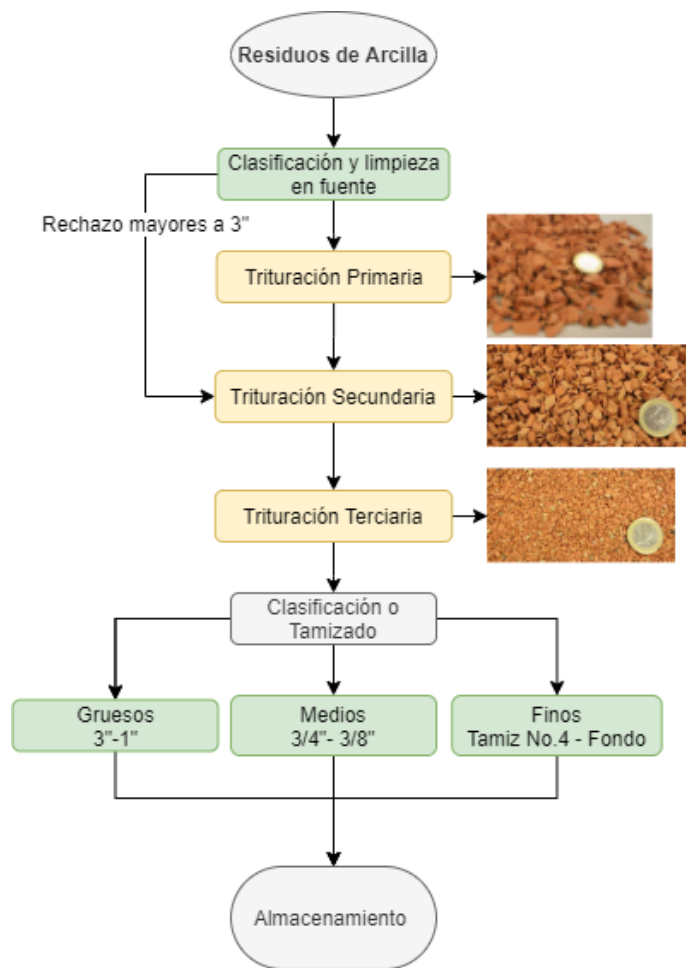
Por último, el material resultante de la trituración secundaria debe ser sometido nuevamente a una trituradora de cono con movimiento excéntrico lo que permite una reducción de los tamaños que van desde el tamiz No. 4, de 4,75 mm,

hasta el Fondo, en esta etapa de trituración terciaria se determina la calidad del producto final de trituración.

11.1.3 Tamizado o Cribado

La etapa de tamizado o cribado tiene como objetivo clasificar los materiales triturados mediante el uso de tamices o cribas con los cuales se obtienen diferentes productos.

El triturador primario arroja materiales gruesos con tamaños de 3" a finos los cuales se conducen por bandas transportadoras hasta la criba, en este proceso se separa la arena de las gravas, luego la criba separa todo el material que pasa por la malla de 3/4" y que se retiene en la malla de 3/8" el cual es clasificado como material terminado de granulometría media y por ultimo todo el material que pasa por la malla 3/8" se envía en bandas transportadoras como producto terminado fino o arenas No. 4. Todo el proceso de trituración y cribado que se lleva a cabo para el reciclaje de los residuos de arcilla se asemejan a el proceso industrial que se realiza en una planta de trituradora y cribado fija de materiales pétreos.



*Ilustración 9. Esquema de plan de aprovechamiento del material reciclado
Elaboración propia*

11.1.4 Almacenamiento y manipulación del material resultante

Finalmente, el material resultante ya clasificado y limpio debe ser almacenado de manera tal que se prevenga la aparición de problemas durante su almacenamiento y manipulación como lo puede ser la segregación de las partículas, la degradación del material, la contaminación del mismo con materiales extraños y protegidos de la intemperie.

11.2 Mitigación ambiental

El uso de los residuos de los materiales de construcción civil y la demolición transformados en agregados reciclados o materiales aprovechables pueden ser empleados y reintegrados al ciclo productivo, desde el punto de vista ambiental el reciclaje de estos residuos es bastante interesante, dado que incrementa la vida útil de los vertederos y previene la degradación de los recursos no renovables; pero, desde el punto de vista netamente económico, el reciclaje de residuos de materiales de la industria de la construcción resulta atractivo cuando el producto es competitivo con otros materiales en relación al costo y a la calidad. Con lo cual el uso de materiales reciclados, se puede traducir en grandes ahorros en el transporte de residuos de la construcción y de materia primas [45].

Por lo tanto, la implementación de un programa de gestión y mitigación ambiental enfocada hacia una economía circular mediante la reglamentación de normas técnicas y ambientales, puede ser una medida eficaz para el aprovechamiento y uso de estos residuos. Sin embargo, se hace necesaria la intervención de entidades distritales y nacionales que regulen la generación de desechos y residuos de construcción y así mismo mitigar la disposición de estos en lugares que no son adecuados para su almacenamiento ni aprovechamiento, como lotes baldíos, baches, lecho de ríos y ecosistemas que se vean gravemente afectados por la contaminación de estos residuos.

12.PROPUESTA PARA EL USO DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA ARCILLA EN COLOMBIA

En efecto, la revisión bibliográfica evaluada en capítulos anteriores lleva a analizar la posibilidad de escoger ciertas alternativas que involucren la utilización de residuos de arcilla, de manera que estas puedan ser aplicadas en Colombia y por consiguiente den como resultado una disminución en el impacto generado por esta industria. Varios autores en Colombia y en el mundo demuestran en sus ensayos la importancia de conocer los componentes químicos que posee la arcilla, dado que estos determinan en gran parte el uso que se les puede dar. A continuación se presenta una tabla resumen, a partir del análisis químico por Fluorescencia de Rayos X reportados en la bibliografía revisada, la cual permite identificar los componentes principales del material de estudio (arcilla).

	COMPONENTES QUIMICOS (%)								Alternativa
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MgO	CaO	Otros	
Estudio de reutilización de residuos de baldosas cerámicas (Chamote)									
Masa cerámica	59,3	20,9	8,6	4,1	1,5	2,6	0,9	2,1	Bloques de sellado cerámicos
Chamote	66,5	20,4	8,6	1,0	1,5	1,2	0,1	0,7	
Mezclas de arcillas y residuos sólidos de construcción para su utilización en la industria de materiales									
Arcilla roja	41,91	23,39	10.20	-	-	0,18	0,08	0,43	Ladrillos cerámicos
Preparación y caracterización de sistemas chamote - arcilla para la reutilización de residuos industriales									
Muestra 1	60,55	27,55	6,00	3,55	1,26	0,08	0,88	1,18	Bloques cerámicos
Muestra 2	62,19	24,29	7,66	1,89	1,39	0,07	1,99	0,51	
Ladrillo	61,07	25,29	7,67	3,43	1,22	0,08	0,79	0,44	
COLOMBIA									
Producción de elementos constructivos a partir de residuos de ladrillo activados alcalinamente									
Residuo ladrillo	65,92	20,08	9,10	0,97	1,09	0,86	0,73	0,44	Bloque, adoquín y teja
Residuo ladrillo-10% en peso cemento Portland	21,13	4,92	4,88	0,25	0,24	1,61	64,27	0,26	
Evaluación de la adición de polvo de ladrillo en la mezcla de cemento, para la producción de prefabricados de concreto en la empresa reciclados industriales de Colombia									
Cemento (muestra patrón)	18,52	4,31	4,1	0,89	0,28	0,03	61,84	7,08	Prefabricados de concreto
RCD 8% en peso	66,59	8,65	2,6	0,6	0,45	0,53	10,96	1,58	

Tabla 2. Resumen componentes químicos (%) para las alternativas
Elaboración propia

En vista de que en Colombia, en gran parte del territorio, los recursos existentes comprueban la presencia de depósitos arcillosos, la diversidad de estos permite adaptar algunos de los ensayos vistos a nuestro país rigiéndonos principalmente por las normas vigentes. Se dice que un gran número de estos depósitos de arcilla son de origen residual y transportado debido a la actividad volcánica relacionada a los Andes Colombianos [44].

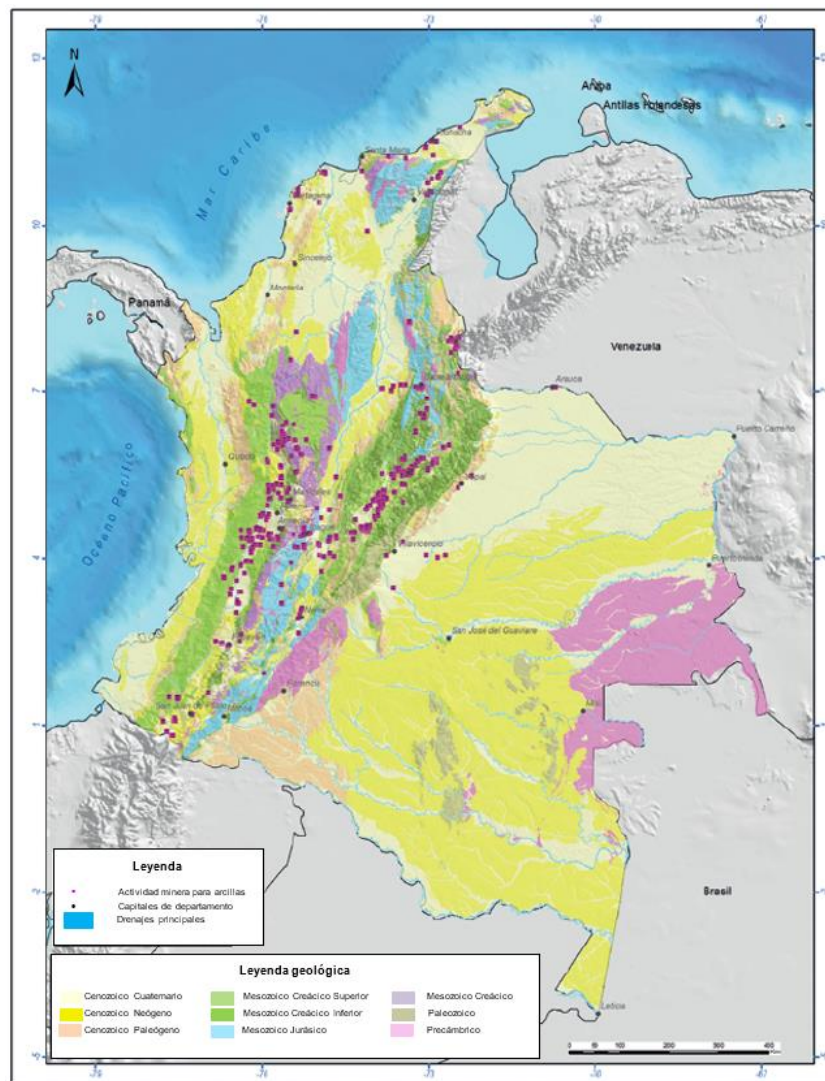


Ilustración 10. Principales zonas con actividad minera de arcillas en Colombia
Fuente: Metodología para la evaluación de producción de cementos tipo LC3 en el contexto colombiano [46].

Como se puede observar en la Ilustración 9, existe una cantidad considerable de yacimientos arcillosos, los cuales en su mayoría son utilizados como fuentes de extracción de materia prima para su implementación en diversos campos. Sin embargo, el volumen de producción de arcilla en las diferentes partes del país no sobrepasa los cinco millones de toneladas anuales[44], esto se debe porque en Colombia este tipo de explotación minera se categoriza como tipo II, en el decreto 1886 del 2015 se hace referencia a excavaciones subterráneas donde la concentración de metano en la mina es igual o inferior a 0,3 % . Al mismo tiempo, hay que mencionar que esta categorización tuvo en cuenta el tipo de mineral, el volumen de producción, reservas, la tradición minera de comunidades locales y regionales; además de clasificar en 26 distritos agrupados en 3 distritos los cuales están organizados de mayor a menor dependiendo el volumen de producción.

No obstante, para cumplir con el objetivo de este capítulo es importante determinar cuáles de estos depósitos funcionan para efecto de nuestra investigación. Por tanto, de acuerdo con la tesis desarrollada por Muñoz López [46], se identifican cuatro formaciones geológicas en el país que cumplen con las condiciones ideales para ser fuente de materia prima en la industria de los materiales de construcción.

12.1 Formación Guaduas

La formación Guaduas se encuentra dentro el Distrito minero Sabana de Bogotá, el cual a su vez está conformado por el distrito capital de Bogotá y sus

municipios cercanos a Bosa, Funza, Suba, Usaquén, Usme; asimismo los municipios de Bojacá, Chía, Gachancipá, Guasca, La Calera, Madrid, Mosquera, Nemocón, Sibaté, Soacha, Sopó, Subachoque, Tabio, Tenjo, Cota, Zipaquirá y Tocancipá. Este distrito abarca arcillas pertenecientes a depósitos terciarios representante de las formaciones Guaduas y Bogotá.

Esta formación comprende de arcillolitas limosas, de aparente color gris a gris amarillento en su parte inferior, gris oscuro en su parte media y en su parte superior amarillo rojizo a grasoso. Gracias a sus componentes, estas arcillas pueden ser utilizadas para crear elementos como tubos, ladrillos y tejas, sin embargo, al tener gran contenido de illita y montmorillonita la arcilla deber ser complementada con materiales que le aporten resistencia.

REQUISITOS MÍNIMOS	FORMACIÓN GUADUAS
$\text{Al}_2\text{O}_3 > 18 \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 19,74 \%$
$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 > 0,3 \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 0,33 \%$
$\text{CaO} < 0,3 \%$	$\text{CaO} = 0,27 \%$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 < 10 \%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,78 \%$

*Tabla 3. Comparación de los requisitos químicos formación Guaduas
Fuente: Metodología para la evaluación de producción de cementos
tipo LC3 en el contexto colombiano [46].*

12.2 Batolito de Ibagué

El batolito de Ibagué pertenece al Distrito minero Ataco-Payandé el cual hace parte del departamento del Tolima abarcando la zona minera de los municipios de Ataco, Chaparral, Coello, Coyaima, Carmen de Apicalá, Espinal, Flandes, Guamo, Ibagué, Melgar, Rovira, Saldaña, San Luis y Valle de San Juan. Este departamento se caracteriza por contener de depósitos de arcillas residuales

debido a la meteorización de rocas ígneas intrusivas, extrusivas y metamórficas; igualmente, es posible encontrar suelos sobre depósitos aluviales, de derrubio, sedimentarios o transportados.

El batolito de Ibagué representa una formación intrusiva del Jurásico Superior que dispone de la presencia de granodioritas, tonalitas, cuarzodioritas, granitos y cuarzo monzonitas. Este cuerpo intrusivo está constituido en su mayoría por saprofitos, lo cual ha permitido ser utilizado como fuente arcillas para ladrilleras, esto se debe a en que su composición de minerales producto de la meteorización de la roca forma gran parte de feldespatos y esto a su vez caolines.

REQUISITOS MÍNIMOS	FORMACIÓN BATOLITO IBAGUÉ
$\text{Al}_2\text{O}_3 > 18 \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 19,68 \%$
$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 > 0,3 \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 0,41 \%$
$\text{CaO} < 0,3 \%$	$\text{CaO} = 4,58 \%$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 < 10 \%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10,71 \%$

*Tabla 4. Comparación de los requisitos químicos Batolito Ibagué
Fuente: Metodología para la evaluación de producción de cementos
tipo LC3 en el contexto colombiano [46].*

12.3 Formación Amagá – Medellín

El Distrito minero Amagá – Medellín incorpora las fuentes mineras de los municipios de Amagá, Angelópolis, Bello, Copacabana, Fredonia, Girardota, Itagüí, Medellín, Venecia y Titiribí. En este distrito se pueden hallar arcillas residuales en el batolito Antioqueño producto de la meteorización de rocas ígneas intrusivas como extrusivas. Las arcillas sedimentarias las cuales se ven en menor cantidad pertenecen principalmente a la formación de Amagá a partir de la inundación de dicha cuenca; estas arcillas se caracterizan por ser orgánicas de

alta, mediana y baja plasticidad de composición caolinítica. Pueden ser utilizadas en la creación de ladrillo macizos, perforados, tejas y tubos.

REQUISITOS MÍNIMOS	FORMACIÓN AMAGÁ
$\text{Al}_2\text{O}_3 > 18 \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 18,51 \%$
$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 > 0,3 \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 0,31 \%$
$\text{CaO} < 0,3 \%$	$\text{CaO} = 0,36 \%$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 < 10 \%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 6,09 \%$

*Tabla 5. Comparación de los requisitos químicos Formación Amagá Medellín
Fuente: Metodología para la evaluación de producción de cementos tipo LC3 en el contexto colombiano [46].*

12.4 Stock de arcillas Altavista – Itagüí

El Stock de arcillas Altavista – Itagüí hace parte del Distrito minero Amagá – Medellín, en esta zona se describen fuentes que contiene arcillas residuales contenidas en depósitos de tipo mecánico, lo cuales hacen referencia a depósitos de ladera y coluviones. Estas arcillas al igual que las mencionadas anteriormente, son competentes para la fabricación de ladrillos macizos, ladrillos para bovedillas, ladrillos perforados, tejas y tubos.

REQUISITOS MÍNIMOS	STOCK DE ARCILLA ALTAVISTA-ITAGÜÍ
$\text{Al}_2\text{O}_3 > 18 \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 25,1 \%$
$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 > 0,3 \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1,9 \%$
$\text{CaO} < 0,3 \%$	$\text{CaO} = 0,74 \%$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 < 10 \%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 9,23 \%$

*Tabla 6. Comparación de los requisitos químicos Stock de arcilla Altavista-Itagüí
Fuente: Metodología para la evaluación de producción de cementos tipo LC3 en el contexto colombiano [46].*

En relación con las cuatro zonas del país presentadas anteriormente es conveniente destacar que estas demuestran contener los componentes principales para ser utilizados como materiales cementicios. La investigación elaborada por

Muñoz [46], indica los requisitos mínimos en cuanto a la composición química y mineralógica de las arcillas aptas para ser empleadas como material cementicio suplementario en cementos; dentro de estos minerales encontramos la Alúmina (Al_2O_3), Óxido de silicio (SiO_2), Óxido de calcio (CaO) y Óxido de hierro (Fe_2O_3). Un factor importante para recalcar al momento de hacer esta comparación es el índice de puzolanicidad la cual está dada por la relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ y debe ser $> 0,3 \%$. Este índice permite determinar las condiciones mínimas necesarias para que las arcillas puedan reaccionar con el Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y se genere la reacción puzolánica, la cual resulta en mayor generación de gel de CSH.

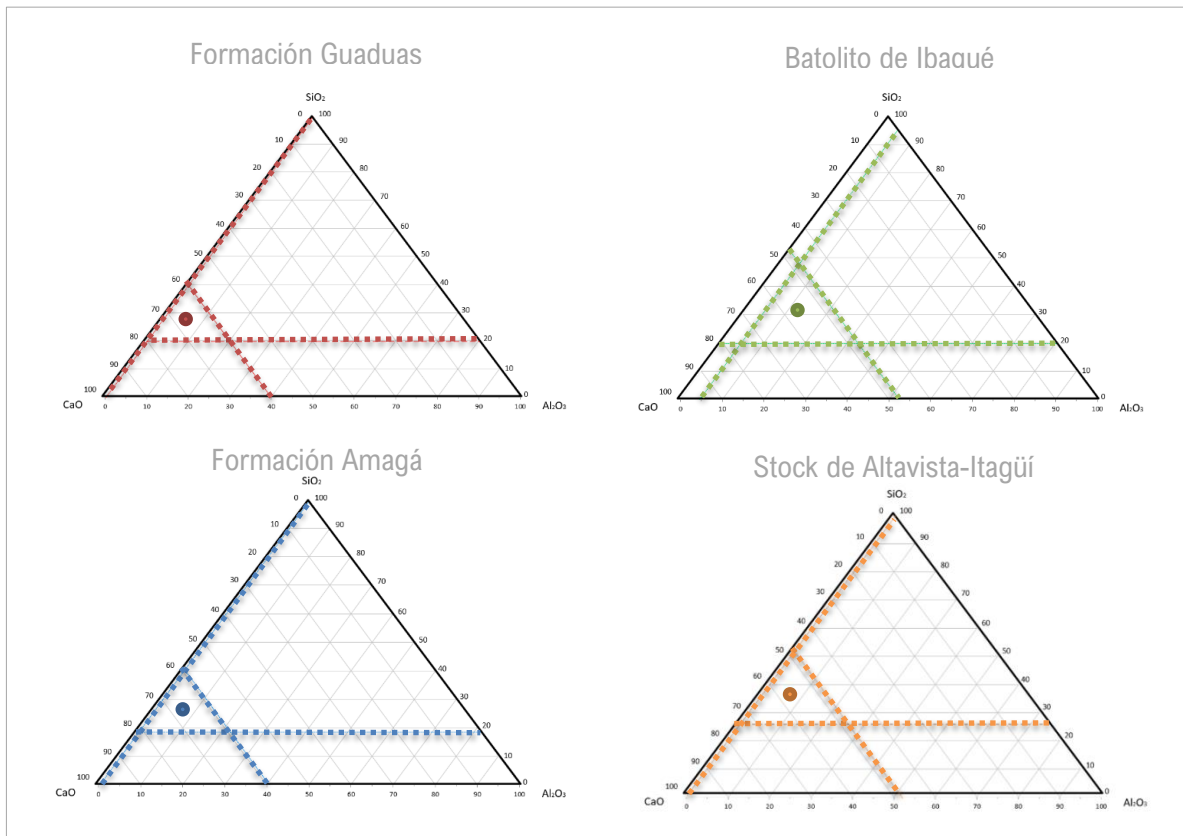


Ilustración 11. Diagrama de fases
Elaboración propia

La ilustración 11 permite identificar la ubicación química de cada uno de los yacimientos de arcilla establecidos anteriormente, este diagrama se basa en los análisis químicos y mineralógicos reportados por el libro Minerales de Colombia publicado por el Servicio Geológico de Colombia, vol. 1 en el cual se describen los máximos y mínimos porcentuales de los niveles químicos correspondientes a cada zona. Adicionalmente, gracias a estos análisis es posible determinar el comportamiento y reacción de las arcillas bajo la acción de otros materiales de construcción.

Ahora bien, de acuerdo con Muñoz [46], en Colombia existen yacimientos donde las arcillas explotadas cuentan con la viabilidad de la implementación de cementos verdes o de bajo contenido de carbono, por tal motivo se busca identificar plantas de producción de materiales cerámicos que hagan uso de estas fuentes y que generen los residuos para la implementación en el presente estudio.

12.5 Propuestas de uso del residuo

Teniendo en cuenta las características especiales que poseen los residuos generados en chircales ubicados en las principales zonas mineras de arcillas en Colombia y todo el proceso de aprovechamiento del material mediante su reciclaje es posible definir mediante una tabla de granulometrías los diferentes uso y aplicaciones que se le pueden dar a estos desechos arcillosos ya tratados como adición en la elaboración de nuevos materiales de construcción.

PROPUESTAS DE UTILIZACIÓN DE ACUERDO CON LA GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL RECICLADO				
	TAMIZ	USO PROPUESTO		
Agregado Grueso	3 "	Material filtrante para sistemas de drenaje		
	2 "			
	1 1/2 "			
	1 "			
	3/4 "	Subbases granulares para pavimentos asfáltico, losas de concreto portland y andenes o estructuras peatonales		
	1/2 "			
	3/8 "			
Agregado Fino	No. 4	Material filtrante para tratamiento de aguas residuales		
	No. 8			
	No. 16			
	No. 30	Agregados para elaboración de prefabricados en concretos		
	No.50			
	No.100			
	No.200			
	FONDO			

Tabla 7. Propuestas de utilización de acuerdo con la granulometría del material reciclado
Elaboración propia

12.5.1 Material filtrante para sistemas de drenaje

Con base a las especificaciones contempladas en la sección 340-11 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), la construcción de subdrenes con geotextil y material granular filtrante debe cumplir con requerimientos de calidad mínimos que permitan hacer uso del material granular como material filtrante. Dentro de los cuales se exige que el material constituido por partículas con tamaños el tamiz de

3" como máximo y el tamiz 3/4" como mínimo funcionan como material filtrante. Se permite el uso de un solo tamaño siempre in cuando su tamaño se encuentre dentro de los tamaños máximos y mínimos ya mencionados. Este material deberá estar limpio de cualquier impureza orgánica y partículas finas además que su factor forma deberá ser angular o redondeados o se permite una combinación de ellas.

Para la aceptación del material granular como material filtrante este debe ser sometidos a ensayos de calidad los cuales deben cumplir con los valores mínimos permisibles que se presentan a continuación.

Ensayo	Normas de Ensayo	Valor
Desgaste en Máquina de los Ángeles (%)	INV-E-219-07	≤ 40
Sulfato de Sodio	INV-E-220-07	≤12
Sulfato de Magnesio		≤18
Índice de desleimiento - durabilidad (%)	INV-E-236-07	≤ 2
Contenido de materia orgánica (%)	INV-E-121-07	Cero

*Tabla 8. Requerimientos de calidad para material granular en drenajes
Adaptado de sección 340-11 IDU*

12.5.2 Material filtrante para tratamiento de agua residuales

La construcción de filtros con ladrillo triturado en el tratamiento de aguas residuales según la investigación de Moya Andino [43] donde determino que el ladrillo como material filtrante presenta buenas condiciones, evidenciadas en la reducción de contaminación con base a parámetros físico químicos, además que el material no presenta gran variación en su composición una vez culminado el proceso de filtración. Si se quiere hacer uso del ladrillo triturado reciclado en la

elaboración de un filtro para tratamiento de aguas se debe cumplir con una granulometría especial. Donde se exige que la granulometría del material debe estar constituido en tamaños de tamiz de 3/8" a tamiz No. 4 y no se permiten partículas finas del material además debe estar limpio y libre de cualquier impureza orgánica.



*Ilustración 13. Material filtrante para tratamiento de agua residuales
Fuente: Análisis del ladrillo triturado como filtro en el tratamiento de aguas
residuales provenientes del centro de faenamiento Tena. [43]*

12.5.3 Subbases granulares

Con base a las especificaciones contempladas en la sección 400-11 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), se definen tres diferentes categorías de capas granulares para base las cuales denomina Clase A (SBG_A), Clase B (SBG_B) y Clase C (SBG_C). Esta clasificación se encuentra en función de la importancia de la vía, del nivel de tránsito, del tipo del pavimento y de su posición dentro de la estructura como se muestra en la tabla 9.

Tipo de Capa	Categorías de Tránsito			
	T0-T1	T2-T3	T4-T5	PEATONAL
Pavimento Asfáltico				
Subbase Granular	SBG_C	SBG_B	SBG_A	
Pavimento de Losas de Concreto de Cemento Pórtland				
Subbase Granular	SBG_C	SBG_A	SBG_A	
Andenes y Estructuras Peatonales				
Subbase Granular				SBG PEA

Tabla 9. Clasificación de las capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito
Adaptado de sección 400-11 IDU

El material granular reciclado de la industria de la arcilla no puede ser usado en la conformación de bases granulares dado que las propiedades mecánicas del material están por debajo de las exigencias para ser agregado granular para base, Se propone hacer una combinación de agregados reciclados con agregados natural del 50/50 ya que es la proporción que presenta mejores resultados en función de las exigencias que se pide para un material granular para la conformación de subbases [47].

Las características que debería tener los agregados que se empleen en la construcción de subbases granulares de acuerdo con la sección 400-11 del IDU, deberán llenar los siguientes requisitos y granulometría determinada mediante el ensayo INV E-213-07.

		TAMIZ (U.S. Standard)								
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No. 200
		%PASA								
Subbase	SBG_1	100	80-95	60-90	-	36-68	25-50	15-35	06-20	0-10
	SBG_2	-	100	75-95	62-88	42-78	28-55	16-40	06-22	0-12
	SBG_PEA	100	75-98	60-90	-	36-66	25-52	15-40	06-25	0-14

Tabla 10. Granulometría para subbases granulares.
Adaptado de sección 400-11 IDU

Ensayo		Norma de Ensayo	Clase de Subbase Granular			
			SBG_PEA	SBG_C	SBG_B	SBG_A
Dureza						
Desgaste Los Ángeles	En 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	50	45	40	40
Micro Deval % máximo	Agregado Grueso	INV E-238-07	NA	35	35	30
10% de finos	Valor en seco, Kn mínimo y Relación húmedo/seco % mínimo	INV E-224-07	NA	40-65	50-70	60-75
Durabilidad						
Pérdida en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18	18
Limpieza						
	Límite Líquido, % máximo	INV E-125-07	40	25	25	25
	Índice de Plasticidad, % máximo	INV E-126-07	10	6	3	3
	Equivalente de Arena, % mínimo	INV E-133-07		18	18	20
	Valor de Azul de Metileno, máximo	INV E-235-07		10	10	10
	Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo	INV E-211-07		2	2	2
Geometría de las partículas						
	Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo1 cara - 2 caras	INV E-227-07	NA	NA	NA	50-30
	Índice de Aplanamiento, % máximo	INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
	Índice de Alargamiento, % máximo	INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
	Angularidad del Agregado Fino, % mínimo (RO)	INV E-239-07	NA	NA	NA	NA
Capacidad de Soporte						
	CBR, % mínimo - Referido al 95 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142 -07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.	INV E148-07	20	30	40	60

Tabla 11. Requisitos de calidad del material granular para la composición de subbases granulares.
Adaptado de sección 400-11 IDU

Se debe asegurar una curva granulométrica uniforme y sensible paralela a los límites de franja esto con el objetivo de prevenir segregaciones del material en su manipulación o transporte además de asegurar la resistencia y compactación necesaria. Además de esto se debe asegurar que la relación de polvo el cual es el porcentaje de material que pasa tamiz No. 200 y el porcentaje que pasa tamiz No.40 no sea mayor a 2/3 y el tamaño máximo nominal no mayor a 1/3 del espesor de las subcapas compactadas.

12.5.4 Ladrillos, bloques y otros productos cerámicos

Se propone utilizar el material que se encuentra entre el tamiz No.30 y fondo como materia prima para la fabricación de nuevos ladrillos, bloques y otros productos cerámicos tales como adoquines, tejas, tuberías. Se debe asegurar que las unidades de mampostería u otros productos de arcilla que se desarrollen con la adición del material reciclado cumplan con las siguientes normas las cuales están definidas en función del uso que se le quiere dar al producto terminado.

Ensayo	Norma de ensayo
Métodos para Muestreo y Ensayos de Unidades de Mampostería y Otros Productos de Arcilla	NTC-4017
Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida. Ladrillos y Bloques Cerámicos. Parte 1	NTC-4205
Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida. Ladrillos y Bloques Cerámicos. Parte 2	NTC-4205-2
Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida. Ladrillos y Bloques Cerámicos. Parte 3	NTC-4205-3
Adoquín de Arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano	NTC-3829
NRS-10 Título D- Mampostería Estructural- Requisitos para los Materiales	Capítulo D.3.1.1
NRS-10 Título D- Mampostería Estructural- Ensayos de Control para los Materiales	Capítulo D.3.1.2

*Tabla 12. Ensayos de muestreo y calidad para mampostería, tejas, adoquines.
Elaboración propia.*

12.5.5 Morteros

Para la fabricación de mezclas de mortero seco o húmedo, para su aplicación en la conformación de mampostería simple o reforzada, u otros usos estructurales se propone incorporar un porcentaje de polvo de ladrillo como remplazo del cemento. Los moteros según la NTC 3356 se clasifica en tres tipos M, S y N de acuerdo con su resistencia a la compresión de 17,5 Mpa, 12,5 Mpa y 7,5 Mpa respectivamente. Para asegurar la resistencia a la compresión de cada tipo de mortero se debe cumplir con ciertas propiedades físicas del material cementante descritas en la NTC 4050 Tabla 1, donde se describe a detalle la finura, tiempos de fraguado, resistencia a la compresión, contenido de aire y porcentaje de retención de agua.

Tipo de cemento para mampostería	N	S	M
Finura, residuo en un tamiz de 45 mm (No. 325), % máximo	24	24	24
Expansión en autoclave, % máximo	1,0	1,0	1,0
Tiempo de fraguado, ensayado por agujas de Gillmore:			
Fraguado Inicial, no menor de, min	120	90	90
Fraguado final, no mayor de, min	1440	1440	1440
Tiempo de fraguado, ensayado por agujas de Vicat:			
Fraguado Inicial, no menor de, min	60	45	45
Fraguado final, no mayor de, min	1440	1440	1440
Resistencia a la compresión (promedio de 3 cubos):			
7 días, Mpa	3,5	9,0	12,5
28 días, Mpa	6,2	14,5	20,0
Contenido de aire del mortero			
mínimo, % en volumen	8	8	8
máximo, % en volumen	21	19	19
Valor de la retención de agua, % mínimo de la fluidez inicial	70	70	70

*Tabla 13. Características físicas del cemento para morteros.
Adaptado de NTC 4050*

Se proponen alternativas de dosificación del material utilizando cemento para mampostería, cemento Pórtland y polvo de ladrillo.

Mortero tipo	Cemento Pórtland	Cemento para mampostería	Polvo de Ladrillo	Arena / Material cementante	
				Mín.	Máx.
M	0,76	0,76	0,24	2,25	2,5
S	0,38	0,76	0,24	2,50	3,0
N	0,00	0,76	0,24	3,00	4,0

Tabla 14. Dosificación del material para elaboración de morteros con adición de polvo de ladrillo
Adaptado de NTC 3356

12.5.6 Mezclas de concreto para elaboración de prefabricados

Para la elaboración de mezclas de concreto se propone hacer uso del ladrillo triturado como remplazo de un porcentaje del agregado natural y una segunda propuesta la cual consiste incorporar un porcentaje de polvo de ladrillo como remplazo del material cementante.

Las características básicas que deben tener los prefabricados se basan en las especificaciones establecidas por la NTC 4109 “*Prefabricados de concreto. Bordillos, cunetas y topellantas de concreto*” la cual tiene como objeto establecer la clasificación, características físicas y mecánicas, designación y métodos de ensayo para bordillos, cunetas y topellantas de concreto, prefabricados o contruidos en el sitio, para uso en redes viales urbanas, carreteras nacionales o en zonas para uso peatonal. Dentro de esta normativa, se establecen ciertas regulaciones que permiten la elaboración de los prefabricados de manera correcta a partir de las siguientes normas.

Ensayo	Norma de ensayo
Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas.	NTC-121
Especificación de los agregados para concreto.	NTC-174
Cemento Pórtland. Especificaciones químicas.	NTC-321
Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra.	NTC-550
Aditivos químicos para concreto.	NTC-1299
Cemento Pórtland Blanco.	NTC-1362
Compuestos líquidos formadores de membrana de curado para el concreto.	NTC-1977
Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión. Utilizando una viga simple con carga en los tercios medios.	NTC-2871
Agua para la elaboración de concreto.	NTC-3459
Aditivos incorporadores de aire para concreto	NTC-3502
Concreto coloreado integralmente. Especificaciones para pigmentos.	NTC-3760
Agregados livianos para concreto estructural.	NTC-4045

*Tabla 15. Ensayos para la elaboración de prefabricados (bordillos, cunetas y topellantas) de concreto.
Elaboración propia.*

Otra normativa que nos compete dentro de esta alternativa es la NTC 4024 “*Prefabricados de concreto. muestreo y ensayo de prefabricados de concreto no reforzados. Vibrocompactados*”, esta norma establece lo procedimientos para el muestreo y el ensayo de prefabricados de concreto, tales como: unidades de perforación vertical o macizas (bloques y ladrillos) para mampostería de concreto y chapas de concreto; gramoquines, losetas de revestimiento para cubiertas planas y otros prefabricados de concreto no reforzado, elaborados con mezclas “secas”, vibro compactados, con el fin de evaluar su resistencia a la compresión, absorción,

densidad, contenido de humedad y dimensiones. Para asegurar que el material cumpla con la norma, se deben realizar los ensayos descritos a continuación.

Ensayo	Norma de ensayo
Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.	NTC-396
Unidades (Bloques y Ladrillos) de concreto, para mampostería estructural.	NTC-4026
Unidades (Bloques y Ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural, interior y chapas de concreto.	NTC-4076

*Tabla 16. Ensayos para la elaboración de prefabricados de concreto no reforzados.
Vibrocompactados
Elaboración propia.*

Para la segunda propuesta de esta alternativa que consiste en la implementación de un porcentaje de polvo de ladrillo como remplazo del material cementante, se implementa la NTC 33 “*Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire*” y Ensayo de Granulometría por rayos láser. Esta primera norma tiene como objetivo la determinación de la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire, es decir que tan grueso o fino pueden ser los granos del cemento que se está trabajando, que expresa en términos de superficie específica, como área total en centímetros cuadrados por kilogramo de cemento. Esta norma se ha empleado y puede emplearse para determinar la finura de otros materiales.

Para la preparación de las mezclas se propone hacer reemplazo del cemento por polvo de ladrillo en los siguientes porcentajes recomendados por la investigación de Pineda y Quintero[41].

Materia prima	Cantidad (g)	Masa (g)	Porcentaje de adición (%)
Cemento	1700	2000	15
Polvo de ladrillo	300		
Cemento	1600	2000	20
Polvo de ladrillo	400		
Cemento	1500	2000	25
Polvo de ladrillo	500		
Cemento	1400	2000	30
Polvo de ladrillo	600		

Tabla 17. Reemplazos porcentuales del polvo de ladrillo.

Fuente: Evaluación de la adición de polvo de ladrillo en la mezcla de cemento, para la producción de prefabricados de concreto en la empresa reciclados industriales de Colombia [41]

A continuación, se presentan los ensayos correspondientes permitirán determinar cuál de estas mezclas resulta más eficiente para ser usada como mezcla de concreto para elaboración de prefabricados no estructurales.

Ensayo	Norma de ensayo
Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico.	NTC-221
Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico.	NTC-110
Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de vicat.	NTC-118
Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado.	NTC-220
Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica.	NTC-112
Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto.	NTC-174
Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino.	NTC-237
Preparar y curar probetas de concreto.	ASTM C31
Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.	NTC-673
Método de ensayo para la elaboración, curado acelerado y ensayo a compresión de especímenes de concreto	NTC-1513
Cemento portland especificaciones químicas.	NTC-321
Ensayo de fluorescencia de rayos X.	-
Análisis termogravimétrico.(polvo ladrillo)	-

Tabla 18. Ensayos para la elaboración de prefabricados de concreto no estructurales. Elaboración propia

Para finalizar con este capítulo se proponen los siguientes elementos prefabricados no estructurales como una posible aplicación del material reciclado (polvo de ladrillo) dando como resultado obras de mobiliario urbanístico establecidos por la Secretaría Distrital de Planeación - Dirección del Taller del Espacio Público en su Cartilla de Andenes Bogotá D.C.

OBRAS DE URBANISMO
Sardineles
A10 Sardinel Prefabricado tipo A
A15 Sardinel Prefabricado tipo B
Tabletas, Adoquines y losetas
A50 Loseta prefabricada 400x400.
A51 Loseta prefabricada 400x200.
A52 Loseta Prefabricada de ajuste 400x100
Bordillos Prefabricados
A80 Bordillo prefabricado - Tipo A (800mmx200mmx350mm)
A81 Bordillo prefabricado - Tipo B (800mmx150mmx350mm)
Cañuelas y Cárcamos
A120 Cañuela Prefabricada Tipo A
A121 Pieza de Remate Prefabricada – Cañuela Tipo A
A122 Pieza en T Prefabricada – Cañuela Tipo A
A123 Pieza en L Prefabricada – Cañuela Tipo A
A124 Rejilla Prefabricada 300 x 600 – Cañuela Tipo A
A125 Cañuela Prefabricada Vial – Tipo B

*Tabla 19. Propuestas mobiliario urbanístico.
Elaboración propia*

13.CONCLUSIONES

- Dentro de la revisión tecnológica expuesta, queda en evidencia como el mal manejo de residuos sólidos generan grandes pérdidas de energía, materia prima no renovable y contaminación ambiental. Como consecuencia de esto se impulsa la constante búsqueda de nuevos métodos de manejo y mitigación ambiental a los residuos resultantes de la industria de la arcilla y su posible aplicación en nuevos materiales de construcción con valor agregado.
- A pesar de que en Colombia aún no se efectúa como tal un modelo de economía circular que reglamente el manejo y tratamiento de los residuos generados en la industria de la arcilla, la implementación de centros de aprovechamiento y tratamiento de residuos de demolición y construcción demuestran que el país se está encaminando en un futuro de responsabilidad y conciencia ambiental.
- Así mismo se logró determinar la importancia de la implementación de un modelo de economía circular para los materiales de construcción que fomente el uso medido y adecuado de todas aquellas materias primas usadas en la elaboración de materiales construcción y su correcta clasificación y disposición al momento de retornar nuevamente el material a su ciclo productivo una vez este sea desechado.
- Se identificaron diferentes alternativas de utilización, entre la cuales están la generación de agregados para concretos y morteros, la producción de polvo de ladrillo para la fabricación de elementos cerámicos; donde se observó que la

mayor parte de los ensayos e investigaciones utilizaban los residuos como reemplazos y adiciones minerales.

- En cuanto a las alternativas empleadas a nivel mundial se propone un modelo de economía circular aplicado al aprovechamiento de residuos de arcilla a través de un proceso de transformación física del material mediante la trituración y tamizado del mismo, para luego usar el material transformado como agregado granular reciclado, una adición como material cementante en el caso de elaboración de nuevos materiales cerámicos o mezclas de concreto para elemento prefabricados sin refuerzo.

- Se determinó que el uso de los residuos de la industria de la arcilla tiene un gran potencial de investigación en cuanto a su aplicación en nuevos materiales de construcción. De este modo, se evidencia la importancia de hacer uso de estos desechos en Colombia, teniendo en cuenta que existen diferentes yacimientos de arcillas que son explotados y generan grandes cantidades de desechos que poseen una composición química y mineralógica que le brinda la propiedad de ser un material puzolánico.

- Con relación a lo expuesto durante el desarrollo de la investigación, se establecieron diferentes propuestas de uso del residuo en función de la granulometría del material reciclado basándonos en las especificaciones técnicas requeridas dependiendo de la aplicación se le quiera dar.

14.RECOMENDACIONES

Para futuros proyectos y trabajos de investigación que se puedan realizar derivados de este trabajo de investigación, se plantean las siguientes recomendaciones.

- Asegurar que el material reciclado este limpio y libre de materia orgánica; para esto se recomienda aplicar los procedimientos para determinar el contenido de materia orgánica aproximado, descritos en la norma INV E-212-07 *“Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos”* y la NTC 127 *“Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto”*
- Para lograr una correcta aplicación del polvo de ladrillo como un remplazo del cemento, se recomienda determinar la finura de Blaine descrita en la norma NTC 33 *“Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato de Blaine de permeabilidad de aire”* con el fin de alcanzar la finura más cercana a la del cemento.
- Se deja abierta la posibilidad a que se elaboren diseños de mezcla para morteros y concretos con el uso de los agregados propuestos en este documento.
- Además, se propone investigar la viabilidad del uso del material como lecho filtrante en el tratamiento de aguas residuales y su implementación como material para subbases granulares en la conformación de vías y accesos peatonales.

- Se recomienda hacer un análisis de costos que permita determinar si el uso o la aplicación del material reciclado es viable para su implementación en la elaboración de nuevos materiales de construcción.
- Realizar un análisis del ciclo de vida que permita estimar y evaluar los impactos ambientales generados por la reconfiguración de estos nuevos materiales de construcción.

REFERENCIAS

- [1] Z.-Z. Kilns, “Brick Market,” 2015. [Online]. Available: <http://www.hablakilns.com/%0Apages/industry/brick-market>. [Accessed: 29-Aug-2020].
- [2] F. Pacheco-Torgal and et al., “Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks, Design, Properties and Durability, Cap 1. ‘Introduction to eco-efficient masonry bricks and blocks.’” pp. 1–10, 2014.
- [3] Y. L. L. Júnior, L. Ancelmo, and R. A. L. Soares, “Estudio de Reutilización de Residuos de Baldosas Cerámicas (Chamote),” pp. 45–50, 2016.
- [4] M. D. P. De Moraes, R. S. Macedo, and C. M. O. Raposo, “Preparação e caracterização de sistemas chamote / argila visando o reaproveitamento de descartes industriais (Preparation and characterization of systems grog / clay to the,” vol. 61, pp. 206–212, 2015.
- [5] “Mezclas de arcillas y residuos sólidos de construcción para su utilización en la industria de materiales . Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Metalúrgico Manuel Brito Fernández Mezclas de arcillas y residuos sólidos de construcción para su utilización en la industria de materiales Autor : Manuel Brito Fernández,” 2012.
- [6] C. L. Rocha Osorio, “Aprovechamiento y revalorizacion de los residuos de la construccion y demolicion generados por un evento adverso para la construccion de obras civiles sostenibles.,” Manizales, 2015.

- [7] C. for D. at R. University, D. G. C. Melbourne in association with BIS, Shrapnel, CSIRO, and S. C. Services, "Environmental, Scoping study to investigate measures for improving the Materials, sustainability of building," p. p.271, 2006.
- [8] J. M. Guarin, "Posibilidad de diseño de concretoarquitectonico utilizando agregado grueso de ladrillo triturado reciclado," 2012.
- [9] A. DeVenny and M. Khalaf, "The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete," *Mason. Int.*, pp. 81–84, 1999.
- [10] T. C. Hansen, "Recycling of demolished concrete and masonry," in *Report of Technical Committee 37-DRC, Demolition and Reuse of Concrete, RILEM, E&FN Spon*, 1992.
- [11] K. S. Debieb F, "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete.," *Constr Build Mater*, no. 22:886–93, 2008.
- [12] S. J. Wild S, Gailius A, Hansen H, "Waste clay brick – a European studu of its effectiveness. In: Proceedings of the international congress "Creating with concrete,"" *Constr. Build. Mater.*, pp. 261–73, 1999.
- [13] A. Akhtaruzzaman and A. Hasnat, "Properties of concrete using crushed bricks as aggregate.," *Concr. Int*, vol. 5(2):58–63, 1988.
- [14] M. Mansur, T. Wee, and S. Lee, "Crushed bricks as coarse aggregate for concrete.," *ACI Mater J*, vol. 96(4):478–, 1999.
- [15] Cachim PB., "Mechanical properties of brick aggregate concrete," *Constr Build Mater*, pp. 23:1292–7., 2009.
- [16] R. J. Cabral AEB, Schalach V, Dal Molin DCC, "Mechanical properties

modeling of recycled aggregate concrete.,” *Constr Build Mater*, pp. 24:421–30., 2010.

- [17] M. G. Cordinalesi V, “Behavior of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate.,” *Constr Build Mater*, pp. 23:289–94., 2009.
- [18] C. S. Poon, S. C. Koun, and L. Lam, “Use of recycled aggregated in moulded concrete bricks and blocks,” *Constr Build Mater*, vol. 28:1–9, 2002.
- [19] R. Ravindrajah, Y. Loo, and C. Tam, “No Title. Strength evaluation of recycled aggregate concrete by in-situ tests.,” *Mater Struct*, vol. 21():289–9, 2006.
- [20] CAEM, “Inventario Nacional del Sector Ladrillero Colombiano,” in *Inventario Nacional del Sector Ladrillero Colombiano*, 2015, p. 18.
- [21] UPME, “Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los material de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y Eje Cafetero.,” Bogotá D.C., 2014.
- [22] R. Andres, M. De Gutiérrez, and A. Jimena, “Producción de elementos constructivos a partir de residuos de ladrillo activados alcalinamente,” *Rev. Fac. Ing.*, p. 11, 2016.
- [23] R. A. C. C.J. Kibert, “Overview of Deconstruction in Selected Countries,” Australia, 2000.
- [24] E. L. I. C.T. Formoso, L. Soibelman, C.D. Cesare, “Material waste in building industry: main causes and prevention,” , *J. Constr. Eng. Manag.*, pp. 316–325, 2002.

- [25] Tiempo-Colciencias, “Ladrillos hechos de escombros,” 2018. [Online]. Available: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-912278>. [Accessed: 20-Jul-18].
- [26] S. Gallon, E. López, and C. García, “ANÁLISIS DE RESIDUOS DE LADRILLO COMO AGREGADO GRUESO PARA LA FABRICACIÓN DE CONCRETO,” *Rev. Colomb. Mater.*, no. 12, pp. 53–69, 2018.
- [27] Ellen MacArthur Foundation., “Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition.,” *J. Ind. Ecol.*, 2014.
- [28] J. Park, N. Díaz-Posada, and S. Mejía-Dugand, “En Challenges in implementing the extended producer responsibility in an emerging economy: the end-of-life tire management in Colombia.,” *J. Clean. Prod.* 189, Bogotá D.C., pp. 754–62, 2018.
- [29] Eduardo Besoain, *Mineralogía De Arcillas De Suelos*. San Jose. Costa Rica, 1985.
- [30] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Reusing ceramics waste in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, pp. 832–838, 2010.
- [31] J. Korhonen, A. Honkasalo, and J. Seppala, “Circular Economy: The concept and its limitations, Ecological Economics,” 2018.
- [32] A. Chavez, N. Guarín, and M. C. Cortes., “Determinación de propiedades físico-químicas de los materiales agregados en muestra de escombros en la ciudad de Bogotá,” *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 22, pp. 45–58, 2013.
- [33] C. Vidal, “Estudio Comparativo de los Sistemas de Gestión de RCDs entre España y Brasil .,” *Esc. Univ. Arquit. Técnica*, pp. 74–257, 2015.

- [34] Consejo Nacional de Política Económica y Social, “Documento CONPES 3874,” 2016.
- [35] Departamento Nacional de Planeación and B. Mundial, “Estrategia Nacional de Infraestructura. Sector Residuos Sólidos.,” 2015.
- [36] W. Gómez and J. Rodríguez, “Estrategia para el mejoramiento ambiental del proceso de producción de ladrillera Las Canteras S.A. de Bogotá según los criterios de economía azul,” *Univ. Dist. Fr. José Caldas*, p. 194, 2015.
- [37] P. Process, “The Clay Life Cycle.” pp. 1–44, 2018.
- [38] S. Sales *et al.*, “Avaliação da mistura de chamote cerâmico com solo laterítico para utilização em camada de base de pavimentos rodoviários,” pp. 1–9, 2006.
- [39] C. O. M. Chamote, “Avaliação de argamassas no estado endurecido incorporadas com chamote,” no. November, 2018.
- [40] S. V. Zito, “Polvo de ladrillo como material suplementario: comportamiento en morteros y hormigones,” *Rev. Hormigón*, 2017.
- [41] J. N. Pineda and G. A. Quintero, “Evaluación de la adición de polvo de ladrillo en mezcla de cemento, para la producción de prefabricados de concreto en la empresa de reciclados industriales de Colombia.,” 2018.
- [42] C. Bedoya and L. Dzul, “Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project,” vol. 30, pp. 99–108, 2015.
- [43] H. P. Moya Andino, “Análisis del ladrillo triturado como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del centro de faenamiento Tema, ubicado en la ciudad de Tena, Provincia de Napo.,” Universidad Técnica de Ambato,

2018.

- [44] B. B. de la Cuesta, "La reutilización de ladrillos, Ventajas ecológicas y viabilidad constructiva," Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2018.
- [45] E. Parillo and C. C, "Reutilización de residuos sólidos en la producción de pavimentos rígidos de bajo costo en el distrito de Juliaca, Puno." Investigación Andina, p. 12, 2015.
- [46] K. L. Muñoz Lopez, "Metodología para la Evaluación del Potencial de Producción de Cementos Tipo LC3 en el Contexto Colombiano. Aproximación Teórica," Universidad Militar Nueva Granada, 2020.
- [47] B. Contreras and A. Herrera, "Mejoramiento del Agregado Obtenido de Escombros de la Construcción para Bases y Subases de Estructuras de Pavimento en Nuevo Chimbote-Santa.Ancash," Universidad Nacional del Santa, 2015.