

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**Unidad Académica de Valle de las Palmas**



**TÍTULO**

**RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN COMO MATERIA PRIMA PARA  
LA ELABORACIÓN DE UN MATERIAL ADSORBENTE DE CO<sub>2</sub>**

**Presenta:**

**Oscar Diego Armendáriz Ibarra**  
[oscar.armendariz.ibarra@uabc.edu.mx](mailto:oscar.armendariz.ibarra@uabc.edu.mx)  
**ORCID: 0009-0003-6482-1350**

Tesis profesional para obtener el título de Maestro en Arquitectura, Diseño y Urbanismo

**Directora de Tesis:**

**Dra. María Cristina Castañón Bautista**  
[cristinacastanon@uabc.edu.mx](mailto:cristinacastanon@uabc.edu.mx)  
**ORCID: 0000-0001-5197-3951**

**Co-Directora de Tesis:**  
**Brenda Cecilia Alcántar Vázquez**  
[BAlcantarV@iingen.unam.mx](mailto:BAlcantarV@iingen.unam.mx)  
**ORCID: 0000-0002-7462-249x**

**Tijuana, B. C., a noviembre del 2023**

## Agradecimientos Institucionales

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el apoyo económico para la realización de este trabajo de investigación.

A la Universidad Autónoma de Baja California por su apoyo en la formación académica, su compromiso y su apoyo.

Al posgrado de maestría en Arquitectura, Urbanismo y Diseño (MAUD) por su apoyo en la formación académica.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme su apoyo y facilitarme el uso de sus instalaciones para la realización de este trabajo de investigación de tesis.

A la Dra. María Cristina Castañón Bautista, por su invaluable tiempo, guía, sus consejos, su inmensa paciencia, dedicación y apoyo para realizar este trabajo de investigación.

A la Dra. Brenda Cecilia Alcántar Vázquez, por su enorme paciencia, su guía y consejos, pero sobre todo por su tiempo y compromiso en la orientación y enseñanza para el desarrollo de este trabajo de investigación de tesis.

# Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES</b> .....  | <b>2</b>  |
| ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICAS .....  | 5         |
| ABREVIATURAS.....   | 6         |
| <b>RESUMEN</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>8</b>  |
| 1.1. SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.....   | 8         |
| 1.1.1. Sector de la construcción en el mundo.....   | 8         |
| 1.1.2. Sector de la construcción en México y Baja California. ....  | 11        |
| 1.2 PROBLEMÁTICA ASOCIADA AL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.....   | 15        |
| 1.2.1. Clasificación de los residuos del sector de la construcción y demolición. ....                     | 15        |
| 1.2.2. Impactos ambientales asociada al sector de la construcción. ....                                   | 25        |
| 1.2.3. Impactos sociales asociados al sector de la construcción. ....                                     | 30        |
| 1.2.4. Impactos económicos asociados al sector de la construcción.....                                    | 32        |
| 1.2.5. Normatividad y gestión sobre residuos del sector de la construcción en México y otros países. .... | 34        |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN.....   | 41        |
| <b>CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO</b> .....  | <b>43</b> |
| 2.1. SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO.....  | 43        |
| 2.1.1. Cambio climático asociado al sector de la construcción.....  | 43        |
| 2.1.2. El Sector Constructivo y sus aportaciones de CO <sub>2</sub> .....                                 | 49        |
| 2.1.3. Mitigación al cambio climático desde el sector de la construcción. ....                            | 50        |
| 2.1.4. Economía circular de los RCD.....  | 54        |
| 2.2. MATERIALES ADSORBENTES DE CO <sub>2</sub> A PARTIR DE RESIDUOS.....                                  | 56        |
| 2.2.1. Materiales adsorbentes de CO <sub>2</sub> .....  | 56        |
| 2.2.2. Una alternativa para el uso de residuos.....   | 62        |
| 2.2.3. Ortosilicato de litio (Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> ) .....                                    | 64        |
| 2.3. OBJETIVOS.....   | 65        |
| 2.3.1. Objetivo general .....   | 65        |
| 2.3.2. Objetivos específicos.....   | 65        |
| <b>CAPÍTULO III.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b> .....  | <b>66</b> |
| 3.1. ACONDICIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD. ....   | 66        |
| 3.1.1. Molienda y tamizado del material. ....   | 66        |
| 3.1.2. Composición química: Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX). ....                        | 68        |
| 3.1.3. Fases cristalinas: Difracción de Rayos X (DRX).....  | 69        |
| 3.2. SÍNTESIS DEL ORTOSILICATO DE LITIO (Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> ).....                          | 70        |
| 3.2.1. Método de impregnación por precipitación. ....   | 70        |
| 3.2.2. Caracterización del Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> .....   | 73        |
| 3.3 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE CO <sub>2</sub> . ....                                     | 73        |
| 3.3.1 Experimentos dinámicos e isotérmicos de adsorción: Análisis termogravimétricos (ATG). ....          | 73        |
| 3.3.2. Identificación de las condiciones de regeneración del adsorbente. ....                             | 75        |
| <b>CAPÍTULO IV.- RESULTADOS</b> .....   | <b>76</b> |
| 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL RCD Y Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> SINTETIZADO CON RCD.....                  | 76        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.1.1 Caracterización química.....  | 76         |
| 4.1.2. Caracterización por Difracción de Rayos X (DRX).....                         | 78         |
| 4.1.3 Análisis de adsorción/desorción, prueba de BET.....                           | 79         |
| 4.2. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICOS DINÁMICOS E ISOTÉRMICOS (ATG).....                 | 81         |
| 4.2.1. Determinación de la temperatura de adsorción/desorción.....                  | 87         |
| 4.2.3. Ciclos programados de adsorción/desorción.....                               | 90         |
| <b>CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES. ....</b>   | <b>94</b>  |
| <b>REFERENCIAS .....</b>  | <b>98</b>  |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>110</b> |
| <b>ANEXO A) CLASIFICACIÓN DE LOS RECURSOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN .....</b> | <b>110</b> |
| <b>ANEXO B) PROPIEDADES PELIGROSAS .....</b>  | <b>112</b> |

## Índice de tablas, figuras y gráficas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Producción de empresas constructoras en B.C. según tipo de obra .....  | 14 |
| Tabla 2. Porcentajes de la composición gravimétrica de los RCD. ....  | 16 |
| Tabla 3. Composición química de los RCD. ....   | 21 |
| Tabla 4. Composición principal de los RCD. ....   | 21 |
| Tabla 5. Tipo, promedio y porcentaje presentes en los RCD. ....   | 21 |
| Tabla 6. Composición principal de los materiales de construcción. ....  | 22 |
| Tabla 7. Tipo de materiales y porcentajes estimados en vertederos de RCD. ....  | 23 |
| Tabla 8. Toneladas generadas, según tipo de obra y porcentaje equivalente .....   | 25 |
| Tabla 9. Normas con presencia nacional sobre RCD. ....  | 37 |
| Tabla 10. Principales GEI, emitidos por actividades antropogénicas. ....  | 46 |
| Tabla 11. Valores de emisiones e incertidumbre por tipo de GEI. ....  | 47 |
| Tabla 12. $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ preparado con fuentes alternas de residuos .....  | 62 |
| Tabla 13 Caracterización química del RCD obtenida por FRX .....   | 77 |
| Tabla 14 Composición elemental del RCD obtenida por FRX: elementos traza .....  | 77 |
| Tabla 15 Comparación de resultados reactivos puros y RCD. ....  | 93 |
| <br>  |    |
| Imagen 1 Molino de bolas TECAN.....   | 67 |
| Imagen 2 Tamizador automático .....   | 68 |
| Imagen 3. Síntesis de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ con reactivos puros .....   | 72 |
| Imagen 4. Síntesis de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ con RCD .....   | 72 |
| <br>  |    |
| Figura 1 Concentración de $\text{CO}_2$ de 1951 al 2022. ....   | 48 |
| Figura 2 Consumo de energía y porcentaje de emisiones del sector constructivo a nivel mundial. ....   | 50 |
| Figura 3 Ejemplo de fuentes, captura de $\text{CO}_2$ y aplicación de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ .....   | 58 |
| Figura 4 Curva isotérmica típica de adsorción/desorción de $\text{CO}_2$ .....  | 74 |
| <br>  |    |
| Gráfica 1. Difractograma de Rayos X reactivos puros y RCD. ....   | 78 |
| Gráfica 2. Isotermas de adsorción/desorción de $\text{N}_2$ para $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de reactivos puros. .   | 79 |
| Gráfica 3. Isotermas de adsorción/desorción de $\text{N}_2$ para $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de RCD (prueba de BET).....                                     | 80 |
| Gráfica 4. Análisis termogravimétrico dinámico para determinar las temperaturas de captura para el $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ preparado con reactivos puros y RCD.....           | 81 |
| Gráfica 5. Análisis isotérmico de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de reactivos puros a diferentes temperaturas con presión parcial de $\text{CO}_2$ de 0.2. .... | 82 |
| Gráfica 6. Análisis isotérmico de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de RCD a diferentes temperaturas con presión parcial de $\text{CO}_2$ de 0.2.....              | 83 |
| Gráfica 7. Análisis isotérmico de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado con reactivos puros a 580°C a distintas presiones parciales de $\text{CO}_2$ .....                      | 85 |
| Gráfica 8. Análisis isotérmico del $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de RCD a 580°C a distintas presiones parciales de $\text{CO}_2$ .....                         | 86 |
| Gráfica 9. Curvas de adsorción/desorción de $\text{CO}_2$ de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de reactivos puros.....   | 88 |
| Gráfica 10. Curvas de adsorción/desorción de $\text{CO}_2$ de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de RCD.....  | 89 |
| Gráfica 11. Ciclos de adsorción/desorción de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de reactivos puros. ....  | 91 |
| Gráfica 12. Ciclos de adsorción/desorción de $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado a partir de RCD. ....  | 92 |

## Abreviaturas

ACR. Agregados de Concreto Reciclado  
AGRECA. Asociación de Empresas Gestoras de Residuos de Construcción y Demolición  
AR. Agregados Reciclados  
BET. Brunauer, Emmett y Teller  
CaO. Óxido de Calcio  
CC. Cambio Climático  
CCUS. Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono  
CDMX. Ciudad de México  
CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas  
CEESCO. *Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción*  
CH<sub>4</sub>. Metano  
CMIC. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción  
CO<sub>2</sub>. Dióxido de Carbono  
CONAVI. Comisión Nacional de Vivienda  
DRX. Difracción de Rayos X  
EAFS. Escorias de Horno de Arco Eléctrico  
EPA. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos  
EUA. Estados Unidos de América  
FRD. Fluorescencia de Rayos X  
GEI. Gases de Efecto Invernadero  
Gg de CO<sub>2</sub>e. Gases equivalentes de CO<sub>2</sub>  
Gt de CO<sub>2</sub>. Gigatoneladas de CO<sub>2</sub>  
ICDD. Centro Internacional de Difracción de Datos  
ICSD. Base de Datos de Estructura Cristalina Inorgánica  
IPCC. Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático  
IUPAC. Unión Internacional de Química Pura y Aplicada  
LGPGR. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos  
Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>. Ortosilicato de litio  
LiAc. Acetato de litio  
mdd. millones de dólares  
N<sub>2</sub>O. Óxido Nitroso  
NDC. Contribución Determinada a Nivel Nacional  
OCDE. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico  
ONU. Organización de las Naciones Unidas  
PCG. Potencial de Calentamiento Global  
PIB. Producto Interno Bruto  
PNUMA. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente  
ppm. partículas por millón  
RCD. *Residuos de Construcción y Demolición*  
RSU. Residuos Sólidos Urbanos  
SEDEMA. Secretaría del Medio Ambiente  
SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
TCMA. Tasa de Crecimiento Anual  
ATG. Análisis Termogravimétrico  
UE. Unión Europea  
UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México  
USCUSS. Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura  
µm. micrómetro

## Resumen

El actual trabajo de tesis de maestría, tiene como fin describir la síntesis de un material de ortosilicato de litio ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) adsorbente de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a partir de los residuos generados por el sector de la construcción y demolición, esto, como una alternativa que permita la disminución y adsorción de  $\text{CO}_2$  generado por el sector de la construcción y las 185 de las 262 ramas económicas que se relacionan con este sector.

Dentro de las preocupaciones que más aquejan a la humanidad en la actualidad, no podemos dejar de mencionar a la contaminación ambiental, el constante aumento en el consumo de recursos naturales no renovables, así como el concepto de usar y tirar, lo cual trae como consecuencia cantidades excesivas de residuos los cuales generalmente son mal manejados, pero principalmente el aumento en la emisión de GEI, primordialmente el  $\text{CO}_2$  atribuido comúnmente a las distintas actividades antropogénicas.

La industria de la construcción es el mayor generador de emisiones de  $\text{CO}_2$ , por lo cual es de suma importancia reducir dichas emisiones, la investigación en el uso de materiales innovadores para la captura de  $\text{CO}_2$  a partir de RCD son clave para mitigar el calentamiento global y el cambio climático, presentando estos materiales una menor huella de carbono. La mitigación tiene como objetivo reducir las emisiones de GEI, aumentando los sumideros de captura y almacenamiento de dichos gases, o la captura y uso de carbono.

Por lo cual, la innovación en la síntesis y el estudio de las propiedades del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de RCD son prometedoras al presentar buena capacidad de adsorción, estabilidad térmica, una cantidad significativa de ciclos, así como buena cinética de adsorción/desorción.

# Capítulo I.- Introducción

## 1.1. Sector de la construcción.

### 1.1.1. Sector de la construcción en el mundo.

Desde que la humanidad buscó refugio de las adversidades climáticas, el hombre como especie, inicia a modificar su espacio para acondicionarlo, habitarlo y convertirlo su hogar. El hombre ha evolucionado y desarrollado la tecnología, su primer hogar dejó de ser una caverna para convertirse en un edificio aunado a un inmenso conjunto de edificaciones de todo tipo donde desarrolla sus principales actividades sociales a las cuales le llamamos ciudades (Rodríguez & Meza, 2018).

Por consiguiente, haciendo de la construcción una actividad cotidiana y ampliamente estudiada por nuestra especie, la construcción tiene un gran impacto medioambiental, no sólo contempla la perturbación edafológica, sino conlleva a diversos problemas como: el cambio climático, afectaciones al ozono estratosférico, generación de residuos, explotación de recursos naturales, afectaciones de suelo, agua, aire, así como la disminución y/o pérdida de diversidad biológica (Alanis, 2013).

En consecuencia, es a partir del crecimiento poblacional y tecnológico, que el sector de la construcción prevé para los siguientes 40 años un alto desarrollo, con una estimación en construcción de 230 mil millones de m<sup>2</sup> de nueva infraestructura. Entre la generación de obras y la operación de edificios, se establece al sector de la construcción, como una de las fuentes de contaminación más importante a nivel mundial, consumiendo 36% de la energía y generando el 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Fernández, Yurivilca, & Minoja, 2019). Autores como Rodríguez, L. mencionan que el sector de la construcción

consume alrededor del 50% de los recursos naturales, 40% de la energía global, 12% del agua potable es utilizada por este sector, produciendo el 38% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Rodríguez & Meza, 2018).

Como consecuencia en la actualidad a nivel global uno de las mayores objetivos que tiene la humanidad, es la creación de un mundo más sustentable, buscando un cuidado racional y eficiente de los recursos, creando bienestar para la población actual y cuidando estos recursos para generaciones venideras, para lograr dicho objetivo es de suma importancia la buena gestión de los residuos, haciendo que estos tengan el mayor aprovechamiento, evitando que dichos residuos sean destinados a donde no tengan algún tipo de uso (Ceñal Ruiz & Korb Reachy, 2015).

Debido a que el crecimiento económico de las naciones, tiene una fuerte relación con las ciudades, la infraestructura implica el desarrollo social y el incremento de su productividad. La migración rural-urbana en búsqueda de nuevas oportunidades y el cambio demográfico han generado el incremento de los espacios necesarios para generar bienestar y ascenso social (Platt, Construcción, pilar de la economía, el desarrollo urbano y el avance industrial, 2017).

En otras palabras, dentro de los aspectos de bienestar, social, económico y de infraestructura, el sector de la construcción a nivel mundial en el año 2021 generó 10.7 billones de dólares, algunas de las estimaciones futuras prevén un desarrollo del 42% entre la década de 2020 y el 2030. Por ejemplo, en la zona de Asia-Pacífico se estima un crecimiento de 50%; en América del Norte, este sector tiene un incremento proyectado del 32%; Europa Occidental, un aumento del 23% (Equipar Conectando Negocios, 2022).

Obviamente, también se espera que en Latinoamérica el sector registre un crecimiento, aproximadamente 9.6% para el año 2022, con un aumento del 35% en la década del 2030, siendo la construcción residencial la que genere el impulso de crecimiento debido a la demanda social en inversión residencial (Equipar Conectando Negocios, 2022).

Por otra parte, en un país de habla hispana como España, por ejemplo, se puede mencionar, qué, el número promedio de trabajadores afiliados a la Seguridad Social durante el año 2021 en el sector de la construcción ha sido de 1.288.072, lo cual supone 55.564 trabajadores más que en 2020, lo que representa un incremento interanual del 4,5%. El número de afiliados en el sector supera el registrado en 2019 con un incremento del 2,7%. Respecto al crecimiento de la industria de la construcción española, datos obtenidos al 31 de diciembre del 2021, las empresas del sector de la construcción dadas de alta en la seguridad social fueron de 132, 857, sumando 6,015 empresas más que el año anterior, lo que es incremento del 4.7% con respecto al 2020 (Observatorio Fundación Laboral de la Construcción, 2022).

En conclusión, el sector de la construcción es un componente medular en el desarrollo económico de cualquier país y/o región, creando la infraestructura necesaria para fomentar el desarrollo económico sostenido, con él se incrementan las inversiones de los sectores privados y públicos, generando una mejor calidad de vida para la población e incrementando el desempeño de los sectores productivos (Quiroz , 2020).

Por lo tanto, carreteras, irrigación, transmisión eléctrica, edificación sobresaliendo vivienda, equipamiento urbano entre otras se consideran activos de un país, mientras más obras se realicen, mayor riqueza se genera, al igual que empleos, dicho lo anterior

el sector de la construcción tiene una importante función social (Poó Rubio, 2003). El sector de la construcción genera un estimado de 250 millones de trabajos, lo que se considera un 7.7% de todo el empleo a escala mundial. Por cada millón de dólares invertido en productos de construcción se producen en promedio 97 empleos en países emergentes (Forbes Colombia, 2021).

### 1.1.2. Sector de la construcción en México y Baja California.

El sector de la construcción en el territorio nacional, tiene un importante dinamismo por parte del gobierno federal y los estados, quienes implementan obra pública como una herramienta de activación económica, incentivando el desarrollo regional mediante la inversión en turismo, industria, desarrollo urbano generando con ello fuentes de empleo (Poó Rubio, 2003).

En México el sector de la construcción generó aproximadamente 252 mil millones de pesos, colocando al sector en la tercera actividad económica con mayor importancia del país. Por cada 10 empleos directos se producen 5 trabajos indirectos en los sectores económicos que se relacionan con el sector de la construcción, activando 185 de las 262 ramas económicas nacionales. Las aportaciones del sector constructivo al Producto Interno Bruto (PIB) del país fue de 6.5% hasta finales de 2019 (Méndez, 2019).

La Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) considera seis tipos de obras según los sectores:

1. Agua
2. Riego
3. Electricidad y telecomunicaciones
4. Transporte
5. Petróleo y petroquímica
6. Otras obras

(Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

El sector de la construcción se divide en dos grandes áreas:

1. Obras de edificación e infraestructura.
2. Construcción pesada.

El área de edificación e infraestructura incluye:

- Vivienda;
- Edificios industriales, comerciales y de servicios;
- Escuelas;
- Hospitales y clínica
- Obras y trabajos auxiliares para la edificación.

Mientras tanto en el área de la infraestructura y construcción pesada considera:

- Transporte y urbanización total;
- Otras construcciones;
- Electricidad y telecomunicaciones;
- Petróleo y petroquímica,
- Agua, riego y saneamiento

(Quiroz , 2020).

De acuerdo con el Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción (CEESCO) en el año 2021 el sector de la construcción en México registró un 1 billón 793 mil millones de pesos, colocando a este en el cuarto lugar a nivel nacional en la aportación del PIB. En el primer trimestre del 2022 el sector de la construcción facturó 126 mil 901 millones de pesos (CEESCO, 2022).

Debido a que en épocas de crecimiento el sector de la construcción tiende a desarrollarse, mientras en crisis éste se contrae de forma trascendental, gracias al efecto multiplicador en la generación de empleos directos, así como su relación en otros

sectores productivos. En 2019 la edificación representó el 47% del valor de producción, el 53% lo registro obras de infraestructura y construcción pesada. El sector público tuvo una participación del 38% en construcción de infraestructura y construcción pesada, el sector privado represento el 62% con edificación (Quiroz , 2020).

Es decir, esto indica que el sector responde a la situación económica del país, ya que las crisis menguan a los sectores que integran el ramo constructivo, se ven afectadas empresas proveedoras de materias primas, cementeras, mano de obra entre otros sectores (Platt, 2017). A pesar de la actual recesión, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) estima un aumento del 3.3% del PIB para el 2022, esto gracias a que las obras que se interrumpieron se han activado o lo harán a la brevedad (POSSEHL, 2022).

En México el sector de la construcción no ha superado su caída posterior a la crisis sanitaria del 2019, esto debido al aumento de costos en los materiales, las alzas en las tasas de interés y la falta de inversión en infraestructura. De acuerdo con Samuel Vázquez, economista principal de *BBVA Research México*, describe que los factores que arrastra el sector de la construcción, es la edificación residencial, la cual presenta una disminución en los últimos años, pasando de 60 o 65% en el 2007 cuando presentó su mayor dinamismo a 40 o 45% actualmente, el resto recae en la generación de naves industriales, centros comerciales, edificios para oficina. Por su parte Francisco Javier Solares Alemán, presidente de la CMIC estima un crecimiento de 1 o 2% para finales del año 2022. Las constructoras generarían un estimado de 430,000 millones de pesos, cuando en el año 2021 se facturo 421,000 millones de pesos. La inversión pública para

el sector de la construcción representa el 2% del PIB, cuando debería destinar entre el 5 y 6% (Escobar, 2022).

Como consecuencia, de las 32 entidades federativas del país, el estado de Baja California aportó en el año 2021 el 5.0% del PIB en el sector de la construcción con 89 mil 769 millones de pesos, a nivel nacional fue como se comentó anteriormente de 1 billón 793 mil millones de pesos (Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción, 2023). Según el CEESCO en el 2022 el sector en el estado mostró una mayor dinámica, debido a un incremento en la facturación de obras para generación y distribución de electricidad e infraestructura en telecomunicaciones con un 45%; mientras 32.6% corresponde a la edificación de vivienda, industria, comercial y servicios (Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción, 2022).

En la tabla 1 observamos la inversión económica correspondientes al sector de edificación, agua, riego y saneamiento, electricidad y comunicaciones, así como transporte, urbanización, hidráulicas y así como otro tipo de construcciones registraron decrementos, mientras que obras para conducción de hidrocarburos e instalaciones petroquímicas registraron un estancamiento (Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción, 2022).

**TABLA 1. PRODUCCIÓN DE EMPRESAS CONSTRUCTORAS EN B.C. SEGÚN TIPO DE OBRA**  
**MILLONES DE PESOS CORRIENTES (ENERO-ABRIL 2022)**

| Tipo de obra                      | enero-abril 2021 | enero-abril 2022 | Var% real    |
|-----------------------------------|------------------|------------------|--------------|
| Edificación                       | 3,017, 352       | 4,593,885        | 32.6%        |
| Agua, riego y saneamiento         | 161, 809         | 131,009          | -29.6%       |
| Electricidad y telecomunicaciones | 191,818          | 326,809          | 45.0%        |
| Transporte y urbanización         | 798.523          | 776.665          | -14.9%       |
| Petróleo y petroquímica           | 30,862           | 26,151           | 0.0%         |
| Otras construcciones              | 1,026,703        | 1,176,202        | -0.8%        |
| <b>Total</b>                      | <b>5,227.067</b> | <b>7,265,761</b> | <b>21.0%</b> |

Tabla elaborada por CEESCO con información de INEGI (Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción, 2022).

## 1.2 *Problemática asociada al sector de la construcción.*

### 1.2.1. Clasificación de los residuos del sector de la construcción y demolición.

Anteriormente conocidos como escombros, los residuos de construcción y demolición (RCD) son aquellos resultantes de actividades de construcción como, reparación, remodelación, demolición, de obras civiles o de otras actividades conexas, complementarias o análogas (Trujillo & Quintero, 2021). De acuerdo con Peñalvo-López y colaboradores, los RCD son cualquier sustancia o elementos que, según la definición de residuos, se produce en obras tanto de construcción, rehabilitación o demolición (Peñalvo-López, Cárcel Carrasco, Beltrán-Rodríguez, & Beltrán-Rodríguez, 2019).

A nivel mundial se producen más de 10 mil millones de toneladas de RCD, lo que representa un problema que deben de gestionar los países de todo el mundo (Huanyu, Jian, Hongping, Zillante, & Jiayuan, 2023). Sin embargo, este tipo de residuos está aumentando drásticamente. Los RCD de alto volumen que requieren atención prioritaria, en términos de calidad este tipo de residuos se generan durante la construcción, renovación y demolición de edificios. Por ello es importante comprender sus características (Ansari & Ehrampoush, 2018).

Hasta ahora estos residuos son una mezcla muy diversa de materiales de construcción, dentro de este tipo de residuo encontramos agregados, concreto, madera, papel, metal, materiales aislantes y vidrio, los cuales pueden estar contaminados con pinturas, sujetadores, adhesivos, revestimientos de paredes y suciedad (El-Haggar, 2007).

Históricamente los materiales constructivos procedían de un origen pétreo, por ello su reintegración al medio era progresivo, sin embargo, los problemas surgen cuando se inicia el uso de materiales alternativos como metales y plásticos para hacer frente a funciones, rendimientos y costos. Materiales más resistentes a la tracción que la piedra y el ladrillo, regularmente tienen menor durabilidad, son de difícil reciclado y alto consumo de energía, generando importantes grados de contaminación, por ello la importancia de minimizar, controlar y en lo posible reincorporar éstos a la cadena de construcción (Sistema de Ingeniería y control Ambiental, S.A de C.V., 2009).

En la Tabla 2 se observan los porcentajes en la composición de los RCD de la misma forma se han determinado bajo distintos estudios gravimétricos, determinando que, en promedio el 90% de los RCD comprenden materiales cerámicos reciclables, ladrillos, bloques, tejas, revestimientos, morteros, así como concreto.

**TABLA 2. PORCENTAJES DE LA COMPOSICIÓN GRAVIMÉTRICA DE LOS RCD.**

| Composición gravimétrica promedio de RCD |      |
|--|------|
| Mortero                                  | 63%  |
| Hormigón                                 | 29%  |
| Otros                                    | 7%   |
| Orgánicos                                | 1%   |
| Total                                    | 100% |

Materiales y porcentajes presentes en los RCD (de Barros Martins, y otros, 2023).

Los RCD pueden considerarse inertes, no peligrosos y pueden tener un alto valor y la posibilidad de ser aprovechados, muchos de estos residuos son desechados en vertederos sin ser recuperados para su reutilización (Suárez-Salgado, Betancourt-Quiroga, Molina-Benavides, & Mahecha-Vanegas, 2019).

Comúnmente los RCD son sólidos que tienen su origen en la excavación, construcción, demolición, reparación y adecuaciones de obras civiles u otras entre las que se pueden encontrar los siguientes tipos:

1. **Susceptibles a aprovechamiento**, dentro de estos se encuentran productos de excavación, nivelaciones y sobrantes de adecuaciones de terreno: coberturas vegetales, suelo, limos y materiales pétreos productos de la excavación, entre otros.
2. **Productos de cimentaciones y pilotajes** como lo son arcillas, bentonitas y demás.
3. **Pétreos** donde podemos mencionar: hormigón, arenas, gravas, gravillas, cantos, pétreos asfálticos, cerámicas, mezcla de cementos, concretos hidráulicos trozos de ladrillo y bloques, entre otros.
4. **No pétreos** dentro de estos materiales hallamos vidrio, hierro, cobre, aluminio, estaño, zinc, entre otros metales, poliestireno, madera, plásticos, PVC, cartón, yeso entre otros. (Becerra Hinstroza, 2019).

Como podemos deducir los RCD son generados en pequeñas obras cuyos residuos son retirados por vehículos de carga privados, aproximadamente el 5% de dichos residuos son transportados por vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos (RSU), y cerca del 10% de los RCD se estima son dispuestos en suelos de conservación o en vía pública, el 67% de la obra pública y privada son transportados por vehículos de carga privada, desafortunadamente, únicamente el 20% se dispone en lugares autorizados, el 3% se recicla, el resto se usa para renivelación de terrenos, rellenos sanitarios y de manera inadecuada se disponen en suelos de conservación o vía pública (Suárez-Salgado, Betancourt-Quiroga, Molina-Benavides, & Mahecha-Vanegas, 2019).

Como ya hemos mencionado los residuos son sustancias u objetos que su poseedor excluya o tenga la intención o la obligación de excluir, estos se pueden clasificar:

1. Según la peligrosidad de los residuos.
2. Según el origen de los residuos.
3. Según su composición.

Según su peligrosidad encontramos:

1. **Residuos inertes:** Son aquellos residuos que no presentan transformaciones físicas, químicas o biológicas, no son solubles, no combustionan y no reaccionan física ni químicamente de ninguna manera, no son biodegradables por lo tanto no afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto y no contaminan el medio o afectan la salud humana (Peñalvo-López, Cárcel Carrasco, Beltrán-Rodríguez, & Beltrán-Rodríguez, 2019).
2. **Residuos tóxicos y peligrosos:** Estos son residuos que por sus características se consideran peligrosos para el ser humano y el medio, presentan sustancias peligrosas o tóxicas, en estos también se consideran los recipientes y envases que los haya contenido. Su principal problema es su capacidad para contaminar otros residuos, en especial los inertes, aumentando considerablemente el costo de su gestión (de Santos Marián, Monercillo Delgado, & García Martínez, 2013).
3. **Residuos no peligrosos:** Son aquellos que son inertes como lo son el plástico, papel, cartón, metal que no presentan contaminación por alguna sustancia.

Existen otros tipos de residuos que por sus características se **consideran residuos especiales** estos dependerán de su generación, naturaleza, gestión, etc. Tienen normativas específicas, como lo son residuos urbanos, residuos electrónicos y eléctricos, sanitarios, neumáticos, vehículos de vida útil final (RECYTRANS , 2013).

Una parte importante es la clasificación y la descripción de los residuos de construcción los cuales se pueden clasificar según su origen o la naturaleza.

❖ **Según su origen** encontramos:

A. Residuos procedentes de procesos de extracción de áridos o puntos de la obra donde se hacen movimientos de tierras, sin otro tipo de actividad constructiva.

- Residuos procedentes de obras de construcción.
- Residuos procedentes de obras de demolición.

B. Los residuos de construcción por su naturaleza, se pueden diferenciar entre:

- Residuos inertes donde encontramos a la mayoría de los RCD como lo son hormigón, ladrillos, tejas, vidrio y cualquier tipo de tierra de tierra o canto.
- Residuos no peligrosos como lo son madera, algunos plásticos, papel, yeso, textiles y la mayoría de los metales
- Residuos tóxicos y peligrosos aquí encontraremos a las pinturas y disolventes, plomo, amianto, así como sus derivados y los residuos radiactivos (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo, Sánchez Cotte, & Rondón Quintana, 2017).

Por la escasa experiencia con la que se cuenta México en cuestión de residuos, específicamente en RCD, es de suma importancia generar acciones innovadoras que permitan el aprovechamiento de este tipo de materiales, siendo efectivas para áreas de construcción futuras, para ello es determinante cambiar la perspectiva de ver a los residuos como basura y enfocarlos como material de aprovechamiento, susceptible a ser utilizados en nuevas construcciones, haciéndolas sustentables, eficientes y seguras (Ceñal Ruiz & Korb Reachy, 2015).

Los RCD tienen propiedades que dependen de su origen y composición, separándolos en residuos de:

- Construcción y demolición de edificación y estructuras
- Capas firmes

Los primeros pueden contaminar otros materiales de interés, por ello deben separarse en la obra, presentan una gran cantidad de residuos. Los segundos son más homogéneos, presentan menor posibilidad de contaminantes en su origen, sin embargo, requieren equipos y tecnologías específicas. En los residuos, el tamaño es muy heterogéneo ya que depende de la técnica de demolición, pueden tener presencia de metales, vidrio, betún, materia orgánica y yeso.

De acuerdo con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y el Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana del gobierno de España, una de las características primordiales de los residuos es su composición química, el hormigón dependerá del árido utilizado en su producción ya que más del 75% de su total lo constituye el árido, así, como hidratantes del cemento, silicatos, aluminatos y elementos cálcicos, por ende, pueden ser calizos o silíceos en la Tabla 3 veremos el porcentaje de silicio y calizos presentes en los RCD (Centro de Estudios y

Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2014).

**TABLA 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS RCD.**

| Compuestos                     | Residuo silíceo % | Residuo calizo % |
|--------------------------------|-------------------|------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 45-60             | 4-5              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15-20             | 1-2              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2-5               | 1-2              |
| CaO                            | 5-7               | 52-54            |
| MgO                            | 0.5-1.5           | 0.2-0.8          |

La composición química de los escombros de hormigón dependerá del árido utilizado para su producción, gráfica tomada del (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2014).

La presencia de distintos compuestos y sus respectivos porcentajes en materiales cerámicos los observamos en la Tabla 4 donde se determina que el mayor porcentaje se encuentra en los residuos con presencia de sílice.

**TABLA 4. COMPOSICIÓN PRINCIPAL DE LOS RCD.**

| Compuesto                      | % residuo cerámico |
|--------------------------------|--------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 40-50              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6-8                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2-4                |
| CaO                            | 20-28              |
| MgO                            | 0-1                |

La composición química de los residuos cerámicos es muy diversa, sin embargo, el óxido de silicio y el óxido de calcio presentan mayor abundancia en los RCD. Gráfica tomada del (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2014).

A continuación, en la Tabla 5 se pueden observar algunos materiales que se utilizan en el sector de la construcción y demolición, donde se describe la generación promedio anual y el porcentaje que representa cada uno de los materiales.

**TABLA 5. TIPO, PROMEDIO Y PORCENTAJE PRESENTES EN LOS RCD.**

| Producto                           | Generación promedio anual<br>(miles de toneladas) | Porcentaje (%) |
|------------------------------------|---|----------------|
| Material para trabajo en<br>suelos | 2,637.55  | 43.16          |
| Concreto                           | 1,489.88  | 24.38          |
| Block                              | 1,425.72  | 23.33          |
| Tablaroca Yeso                     | 247.5   | 4.05           |

|           |       |      |
|-----------|-------|------|
| Madera    | 92.89 | 1.52 |
| Cerámica  | 51.94 | 0.85 |
| Plásticos | 44    | 0.72 |
| Piedra    | 37.89 | 0.62 |
| Papel     | 29.94 | 0.49 |
| Varilla   | 29.33 | 0.48 |
| Asfalto   | 15.28 | 0.25 |
| Lámina    | 5.5   | 0.09 |
| Otros     | 3.67  | 0.06 |

Gráfica tomada de la Facultad de Ingeniería. Problemática de los residuos de la construcción y demolición, México, 2015.

En la Tabla 6 podemos observar la composición de los RCD, los componentes mayoritarios, así como su distribución porcentual según el material. Estos difieren según el tipo de infraestructura, de ello dependen sus componentes mayoritarios, así como el tipo y distribución porcentual de las materias primas utilizadas, estas varían de país en país dependiendo de su disponibilidad y sus hábitos de construcción (Landau, 2006).

**TABLA 6. COMPOSICIÓN PRINCIPAL DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

**COMPONENTES MAYORITARIOS Y DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL.**

| Material                       | % en volumen |
|--------------------------------|--------------|
| Arena                          | 60           |
| Yeso Natural                   | 1            |
| Metales                        | 4            |
| Grava                          | 14           |
| Caliza (Producción de cemento) | 6            |
| Arcilla                        | 6            |
| Piedra Natural                 | 4            |
| Madera                         | 2            |
| Petróleo (Plásticos)           | 3            |
| Total                          | 100          |

Tabla tomada del documento denominado: Monografía sobre residuos de construcción y demolición (Gobierno Vasco, 2004).

El sector de la construcción produce impactos en todos sus procesos, extracción, fabricación de materiales hasta el desarrollo de obra civil, consumiendo recursos no renovables, un elevado gasto de energía, contaminando el agua y aire. Sus residuos son dispuestos en zonas inadecuadas o mal utilizados, rellenando sitios que a futuro servirán como nuevas edificaciones, transfigurando a estos en terrenos inestables y difíciles de

aprovechar (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo, Sánchez Cotte, & Rondón Quintana, 2017).

Como podemos observar en la tabla número 7 encontramos los materiales de RCD y sus porcentajes estimados, en los vertederos acondicionados para recibir residuos, se encuentran hasta un 75% de RCD, caracterizados en los siguientes materiales:

**TABLA 7. TIPO DE MATERIALES Y PORCENTAJES ESTIMADOS EN VERTEDEROS DE RCD.**

| Material                              | % en volumen |
|---------------------------------------|--------------|
| Ladrillos, azulejos y otros cerámicos | 54           |
| Hormigón                              | 12           |
| Piedra                                | 5            |
| Arena, Grava y otros áridos           | 4            |
| Madera                                | 4            |
| Vidrio                                | 0.5          |
| Plástico                              | 1.5          |
| Metales                               | 2.5          |
| Asfalto                               | 5            |
| Yeso                                  | 0.2          |
| Papel                                 | 0.3          |
| Basura                                | 7            |
| Otros                                 | 4            |

Tabla tomada de (Sistema de Ingeniería y control Ambiental, S.A de C.V., 2009).

De acuerdo con la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) el sector en México genera el 50% de las emisiones contaminantes. Sin embargo, cada vez se busca más satisfacer criterios de sostenibilidad, cumplir con leyes y regulaciones de cada nación, buscando la eficiencia de recursos y el cuidado ambiental (POSSEHL, 2022).

Desafortunadamente es más barato trasladar residuos a campo abierto, incluso a un vertedero, que reciclar, separar, clasificar y reutilizar, sin embargo diferentes grupos sociales y ecologistas piden pronta solución a una situación que no sólo afecta visualmente el paisaje, provoca graves problemas de contaminación, esta es una actividad aparentemente inerte, pero al no separar materiales como: ladrillo, azulejos,

hormigón, yeso, restos de pinturas, sodio, níquel, etc., y otros materiales nada ecológicos, generan un desastre medioambiental (Landau, 2006).

Los desechos sólidos se generan en hogares, oficinas, tiendas, mercado, restaurantes, instituciones públicas, instalaciones industriales, plantas de tratamiento de aguas y alcantarillado, obras de construcción y demolición u actividades agrícolas (IPCC, 2006) no son considerados residuos de manejo especial al no rebasar los 80m<sup>3</sup>.

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México, entre el 60-70% de la composición de los RCD son materiales minerales, tierras, hormigón, ladrillos, cerámicos; el resto está formado por cantidades variables de residuos de madera, metal, yeso, plásticos, etc. La mayor parte son residuos no peligrosos, incluso inertes, cuyo aprovechamiento no debe presentar problema, sino que puede contribuir a la disminución del consumo de recursos minerales naturales (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020).

Los residuos de la construcción y demolición, se consideran residuos de manejo especial cuando generen más de 80m<sup>3</sup>. En la tabla número 8 podemos observar la generación de toneladas de RCD, según su tipo de obra, así como el porcentaje equivalente. En 2018 se estimó en 10.15 millones de toneladas los residuos generados por el sector constructivo, 3.8 millones corresponden al sector del transporte y urbanización lo cual equivale al 38.2% de la generación total, la inversión pública aportó el 56.76% del total de los residuos, siendo el subsector de carreteras, puentes y caminos con 32% el que más residuos generó con 1.8 millones de toneladas, la inversión privada con 0.9 millones de tonelada, la cual representa el 20% de la generación de residuos,

encontramos el subsector de instalaciones para edificación (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

**TABLA 8. TONELADAS GENERADAS, SEGÚN TIPO DE OBRA Y PORCENTAJE EQUIVALENTE**

| Tipo de Obra                      | Generación en Toneladas | Porcentaje de Generación |
|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Edificación                       | 1,593,512.64            | 16%                      |
| Agua, riego y saneamiento         | 900,576.75              | 9%                       |
| Electricidad y Telecomunicaciones | 536,280.50              | 5%                       |
| Transporte y urbanización         | 3,880,234.01            | 38%                      |
| Petróleo y petroquímica           | 1,049,782.31            | 10%                      |
| Otras construcciones              | 2,192,936.43            | 22%                      |
| <b>Total</b>                      | <b>10,153,322.63</b>    | <b>100%</b>              |

Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020).

Sin embargo, el sector constructivo, seguirá generando RCD y estos dependerán de las regiones del mundo, el material recuperado regularmente siempre es de menor calidad, muchas veces los residuos constructivos acaban en vertederos, una realidad generalizada en América Latina (Peters Quiroga, 2022).

Debido a la múltiple variedad de materiales que son considerados como residuos en el sector de la construcción y demolición se puede implementar el desarrollo de una vida útil más amplia, así como el reúso de los materiales, considerando que a partir de estos residuos podemos desacelerar la pérdida de materias primas destinadas a estas actividades. Se pueden implementar estrategias para disminuir la generación de estos residuos como lo son la demolición selectiva o la desconstrucción permitiendo un mayor aprovechamiento de estos materiales dándoles una mayor vida útil (Ceñal Ruiz & Korb Reachy, 2015).

### 1.2.2. Impactos ambientales asociada al sector de la construcción.

La forma en que se desarrolla el sector de la construcción, así como sus sistemas de producción contribuyen e impactan de forma alarmante al medio donde se desarrolla.

El sector de la construcción mide sus impactos por el consumo de recursos y los residuos resultantes de su actividad (Rodríguez & Meza, 2018). Esto se debe a que el sector de la construcción realiza la mayor explotación de recursos, bióticos y abióticos, el 50% de estos recursos no son renovables. De acuerdo con el *World Watch Institute*, el sector de la construcción consume el 40% de piedras brutas, grava y arena, de madera virgen consume el 25% al año a nivel mundial, lo cual podría resultar en la escasez de dichos recursos (Dobrowolska, 2021).

El sector de la construcción es una fuente de impactos ambientales, ya sea de forma directa o indirecta. Los impactos negativos más relevantes a mencionar son el incremento de la presión y agotamiento de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad debido a la extracción de materias primas, introducción, generación y vertido de diversos contaminantes causantes del deterioro ambiental, la generación de polvo, la contaminación acústica, la remoción de áreas vegetativas, la polución atmosférica (Enshassi, Kochendoerfer, & Rizq, 2014).

Tenemos que considerar que el sector de la construcción aporta según algunas estimaciones un 23% de la contaminación atmosférica, contamina el 40% del agua y genera el 50% de los residuos en vertederos, por lo cual la reutilización de residuos debe seguir siendo objeto de estudio para generar alternativas (Dobrowolska, 2021). El sector de la construcción es de los sectores que más recursos consume en el mundo, se estima que gasta el 40% de la energía total y genera el 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los RCD producen contaminación del agua, suelo, aire, afectando ecosistemas y la salud humana (Suárez-Salgado, Betancourt-Quiroga, Molina-Benavides, & Mahecha-Vanegas, 2019).

Cabe mencionar que el sector de la construcción emite CO<sub>2</sub> al mantener funcionales los edificios, por ejemplo, en 2019 las emisiones aumentaron 9.95 gigatoneladas. Junto con la contaminación generada por el sector de la construcción, el sector acumula el 38% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía (Portal Ambiental, 2021).

Dentro de las problemáticas que se asocian al sector de la construcción, los RCD han tomado gran relevancia debido al aumento significativo en los últimos años, generando problemas ambientales como resultado de su vertido incontrolado (Ossa & García, 2015).

En la actualidad es importante considerar a los RCD como un problema que se genera a escala mundial de forma alarmante, ya que se producen más de 10,000 millones de toneladas anuales, en consecuencia, generan impactos negativos social y ambientalmente, como lo son: ocupación de la tierra, consumo de materias primas, consumos altos de energía, alta emisión de gases de efecto invernadero, así como contaminación del agua (Huanyu, Jian, Hongping, Zillante, & Jiayuan, 2023).

La demolición o renovación de infraestructura existente, así como el desarrollo de nueva infraestructura, generan residuos cuya alternativa de disposición en países en vías de desarrollo comúnmente es disponerlos en vertederos los cuales no están controlados o regulados (Gómez Meijilde, Pérez Pérez, Rodríguez Pasadín, & Corraliza Tejeda, 2015).

La mayoría de los países generan cantidades importantes de RCD teniendo su disposición final en vertederos, por ejemplo, Brasil y Australia con 40%, mientras que países como Canadá, Hong Kong y Estados Unidos se trataron de mantener por debajo

del 30%, en comparación del 44% del Reino Unido, la mitad de residuos se desechan en vertederos no aptos, los países del Golfo generaron más de 120 millones de toneladas anuales, el 15% son residuos de construcción, esto debido a la mala gestión de residuos de la industria constructiva (Al-Raqueb, Hamidreza Ghaffar, Al-Kheetan, & Chougan, 2023).

Sin embargo, a pesar de lo descrito anteriormente no debemos olvidar que, la función principal del sector de la construcción ha sido proveer de vivienda, edificios públicos e infraestructura para el sector industrial, así como diversas obras que faciliten el desarrollo de la sociedad. El sector de la construcción, continúa su desarrollo a pesar de pasar por épocas de carestía, desarrollo, desastres naturales o conflictos bélicos, utilizando gran variedad de materiales y distintos métodos de construcción. Es una industria tradicional que difícilmente acepta nuevas exigencias, ya que estos cambios pueden traer más conflictos que beneficios (Sistema de Ingeniería y control Ambiental, S.A de C.V., 2009).

Los RCD se constituyen de materiales inertes y no inertes, su composición dependerá de la etapa constructiva. Actualmente, existe una tendencia sobre el reciclaje de residuos y el cuidado del medio ambiente. Sin embargo, el sector de la construcción continúa representando una de las mayores amenazas ambientales debido a sus fuentes de contaminación (Liseane, Enedir, & Juárez J., 2022).

Se han planteado mundialmente estrategias para disminuir los RCD, entre ellas, la reducción de los residuos en la fuente, reutilización y reciclaje, sin embargo, es importante considerar procesos que generen valor agregado a estos materiales que les

permita reintegrarse a la cadena productiva, creando una solución sustentable a la problemática (Chica-Osorio & Beltrán-Montoya, 2018).

Sin embargo, los RCD generalmente no son tratados ni separados siendo vertidos en sitios clandestinos, cuyos residuos por lo general corresponden a materiales de excavación, restos de ladrillo, azulejos, mortero, concreto, yeso, madera, plásticos, solventes, restos de pintura, metales y otros materiales, generando un impacto ambiental importante. En consecuencia, el manejo inadecuado de dichos materiales en su disposición final, contemplan diversos problemas ambientales, de imagen urbana y salud, sobresaliendo los que a continuación se mencionan (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2013).

- Obstrucción de arroyos, cañadas y barrancas
- Afectación al drenaje natural
- Azolve de las partes bajas e inundación de zonas aledañas en temporada de lluvias.
- Afectaciones al medio físico y medio biótico (flora y fauna)
- Focos de contaminación por mezcla de residuos, incluso peligrosos.
- Contaminación del suelo y subsuelo e incluso acuíferos
- Afectación de zonas de recarga de agua subterránea
- Impacto visual del entorno
- La proliferación del polvo (contaminación del aire) provoca enfermedades respiratorias.
- Proliferación de fauna nociva

Conforme a lo anterior, debemos mencionar que, la iniciativa privada genera el 95% de los residuos de construcción en el desarrollo de fraccionamientos, centros comerciales e industria, desechos que generan deterioro de la imagen urbana, el aire y genera problemas de salud (Magallanes, 2022). Los RCD generados al año por el sector de la construcción aunado al alto porcentaje de residuos cuya disposición final son los vertederos, es el mayor impacto ambiental que se le atribuye al sector de la construcción (Becerra Hinestroza, 2019).

### 1.2.3. Impactos sociales asociados al sector de la construcción.

A nivel social, el sector de la construcción siempre ha tenido una función central, siendo un generador de desarrollo regional y local, trayendo consigo la integración y progreso de comunidades, quienes demandan hogares, hospitales, escuelas, carreteras, etc. Así como el desarrollo de servicios municipales de energía, agua potable, drenaje, obras viales y su mantenimiento (Poó Rubio, 2003).

Por esta razón, se ha comprobado que la inversión en infraestructura, específicamente en obras civiles, es una estrategia efectiva a nivel político, ya que tiene como consecuencia el crecimiento y la estimulación económica, impactando en la generación de empleos y aumento de productividad, estos beneficios obtienen un valor agregado si se observan en periodos de crisis o incertidumbre. El sector de la construcción es una fuente de empleos y productividad, contribuye a disminuir las brechas sociales y permite a la población satisfacer sus necesidades básicas como son salud, educación y acceso a servicios (Galán, 2021).

No obstante el sector de la construcción también presenta impactos negativos en el aspecto social de los cuales podemos mencionar, el ruido y la vibración por el tráfico

de vehículos pesados, utilizados durante el proceso de extracción de materiales, el desarrollo de obra y el posterior vertido de RCD, la alteración y degradación paisajista en entornos naturales, alteraciones resultado de la extracción de materiales o su vertido como residuo, así como la ocupación de suelos en entornos urbanos que podrían destinarse para distintos usos (de Santos Marián, Monercillo Delgado, & García Martínez, 2013).

Sin embargo, el mayor problema social al que nos enfrentamos en la actualidad es el cambio climático, se le llama así a la variación global del clima en el planeta afectando principalmente las temperaturas y patrones climáticos. Las actividades antropogénicas han sido el factor principal de este cambio, como resultado de las emisiones de GEI derivado del uso de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas, empleado en las distintas actividades económicas, entre ellas la construcción (Suescum Morales, 2022).

De tal forma que las actividades humanas modifican cada rincón del planeta de distintas formas. Por lo tanto, bajo las condiciones cambiantes actuales del clima se esperan más olas de calor, estaciones cálidas más prolongadas, las estaciones frías se reducirán; mientras mayor sea el cambio, las temperaturas extremas serán más comunes, llegando a niveles críticos para la salud humana y la agricultura (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2021) .

Otro impacto importante que debemos mencionar y el cual nos ocupa en este trabajo son: los RCD causantes de impactos significativos sobre el medio ambiente y la sociedad al ser eliminados de manera incorrecta. Estos RCD se producen cuando se construyen, se renuevan o en su defecto se demuelen estructuras de ingeniería civil, los

componentes de mayor presencia son concreto, madera, paneles de yeso, ladrillos, metal, papel y plástico (Liseane, EneDir, & Juárez J., 2022).

Se espera que para el año 2030 la población mundial llegue a los 8,500 millones de habitantes, alcanzando unos 9,700 millones para el 2050, lo cual tendrá repercusiones en el sector de la construcción. Al aumentar de la clase media, existe un mayor consumo de recursos e incrementa la presión en la infraestructura urbana. Actualmente el sector de la construcción demanda altas cantidades de materias primas, aproximadamente el 35% termina como residuo en vertederos, respecto al uso de energía final, se considera el uso en un 36%, mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> equivale aproximadamente en un 39% (Murano & Tavares, 2023).

Este tipo de residuos generan impactos sociales importantes de los cuales algunos de los que podemos mencionar son, los riesgos para la salud causadas por distintas enfermedades, incremento en el tráfico, conflictos de empresas constructivas, problemas de drenaje provocando inundaciones que transportan residuos por efectos de lluvia (Shitaw, Yidnekachew, & Eliyas, 2022). Los RCD constituye entre un 30 y 40% en países industrializados, entre los distintos países la tasa de reciclaje es distinta, algunas naciones como Países Bajos, Irlanda o Hungría reportan porcentajes de recuperación entre el 99 y el 100% entre los años 2017 y 2018, en otras naciones se reportan porcentajes entre el 0 y el 69% (Peters Quiroga, 2022).

#### 1.2.4. Impactos económicos asociados al sector de la construcción.

A nivel mundial, las naciones sustentan su desarrollo económico en proyectos del sector de la construcción, las obras civiles e ingeniería pesada ofrecen fuentes de empleo, contribuyen a la economía y es fuente de desarrollo de otros sectores, a nivel

económico sobresalen de su aportación a la producción nacional. En países en vías de desarrollo constituyen el 80% del activo de capital total, el 10% del (PIB) y supera el 50% de la riqueza invertida en activos fijos (Shitaw, Yidnekachew, & Eliyas, 2022)

Se considera que cada proyecto de construcción sea ejecutado con el material estimado para dicho fin, sin embargo, cada obra genera una cantidad importante de desperdicios, tanto en proyectos del sector público, como en el sector privado, por ejemplo los materiales con mayor volumen de residuos generados por el sector de la construcción son cemento, bloques huecos de concreto, barras de refuerzo, concreto y morteros, lo que constituye costos importantes de los proyectos de índole constructivo (Shitaw, Yidnekachew, & Eliyas, 2022).

Los RCD se deben considerar como uno de los principales problemas económicos, debido al sobre costo total, que resulta del desperdicio de material, el cual oscila en un 30% de los materiales comprados. Fue durante el último tercio del siglo XXI que se desarrollaron patrones de consumo en la que el consumo es un fin por sí mismo y no el fin para lograr un objetivo, con ello se establece que, no importa que las cosas sigan sirviendo, lo importante es seguir consumiendo; el impulso del desarrollo económico es el consumo. La práctica de usar y tirar también afecta al sector de la edificación, teniendo una tecnología que le permite extraer grandes volúmenes de materias primas, principalmente áridos esto es económicamente rentable, pero solo a corto plazo y para unos cuantos individuos, generando a la postre problemas económicos, sociales y ambientales (de Santos Marián, Monercillo Delgado, & García Martínez, 2013).

Las pérdidas económicas en el sector de la construcción, ocurren durante el proceso de edificación, lo cual no agrega valor a los proyectos constructivos ya que se generan gastos directos e indirectos, los materiales utilizados en obras estructurales son el hormigón, acero y ladrillos, mientras que mosaicos, cemento, baldosas y pintura son utilizados para detallar o complementar las estructuras constructivas, esta problemática de índole económica tiene una múltiple variedad de circunstancias como son manejo inadecuado, problemas de transporte y adquisición, modificación de diseño, almacenamiento inadecuado, habilidades laborales inadecuadas y algunos acuerdos de subcontratación (Nawaz, Chen , & Su, 2023).

#### 1.2.5. Normatividad y gestión sobre residuos del sector de la construcción en México y otros países.

La gestión de los RCD, deben de cumplir con leyes y regulaciones ambientales de cada país, para su eliminación como desecho sólido, sin embargo, los volúmenes de RCD se han mantenido en un crecimiento continuo sin ser tratados adecuadamente en distintos países (S. Walaa & Kassim, 2023).

En México la SEMARNAT estima la generación de RCD aproximadamente en un 17.5% de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), los cuales representan una problemática por su disposición final de forma inadecuada, en el país se estima que se generan a diario en promedio 16,438 toneladas de RCD, lo que da un total de 6.1 millones de toneladas anuales (Muñoz Socha, 2018).

Por lo cual es necesario que para los RCD se implemente un plan de manejo que cumpla con los siguientes puntos

- Características de las obras.

- Principales generadores de RCD.
- Estimaciones de las cantidades de cada material.
- Propuesta para minimizar, reusar y reciclar.
- Forma de transportar los residuos de construcción y demolición.

Es importante que el plan de manejo de los distintos RCD se prepare cuando:

- Los proyectos residenciales sean mayores a 10 casas.
- Se realicen obras de edificios institucionales, educativas, salud y edificios públicos que sobrepasen un área de 1250m<sup>2</sup>.
- Haya proyectos de demolición, renovación o remodelación que sus volúmenes excedan los 80m<sup>3</sup> de RCD.
- Proyectos de ingeniería civil que excedan los 500m<sup>3</sup> de producción en residuos, incluyendo aquellos residuos que se generan en el desarrollo de la misma obra (García Chiquito, 2020).

Para llevar a cabo estos pasos el 8 de octubre del 2003 se publica la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) modificada el 22 de mayo del 2015, la cual tiene como objetivo garantizar el derecho a toda persona a un medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención, la generación, la valorización y gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

La LGPGIR en su artículo 7 establece que es la federación, a través de la SEMARNAT la encargada de expedir las normas oficiales mexicanas, reglamentos y demás disposiciones jurídicas en materia de residuos, así como el control de los residuos

peligrosos provenientes de pequeños y grandes generadores o micro generadores cuando estos últimos sean contratados por las entidades federativas (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2015).

Además de la LGPGIR existen normas oficiales mexicanas que son las responsables de establecer procedimientos, límites máximos permisibles y demás especificaciones para lograr el objetivo de dicha ley. En materia de residuos algunas de las normas (NOM) aplicables se mencionan a continuación.

En febrero del 2013 en México se publica la NOM-161-SEMARNAT-2011 la cual contempla como obligación a los constructores que generan más de 80m<sup>3</sup> de residuos en cada una de sus obras, la formulación y desarrollo respectivo al plan de manejo (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2013). Considera residuos de manejo especial, a los residuos de obras de construcción, mantenimiento y demolición que generan más de 80m<sup>3</sup>, así como los que se encuentren en lugares como terrenos baldíos, orillas de carreteras, barrancos, pantanos o aquellos que sirven para nivelar o ganar terreno en zonas irregulares (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

En la Ciudad de México a través de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA); fue publicada el 20 de julio de 2021 en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, La NACDMX-007-RNAT-2019 la cual establece la clasificación y especificaciones del manejo integral para los residuos de la construcción y demolición, busca fomentar el manejo adecuado de estos residuos, así como garantizar su reciclaje, reúso y su correcta disposición final (Secretaría del Medio Ambiente, 2021).

Es un plan de manejo de índole estatal del D.F (CDMX) deberán adicionarse los requerimientos locales, en ambos se harán requerimientos específicos dependiendo de la obra en cuestión, en caso de no ser necesario el PM-RCD este podrá ser utilizado como herramienta de aplicación de construcción, aprovechamiento de materiales, así como su correcto manejo y disposición de materiales. La norma establece que los RCD deberán seleccionarse en el origen y entregarse en los sitios autorizados por la SEDEMA o por la autoridad ambiental competente, de forma separada para facilitar su valorización, según las categorías del tipo de material que se manejen (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

**TABLA 9. NORMAS CON PRESENCIA NACIONAL SOBRE RCD.**

| Nombre                | Contenido  |
|-----------------------|--|
| NOM-161-SEMARNAT-2011 | Clasifica los residuos de manejo especial y determina cuales están sujetas al Plan de Manejo; el listado de los mismos, su procedimiento de inclusión y exclusión a dicho listado; así como listados y procedimientos para la formulación de los planes de manejo (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).                                      |
| NACDMX-007-RNAT-2019  | Clasifica los residuos de la construcción y demolición, establece especificaciones y requisitos técnicos para su manejo integral; establece los requisitos complementarios que deben observarse en la formulación de los Planes de Manejo de RCD; así como establecer su procedimiento para la evaluación de la conformidad (Secretaría del Medio Ambiente, 2021). |

Tabla propia realizada con información recabada de (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2015) y (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

Dentro de las herramientas a nivel internacional se puede mencionar el caso de España, sobre la legislación de RCD podemos mencionar el Real Decreto 105/2008 que entro en funciones el 1 de febrero del 2008, el mismo regula la producción y gestión de RCD aunada a distintas iniciativas legales, la cual pretende implementar en el sector de

la construcción y demolición desarrollar los objetivos contenidos en el Plan Nacional de Residuos de la Construcción. Dicha legislación promueve las nuevas tendencias en la gestión de residuos con mayor respeto al medio ambiente y optimizar los recursos y materiales (Martinez Bretand & Tome Trujillo, 2008).

Al mismo tiempo el real decreto 105/2008 regula la producción y gestión de RCD. El objetivo de este decreto es establecer un régimen jurídico de la producción y gestión de los RCD fomentando su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, que asegure que dichos residuos reciban el tratamiento adecuado (Eurofins Enviroment Testing Spain, 2018).

Sistema Neerlandés para procesos de demolición BRL\_SVMS-007 es un instrumento voluntario (no es jurídicamente vinculante) para fomentar la calidad en el proceso de demolición. A los clientes que se ciñen a este sistema de certificación de la contratación y licitación se les garantiza una demolición *in situ* segura y ecológica. El sistema está controlado por terceros y por el Consejo de Acreditación. El proceso de demolición certificado sigue cuatro fases:

- Fase 1 Auditoría previa a la demolición: El contratista de demolición lleva a cabo una inspección detallada del proyecto de demolición y elabora un inventario de los materiales (tanto peligrosos como no peligrosos) para conocer la naturaleza, la cantidad y cualquier posible contaminación de los materiales de demolición obtenidos. Se realiza un inventario de los riesgos que supone para la seguridad en el trabajo y de los riesgos para la seguridad en el entorno.

- Fase 2 Plan de gestión de residuos: Se elabora un plan de gestión de residuos que incluya una descripción del método de demolición selectiva y ecológica, el

procesamiento o la retirada de flujos de materiales obtenidos, las medidas de seguridad que deben tomarse y los requisitos que debe aplicar el cliente.

- Fase 3 Ejecución: La ejecución de la demolición tiene lugar de acuerdo con el plan de gestión de residuos. Participan expertos del ámbito de la seguridad y la demolición ecológica y los contratistas de demolición certificados trabajan con equipamiento aprobado. El contratista de demolición debe garantizar que el emplazamiento de demolición es seguro y está bien organizado y que los flujos de material obtenidos no contaminan el suelo ni el entorno.

- Fase 4 Informe final: La ejecución del proyecto se realiza en consulta con las partes implicadas. El contratista de demolición elabora el informe final de los materiales de demolición obtenidos y lo proporciona al cliente previa solicitud (Comisión Europea, 2016).

Otra norma que es importante mencionar, corresponde a la norma ISO 20887:2020, la cual determina la sostenibilidad en los edificios u obras de ingeniería civil, diseño para el desmontaje y adaptación, así como los principios, requisitos y orientación, con lo cual constructores, arquitectos, ingenieros y diseñadores podrán mejorar y optimizar los ciclos de vida de los edificios reutilizando sus componentes de manera más eficiente. Este estándar genera una visión distinta acercándose a los principios de adaptabilidad y desmontaje incrementando la edad de los edificios a través de reutilizar, reciclar y eliminar distintos materiales que al final de su vida puedan ser utilizados en otras áreas, disminuyendo así emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de una demolición o una nueva infraestructura (Norma internacional ISO para la construcción sostenible, 2020).

Como consecuencia al aumento en la demanda de hogares, la mejora en la red de transportes, el desarrollo de infraestructura en distintas áreas urbanas, las que generan importantes problemas de índole medioambiental, lo cual ha atraído el interés en distintos sectores de la población sobre la generación y gestión de los RCD de forma más eficiente para la reintegración estos a distintas y nuevas infraestructuras (Nandal, Sood, Gupta, & Hu Haq, 2022).

De manera que disminuir la cantidad de residuos que se eliminan en vertederos, preservando así los recursos naturales es de suma importancia, por lo tanto, el reciclaje toma un papel predominante al convertir los RCD en un recurso. El reciclaje y la reutilización de los RCD deben ser prioritarios para la promoción del desarrollo sostenible (de Barros Martins, y otros, 2023).

A pesar de esto, en los países en vías de desarrollo, la generación de RCD es mayor que en naciones desarrolladas y en desarrollo. La poca conciencia social, una baja o nula aplicación de la ley, un desinterés de la comunidad y al mismo tiempo el uso de tecnologías viejas son los causantes de un mayor volumen de RCD, convirtiendo a estos en uno de los mayores problemas respecto a residuos. Los RCD son materiales de tipo inerte de los cuales se pueden mencionar metales, materiales de mortero, hormigón, ladrillo, plástico, madera, cerámica y vidrio de estos el 80% pueden ser reutilizados (Islam, y otros, 2019).

Lo anterior, toma relevancia, ya que, va a permitir la reincorporación de los residuos del sector constructivo a nuevas obras, utilizando los RCD para la producción de áridos teniendo con ello una mejor gestión y consumo de estos materiales, siendo aplicados como agregados para pavimentos de concreto o carreteras. Dichos agregados

pueden ser de dos tipos, los primeros corresponden a agregados de concreto reciclado (ACR) y los segundos son agregados reciclados (AR), los primeros se obtienen posterior al proceso obligatorio de producción del concreto, los AR se genera a partir de RCD los cuales pueden consistir en hormigón, tejas, vidrio, etc. (Nandal, Sood, Gupta, & Hu Haq, 2022).

En México se han logrado avances respecto a la gestión de residuos, ello a pesar de que no se ha logrado alcanzar una situación deseable, debido a que la gestión no ha sido suficiente respecto a un sistema de uso y reciclaje de estos, en naciones con mejores situaciones económicas y sociales más desarrolladas se llega a observar un 100% de eficiencia en reutilización y reciclaje de RCD, por ello es importante mejorar la gestión y aprovechamiento de los mismos (Ceñal Ruiz & Korb Reachy, 2015).

### 1.3. Justificación

Debido al constante aumento en el consumo y agotamiento de recursos naturales, a la generación de GEI, pero sobre todo al incremento en los registros de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, posteriores a era industrial, causante del calentamiento global el cual detona en el CC a nivel mundial, consecuencia de las distintas actividades antropogénicas, de las cuales el sector de la construcción es uno de los actores principales, derivado de la alta demanda de insumos propios y de otros sectores, como son: recursos madereros, industria de extracción de materiales pétreos, cementeras, mineras, industria acerera, industria arenera, entre otras.

La gran cantidad de residuos generados por el sector de la construcción, así como el concepto de usar y tirar, está llevando a países como México a adaptar políticas que

favorezcan al medio ambiente, reciclando, reusando y reutilizando dichos residuos como estrategia para la mitigación al CC, buscando como objetivo la reducción de los GEI y aumentar la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> principalmente.

Como consecuencia del uso de combustibles fósiles para la producción de materiales constructivos los cuales tienen afectaciones ambientales importantes, por ello es necesario la síntesis de nuevos materiales que nos permitan la captura de CO<sub>2</sub>, siendo los residuos de construcción y demolición, una alternativa como materia prima para la obtención de nuevos materiales de captura, secuestro y/o utilización de CO<sub>2</sub>.

La cantidad excesiva de RCD que no son aprovechados y/o reutilizados en nuevas construcciones o que tienen una disposición final inadecuada, pueden ser una fuente importante de sílice, con los que se podrían disponer de adsorbentes sólidos, el ortosilicato de litio (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) es uno de los materiales más prometedores para la captura de CO<sub>2</sub>, por su alta capacidad de adsorción, estabilidad térmica a medianas y altas temperaturas así como una cantidad significativa de ciclos y una excelente cinética de adsorción/desorción, siendo este nuevo material sintetizado a partir de RCD un material que nos permita generar estrategias de mitigación contra el cambio climático.

## Capítulo II.- Marco Teórico.

### 2.1. Sector de la construcción y cambio climático.

#### 2.1.1. Cambio climático asociado al sector de la construcción.

Una de las principales preocupaciones en los últimos años a nivel ambiental, social y económico es el cambio climático, son varios los factores que contribuyen a este entre ellos destacan la industria de la energía, la moda, el transporte y el sector de la construcción (Magallanes, 2022).

Las actividades antropogénicas generan principalmente cuatro GEI de larga duración: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y halocarbonados, los primeros tres son gases de origen natural, sin embargo, su concentración ha aumentado constantemente desde 1750. El registro de la concentración promedio de CO<sub>2</sub> atmosférico en el año 2020 fue de 416.21 partes por millón (ppm) siendo esta la más alta desde el inicio de sus mediciones en 1958. Registros de hielos sostienen que estos niveles son los más altos en los últimos 80,000 años, de acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) señala que desde 1958 las concentraciones de CO<sub>2</sub> han incrementado por arriba de 100 ppm (Organización de las Naciones Unidas, 2020).

Se ha definido como cambio climático a toda modificación en el estado actual del clima, reconocible a partir de una modificación en el valor medio y/o la variabilidad de sus propiedades, las cuales persistieron durante un tiempo prolongado, esto contempla la variabilidad natural o cambios por actividades antropogénicas (Allev, 2018).

De manera que, de acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) considera que un aumento en la temperatura de entre 0.3 a

4.8°C en este siglo, en relación al periodo comprendido entre 1986-2005, causará un aumento en el nivel del mar, mayor frecuencia de inundaciones y sequías, lo cual impactará de forma negativa las edificaciones (Fernández, Yurivilca, & Minoja, 2019).

Convirtiendo cambio climático en una de las principales problemáticas ambientales en el siglo XXI, como ha señalado la ONU desde el protocolo de Kioto en 1997. El IPCC ha determinado que el clima en el planeta ya ha sido modificado por la acumulación de (GEI) en la atmósfera. Gracias a esto, la temperatura media de la tierra se ha incrementado en 0.74°C en el último siglo, pudiendo llegar a aumentar entre 1.8°C y 6°C para finales de este siglo (Universidad Autónoma de Tlaxcala, 2014).

Por ello es importante recordar, que el sector de la construcción usa alrededor del 50% de los recursos naturales, consume aproximadamente el 40% de energía anual, 12% del agua potable mundial y genera (GEI) en un 38%. Los GEI son los promotores del aumento de temperatura mundial, siendo el detonante del cambio climático (CC) entre las décadas de 1970 al 2000 incrementaron los GEI en 1.3%. en cambio, del 2000 al 2010 aumentó los GEI en 2.2% siendo las más emisiones más altas en la historia antropogénica (Meza Estrada, 2018).

Anterior a la revolución industrial se tenía un registro de una concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de 280 ppm, en el año 2018 se llegaron a contabilizar 407.8 ppm, en el 2021 se alcanzó 415 ppm mientras que en la primera semana de junio del 2023 se promediaron 423 ppm, medición que no se presentaba desde hace millones de años, por ende, es importante se relacionen estrategias de mitigación y adaptación para potenciar los esfuerzos de reducir las emisiones e incrementar el nivel de vida y bienestar de las personas (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023).

Dentro de la diversidad de GEI que detonan el cambio climático, el más preocupante es el CO<sub>2</sub>. La industria del cemento emite alrededor del 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, por su lado la producción de hormigón consume 1.6 billones de toneladas de cemento, lo cual emite una tonelada de CO<sub>2</sub> por cada mil kilos producidos de hormigón, otro punto importante a considerar es el uso de maquinaria pesada la cual genera una importante emisión de dióxido de carbono, así como el sector del transporte de materiales que aporta entre el 6 y 8 % de GEI para un proyecto de construcción (Linn, 2019).

Las emisiones de GEI causan efectos negativos en la sociedad y el medio ambiente, según el IPCC la temperatura global incrementará en 1.5°C en los próximos 10 a 30 años, comparado con tiempos anteriores a la revolución industrial, lo cual hace indispensable reducir las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> (Yuan, Chen, Qin, & Hanakyxu Zhou, 2021).

Es perceptible que las temperaturas aumentan, las precipitaciones y las nevadas están cambian sus patrones, ocurren eventos climáticos más extremos, por mencionar fuertes tormentas, se rompe récord en temperaturas, muchos de estos cambios se le atribuyen al incremento de concentración de CO<sub>2</sub> y GEI en la atmósfera, como consecuencia de las actividades antropogénicas (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2022).

Por ejemplo, podemos mencionar a China con un aumento de 750 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> entre 2019 y 2021, debido a un mayor uso de carbono para la generación eléctrica, en cambio las emisiones de los Estados Unidos de América (EUA)

fueron en 2021 un 4% menores a 2019, La Unión Europea (UE) registró un descenso de 2.4% (EL MUNDO, 2022).

**TABLA 10. PRINCIPALES GEI, EMITIDOS POR ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS.**

| Principales GEI de larga duración     |  |
|---------------------------------------|--|
| Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) | Ingresa a la atmósfera al quemar combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), residuos sólidos, árboles y otros materiales biológicos; también como resultado de ciertas reacciones químicas (p. ej.: fabricación de cemento). El dióxido de carbono se elimina de la atmósfera (o "secuestra") cuando lo absorben las plantas como parte del ciclo biológico del carbono.   |
| Metano (CH <sub>4</sub> )             | Se genera durante la producción y el transporte de carbón, gas natural y petróleo. Se presentan emisiones de metano en prácticas ganaderas y otras prácticas agrícolas, así como a raíz de la descomposición de residuos orgánicos en rellenos sanitarios para residuos.   |
| Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)      | Se emite durante actividades agrícolas e industriales, en la combustión de combustibles fósiles, residuos sólidos y también durante el tratamiento de aguas residuales.  |
| Gases fluorados                       | Los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos, el hexafluoruro de azufre y el trifluoruro de nitrógeno son gases de efecto invernadero sintéticos, potentes se emiten en diversos procesos industriales. En ocasiones, los gases fluorados se utilizan como sustitutos de sustancias que destruyen el ozono de la estratósfera (p. ej.: clorofluorocarbonos, hidrofluorocarbonos y halones). Estos gases habitualmente se emiten en pequeñas cantidades, en ocasiones se les conoce como gases de Alto Potencial de Calentamiento Global. |

(Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2022).

De acuerdo con Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el CO<sub>2</sub> tiene un potencial de calentamiento global (PCG) de 1, 100 años es el tiempo utilizado como referencia, tiene una alta persistencia en el sistema climático, las emisiones de CO<sub>2</sub> generan altas concentraciones que durarán milenios (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2022).

Conforme a la evidencia científica existente, el aumento en la temperatura a nivel mundial, incrementaría la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos, lo cual creará costos directos e indirectos a sectores económicos, empresas, familias y personas

que gastan o invierten debido a la incertidumbre generado por el cambio climático (Cárdenas , Li Ng, & Serrano, 2021).

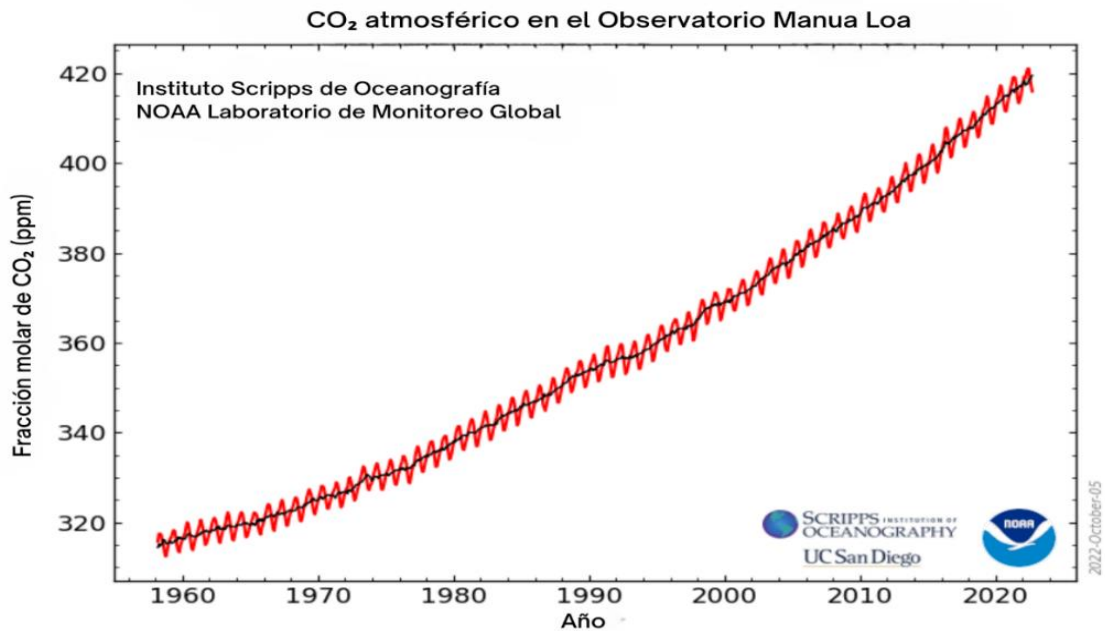
**TABLA 11. VALORES DE EMISIONES E INCERTIDUMBRE POR TIPO DE GEI.**

| Tipo de gas                   | Emisiones (Gg de CO <sub>2</sub> e) | Incertidumbre (%) |
|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| CO <sub>2</sub>               | 503,473.80                          | 5.88              |
| CH <sub>4</sub>               | 142,143.76                          | 4.85              |
| N <sub>2</sub> O              | 41,134.72                           | 123.29            |
| HFC                           | 12,616.74                           | 22.07             |
| PFC                           | 0.00                                |                   |
| SF <sub>6</sub>               | 195.25                              | 3.89              |
| CO <sub>2</sub> (absorciones) | -148,346.07                         | 19.46             |

Se presentan los valores de emisiones e incertidumbres por tipo de gas (Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2022).

En el año 2021 las emisiones de CO<sub>2</sub> batieron un nuevo récord mundial con 36,000 millones de toneladas, debido a un mayor uso de carbón (6% más) lo que también es el máximo histórico en términos absolutos. Por las sequías se dejó de producir energía hidroeléctrica, el aumento del costo del gas natural, hizo que muchos países incrementaran el uso del carbono en la generación de energía, lo que generó el aumento de CO<sub>2</sub> (EL MUNDO, 2022).

FIGURA 1 CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> DE 1951 AL 2022.



Información tomada de la (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023).

Las emisiones de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> en México en el año de 1990 se estimó en 315,031.80 Gg de CO<sub>2</sub>e, ya para el año 2015 se acrecentó 59.8% con una tasa de crecimiento anual (TCMA) de 1.89%, esto como consecuencia en el incremento del uso de combustibles de origen fósil. En el lustro que corresponde de 2010 a 2015, el aumento fue de 2.34% con una TCMA de 0.46% comparado con un incremento de 12.15% con una tasa de 2.32% durante 2005-2010 (Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2022).

A continuación, mencionamos algunas de las principales fuentes de emisión de dióxido de carbono.

Dentro de las actividades humanas que más emisiones de CO<sub>2</sub> generan encontramos a los combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) utilizados para la

generación de energía, transporte, procesos industriales y cambios en el uso de suelo (USCUSS) (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022).

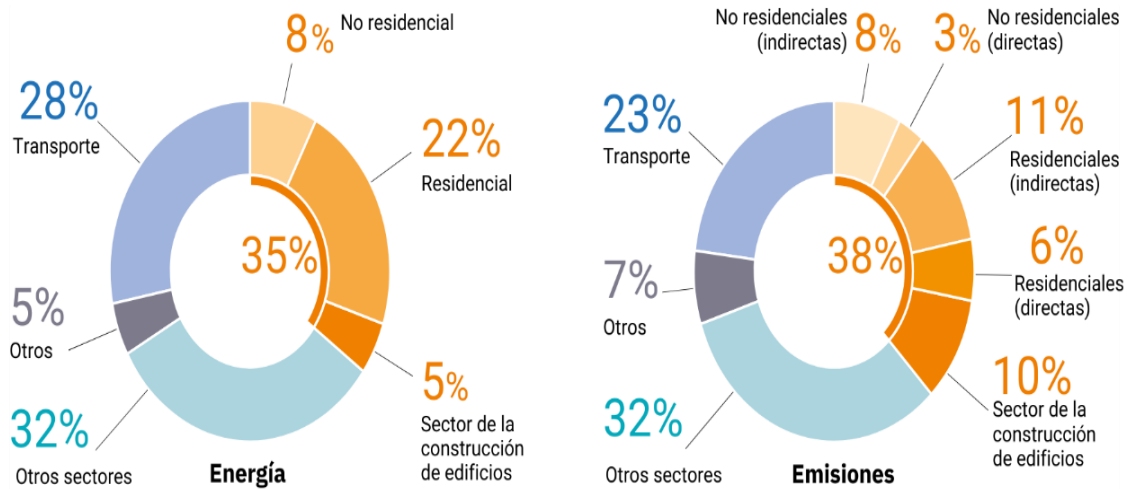
### 2.1.2. El Sector Constructivo y sus aportaciones de CO<sub>2</sub>.

Según estudios de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en México se prevé que para mediados de este siglo se construyan 7 millones de viviendas, las cuales emitirán cerca de 25 millones de toneladas de gases de efecto invernadero, esto debido a los procesos tradicionales de construcción los cuales requieren el uso de combustibles de origen fósil para cubrir su demanda energética (Esperanza, 2018).

En el año 2018 y 2019 el sector de la construcción en su rama de edificación registró emisiones de CO<sub>2</sub> por aproximadamente 10 Gt de CO<sub>2</sub>, lo cual supone el 28% de las emisiones globales concerniente con la energía, si a esto se le suma las emisiones de la industria de la construcción incrementa al 38% del total de las emisiones mundiales (Global Alliance for Buildings and Construction, 2020).

El sector de la construcción contempla a otros sectores como el acero, cemento, madera, vidrio entre otros, por lo tanto, se realiza una estimación de sus emisiones, las emisiones generadas por el sector de energía eléctrica y calor comercial se consideran emisiones indirectas (Linn, 2019).

**FIGURA 2 CONSUMO DE ENERGÍA Y PORCENTAJE DE EMISIONES DEL SECTOR CONSTRUCTIVO A NIVEL MUNDIAL.**



Cuota mundial de energía, sector de los edificios y de la construcción y porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub> del sector constructivo y sectores secundarios 2019. Modificada de (Global Alliance for Buildings and Construction, 2020).

### 2.1.3. Mitigación al cambio climático desde el sector de la construcción.

En la actualidad las emisiones de GEI principalmente el CO<sub>2</sub> se consideran como los principales actores que afectan al cambio climático, siendo los combustibles fósiles sus mayores contribuyentes. El uso de materiales que capturan y secuestran CO<sub>2</sub> se consideran una alternativa para disminuir dicho problema (Chen, y otros, 2016).

Una de las estrategias para la mitigación al cambio climático es la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, por ejemplo, la ONU ha establecido como uno de sus objetivos más ambicioso alcanzar una emisión neta global cero para mediados de este siglo. La ONU ha solicitado a las naciones del mundo que se enfoquen y esfuercen para lograr dicho objetivo, ya que esta reducción de emisiones no corresponde a un sólo país o sector económico, dicho esfuerzo requiere la participación de todos los países y sectores (Quang, Milani, & Zahra, 2023).

En México a partir del año 2013 los actores del sector constructivo deben cumplir con un plan de manejo de RCD conforme a la norma NOM-161-SEMARNAT-2011. La cual se determina que los RCD se clasifican como residuos de manejo especial, con lo que se establece acciones para reutilizar, reciclar o disponer correctamente del residuo (Ossa & García, 2015).

Para la mitigación del cambio climático el sector de la construcción es un actor principal. Con la misión de reducir los GEI entre el 50% a 90% para mediados de este siglo, evitando así el calentamiento global entre 1.5 y 2°C. El sector de la construcción está ampliamente relacionado con la emisión de GEI ya sea en el consumo energético durante la vida del edificio, como la energía incorporada en la extracción y generación de materiales (Fernández, Yurivilca, & Minoja, 2019).

Dentro de las estrategias de mitigación el sector prevé una actitud más sustentable, al generar planes que reduzcan emisiones de carbono, así, constructoras y usuarios finales procuran usar materiales que cumplan con normas que brinden seguridad y comodidad sin dañar el medio ambiente, por ello es importante que este sector cuente con planes ambientales que satisfagan la calidad de vida de los habitantes, sin comprometer recursos (Donato, 2022).

Se han considerado algunas alternativas para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, entre las que mencionamos las siguientes:

- Eficiencia en la producción y consumo de energía.
- Desarrollar y aplicación de fuentes de energías limpias y renovables (Celdas de combustible, celdas solares, energía nuclear, entre otras).
- Implementar programas de reforestación y/o reducción de deforestación, reduciendo con ello la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico.

- Uso y separación de CO<sub>2</sub> para la fabricación de combustibles y otros compuestos químicos.
- Captura y posterior uso y/o confinamiento de CO<sub>2</sub>.

Los primeros dos puntos, son alternativas con fuertes aspectos tecnológicos, económicos y sociales; los puntos restantes son alternativas viables a corto y mediano plazo, mientras se desarrolla y aplican fuentes de energía más amigables (Ortiz-Landeros, Ávalos-Rendón, Gómez-Yañez, & Pfeiffer, 2011).

En general contamos con dos tipos de estrategias cuando hablamos de edificaciones:

- Medidas de mitigación al cambio climático
- Medidas de Adaptación al cambio climático

La mitigación se centra en reducir las emisiones de los GEI o a la captura de los mismos, a través de sumideros de carbono, respecto a la infraestructura la medida se dirige al ahorro de energía, uso de energías renovables, manejo de residuos, etc. (Minoja, Fernández, & Yurivilca, 2018).

Se puede definir, que la adaptación se aboca a reducir la vulnerabilidad, así como los riesgos generados por el CC, para la infraestructura edilicia se concentra en la resiliencia de los edificios (Fernández, Yurivilca, & Minoja, 2019).

Mientras incrementa el uso de materias primas utilizadas en el sector de la construcción y se acelera el agotamiento de recursos naturales, plantas avanzadas de recuperación y reciclaje de residuos tendrán mayor relevancia, capaces de generar materiales de calidad con potencial de sustituir recursos naturales vírgenes, utilizados como materiales de construcción (Peters Quiroga, 2022).

México cuenta desde 2012 con la Ley General de Cambio Climático, en 2018, se crea la figura de Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC), que establece el cumplimiento de objetivos y metas firmados por la Nación, respecto al Acuerdo de París en mitigación y adaptación al Cambio Climático (Cárdenas , Li Ng, & Serrano, 2021).

Durante el año 2019 se registró un aumento del 3% en consumo de energía respecto al 2018. Con el fin de mejorar la eficiencia energética en los edificios, se realizó una inversión de 152,000 mdd, sin embargo, el sector de la edificación y construcción gastó 5.8 billones de dólares en edificación; por cada dólar invertido en eficiencia energética se gastaron 37 en el sector constructivo tradicional. Con esto el sector de la construcción y edificación se alejó del objetivo del Acuerdo de París, que es mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C (Global Alliance for Buildings and Construction, 2020).

Dentro de los países miembros de Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), México es el país que menos aplica impuestos ambientales, sin embargo, es el país de América latina que genera más emisiones, la Agencia Ambiental de energía reportó en el año 2017 que nuestro país ocupa el décimo cuarto lugar en emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo. México pasó de emitir 264 millones de toneladas en 1990 a 416 millones para el año 2010 (Piquero, Colín, & Chinchilla, 2022).

Debido a la creciente preocupación social por el cambio climático y la sostenibilidad, 455 millones de toneladas de residuos de la construcción y demolición fueron transformados en compostas, combustibles y otros, esto es benéfico ya que se reducen costos al disminuir el uso de nuevos materiales, reduciendo el impacto al medio ambiente (POSSEHL, 2022).

Estabilizar el clima requerirá reducciones fuertes, rápidas y sostenidas de emisiones de gases de efecto invernadero y llegar a cero las emisiones netas de CO<sub>2</sub>. Limitar otros GEI y contaminantes atmosféricos, especialmente el metano, podría ser beneficioso tanto para la salud como para el clima (Organización de las Naciones Unidas, 2021).

#### 2.1.4. Economía circular de los RCD.

En Palabras de José Portela, presidente de la asociación AGRECA y Valoriza RCD. Economía Circular es reutilización, es reducción, es minimización de impacto, son bajos costos de proceso... antes incluso que reciclaje. Economía Circular es lo que hace el sector de Valorización de Residuos de Construcción y Demolición, donde el vertido es simbólico, la incineración inexistente y el reciclaje de subproductos obtenidos completo (férticos, plásticos, maderas, etc.) Pero, además, en ese camino, se evita la extracción de áridos naturales, con el consiguiente impacto ambiental y consumo de energía (Canales sectoriales Interempresas, 2017).

Podemos entender a la economía circular como un modelo de producción y consumo, donde los recursos y materiales son indefinidamente reciclados, disminuyendo al máximo los residuos e incrementando la vida de los productos.

Contra poniéndose al modelo tradicional de economía lineal “usar y tirar” siendo una práctica que actualmente no debería ser aplicable, esto debido a que hace mención a una época en la que recursos y fuentes de energía eran de fácil acceso y baratos, además de que se consideraban ilimitados (ANFAPA Asociación de Fabricantes de Morteros y SATE, 2020).

Sin embargo, es importante entender la economía circular de los residuos de la construcción, ya que se trata de un modelo económico que:

1.- Utiliza en menor medida los recursos naturales, así como agua y energía, satisfaciendo las necesidades requeridas.

2.- Seleccionar de forma adecuada los materiales, desestimando los no renovables y las materias primas sobreexplotadas, apoyando el uso de materiales reciclados en la medida de lo posible.

3.- Gestionar eficientemente los recursos utilizados, manteniéndolos y recirculándolos en el sistema económico el mayor tiempo posible y minimizando la generación de residuos.

4.- Disminuir impactos ambientales favoreciendo la resiliencia del capital natural promoviendo su regeneración.

Dicho esto, la economía circular se describe como un modelo económico que facilita incrementar la eficiencia al utilizar los recursos, evitando la dependencia de la importación de materias primas, fuentes de energía y mercancías, incentivando ventajas competitivas a las empresas, creando nuevas actividades y plazas de trabajo de calidad. Con esto se observa un futuro que cuida los recursos naturales globales y crea responsabilidad en la gestión de los mismos.

Considerando los volúmenes de recursos naturales que gestiona el sector constructivo y que este es uno de los sectores claves de la economía, la implementación de este modelo se presenta como una fuente de oportunidad a la que se debe dirigir este sector (Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2018).

Se pretende acciones de reciclado de los desechos de la construcción, aprovechando pedacería de acero que pueda ser usado por las fundidoras, el vidrio, la madera, así como ladrillo, yeso y concreto. El ladrillo y yeso se separan y trituran, se puede aplicar en la base de los pavimentos, el concreto se muele sacando agregados como arena y piedra, así como concreto estructural utilizado en banquetas y firmes de viviendas (Magallanes, 2022).

Asimismo, podemos mencionar algunos de los beneficios asociados a este modelo económico que pueden ser aplicados al sector de la construcción que se desarrollan en la actualidad e incrementarán en el futuro.

Medio Ambiente. En este apartado se puede observar, una reducción en el uso de recursos, así como la disminución de residuos ayudando al medio ambiente evitando un impacto negativo en el mismo.

Sector de la construcción. Este podrá minimizar la necesidad de adquirir materiales vírgenes, reutilizando, optimizando y abaratando los procesos.

Sociedad. Podrá verse beneficiada al mejorar su calidad de vida por la reducción de emisiones que se generan al desarrollar materiales de construcción (S&P, 2020).

## 2.2. Materiales Adsorbentes de CO<sub>2</sub> a partir de residuos.

### 2.2.1. Materiales adsorbentes de CO<sub>2</sub>.

La combustión de distintos materiales pétreos ha incrementado la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, generando un efecto invernadero, bajo esta amenaza se han propuesto soluciones importantes, entre ellas se encuentra la captura, separación y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (Ortiz-Landeros, Ávalos-Rendón, Gómez-Yañez, & Pfeiffer, 2011).

De las tecnologías más ampliamente estudiadas y desarrolladas podemos mencionar los adsorbentes de CO<sub>2</sub> a partir de diversos materiales. México presenta un retraso importante respecto a países que cuentan con mejor tecnología y generan residuos más sustentables. Es importante indicar que se han logrado avances significativos respecto a la gestión y aprovechamiento de residuos, no obstante, aún no se alcanza una situación deseable debido a la gran cantidad de daños ambientales que se han generado en periodos anteriores (Ceñal Ruiz & Korb Reachy, 2015).

En el año 2016 las emisiones de fuentes estacionarias aportaron más del 50% de las emisiones totales, siendo la producción de energía, las cementeras, la refinación de petróleo, el endulzamiento de gases y la siderúrgica quienes emiten cantidades importantes de CO<sub>2</sub> (Bejarano-Peña & Alcántar-Vázquez, 2021).

Por ello la importancia de generar materiales para la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) una tecnología estudiada para mitigar la emisión de GEI sobre todo CO<sub>2</sub>. Los materiales sorbentes de CO<sub>2</sub> se pueden clasificar de acuerdo a la temperatura de adsorción siendo baja, media y alta temperatura. Teniendo mecanismos de adsorción tanto físicos como químicos, este tipo de materiales tienen ventajas por su reactividad cinética, capacidad y estabilidad durante la adsorción y desorción de CO<sub>2</sub> (Tong, y otros, 2022).

Los materiales para la captura de CO<sub>2</sub> pueden contemplar a las zeolitas, hidrotalcitas, óxidos de calcio y cerámicas de litio, estos últimos considerados materiales que actualmente se han desarrollado como sorbentes de alta temperatura, cuya propiedad es la separación directa de CO<sub>2</sub> de gases de combustión. Otros materiales sorbentes sintetizados a partir de CaO atraen mucho la atención debido a su alta

adsorción teórica y bajo costo, por lo cual se han considerándolo un material factible en la captura de CO<sub>2</sub> (Chen, y otros, 2016).

En la actualidad se desarrollan nuevas técnicas de captura de CO<sub>2</sub>. Entre ellas se emplean técnicas como absorción, adsorción, separación por membranas, separación criogénica y proceso biológico para su secuestro. Los sorbentes como zeolitas, óxidos de magnesio, óxidos de calcio y óxidos a base de litio se estudian para la captura directa de CO<sub>2</sub> (Nair & Raghavan, 2021).

**FIGURA 3 EJEMPLO DE FUENTES, CAPTURA DE CO<sub>2</sub> Y APLICACIÓN DE Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>**

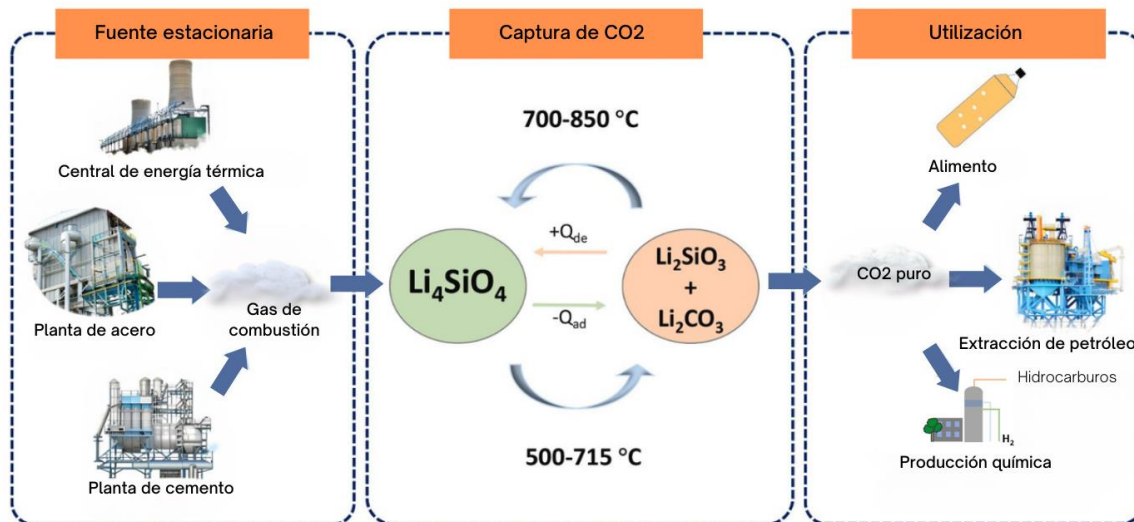


Imagen tomada y modificada de (Tong, y otros, 2022).

Es en Japón (Kioto), un 11 de diciembre de 1997 que, los gobiernos de las distintas naciones, acuerdan reducir sus emisiones de GEI en un mínimo de 5% respecto a los niveles de CO<sub>2</sub> comprendidos entre 2008 y 2012. Ante dicha situación es en 1998, Nakagawa y Ohashi desarrollan un método de captura de CO<sub>2</sub>, mediante el empleo de metazirconato de litio (Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>), a partir de esta investigación se han desarrollado otros materiales que capturan CO<sub>2</sub>, entre ellos el Li<sub>6</sub>ZrO<sub>7</sub>, Li<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> y Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, este último,

presentó mejores cualidades absorbentes con hasta 50% más de CO<sub>2</sub> que los demás materiales (Mejia Trejo, 2008).

El litio que se contiene en cerámicas ha llamado la atención para captura de CO<sub>2</sub>, entre dichos materiales que incluyen silicatos de litio podemos mencionar los siguientes:

- Circonatos de litio (Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>, Li<sub>6</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, y Li<sub>8</sub>ZrO<sub>6</sub>)
- Silicatos de Litio (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> y Li<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)
- Titanatos de litio (Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>)
- Aluminatos de litio (Li<sub>5</sub>AlO<sub>4</sub>)
- Ferritas de litio (LiFeO<sub>2</sub>, Li<sub>5</sub>FeO<sub>4</sub>)
- Cupratos de litio (Li<sub>2</sub>CuO<sub>2</sub>)
- Bismutato de litio
- Boratos de litio y
- Galatos de litio (Li<sub>5</sub>GaO<sub>4</sub>)

Todas las cerámicas mencionadas adsorben CO<sub>2</sub> en diferente grado y a diferente temperatura de adsorción y aunque todas presentan buena adsorción de CO<sub>2</sub>, su rendimiento cíclico es muy pobre a excepción del Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> que muestra buena estabilidad cíclica y una cinética más rápida de adsorción de CO<sub>2</sub> (Nair & Raghavan, 2021).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> generado por centrales eléctricas, industrias metalúrgicas, cementeras entre otras pueden ser capturadas posterior a la combustión lo cual proporciona un enfoque a corto plazo para mitigar sus concentraciones, en el proceso de postcombustión los sorbentes sólidos de altas temperaturas (450-700°C) son más eficientes y rentables que materiales a base de aminas de baja temperatura como la separación directa de CO<sub>2</sub> de gases de escape a altas temperaturas ahorrando cantidades importantes de energía (Alcántar-Vázquez & Ramírez-Zamora, 2020).

En general se han documentado una amplia variedad de silicatos de litio con distintas proporciones de  $\text{Li}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  para la captura de  $\text{CO}_2$ , como son  $\text{Li}_8\text{SiO}_6$ ,  $\text{Li}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  y  $\text{Li}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ , también se documentaron cerámicas alcalinas como  $\text{LiFeO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{CuO}_2$ ,  $\text{LiTiO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{LiAlO}_2$ ,  $\text{Li}_5\text{AlO}_4$  y  $\text{Na}_3\text{SbO}_4$ . No obstante los procesos de preparación o reacción química de estos materiales son altamente complejos en comparación con los de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  y no presentan mejores propiedades generales (Yang, y otros, 2016).

Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (**IUPAC**), **adsorción** ha sido definido como el enriquecimiento de uno o más componentes en la región comprometida entre el volumen de dos fases; es decir, una interface que por lo general es sólido-líquido o sólido-gas, sin embargo, si el sistema implica la penetración del fluido en el volumen del sólido el término a aplicado debe ser **absorción**. Por lo tanto, adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un sistema de volumen (Ortiz-Landeros, Ávalos-Rendón, Gómez-Yañez, & Pfeiffer, 2011).

Términos que igual son importantes considerar son la adsorción física o **fisisorción** y la adsorción química o **quimisorción**; el primero hace referencia a la adsorción que no involucra enlaces químicos, o que se debe a fuerzas atractivas débiles, mientras tanto, la quimisorción involucra enlaces químicos o reacciones que dan lugar a la formación de un compuesto distinto sobre la superficie del adsorbente (Ortiz-Landeros, Ávalos-Rendón, Gómez-Yañez, & Pfeiffer, 2011).

Podemos decir que un sistema de adsorción es aquel por el cual átomos o moléculas de una sustancia en determinada fase, son retenidas en la superficie de otra sustancia, que regularmente se encuentra en fase sólida (González Plaza, 2009).

Es de suma importancia para el desarrollo de este tema, tener una conceptualización más clara de dos palabras que en su pronunciación suena muy similar, nos referimos en este sentido a las palabras de adsorción y absorción.

La absorción consiste en la transferencia selectiva de los compuestos orgánicos volátiles en una corriente gaseosa a una corriente líquida. La absorción puede ser química o física. La primera involucra la reacción entre el compuesto orgánico volátil y el solvente, mientras que la absorción física sólo implica la disolución del compuesto.

La adsorción misma es un fenómeno en donde las moléculas de gas que pasan a través de un lecho de partículas sólidas son selectivamente retenidas por fuerzas de atracción, las cuales son más débiles y menos específicas que las de las uniones químicas. Durante la adsorción, una molécula de gas emigra desde la corriente de gas hacia la superficie del sólido donde es retenida por atracción física, liberando energía el “calor de adsorción”. La capacidad de adsorción del sólido tiende a incrementarse con la concentración de la fase gas, el peso molecular, la difusividad, la polaridad y el punto de ebullición. La mayoría de los gases (“adsorbatos”) pueden ser removidos (“desorbidos”) del adsorbente calentando hasta una temperatura suficientemente alta, reduciendo la presión a un valor suficientemente bajo (desorción por vacío). Los adsorbentes utilizados en gran escala incluyen al carbón activado, sílica gel, alúmina activada, zeolitas sintéticas, tierra de fuller y otras arcillas. La más importante característica de los adsorbentes sólidos son sus grandes superficies, volumen y su afinidad para

componentes individuales. Algunos de estos adsorbentes, así como sus usos se muestran en la siguiente Tabla (Romero Cano, 2018).

En la Tabla 12, se presentan diversos materiales de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  en las cuales se observan distintas temperaturas de adsorción, diferentes condiciones en volumen de  $\text{CO}_2$ , así como su estabilidad cíclica de adsorción/desorción.

**TABLA 12.  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  PREPARADO CON FUENTES ALTERNAS DE RESIDUOS**

| Material   | Condiciones de adsorción     | Condiciones del gas                  | Capacidad de adsorción   |
|--|------------------------------|--------------------------------------|--|
| Cenizas volantes (filtro ciclónico)  | 600°C por 1h<br>600°C por 2h | 95 ml/min en 100% vol. $\text{CO}_2$ | 38 y 44 Después de 10 ciclos   |
| Vermiculita (provincia de china)   | 650°C por 30 min             | 100% vol. $\text{CO}_2$              | 187 después de 20 ciclos   |
| Cenizas volantes (central eléctrica de Estonia)                                | 600°C por 2h                 | 50 ml/min en 92% vol. $\text{CO}_2$  | 73 (con $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ).<br>113 (con $\text{LiOH}$ )  |
| Cenizas volantes (central eléctrica de carbón)                                 | 600°C por 25 min             | 100 ml/min en 100 vol. $\text{CO}_2$ | 275 después de 10 ciclos   |
| Escorias metalúrgicas de acero y hierro (alto horno y horno de arco eléctrico) | 580°C - 700°C por 3h         | 60 ml/min en 20% vol. $\text{CO}_2$  | Acero: 115.8 ( $P_{\text{CO}_2}=0.2$ bar) y 99.7 ( $P_{\text{CO}_2}=0.05$ bar)<br>Hierro: 130.8 ( $P_{\text{CO}_2}=0.2$ bar) y 115.8 ( $P_{\text{CO}_2}=0.05$ bar) |

Tabla tomada y modificada de (Hernández Tapia, 2022).

### 2.2.2. Una alternativa para el uso de residuos

De las principales limitantes de los materiales de captura de  $\text{CO}_2$  es el alto costo de las materias primas, por lo cual se han iniciado estudios con residuos, como cascarilla de arroz, cenizas volátiles y escorias metalúrgicas, los resultados de adsorción de estos materiales dependerá de la ruta de síntesis. Se han implementado escorias metalúrgicas en medios acuosos para la captura de  $\text{CO}_2$ , así como en corrientes gaseosa con una

concentración específica de CO<sub>2</sub>, dichas escorias se han aplicado de forma indirecta sintetizando cerámicas como materiales adsorbentes, esto debido a su alto contenido de sílice (Si) (7-50% en peso) (Bejarano-Peña & Alcántar-Vázquez, 2021).

Una de las alternativas más prometedoras son las escorias de horno de arco eléctrico (EAFS) las cuales no han sido utilizadas como materia prima para producir cerámicas de litio (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) esto a pesar de tener como componente principal óxidos de ácido como son el sílice, alúmina y óxidos de hierro; óxidos básicos como cal, magnesia y álcalis, los cuales otorgan características deseadas para la síntesis cerámicas de litio con potencial de captura de CO<sub>2</sub> (Bejarano-Peña & Alcántar-Vázquez, 2021).

Otra alternativa importante a mencionar, son los residuos de los sectores agrícolas y forestales, debido a que se producen en grandes cantidades, es amplia su distribución y tiene bajos costos, dichos residuos presentan SiO<sub>2</sub> amorfo, regularmente con alto contenido de silicio, importante para sintetizar Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> como sorbentes, para este tipo de residuos es de suma importancia pretratar las fuentes de silicio a partir de agua/ácido pero su desventaja es que se requiere de cantidades importantes de reactivo líquido, sin embargo esta cantidad de reactivo puede disminuir en una medida importante al utilizar residuos calcinados (cenizas de residuos) (Zenix, y otros, 2021).

Como hemos mencionado las emisiones proceden de distintas actividades, pueden ser: quema de combustibles para generar energía, sector industrial, actividades agropecuarias y deforestación, el CO<sub>2</sub> puede ser adsorbido de la atmósfera por árboles y plantas, así como técnicas industriales de remoción de dióxido de carbono (van den Bos, 2023).

Los materiales que tiene como base al litio han atraído un gran interés, ello a causa de su alta capacidad de captura de CO<sub>2</sub>, selectividad, cinética rápida y buenas propiedades de regeneración, Los cerámicos a base de Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> muestran una adecuada reactividad, estabilidad térmica durante varios ciclos de adsorción/desorción, así como una rápida tasa de adsorción de CO<sub>2</sub> en una amplia variedad de temperaturas y concentraciones de CO<sub>2</sub> (Alcántar-Vázquez & Ramírez-Zamora, 2020).

### 2.2.3. Ortosilicato de litio (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>)

Los materiales cerámicos con litio son capaces de adsorber CO<sub>2</sub> a alta temperatura, debido a su alta eficiencia en la captura de CO<sub>2</sub>, regeneración a baja temperatura y una alta estabilidad (Zhang, y otros, 2019). El ortosilicato de litio tiene una capacidad de adsorción en un rango de temperatura entre 450-700°C, con un valor teórico de 36.7% en peso, es un material conveniente para la captura de CO<sub>2</sub> a altas temperaturas, este reacciona por atribución del Li<sub>2</sub>O que se encuentra en la estructura cristalina del Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> el cual reacciona reversiblemente con el CO<sub>2</sub>. Dentro de las ventajas de este material se puede comentar los siguiente:

- Captura relativamente alta (valor teórico de 36.7% en peso) 450-700°C.
- Cinética rápida de carbonatación/descarbonatación
- Buenas propiedades mecánicas
- Uso de ciclos repetidos de carbonatación/descarbonatación (Suélen M. Amorim, 2016).

Es a principios de siglo XXI que se propone al Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> como adsorbente de CO<sub>2</sub>, por lo cual se desarrollan múltiples investigaciones que permitan establecer mejores procesos de síntesis, aumentar su capacidad de captura, estabilidad cíclica, reducir costos y mejorar posibles aplicaciones (Tong, y otros, 2022).

Los ortosilicatos de litio son los que presentan mejores propiedades en la captura de CO<sub>2</sub> obteniendo buena cinética como eficiencia, los estudios realizados sobre el Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> dio como resultado un material con una mejor capacidad de absorción, con un incremento 50% mayor que el Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> y 30 veces más rápido, esto representa una mayor captura de CO<sub>2</sub> por parte del Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> lo cual determina una mayor capacidad de adsorción teórica, tiene un valor de 36.7% que representa una ventaja frente a 28.7% que presenta el Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> (Mejía Trejo, 2008).

Descrito lo anterior podemos decir que el Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> se debe considerar como mejor opción, en comparación al Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> para la captura de CO<sub>2</sub> debido a que presenta mayor capacidad de absorción, mayor estabilidad en sus propiedades cíclicas, mayor velocidad de reacción y menores costos en sus precursores químicos (Yang, y otros, 2016).

## 2.3. Objetivos

### 2.3.1. Objetivo general

Reutilizar residuos de construcción y demolición como materia prima para la elaboración de un material adsorbente de CO<sub>2</sub> eficiente.

### 2.3.2. Objetivos específicos

- Acondicionar el RCD mediante la molienda y tamizado.
- Caracterizar los RCD mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y adsorción-desorción de N<sub>2</sub> y microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Sintetizar el material adsorbente Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> mediante el método de impregnación por precipitación, utilizando como fuente de sílice los RCD.
- Estimar la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> y regeneración del material adsorbente Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> preparado con RCD mediante análisis termogravimétrico.

## Capítulo III.- Metodología Experimental

### 3.1. Acondicionamiento y caracterización de los RCD.

#### 3.1.1. Molienda y tamizado del material.

Para la síntesis del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  se utilizó material procedente de obras civiles de las distintas zonas de la CDMX los cuales son almacenadas como residuo del sector de la construcción en las bodegas de materiales del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ubicada en Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

Los RCD se acondicionaron a partir del proceso de molienda o fresado por bolas, método ampliamente utilizado para la síntesis de nanomateriales debido a su practicidad. Los materiales se preparan por desgaste mecánico, durante la molienda existe una colisión de alta energía entre las bolas y la muestra, así la partícula se reduce considerablemente y se obtiene una disminución de tamaño lo que conlleva un incremento en el área de superficie. Se utilizó un molino de bolas de rodillo TENCAN con velocidad de 50 a 570 rpm.

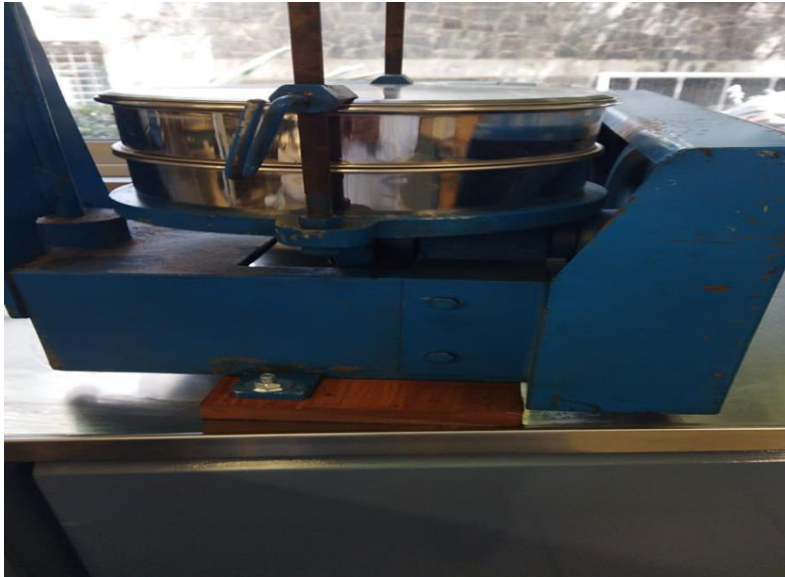
## IMAGEN 1 MOLINO DE BOLAS TECAN



Molino de bolas TECAN, utilizado para moler el material de RCD

Después de realizar la molienda, se inicia el proceso de tamizado, este es un proceso mecánico físico, en el cual partículas sólidas de distintos tamaños son separadas al pasar a través de la malla que contiene el tamiz. El tamiz es una herramienta que posee una malla con poros del mismo tamaño a lo largo de su superficie, por lo tanto, las partículas más grandes que el poro de la malla del tamiz permanecen sobre la superficie de esta, mientras que las partículas que son más pequeñas que los poros pasan libremente por la malla, con apoyo de un equipo mecánico de tamizado, facilitando la separación del material proveniente de residuos del sector de la construcción y la demolición, el tamaño de malla se consideró tomando en cuenta las propiedades para realizar la síntesis del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ , de RCD, se tamizó hasta obtener un polvo fino con un tamaño de malla de  $325 \mu\text{m}$ . Una vez realizado todo el proceso las muestras fueron enviadas para determinar su caracterización físico-química y otra para la síntesis del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  mediante el método de impregnación por precipitación.

## IMAGEN 2 TAMIZADOR AUTOMÁTICO



Tamizador automático

### 3.1.2. Composición química: Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

La composición química del RCD se determinó mediante FRX con un equipo Rigaku Primus II, utilizando una muestra prensada. La técnica de FRX, es una técnica atómica analítica bien desarrollada para el análisis químico cuantitativo y cualitativo, el cual permite determinar la composición de elementos mayoritarios y traza presentes en un material. Es una prueba que tiene carácter multifuncional, con resultados en corto tiempo y de bajo costo. Esta técnica tiene como ventajas la obtención de resultados rápidos, no destructivos y con la capacidad de reconocer una gran variedad de elementos, así como su alta sensibilidad en rango  $10^{-8}$  g y esto dependerá de los elementos de interés, es una prueba utilizada en una amplia variedad de investigaciones. El avance tecnológico y la mejora en el desarrollo metodológico en FRX en los últimos

tiempos, ha permitido el análisis de elementos en materiales de cualquier tipo ya sean de origen natural o sintetizados por el hombre (Marguí, Queralt, & de Almeida, 2022).

- Las muestras en polvo, fueron secadas a 110°C por 2 horas previo a ser analizadas.
- Las pruebas se analizaron en polvo comprimido.
- La pérdida por calcinación se determinó con 1g de polvo de muestra molido y en base seca, calcinado a 1000°C por una hora, posteriormente determinando la pérdida de masa en porciento.

### 3.1.3. Fases cristalinas: Difracción de Rayos X (DRX).

Para el análisis de fases cristalina presentes en los RCD se realizaron difractogramas los cuales se obtuvieron en un difractómetro EMPYREAN el cual está equipado con un filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D.

Para el desarrollo del análisis de esta técnica las muestras fueron trituradas para su posterior homogenización mediante un mortero de ágata y se tamizaron en una malla de 200 (<45 micras), para posteriormente ser medidas, utilizando un portamuestras de aluminio (fracciones no orientadas) dicha medición se realizó en el intervalo angular de  $2\theta$  de 4 a 80° en escaneo por pasos con un “*step scan*” de 0.003° (2Theta) en un tiempo de integración de 40 segundos por paso.

Las pruebas de análisis por DRX), están ampliamente desarrolladas para materiales de tipo cristalino y cerámicas. La DRX funciona según el principio de la ley de Bragg que establece que un incidente de rayos X en una superficie cristalina con un ángulo de  $\theta$  se dispersará en el mismo ángulo,  $\theta$ . La onda dispersa es sensible al espaciado de la red entre los átomos en la fibra y puede estar en fase o fuera de fase, lo

que resulta en un patrón de difracción o ningún patrón que se forma en el detector. De esta manera, las posiciones y formas de los picos se pueden utilizar para obtener información sobre la estructura reticular y la respuesta micromecánica de los materiales (Srisuriyachot et al., 2022).

La cuantificación de las fases cristalinas del material se realizó utilizando el método de RIR (Relación de Intensidades Relativa) implementado en el software HIGHScore v4.5 y la base de datos del ICDD (International Center for Diffraction DATA) y ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

### 3.2. Síntesis del ortosilicato de litio ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ).

#### 3.2.1. Método de impregnación por precipitación.

El  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  fue sintetizado a partir de RCD, como fuente de sílice utilizando el método llamado impregnación por precipitación. Este método consiste en los siguientes pasos: (i) Disolución; en el que los precursores de los componentes activos, a menudo en sus formas de sal (el nitrato es la sal preferida sobre el cloruro o el sulfato) se disuelven primero en agua o en un medio adecuado para formar una solución homogénea. (ii) Precipitación; en el que la solución se somete a ajuste de pH o evaporación para forzar la precipitación de esas sales; durante esta precipitación, las sales pueden hidrolizarse en formas de hidróxido u óxidos, por lo que este paso puede denominarse proceso hidrotermal. (iii) Filtración y secado, en el que luego se recoge la masa sólida y se seca gradualmente hasta aproximadamente el punto de ebullición del medio. La masa seca obtenida se encuentra en estado suelto con forma irregular; por lo tanto, esta masa se muele primero en forma de polvo. Se puede agregar un aglutinante para ayudar a mantener unido el material; el aglutinante se elige de modo que se elimine

en vapor volátil y dióxido de carbono durante la calcinación o activación. (iv) Calcinación se lleva a cabo para convertir la forma de sal o hidróxido de los componentes activos en óxidos al reaccionar con el aire a la temperatura adecuada, por ejemplo, el acetato, el carbonato o el nitrato se descomponen en óxido (Deraz, 2018).

Para la preparación del adsorbente de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ , fue necesario agregar una cantidad adecuada de LiAc (Acetato de litio) la cual nos permite realizar la relación molar de Li/Si de 4.1:1. La reacción molar del Li se estableció con un exceso 0.1mol para compensar la volatilización a alta temperatura. El acetato de litio (4.5156 g,  $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2 \text{Li}_2 \text{H}_2\text{O}$ ,  $\geq 99.0\%$  Sinopharm) se disolvió por completo en 100ml de agua desionizada en un vaso de precipitado a temperatura ambiente, seguido de la adición del RCD. La mezcla en suspensión obtenida se calentó y agitó continuamente a través de una parrilla de agitación con calentamiento utilizando un agitador magnético, hasta que se completó la evaporación del agua.

El material obtenido se coloca en estufa de secado durante 20 horas, para eliminar la posible humedad resultante del proceso anterior, al salir el material los polvos secos se cargaron en un crisol de porcelana y se calentaron en un horno mufla a una velocidad de rampa de  $5^\circ\text{C min}^{-1}$  hasta alcanzar  $750^\circ\text{C}$  durante 2 horas en aire. Después de enfriar las muestras calcinadas, se molieron con un mortero de ágata hasta homogeneizar el material. El procedimiento se repitió utilizando  $\text{SiO}_2$  grado reactivo con fines de comparación.

IMAGEN 3. SÍNTESIS DE  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  CON REACTIVOS PUROS

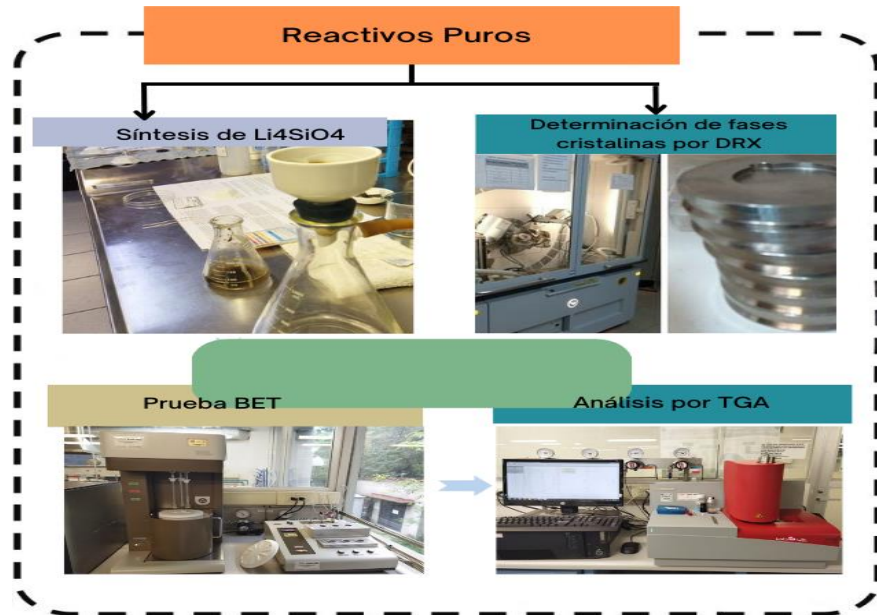
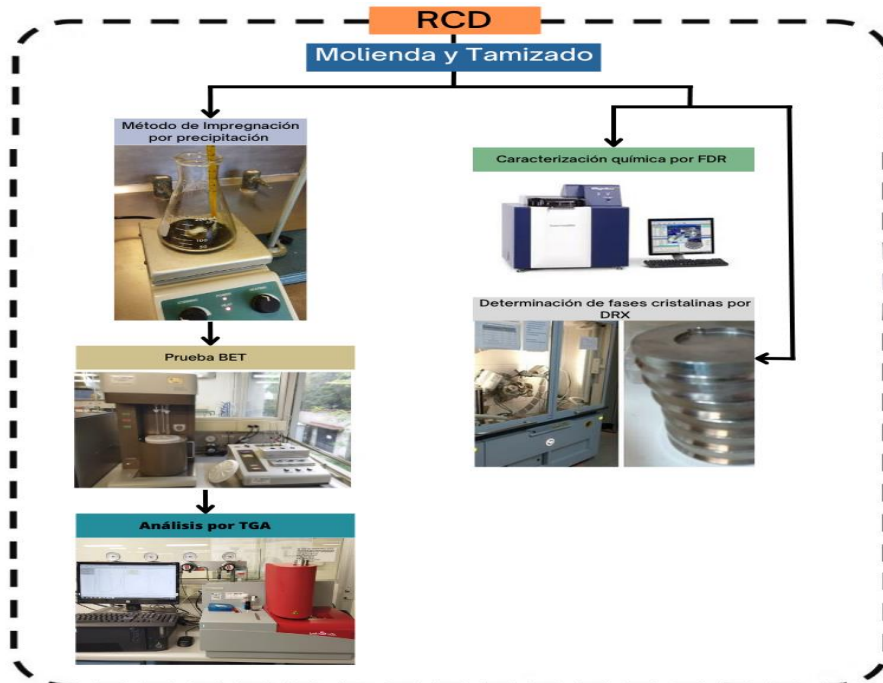


IMAGEN 4. SÍNTESIS DE  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  CON RCD



Imágenes 3 y 4. Representan la síntesis del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  a partir de reactivos puros y RCD y su caracterización.

### 3.2.2. Caracterización del $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ .

Los silicatos de litio obtenidos utilizando RCD como fuente de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  grado reactivo fueron caracterizados por DRX para confirmar la presencia de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  e identificar las fases secundarias formadas. Además, se determinó el área superficial específica utilizando mediante adsorción-desorción de  $\text{N}_2$  utilizando el método BET, las muestras fueron pretratadas en flujo de  $\text{N}_2$  durante 12 horas. Se utilizó el equipo Belsorp mini de Bel Japan. Finalmente, la morfología se observó por mediante MEB.

## 3.3 Evaluación de la capacidad de adsorción de $\text{CO}_2$ .

### 3.3.1 Experimentos dinámicos e isotérmicos de adsorción: Análisis termogravimétricos (ATG).

Es a través de distintas pruebas experimentales de adsorción/desorción de  $\text{CO}_2$  realizadas por ATG que se permitió evaluar la captura y la regeneración del adsorbente sintetizado durante 10 ciclos repetitivos de adsorción/desorción para los materiales sintetizados a partir de reactivos puros y de 30 ciclos repetitivos de adsorción/desorción para el material sintetizado a partir de RCD como fuente de sílice.

Esta técnica proporciona información sobre la estabilidad térmica, composición, residuos, volátiles, cinética de descomposición, etc. Evalúa de forma cuantitativa la adsorción de gases por sólidos, sobre todo a temperaturas altas, por ello el ATG es sumamente utilizado para caracterizar los adsorbentes de  $\text{CO}_2$  y evaluar capacidades de adsorción.

Se realizaron diferentes análisis térmicos en un equipo termogravimétrico de alta resolución LabSys evo SETARAM Instrumentation KEP Technologies. El conjunto de muestras fue tratado en experimentos dinámicos desde una temperatura ambiente hasta

los 800°C con una rampa de calentamiento de 10°C/min, utilizando un flujo de CO<sub>2</sub> con una presión parcial de 0.2. Se realizaron pruebas isotérmicas a una atmósfera de CO<sub>2</sub> de 0.2 a las siguientes temperaturas 300°C, 400°C, 500°C, 550°C, 580°C y 600°C durante 4 horas por muestra, los materiales analizados fueron los siguientes:

Ortosilicato de litio (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) con reactivos puros.

Ortosilicato de litio (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) con RCD

Una vez identificada la mejor temperatura de adsorción de CO<sub>2</sub> para cada material, se realizaron experimentos isotérmicos variando las presiones parciales de CO<sub>2</sub> de 0.5, 0.10, 0.15 y 0.20.

**FIGURA 4 CURVA ISOTÉRMICA TÍPICA DE ADSORCIÓN/DESORCIÓN DE CO<sub>2</sub>**

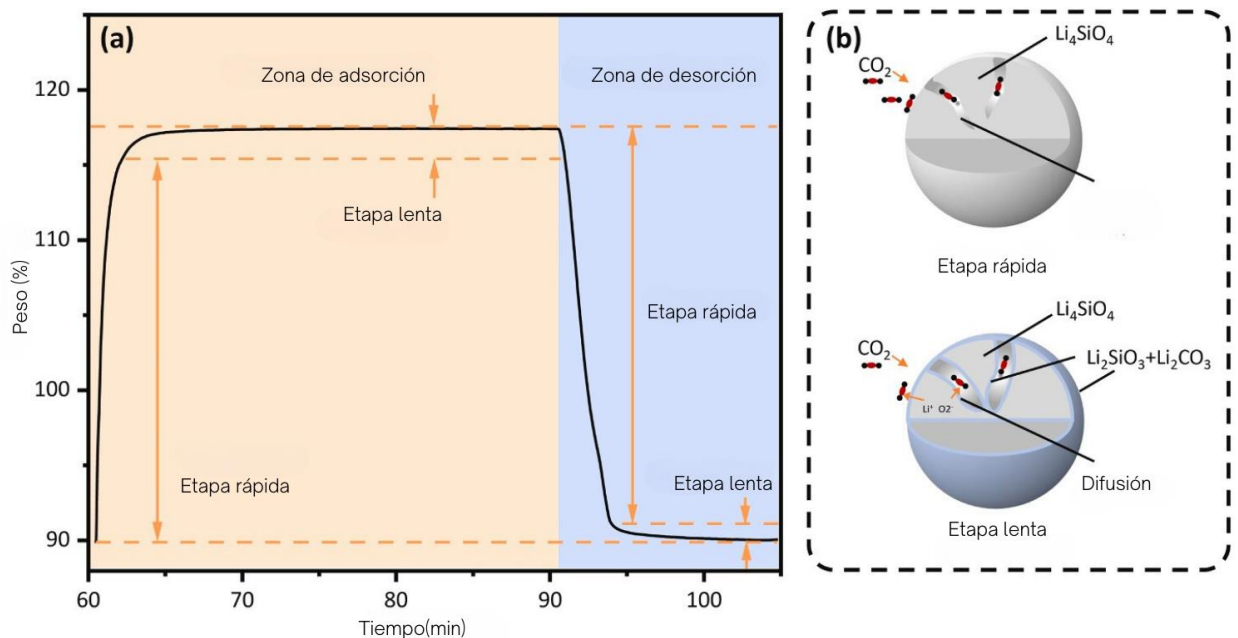


Imagen tomada y modificada de (Tong, y otros, 2022)

Finalmente, todas las muestras fueron tratadas con N<sub>2</sub> al vacío durante 12 horas, para analizar las muestras en un equipo de fisisorción y calcular el área superficial con el método de BET.

### 3.3.2. Identificación de las condiciones de regeneración del adsorbente.

Una vez realizadas las pruebas isotérmicas con ATG a los materiales de Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizados a partir de reactivos puros y RCD a las diferentes temperaturas, se determinó que el mejor comportamiento del material se presentó a la temperatura de 580°C ya que ésta presenta mejor velocidad de adsorción y una mayor captura de CO<sub>2</sub>. Por lo que se evaluó la desorción de CO<sub>2</sub> en flujo de N<sub>2</sub> a esta temperatura y temperaturas un poco superiores (100 °C mayor).

## Capítulo IV.- Resultados.

### 4.1. Caracterización del RCD y $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ sintetizado con RCD.

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de RCD y  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos puros. El análisis químico, la estabilidad térmica y capacidad de captura de  $\text{CO}_2$  son pruebas que se aplicaron en los materiales sintetizados con reactivos puros y RCD.

Con el objeto de caracterizar los materiales de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizados a partir de reactivos puros y RCD, se aplicaron las técnicas, Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX) y Adsorción de  $\text{N}_2$  (método BET).

#### 4.1.1 Caracterización química.

El análisis elemental de los materiales sintetizados se obtuvo mediante FRX. Los difractogramas se obtuvieron en un difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector de PIXcel3D.

Donde las muestras son trituradas para posteriormente ser homogenizadas mediante mortero de ágata y se tamizaron a malla 200 (45micras). Se midieron utilizando un porta muestras de aluminio (fracciones no orientadas). La medición se realizó en un intervalo angular  $2\theta$  de  $4^\circ$  a  $80^\circ$  en escaneo por pasos con un “step scan” de  $0.003^\circ$  (2 Theta) y un tiempo de integración de 40s por paso. La tabla 13 muestra los porcentajes de la composición química de los RCD. Donde el óxido de silicio  $\text{SiO}_2$  representa el 49.28%, siendo este el compuesto con mayor presencia dentro del RCD, en la misma prueba se pudieron determinar la presencia de otros óxidos en distintas proporciones, por mencionar al óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con 14.1%, al óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) con un

13.1%, el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) con porcentajes menores a 3% encontramos al óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), al óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), óxido de titanio ( $\text{Ti}_2\text{O}$ ), óxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ).

**TABLA 13 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL RCD OBTENIDA POR FRX**

| Compuesto | $\text{SiO}_2$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MnO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{CaO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{SO}_3$ |
|-----------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|------------------------|---------------|
| % Masa    | 49.28          | 1.30           | 14.10                   | 8.46                    | 0.14         | 2.26         | 13.12        | 2.2                   | 1.54                 | 0.53                   | 0.37          |

Componentes mayoritarios y resultados obtenidos por FRX.

En la tabla 14 se muestra la presencia de la composición de elementos traza, destacando: Estroncio (Sr), Bario (Ba) y Vanadio (V), con mayor presencia, y el Cromo (Cr), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Galio (Ga), Rubidio (Rb), Itrio (Y), Zirconio (Zr), Niobio (Nb), y Arsénico (As); en concentraciones menores en partes por millón (ppm). Es importante comentar que conforme al método analítico y equipo utilizado los errores estimados en las determinaciones están por debajo del 1% en elementos mayoritarios e inferiores a 4% en elementos traza.

**TABLA 14 COMPOSICIÓN ELEMENTAL DEL RCD OBTENIDA POR FRX: ELEMENTOS TRAZA**

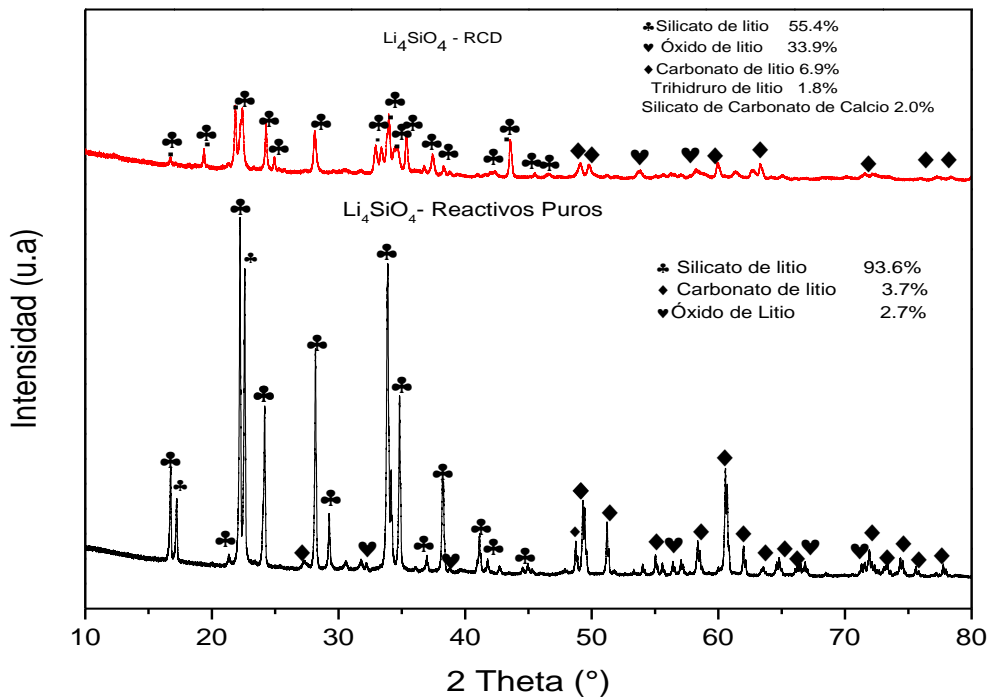
| Elemento | V   | Cr  | Ni  | Cu | Zn  | Ga | Rb | Sr  | Y  | Zr | Nb | Ba  | As |
|----------|-----|-----|-----|----|-----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|
| Ppm      | 183 | 412 | 164 | 35 | 127 | 21 | 46 | 688 | 32 | 34 | 24 | 604 | 19 |

En todas las determinaciones las curvas de calibración han sido desarrolladas con estándares emitidos por instituciones con reconocimiento internacional.

#### 4.1.2. Caracterización por Difracción de Rayos X (DRX).

En la gráfica 1 se presenta el Difractograma de rayos X de las muestras de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos puros y en el material de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  con RCD, donde se pueden observar picos de difracción correspondientes a fases amorfas y cristalinas presentes en el material. El Difractograma en color rojo representa al  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de RCD, mientras que el Difractograma en negro representa el  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos puros.

GRÁFICA 1. DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X REACTIVOS PUROS Y RCD.



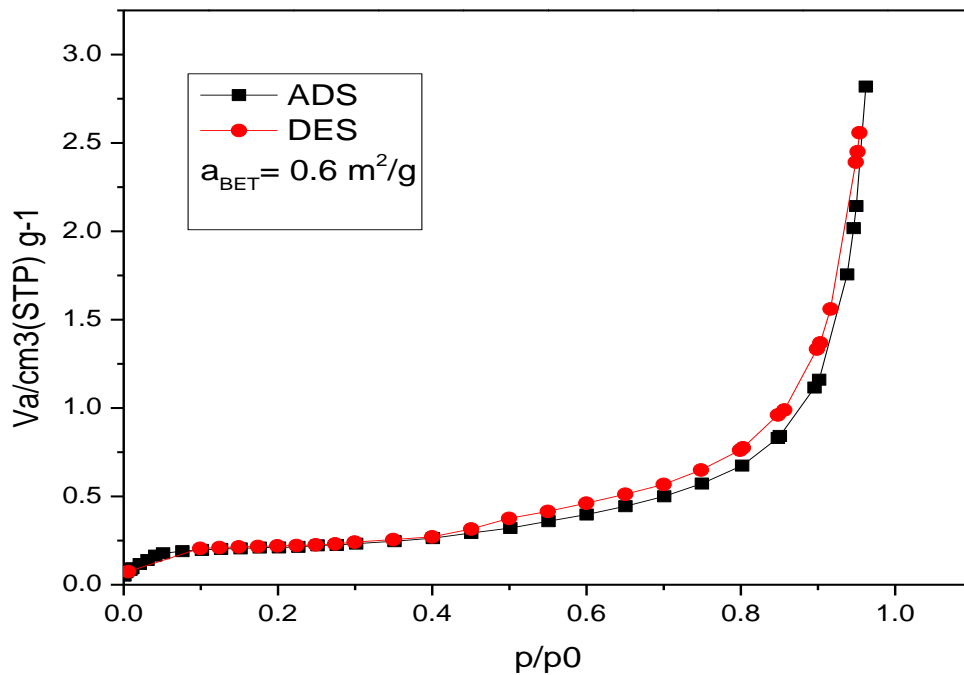
Se comprobó la presencia de silicato de litio, con un 93.6% y 55.4% para los reactivos puros y RCD, respectivamente.

También se muestra la presencia de carbonato de litio con 3.7% y 6.9% y óxido de litio 2.7% y 33.9% para los reactivos puros y los RCD, respectivamente. De forma similar se

observa también la presencia de otros compuestos de litio con mayores porcentajes en los RCD que en los reactivos puros, como los son: óxido de litio y carbonato de litio, indispensables para la síntesis de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  a partir de RCD para la captura de  $\text{CO}_2$ .

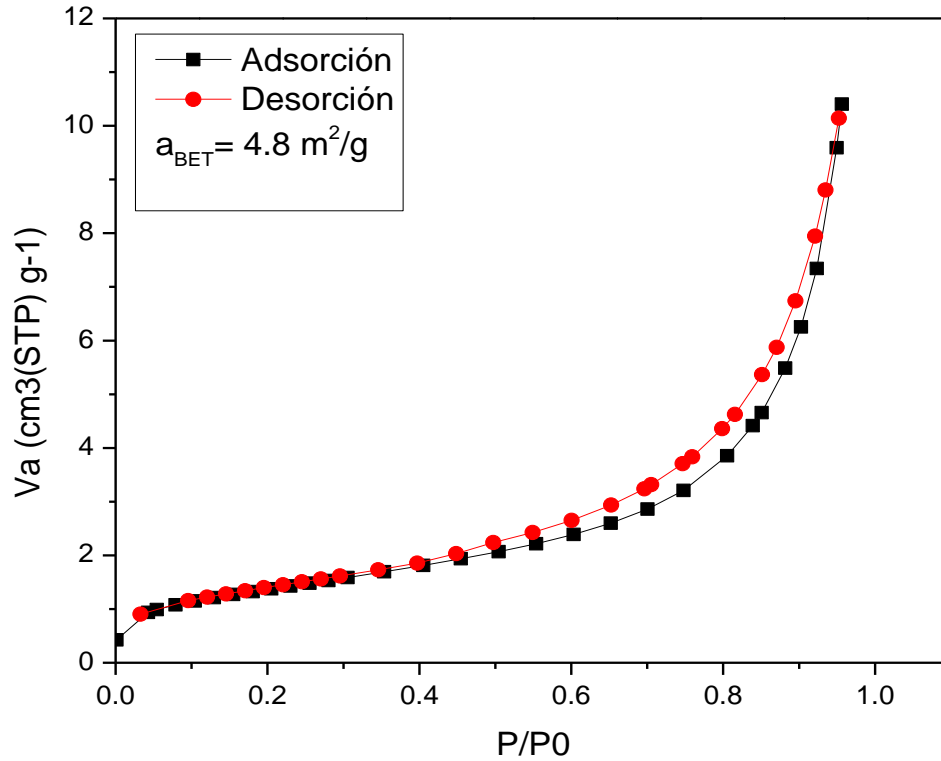
#### 4.1.3 Análisis de adsorción/desorción, prueba de BET.

GRÁFICA 2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN/DESORCIÓN DE  $\text{N}_2$  PARA  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  SINTETIZADO A PARTIR DE REACTIVOS PUROS.



En la gráfica 2, se presenta la isoterma de adsorción-desorción de  $\text{N}_2$  del material sintetizado que se obtuvo a partir de reactivos puros. El área superficial del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizada a partir de RCD que fue de  $0.6 \text{ m}^2/\text{g}$ .

GRÁFICA 3. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN/DESORCIÓN DE N<sub>2</sub> PARA Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> SINTETIZADO A PARTIR DE RCD (PRUEBA DE BET)



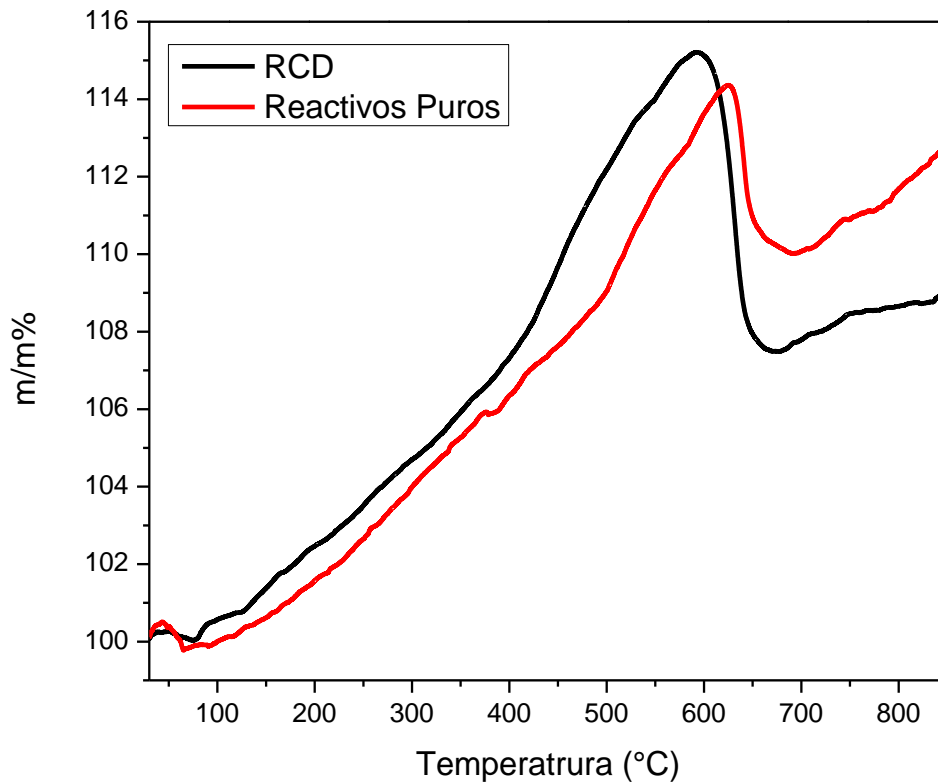
En la gráfica 3, se presenta la isoterma de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> del material sintetizado que se obtuvo a partir de residuos de construcción y demolición. El área superficial del Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizada a partir de RCD que fue de 4.8 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>,

En suma, la técnica de prueba de BET permite determinar la cantidad de material necesarios para tener una captura de CO<sub>2</sub>.

## 4.2. Análisis termogravimétricos dinámicos e isotérmicos (ATG).

Dentro de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales de análisis termogravimétrico dinámico para el  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos puros y  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de RCD realizadas desde T ambiente hasta  $850^\circ\text{C}$ , para observar el intervalo de temperatura adecuada la adsorción/desorción de  $\text{CO}_2$ . Como se muestra en la gráfica 4, se observa que el intervalo de temperatura de captura esta entre los rangos de  $300^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$ .

GRÁFICA 4. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DINÁMICO PARA DETERMINAR LAS TEMPERATURAS DE CAPTURA PARA EL  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  PREPARADO CON REACTIVOS PUROS Y RCD.

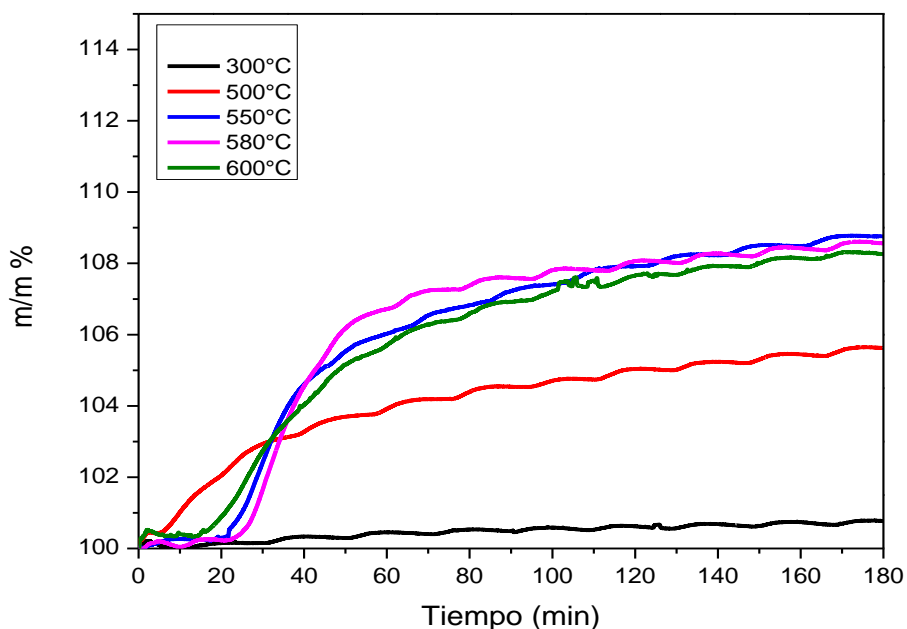


De acuerdo con los resultados obtenidos (gráfica 4) con el fin de obtener una mayor certidumbre en el mecanismo de reacción y la cinética involucrada en la adsorción

de  $\text{CO}_2$  con  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ , se inició con la experimentación correspondiente al análisis termogravimétrico isotérmico para temperaturas de 300, 500, 550, 580 y 600°C.

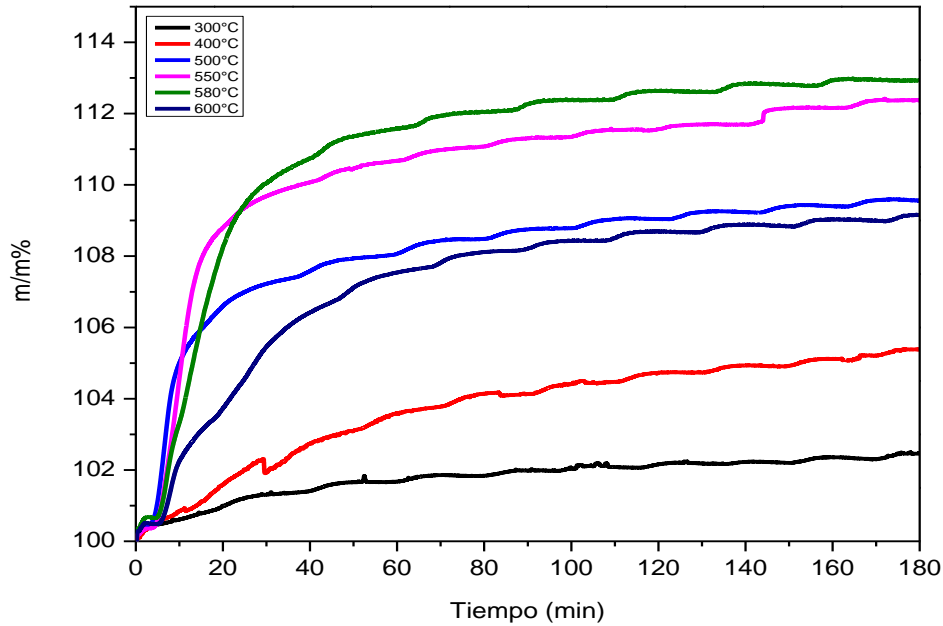
En la gráfica 5 se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas isotérmicas para el material  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos puros donde se obtuvieron las curvas de adsorción para cinco temperaturas 300, 500, 550, 580 y 600°C. Se pueden observar las ganancias de masas respectivas para cada temperatura. Donde el mayor y menor rendimiento se encontró a los 580°C y 300°C respectivamente.

GRÁFICA 5. ANÁLISIS ISOTÉRMICO DE  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  SINTETIZADO A PARTIR DE REACTIVOS PUROS A DIFERENTES TEMPERATURAS CON PRESIÓN PARCIAL DE  $\text{CO}_2$  DE 0.2.



En la gráfica 5. Se observan las curvas de adsorción obtenidas del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado con RCD, para las temperaturas de 300, 400, 500, 550, 580 y 600°C. De las seis diferentes curvas de adsorción es posible observar que la temperatura de 580°C es la de mayor rendimiento de adsorción, mientras que la de menor se obtuvo a los 300°C.

GRÁFICA 6. ANÁLISIS ISOTÉRMICO DE  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  SINTETIZADO A PARTIR DE RCD A DIFERENTES TEMPERATURAS CON PRESIÓN PARCIAL DE  $\text{CO}_2$  DE 0.2.



De acuerdo con los resultados observados en las gráficas 5 y 6, Ambos materiales presentan un comportamiento similar y uniforme, ya que al aumentar la temperatura incrementa el porcentaje de masa ganada para cada caso, a excepción de las isothermas correspondientes a las temperaturas de 300 y 600°C donde el proceso de adsorción es menor en las temperaturas de 500, 550 y 580°C, por su posible sinterización del material, también se puede observar el incremento de la masa en función del tiempo.

Sin embargo, para ambas gráficas, las isothermas de 300 y 600°C presentan las ganancias menores, respecto a las isothermas con temperaturas de 500, 550 y 580°C, ello se debe a que a temperaturas de 300 no se alcanza la adsorción de forma ideal del  $\text{CO}_2$  por lo tanto su captura es menor, en el caso de la isoterma de 600°C el material puede sufrir una desorción a esa temperatura.

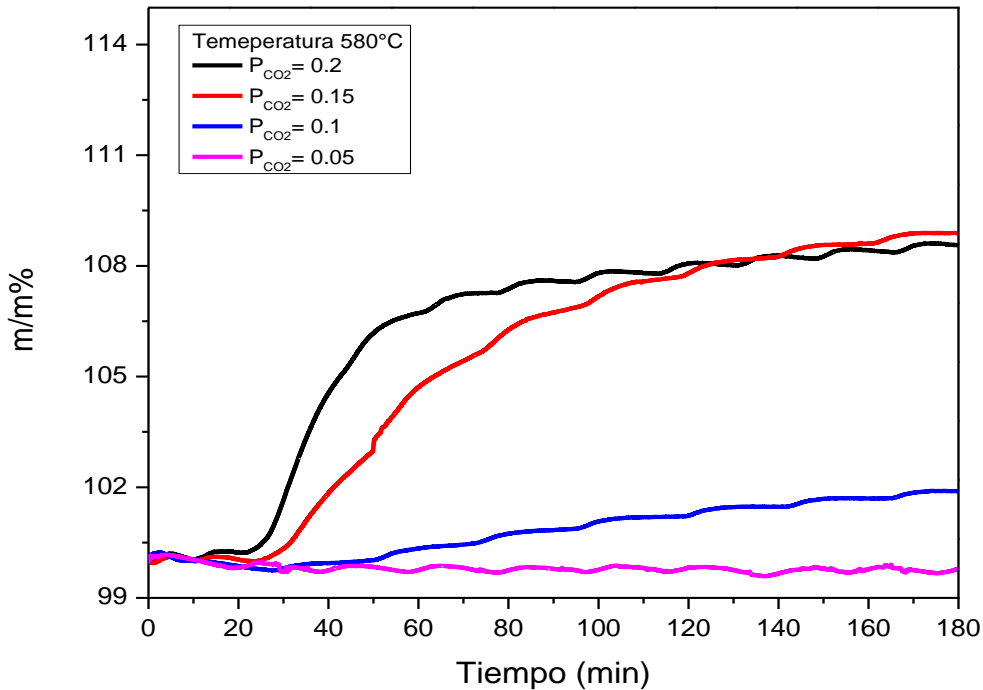
La isoterma de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  con RCD se observa que a  $300^\circ\text{C}$  obtuvo como ganancia de masa 102.49% respecto a la masa inicial del experimento, en la isoterma de  $500^\circ\text{C}$  se obtuvo una ganancia en masa de 109.56%, sin embargo, las isotermas que mayor ganancia tuvieron respecto a la masa inicial del experimento fueron  $550^\circ\text{C}$  y  $580^\circ\text{C}$  obteniendo una ganancia de 112.37% y 112.94% respectivamente, en el caso de la isoterma de  $600^\circ\text{C}$  se obtuvo una ganancia en masa disminuye a 109.14% respecto a las anteriores, ya que a esta temperatura se inicia el proceso de descarbonización, lo cual explicaría la disminución en la captura máxima de  $\text{CO}_2$ . Dicho lo anterior se puede concluir que el mayor porcentaje de adsorción de  $\text{CO}_2$  se presenta en las isotermas de  $550^\circ\text{C}$  y  $580^\circ\text{C}$ .

Por consiguiente, el  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos de puros, presentan menores porcentajes de adsorción respecto al material sintetizado a partir de RCD. Finalmente, los resultados obtenidos en las pruebas termogravimétricas con este material indican que las temperaturas donde hay mejor captura de  $\text{CO}_2$  por el incremento del porcentaje de masa, es en la isoterma correspondiente a las temperaturas de  $550^\circ\text{C}$  y  $580^\circ\text{C}$ , respectivamente, con respecto al porcentaje de ganancia en masa.

En las gráficas 7 y 8, podemos observar las curvas isotérmicas de las presiones parciales de  $\text{CO}_2$  de los materiales sintetizados con reactivos puros y con RCD.

Para el  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos puros y  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  con RCD se realizaron las isotermas con distintas presiones parciales de  $\text{CO}_2$  correspondientes a 0.05, 0.10, 0.15 y 0.20, una temperatura constante de  $580^\circ\text{C}$  (temperatura con mejor rendimiento) y tiempos de duración de 180 minutos.

GRÁFICA 7. ANÁLISIS ISOTÉRMICO DE  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  SINTETIZADO CON REACTIVOS PUROS A  $580^\circ\text{C}$  A DISTINTAS PRESIONES PARCIALES DE  $\text{CO}_2$ .

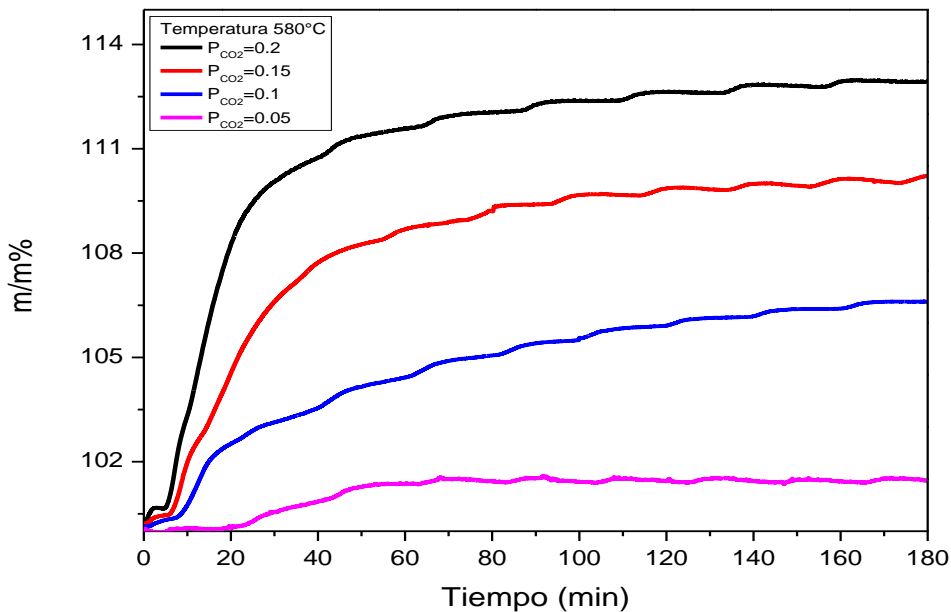


En las líneas isotérmicas de las presiones parciales representadas en la gráfica 7. Observamos 4 curvas, la primera (color rosa) a una presión parcial constante de 0.05 de captura de  $\text{CO}_2$  es la más baja con una pérdida del material inicial con un 99.77%. Mientras que a una presión constante de  $\text{CO}_2$  al 0.10 (color azul) se observa un bajo incremento en la masa del material sintetizado con una ganancia de 101.89%. por lo tanto, no presentar pérdida de material. Mientras que a presiones parciales de 0.15 (color rojo) y 0.20 (color negro) se observan mejores ganancias en masa 108.89% y 108.56% respectivamente, sin embargo, la muestra sometida a presión parcial de 0.20 se observa una mejor capacidad de adsorción en menor tiempo. Observamos un comportamiento similar en las líneas isotérmicas con una ganancia en masa de en ambas presiones parciales, se presenta un incremento importante en la ganancia del material inicial,

sobresaliendo la isoterma a una presión parcial del 0.20 ya que absorbe CO<sub>2</sub> con mayor velocidad y se mantiene constante en comparación con la línea que representa la presión parcial al 0.15 de CO<sub>2</sub>, que adsorbe a menor velocidad pero obtiene mayor ganancia aunque esta ganancia no es significativa, sin embargo a esta presión al final del tiempo de la prueba se obtiene una mínima pero mayor captura de CO<sub>2</sub>, respecto a la presión constante de 0.20.

En la gráfica 8, se muestran los resultados del análisis isotérmico del Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> de RCD obtenidos a cuatro distintas presiones parciales correspondientes a 0.05, 0.10, 0.15 y 0.20 de CO<sub>2</sub>. Estas curvas de presiones parciales como las de Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado a partir reactivos puros de fueron generadas a una temperatura de 580°C con una duración de prueba de 3 horas o 180 minutos.

GRÁFICA 8. ANÁLISIS ISOTÉRMICO DEL Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> SINTETIZADO A PARTIR DE RCD A 580°C A DISTINTAS PRESIONES PARCIALES DE CO<sub>2</sub>.



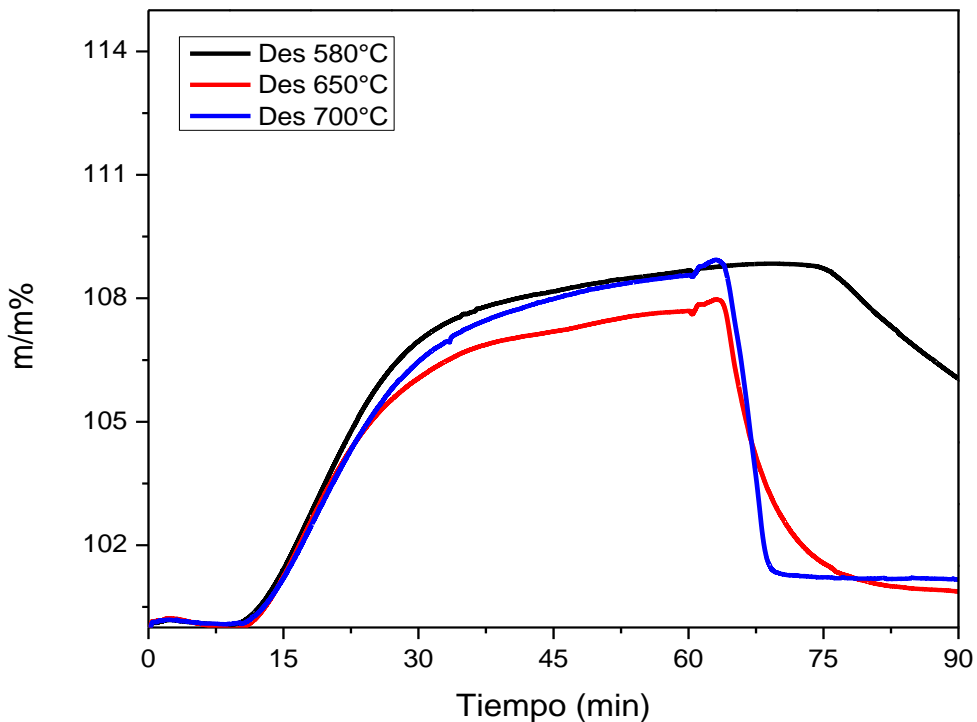
Del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado con RCD se obtuvieron 4 curvas, donde es posible observar el aumento de masa según la presión parcial de  $\text{CO}_2$ . La línea que representa la presión parcial del 0.05 (color rosa) presenta el mínimo incremento en la masa del material con un 102.19%, por lo tanto, no presenta pérdida del mismo. A una presión parcial del 0.10 (color azul) podemos observar un incremento del 106.60% en la masa del material debido a la adsorción del  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, a las presiones parciales de 0.15 (color rojo) y 0.20 (color negro), se debe destacar el incremento de masa en el material respectivamente, a 0.15 hay un incremento de 110.22% de la masa del material, mientras que la mayor captura de  $\text{CO}_2$  se llevó a cabo a una presión parcial del 0.20 con un incremento en masa del 112.94%.

#### 4.2.1. Determinación de la temperatura de adsorción/desorción.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico dinámico isotérmico (gráfica 4) se presentan los resultados obtenidos con  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado con reactivos puros y  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de RCD, en ambos materiales se evaluaron curvas de adsorción-desorción de  $\text{CO}_2$  a 580, 650 y 700°C con 0.20 de  $\text{CO}_2$  (60min) y desorción a diferentes temperaturas en flujo de  $\text{N}_2$  (30 min) con un ciclo del proceso de adsorción/desorción, donde se modificó la temperatura hasta alcanzar la máxima desorción de  $\text{CO}_2$  adsorbido.

La gráfica 9 describe las curvas de adsorción/desorción a tres diferentes temperaturas de desorción (580°, 650 y 700°C) donde las curvas que representan el proceso de adsorción/desorción presentan un pequeño salto causado por un cambio en el flujo de gas en la corriente gaseosa (cambio de  $\text{CO}_2$  a  $\text{N}_2$  puro), iniciando el proceso de desorción.

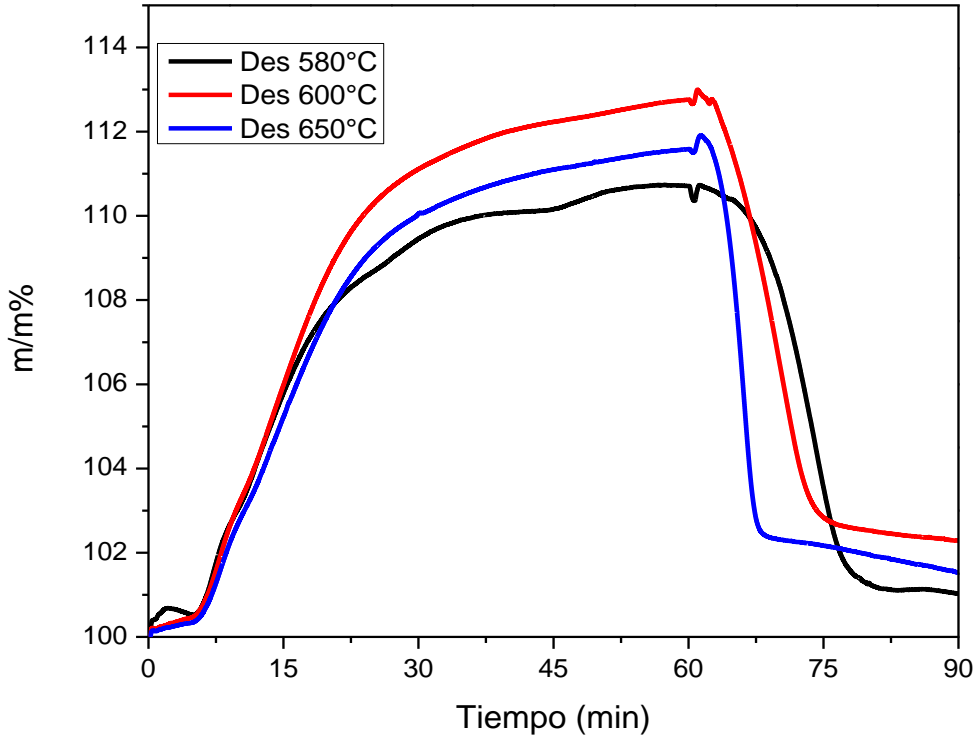
GRÁFICA 9. CURVAS DE ADSORCIÓN/DESORCIÓN DE CO<sub>2</sub> DE Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> SINTETIZADO A PARTIR DE REACTIVOS PUROS.



Respecto a lo observado en la gráfica 9, podemos determinar que la isoterma de color negro que representa la desorción a 580°C, presenta una desorción incompleta, mientras que la curva que muestra la desorción a 650°C en color rojo, describe una desorción casi completa. La isoterma en color azul, que describe la temperatura de desorción de 700°C, logró una desorción menor que a 650°C, pero más rápida, ambas sin llegar a lograr una desorción completa.

En la gráfica 10, se presentan los resultados obtenidos por análisis termogravimétrico para el Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado a partir de RCD las curvas representan el proceso de adsorción/desorción para tres temperaturas de desorción, 580, 600 y 650°C.

GRÁFICA 10. CURVAS DE ADSORCIÓN/DESORCIÓN DE CO<sub>2</sub> DE Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> SINTETIZADO A PARTIR DE RCD.



Las tres distintas temperaturas se pueden observar (gráfica 10) la adsorción a 580°C con 0.20 de presión parcial de CO<sub>2</sub> (60min) y desorción a las diferentes temperaturas (580, 600 y 650°C) en flujo de N<sub>2</sub> (30 min). Como los resultados obtenidos con el Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> con reactivos puros (gráfica 9) se observa el punto de inflexión posterior a los 60 minutos que coincide con el cambio de gas de CO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub> Puro.

En la gráfica 10, se observa que a los 580°C se obtiene la mayor desorción de CO<sub>2</sub> que en las temperaturas de 600 y 650°C, a los 600°C se registra el mínimo nivel de desorción respecto a las temperaturas de 580 y 650°C. Con respecto a la temperatura de 650°C presenta una desorción más rápida pero menor que la obtenida a 580°C.

### 4.2.3. Ciclos programados de adsorción/desorción.

Es importante que un material adsorbente de CO<sub>2</sub> sea sometido a ciclos de adsorción/desorción para determinar esta capacidad. Los materiales adsorbentes necesitan cumplir con ciertas características, como lo son una alta capacidad de adsorción, buena regeneración y una estabilidad que permita un rendimiento importante durante múltiples ciclos de adsorción/desorción a largo plazo (Román, 2021).

El material Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado a partir de reactivos puros se sometió a una serie de 10 ciclos programados de adsorción/desorción de forma continua mientras que el material Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado a partir de RCD fue sometidos a una serie de 30 ciclos de la misma forma.

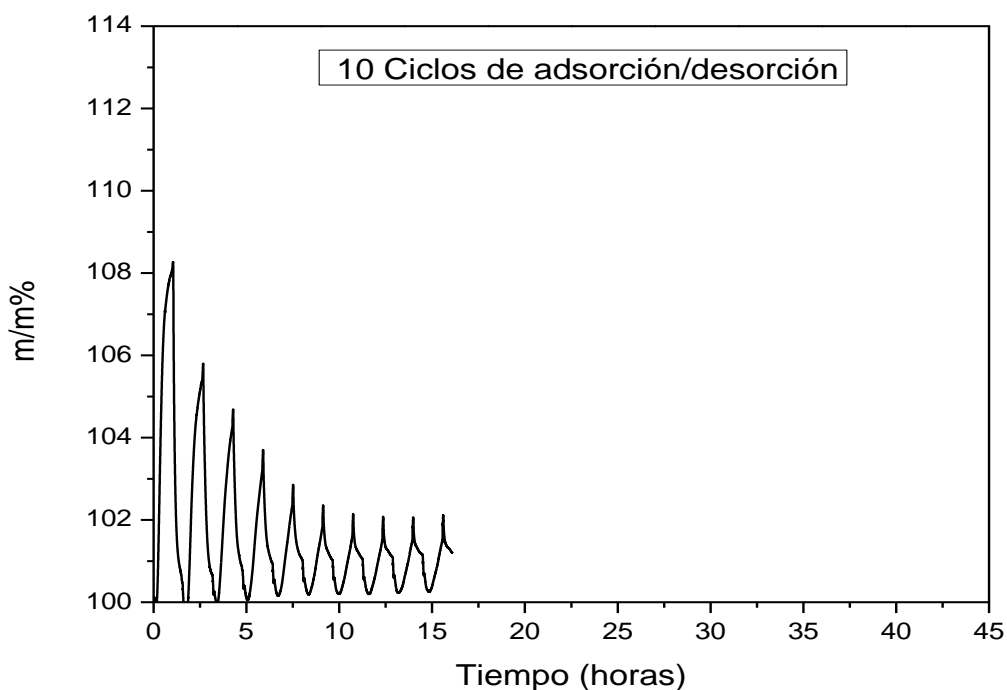
En la gráfica 11 se representan los resultados obtenidos del material del Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado con reactivos puros durante 10 ciclos de adsorción/desorción con un flujo de 0.20 de CO<sub>2</sub>. En la gráfica 12 se observan los resultados obtenidos del material del Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado con RCD durante 30 ciclos de adsorción/desorción con un flujo de 0.20 de CO<sub>2</sub>.

Las condiciones para ambos materiales (gráfica 11y 12) fueron temperatura de adsorción de 580°C (una hora) y 30 minutos de desorción por ciclo, dando un total de 15 horas para material Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado con reactivos puros y 45 horas para el material Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado a partir de RCD.

En el material Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> preparado a partir de reactivos puros y el material de Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> preparado a partir de RCD, se pueden observar (gráficas 11 y 12) que se tienen diferentes capacidades de captura, difieren sus propiedades de adsorción/desorción, así,

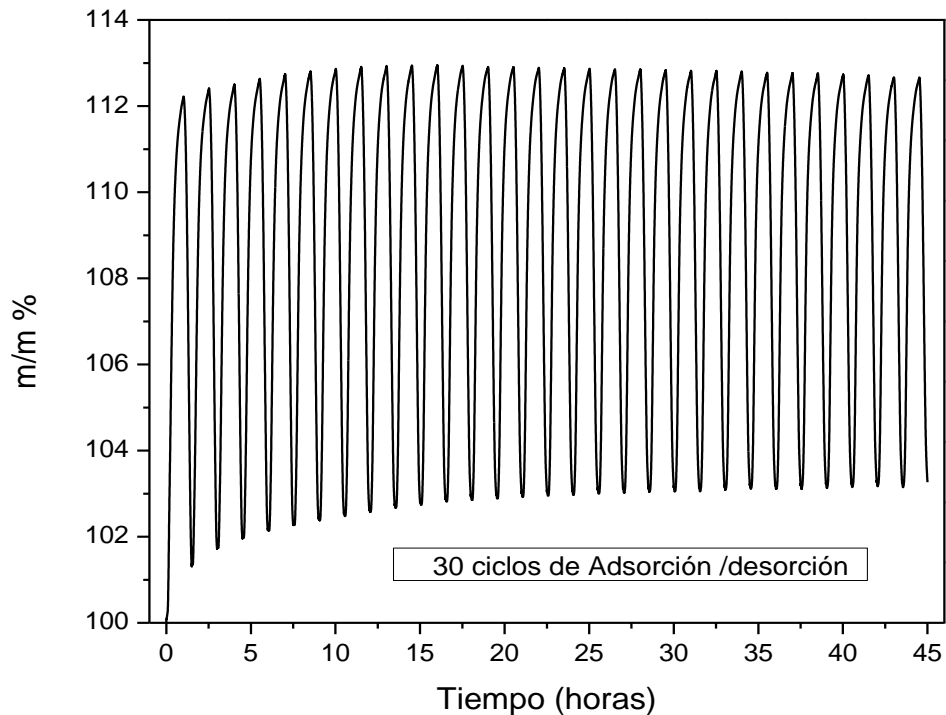
como el comportamiento en la estabilidad en las series de ciclos entre ambos materiales no son homogéneos.

GRÁFICA 11. CICLOS DE ADSORCIÓN/DESORCIÓN DE  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  SINTETIZADO A PARTIR DE REACTIVOS PUROS.



A los 10 ciclos programados de adsorción/desorción del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  preparado con reactivos puros se destaca que la captura máxima se encuentra en el primer ciclo, mientras que en los ciclos posteriores la capacidad de adsorción/desorción va disminuyendo, cambiando significativamente hasta el quinto ciclo, posterior a éste, el material muestra una pérdida en su capacidad de captura de aproximadamente el 75%.

GRÁFICA 12. CICLOS DE ADSORCIÓN/DESORCIÓN DE  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  SINTETIZADO A PARTIR DE RCD.



En la gráfica 12 la adsorción más alta ocurrió en el primer ciclo, presentando una disminución a partir del segundo ciclo, terminando con una estabilidad más baja en los ciclos posteriores al quinto ciclo.

Con base en los datos observados en la Tabla 16 podemos decir que a partir de las isotermas de adsorción/desorción de 30 ciclos, el material  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado con RCD, muestra alta estabilidad en sus procesos de regeneración, conforme los ciclos pasan la adsorción se estabiliza al igual que la desorción, mostrando estabilidad entre cada ciclo.

En la Tabla 16, podemos observar un concentrado de los resultados obtenidos de la caracterización química y física del  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos puros y el  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de RCD.

**TABLA 15 COMPARACIÓN DE RESULTADOS REACTIVOS PUROS Y RCD.**

| Técnica de Caracterización                      |                              | Reactivos puros       |             | RCD                          |                      |
|---|------------------------------|-----------------------|-------------|------------------------------|----------------------|
| FRD   |                              | NA                    |             | $\text{SiO}_2$ -49.89%       | $\text{SO}_2$ -0.37% |
| DRX   | Silicato de litio            | 93.6 %                |             | 55.4 %                       |                      |
|   | Carbonato de litio           | 03.7%                 |             | 06.9 %                       |                      |
|   | Óxido de litio               | 2.7 %                 |             | 33.9 %                       |                      |
|   | Trihidruro de litio          | NA                    |             | 01.8 %                       |                      |
| Prueba de $a_{\text{BET}}$                      |                              | 0.6 m <sup>2</sup> /g |             | 4.8 m <sup>2</sup> /g        |                      |
| Análisis ATG dinámico                           | m/m                          | 114.35                |             | 115.16                       |                      |
|   | Temp.                        | 625.95 °C             |             | 598.28 °C                    |                      |
| Análisis ATG Isotérmico                         | 300 °C                       | 100.77 %m/m           |             | 102.94 %m/m                  |                      |
|   | 500 °C                       | 105.63 %m/m           |             | 109.57 %m/m                  |                      |
|   | 550 °C                       | 108.74 %m/m           |             | 112.33 %m/m                  |                      |
|   | 580 °C                       | 108.60 %m/m           |             | 112.86 %m/m                  |                      |
|   | 600 °C                       | 108.29 %m/m           |             | 109.18 %m/m                  |                      |
|   |                              |                       | 108.56 %m/m |                              |                      |
| Análisis Isotérmico. Presiones Parciales 580 °C | $P_{\text{CO}_2}=0.20$       |                       |             | 112.94 %m/m                  |                      |
|   | $P_{\text{CO}_2}=0.15$       | 108.82 %m/m           |             | 110.21 %m/m                  |                      |
|   | $P_{\text{CO}_2}=0.10$       | 101.86 %m/m           |             | 106.60 %m/m                  |                      |
|   | $P_{\text{CO}_2}=0.5$        | 99.74 %m/m            |             | 101.50 %m/m                  |                      |
| Curvas de adsorción/desorción de $\text{CO}_2$  | 580°C                        | Adsorción =           | 108.78 m/m  | Adsorción =                  | 110.71 m/m           |
|   |                              | Desorción =           | 106.17 m/m  | Desorción =                  | 101.00 m/m           |
|   | 650°C                        | Adsorción =           | 107.91 m/m  | Adsorción =                  | 111.51 m/m           |
|   |                              | Desorción =           | 100.94 m/m  | Desorción =                  | 101.50 m/m           |
| Ciclos de adsorción/desorción                   | 10 ciclos (baja estabilidad) |                       |             | 30 ciclos (alta estabilidad) |                      |

## Capítulo IV.- Conclusiones.

A pesar de las aportaciones sociales y económicas que se generan del sector de la construcción, debemos considerar de forma primordial los impactos que el sector imprime sobre el medio donde se desarrolla. Como ya hemos mencionado el sector de la construcción genera bienestar social al desarrollar la infraestructura para que el ser humano se resguarde de las inclemencias del tiempo y realice un sinnúmero de actividades, con ello generando una derrama económica importante, así como empleos de forma directa e indirecta.

Sin embargo, debemos considerar un problema las emisiones de GEI, siendo el CO<sub>2</sub> el causante principal del calentamiento global y el cambio climático que se generan por el desarrollo del sector de la construcción, así como el consumo de recursos naturales, recursos hídricos, madereros entre otros, convirtiendo a este sector en una actividad poco respetable con medio ambiente y sus recursos bióticos y abióticos. Por lo que es de suma importancia el desarrollo de materiales innovadores que nos permitan la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Los materiales a base de litio han tomado relevancia para cumplir con los objetivos de mitigación al cambio climático permitiendo la captura de CO<sub>2</sub>.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas de FRX realizados en el Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sintetizado a partir de RCD, éstos cuentan con la cantidad de sílice suficiente (49.89%) para la síntesis de nuevos materiales adsorbentes de CO<sub>2</sub>. De manera similar los resultados de DRX en los RCD indican la presencia de compuestos como lo son silicato de litio con un 55.4%, óxido de litio con un 33.9%, carbonato de litio con un 6.9% los cuales son indispensables para la síntesis del material adsorbente.

Con forme a los resultados que se muestran en las pruebas realizadas para determinar el área superficial de BET ( $a_{BET}$ ), podemos establecer que el  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de RCD, éstos presentan una mayor área superficial respecto al  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de reactivos puros, presentando  $4.8 \text{ m}^2/\text{g}$  y  $0.6 \text{ m}^2/\text{g}$ , respectivamente. Por lo que al presentar una mayor área superficial se determina que cuenta con una mayor capacidad de adsorción.

En relación a los resultados obtenidos de las pruebas experimentales del análisis ATG dinámico realizado a los materiales de  $Li_4SiO_4$  sintetizados a partir de reactivos puros y los sintetizados a partir de RCD se determina que el comportamiento en cuanto a las temperaturas de adsorción/desorción corresponden a los RCD teniendo estos una más rápida capacidad de adsorción y una mayor desorción respecto al  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de reactivos puros. Cuyas temperaturas en ambos materiales presentan mejor comportamiento entre los  $580^\circ\text{C}$  y los  $600^\circ\text{C}$ .

De manera similar el comportamiento de los materiales sintetizados a partir de reactivos puros y los sintetizados a partir de RCD, los resultados del análisis térmico muestran que el material sintetizado a partir de reactivos puros presenta su proceso de adsorción a los 24 minutos aproximadamente, obteniendo una masa de  $108.60 \text{ \%m/m}$ . Mientras que el material sintetizado a partir de RCD inicia su proceso de adsorción a los 3 minutos aproximadamente, con una ganancia en masa de  $112.86 \text{ \%m/m}$ , ambos materiales se sometieron a temperaturas de  $580^\circ\text{C}$  siendo el material  $Li_4SiO_4$  sintetizado con materiales de RCD más eficiente respecto a tiempo y ganancia en masa.

Es así que, en los resultados que se presentan en las pruebas de presiones parciales ( $P_{CO_2}$ ) de  $CO_2$  con una temperatura constante de  $580^\circ\text{C}$  se obtuvieron las

mejores ganancias en masa al 0.20 y 0.15  $P_{CO_2}$ , tanto en el material sintetizado a partir de reactivos puros con 108.56 %m/m y 108.82 %m/m respectivamente, y 112.94 %m/m y 110.21 %m/m con el material sintetizado a partir de RCD. Por lo cual se concluye que el  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de RCD presentan mayores ganancias en masa respecto al  $Li_4SiO_4$  al material sintetizado a partir de reactivos puros.

De la misma forma, en los resultados que se obtienen en las curvas de adsorción/desorción de  $CO_2$ , el  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de reactivos puros, se observa una desorción incompleta a los 580°C al obtener 106.17 %m/m, consideremos ahora, que, a una temperatura de 650°C, se obtuvo una desorción casi completa. Con respecto, a las curvas de adsorción/desorción de  $CO_2$  del  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de RCD, observamos que, a 580°C se obtiene una desorción de 101.00 %m/m de manera similar a una temperatura de 650°C se observa una desorción de 101.50 %m/m. Por lo cual podemos inferir que el material sintetizado de RCD presenta mejores resultados en las pruebas de adsorción/desorción al tener mejores desorciones para ambas temperaturas.

Por lo tanto, bajo los datos obtenidos en las gráficas que representan los ciclos de adsorción/desorción de los materiales de  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de reactivos puros 10 ciclos y el material sintetizado a partir de RCD 30 ciclos, se determina que el  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de reactivos puros presenta una degradación importante a partir del quinto ciclo, al ya no presentar cambios en sus procesos de adsorción/desorción, mientras que el  $Li_4SiO_4$  sintetizado a partir de RCD durante los 30 ciclos de adsorción/desorción presenta una alta estabilidad durante cada uno de los ciclos, siendo este un material que presenta mayor estabilidad, respecto al tiempo-masa.

Como resultado de las pruebas realizadas a los materiales sintetizados a partir de reactivos puros y el sintetizado a partir de RCD, el  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de RCD, muestra mejores propiedades sobre el material  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  sintetizado a partir de reactivos puros, mostrando mayor capacidad de adsorción/desorción a temperaturas entre los  $580^\circ\text{C}$  y  $600^\circ\text{C}$ . Con lo cual podemos determinar que, los RCD son una alternativa para la síntesis de un materiales innovadores y baratos, lo cual permitirá a estos residuos ser introducidos nuevamente a sus ciclos de vida.

## Referencias

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (junio de 2022). *La energía y el medioambiente*. Obtenido de Emisiones de dióxido de carbono: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (05 de mayo de 2022). *Emisiones de gases de efecto invernadero*. Obtenido de Comprender los potenciales de calentamiento global: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (01 de agosto de 2022). *Indicadores de Cambio Climático en Estados Unidos*. Obtenido de El cambio climático está sucediendo ahora: <https://www.epa.gov/climate-indicators>
- Alanis, S. (2013). *Caracterización y valorización de residuos de construcción y demolición de San Miguel de Tucumán*. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán. Recuperado el 16 de agosto de 2022
- Alcántar-Vázquez, B. C., & Ramírez-Zamora, R. M. (02 de enero de 2020). Silicatos de litio sintetizados a partir de escorias de hierro y acero como materiales adsorbentes de CO<sub>2</sub> de alta temperatura. 687-699. doi:<https://doi.org/10.1007/s10450-019-00198-z>
- Allev, R. (2018). Informe aceptado por el grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático pero no aprobado en detalles. (B. Kansri, G. Filippo, & J. Bubu, Edits.) Recuperado el 12 de agosto de 2022, de [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4\\_wg1\\_full\\_report.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf)
- Al-Raqueb, H., Hamidreza Ghaffar, S., Al-Kheetan, M. J., & Chougan, M. (abril de 2023). Comprender los desafíos de la gestión de residuos de demolición de la construcción hacia la construcción circular: la perspectiva de las partes interesadas de Kuwait. *Sistemas de los residuos más limpios*, 4, 100075. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912523000015>
- ANFAPA Asociación de Fabricantes de Morteros y SATE. (2020). *Economía circular en el sector de la construcción*. Barcelona: ANFAPA. Recuperado el 02 de septiembre de 2022, de <https://anfapa.com/noticias-sector/1219/economia-circular-en-el-sector-de-la-construccion#:~:text=Como%20econom%C3%ADa%20circular%20entendemos%20aquel,de%20vida%20de%20los%20productos>.
- Ansari, M., & Ehrampoush, M. H. (diciembre de 2018). Análisis cuantitativo y cualitativo de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Yazd, Irán. *Journal Data in Brief*, 21, 2622-2626. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340918313581>
- Becerra Hinestroza, J. B. (2019). ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) GENERADO EN REFORMAS DOMICILIARIAS Y GESTIONADO EN LAS ESCOMBRERAS DEL MUNICIPIO DE MEDELLÍN-ANTOQUIA. Manizales, Manizales, Colombia: Universidad de Manizales. Recuperado el 27 de agosto de 2022, de

<https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/4429/juana%20berlinda%20%202019.pdf?sequence=4>

- Bejarano-Peña, W. D., & Alcántar-Vázquez, B. (2021). Synthesis and evaluation in the CO<sub>2</sub> capture process of potassium-modified lithium silicates produced from steel metallurgical slags. *Materials Research Bulletin*.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (22 de mayo de 2015). Ley para la prevención y gestión integral de los residuos. CDMX, CDMX, México: Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 28 de 05 de 2023, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23.\\_LEY\\_GENERAL\\_PARA\\_LA\\_PREVENCI\\_N\\_Y\\_GESTI\\_N\\_INTEGRAL\\_DE\\_LOS\\_RESIDUOS.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23._LEY_GENERAL_PARA_LA_PREVENCI_N_Y_GESTI_N_INTEGRAL_DE_LOS_RESIDUOS.pdf)
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2013). *PLAN DE MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA DEMOLICIÓN*. México: Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. Recuperado el 13 de agosto de 2022, de <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>
- Canales sectoriales Interempresas. (10 de febrero de 2017). <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/168760-Residuos-de-construccion-el-mas-claro-ejemplo-de-Economia-Circular.html>. Recuperado el 3 de septiembre de 2022, de <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/168760-Residuos-de-construccion-el-mas-claro-ejemplo-de-Economia-Circular.html>
- Cárdenas, G. J., Li Ng, J. J., & Serrano, C. (2021). *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y acciones de mitigación y adaptación*. BBVA. Ciudad de México: BBVA Research. Recuperado el 25 de agosto de 2022, de <https://www.bbva.com/publicaciones/mexico-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-y-acciones-de-mitigacion-y-adaptacion/#:~:text=M%C3%A9xico%20estableci%C3%B3n%20dos%20metas%20en,2030%20en%20el%20caso%20%E2%80%9Cno>
- CEESCO. (2022). *Informe Nacional del Sector de la Construcción*. CDMX: Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción. Recuperado el 18 de agosto de 2022, de [https://www.cmic.org.mx/ceesco/Documentos/Informe\\_Construccion/2022/Enero2022/Informe%20nacional%20del%20sector%20de%20la%20construccion%2031-01-2021.pdf](https://www.cmic.org.mx/ceesco/Documentos/Informe_Construccion/2022/Enero2022/Informe%20nacional%20del%20sector%20de%20la%20construccion%2031-01-2021.pdf)
- Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción. (15 de julio de 2022). Producción de las empresas constructoras en Baja California. México.
- Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción. (2023). *Informe Nacional del Sector de la Construcción*. Empresarial. Recuperado el 17 de marzo de 2023, de [https://www.cmic.org.mx/ceesco/Documentos/Informe\\_Construccion/2023/Febrero/Informe%20Nacional%20del%20Sector%20de%20la%20Construccion%2028-2-2023.pdf](https://www.cmic.org.mx/ceesco/Documentos/Informe_Construccion/2023/Febrero/Informe%20Nacional%20del%20Sector%20de%20la%20Construccion%2028-2-2023.pdf)
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (noviembre de 2014). *Catálogo de residuos utilizables en construcción*. Obtenido de Residuos de Construcción y Demolición: <http://www.cedexmateriales.es>

- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2014). *Catálogo de residuos utilizables en la construcción*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Ceñal Ruiz, B., & Korb Reachy, P. D. (2015). *PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN*. Recuperado el 02 de 04 de 2023
- Chen, X., Xiong, Z., Qin, Y., Gong, B., Tian, C., Zhao, Y., . . . Zheng, C. (10 de agosto de 2016). Sorción de CO<sub>2</sub> a alta temperatura por sorbentes LiSiO dopados con Ca-dopado. *Revista Internacional de Energía del Hidrógeno*, 41(30), 13077-13085. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319916305894>
- Chica-Osorio, L. M., & Beltrán-Montoya, J. M. (16 de mayo de 2018). Caracterización de los residuos de la demolición y construcción para la identificación de su potencial de uso. *redalyc.org*, 85(206), 338-347. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68824>
- Comisión Europea. (2016). *Protocolo de gestión de residuos de*. Comisión Europea. Ecorys. Recuperado el 18 de junio de 2023, de <https://ec.europa.eu>
- Congreso Nacional del Medio Ambiente. (noviembre de 2018). *ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR*. Obtenido de [http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs%202018/6\\_final.pdf](http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs%202018/6_final.pdf)
- de Barros Martins, M. A., Crispim, A., Ferreira, M. L., dos Santos, I. F., Noronha Motta Melo, M. d., Mambeli Barros, R., & Tiago Filho, G. L. (4 de abril de 2023). Evaluación del consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la gestión de residuos sólidos municipales, de construcción y de demolición. *Sistemas de residuos más limpios*, 4, 100070. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912522000707>
- de Santos Marián, D., Monercillo Delgado, B., & García Martínez, A. (2013). *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*. Madrid, España: Tornapunta Ediciones, S.L.U. Recuperado el 14 de septiembre de 2022, de [https://libreria.fundacionlaboral.org/ExtPublicaciones/Gestion\\_residuos\\_2013\\_FINAL.pdf](https://libreria.fundacionlaboral.org/ExtPublicaciones/Gestion_residuos_2013_FINAL.pdf)
- Deraz, N. M. (05 de marzo de 2018). La jurisprudencia comparada de los métodos de preparación de catalizadores: I. Métodos de precipitación e impregnación. *Revista de Química Industrial y Ambiental*, 1(2), 19-21. Obtenido de <https://www.alliedacademies.org/articles/the-comparative-jurisprudence-of-catalysts-preparation-methods-i-precipitation-and-impregnation-methods-10005.html#:~:text=Impregnation%20Method,-Impregnation&text=It%20is%20the%20procedure%20whereby,5%2C10%2C11%5D>
- Dobrowolska, K. (4 de marzo de 2021). Digital. (A. Plan-Construct-Operate, Editor) Recuperado el 21 de octubre de 2022, de <https://archdesk.com>: <https://archdesk.com/es/blog/como-afecta-la-construccion-al-medio-ambiente/#:~:text=Seg%C3%BAn%20el%20World%20Watch%20Institute,sin%20muchos%20recursos%20naturales%20cruciales>.

- Donato, R. (06 de febrero de 2022). *SMART BUILDING DISEÑO, EDIFICACIÓN Y OPERACIÓN INTELIGENTE*. Obtenido de 4 tendencias para el sector constructivo 2022: <https://smartbuilding.mx/4-tendencias-para-el-sector-construccion-en-2022/>
- EBC Construction SMEs Europe. (s.f.). *Manifiesto de EBC 2019-2024*. Recuperado el 4 de March de 2023, de European Builders Confederation: [https://www.ebc-construction.eu/wp-content/uploads/manifiesto\\_ES\\_web.pdf](https://www.ebc-construction.eu/wp-content/uploads/manifiesto_ES_web.pdf)
- EL MUNDO. (09 de marzo de 2022). *SOSTENIBLES EM*. Recuperado el 13 de octubre de 2022, de Las emisiones mundiales de CO2 batieron un nuevo récord en 2021: <https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/medio-ambiente/2022/03/09/62289105fc6c830f5d8b45b3.html>
- El-Haggar, S. M. (28 de septiembre de 2007). Capítulo 8 - Sostenibilidad de la gestión de residuos de construcción y demolición. *Diseño industrial sostenible y gestión de residuos*, 261-292. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123736239500101>
- Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (diciembre de 2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, 29(3), 234-254. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732014000300002](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732014000300002)
- Equipar Conectando Negocios. (2022). La Revista de la construcción y desarrollo inmobiliario en Latinoamérica. *La industria de la construcción crecera a nivel mundial en 2022*. México, México. Recuperado el 01 de octubre de 2022
- Escobar, S. (7 de diciembre de 2022). Industria de la construcción no sale del bache, recuperación total sería hasta el 2025. *El Economista*. Obtenido de <https://www.economista.com.mx/econohabitat/Industria-de-la-construccion-no-sale-del-bache-recuperacion-total-seria-hasta-el-2025-20221206-0135.html>
- Esperanza, K. (11 de julio de 2018). *Centro Urbano*. Obtenido de <https://centrourbano.com/construccion/constructor-genera-50-contaminantes/>
- Eurofins Environment Testing Spain. (14 de diciembre de 2018). <https://www.eurofins-environment.es/es/residuos-construccion-demolicion/>. (Eurofins, Editor) Recuperado el 7 de noviembre de 2022, de <https://www.eurofins-environment.es/es/residuos-construccion-demolicion/>
- Fernández, L., Yurivilca, R., & Minoja, L. (11 de febrero de 2019). *Hablemos de Sostenibilidad y Cambio Climático (Medio Ambiente, Cambio Climático y Salvaguardas)*. (B. I. Desarrollo, Productor) Recuperado el 14 de octubre de 2022, de Edificios vs cambio climático: Construyendo adaptación y mitigación: <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/edificios-vs-cambio-climatico-construyendo-adaptacion-y-mitigacion/>
- Forbes Colombia. (4 de octubre de 2021). La construcción como fuente de empleo: 7,7% de trabajadores en el mundo pertenecen al sector. *Forbes Colombia*. Recuperado el 15 de junio de 2023, de <https://forbes.co/2021/10/04/economia-y-finanzas/la-construccion-como-fuente-de-empleo-77-de-trabajadores-en-el-mundo-pertenecen-al-sector>

- Galán, J. P. (2 de septiembre de 2021). Infraestructura con impacto social. *Forbes Colombia*. Recuperado el 28 de mayo de 2023, de <https://forbes.co/2021/09/02/red-forbes/infraestructura-con-impacto-social>
- García Chiquito, M. C. (2020). *Sustitución de agregado pétreo natural por agregado reciclado en concretos de baja y mediana resistencia*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Recuperado el 26 de mayo de 2023
- Global Alliance for Buildings and Construction. (2020). *Situación Mundial de los Edificios y la Construcción de 2020*. ONU programa para el medio ambiente. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Recuperado el 13 de agosto de 2022, de Ejecutivo, R., Informe, D. E. L., La, S., Mundial, S., & La, D. E. L. O. S. E. Y. (2020). Situación Mundial De Los Edificios Y La Construcción De 2020. Onu.
- Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022). *México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990 - 2019*. Gubernamental, Ciudad de México. Recuperado el 1 de septiembre de 2022, de [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/InventarioGEI\\_Mexico\\_1990\\_2019.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/InventarioGEI_Mexico_1990_2019.pdf)
- Gobierno Vasco. (2004). *Monografía sobre residuos de construcción y demolición*. Gobierno Vasco, Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Recuperado el 15 de agosto de 2022, de <https://www.btbab.com/wp-content/uploads/documentos/legislacion/construccion.pdf>
- Gómez Meijilde, B., Pérez Pérez, I., Rodríguez Pasadín, A. M., & Corraliza Tejeda, S. (mayo de 2015). Reciclaje de los residuos de construcción y demolición como áridos reciclados de mezclas bituminosas en frío. Obtenido de ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/276248838\\_Reciclaje\\_de\\_los\\_residuos\\_de\\_construccion\\_y\\_demolicion\\_como\\_aridos\\_reciclados\\_de\\_mezclas\\_bituminosas\\_en\\_frio](https://www.researchgate.net/publication/276248838_Reciclaje_de_los_residuos_de_construccion_y_demolicion_como_aridos_reciclados_de_mezclas_bituminosas_en_frio)
- González Plaza, M. (2009). *Desarrollo y modificación superficial de adsorbentes para la captura de CO<sub>2</sub> postcombustión*. Tesis doctoral, Instituto de Ciencias y Tecnología del Carbono, de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, Oviedo. Recuperado el 15 de agosto de 2022, de <http://hdl.handle.net/10261/102907>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (9 de agosto de 2021). *Noticias ONU Mirada global Historias Humanas*. Obtenido de [https://news.un.org/es/story/2021/08/1495262?\\_gl=1\\*14ypb79\\*\\_ga\\*MjEyMTU4MDEwOC4xNjg2MTc4ODIy\\*\\_ga\\_TK9BQL5X7Z\\*MTY4NjE3ODgyMi4xLjEuMTY4NjE3ODgzNS40Ny4wLjA](https://news.un.org/es/story/2021/08/1495262?_gl=1*14ypb79*_ga*MjEyMTU4MDEwOC4xNjg2MTc4ODIy*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY4NjE3ODgyMi4xLjEuMTY4NjE3ODgzNS40Ny4wLjA).
- Hernández Tapia, V. (2022). *Estudio cinético del proceso de desorción de CO<sub>2</sub> en Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> preparado utilizando escorias metalúrgicas*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 29 de marzo de 2023
- Huanyu, W., Jian, Z., Hongping, Y., Zillante, J., & Jiayuan, W. (noviembre de 2019). Una revisión de los métodos de evaluación del rendimiento para la gestión de residuos de construcción y

- demolición. *Recursos, Conservación y Reciclaje*, 150, 104407. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919303027>
- Huanyu, W., Jian, Z., Hongping, Y., Zillante, J., & Jiayuan, W. (marzo de 2023). Investigación de los impactos sociales y económicos de la movilidad interregional de los residuos de construcción y demolición en Australia. *Recursos, Conservación y Reciclaje*, 190, 106814. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344922006462>
- Islam, R., Nazifab, T. H., Yuniarto, A., Uddinb, A. S., Salmiati, S., & Shahid, S. (18 de julio de 2019). Un estudio empírico de la generación de residuos de construcción y demolición y la implicación del reciclaje. *Gestión de residuos*, 95, 10-21.
- Landau, L. (2006). *Residuos de construcción y demolición*. Universidad de Huelva. Obtenido de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q:intitle:No+title#0>
- Linn. (30 de marzo de 2019). *GrowingBuildings*. Recuperado el 2 de febrero de 2023, de <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/>
- Liseane, T. P., EneDir, G., & Juárez J., T. J. (diciembre de 2022). Una perspectiva sobre la gestión de residuos de construcción en Brasil. *Materiales más limpios*, 6, 100153. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397622001137>
- López, P. (2020). *DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS MATERIALES CERÁMICOS POROSOS CON MICROESTRUCTURA TIPO AGUJA DE SISTEMAS Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-(MOX)*. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires: Investigación Joven. Recuperado el 27 de agosto de 2022, de <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/11547>
- Magallanes, A. (22 de agosto de 2022). ¿Qué es la economía circular? Beneficios de reciclar material de construcción. Torreón, Coahuila, México: Milenio. Obtenido de <https://www.milenio.com/estados/que-es-la-economia-circular-reciclar-material-de-construccion>
- Marguí, E., Queralt, I., & de Almeida, E. (1 de septiembre de 2022). Espectrometría de fluorescencia de rayos X para análisis ambiental: principios básicos, instrumentación, aplicaciones y tendencias recientes. *Chemosphere*, 302(1), 135006. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522014990>
- Martinez Bretand, C., & Tome Trujillo, M. (2008). *Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDS): importancia de la recogida para optimizar su posterior valorización*. Vías y construcciones, S.A. Madrid: Congreso Nacional del Medio Ambiente. Recuperado el 23 de junio de 01, de [http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/2633\\_CMartinez.pdf](http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/2633_CMartinez.pdf)
- Mejia Trejo, V. L. (2008). Captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en las soluciones sólidas de ortosilicato de litio y sodio (Li<sub>4</sub>NaxSiO<sub>4</sub>). Ciudad de México, Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Méndez, J. (mayo de 2019). La industria de la construcción contribuye con el 6.5% del PIB en la economía nacional. Puebla, Puebla.
- Meza Estrada, C. (2018). La construcción sostenible frente a. *MODULO ARQUITECTURA-CUC*, 9-22.

- Minoja, L., Fernández, L., & Yurivilca, R. (2018). *Hacia el 30% de financiamiento climático: ¿cómo pueden contribuir los edificios?* Banco Interamericano de Desarrollo. doi:<http://dx.doi.org/10.18235/0001458>
- Muñoz Socha, M. M. (noviembre de 2018). EVALUACIÓN FINANCIERA DE PEQUEÑAS PLANTAS MÓVILES DE. CDMX, México: Universidad Autónoma de México. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/11334/1/tesis.pdf>
- Murano, M. R., & Tavares, S. F. (marzo de 2023). Una revisión sobre barreras, impulsores y partes interesadas hacia la economía circular: la perspectiva del sector de la construcción. *Consumo más limpio y responsable*, 8, 100-107. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666784323000086>
- Nair, S., & Raghavan, R. (2021). *A kinetic study of CO2 sorption/desorption of lithium silicate synthesized through a ball millinh.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.178918>
- Nandal, M., Sood, H., Gupta, P., & Hu Haq, M. (16 de noviembre de 2022). Caracterización morfológica y física de residuos de construcción y demolición. *materialstoday: P(CEEDINGS)*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322068481>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). *Tendencias en el dióxido de carbono atmosférico.* National Oceanic and Atmospheric Administration, Departamento de Comercio de EE.UU. Mauna Loa: NOAA. Recuperado el 15 de junio de 2023, de <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html>
- Nawaz, A., Chen, J., & Su, X. (febrero de 2023). Factores en las prácticas críticas de gestión para proyectos de construcción predictores de residuos para la minimización y maximización de C&DW. *Revista de la Universidad Rey Saud-Ciencia*, 35(2), 102512. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364722006930>
- Norma internacional ISO para la construcción sostenible.* (21 de February de 2020). Recuperado el 28 de April de 2023, de GlobalSTD: <https://www.globalstd.com/blog/norma-internacional-iso-para-la-construccion-sostenible/>
- Normas DIN (Deutsches Institut für Normung).* (s.f.). Recuperado el 28 de April de 2023, de Normas: Normas DIN (Deutsches Institut für Normung) Historia. DIN fue fundada en Berlín como el "Normenausschuss der Deutsch: <https://interinfojtdc.files.wordpress.com/2017/08/normativa-aplicada-en-dibujo-industrial-y-mecanico.pdf>
- Observatorio Fundación Laboral de la Construcción. (2022). *Informe sobre el sector de la construcción 2021.* Recuperado el 25 de febrero de 2022, de Observatorio de la Construcción: <https://www.observatoriodelaconstruccion.com/uploads/media/HKQvbb7Q4Z.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas. (11 de mayo de 2020). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.* Recuperado el 10 de Octubre de 2022, de El mundo registra concentraciones récord de dióxido de carbono a pesar de la COVID-19: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-mundo-registra-concentracion-record-de-dioxido-de-carbono- apesar#:~:text=En%20abril%20de%202020%2C%20la,de%20los%20%C3%BAltimos%20800.000%20a%20%C3%B1os.>

- Organización de las Naciones Unidas. (9 de agosto de 2021). *Cambio climático: El ser humano ha calentado el planeta a un nivel nunca visto en los últimos 2000 años*. Recuperado el 2 de septiembre de 2022, de [https://news.un.org/es/story/2021/08/1495262?\\_gl=1\\*1qlf1pg\\*\\_ga\\*MjEyMTU4MDEwOC4xNjg2MTc4ODIy\\*\\_ga\\_TK9BQL5X7Z\\*MTY4NzA2MDg2NS41LjAuMTY4NzA2MDg2NS4wLjAuMA..](https://news.un.org/es/story/2021/08/1495262?_gl=1*1qlf1pg*_ga*MjEyMTU4MDEwOC4xNjg2MTc4ODIy*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY4NzA2MDg2NS41LjAuMTY4NzA2MDg2NS4wLjAuMA..)
- Organización de Naciones Unidas programa para el medio ambiente. (16 de diciembre de 2020). Obtenido de <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/emisiones-del-sector-de-los-edificios-alcanzaron-nivel>
- Ortiz-Landeros, J., Ávalos-Rendón, T. L., Gómez-Yañez, C., & Pfeiffer, H. (noviembre de 2011). Análisis y perspectiva sobre el CO2 quimisorción en cerámica de litio mediante análisis térmico. *Revista de Análisis Térmico y Calorimetría*, 647-655. doi:10.1007/s10973-011-2063-y
- Ossa , A., & García, J. L. (27 de marzo de 2015). *Instituto de Ingeniería UNAM*. Recuperado el 19 de octubre de 2022, de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD): <http://www.ii.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyecto/Paginas/Residuosdeconstruccionydemolicion.aspx>
- Pacheco Bustos, C. A., Fuentes Pumarejo, L. G., Sánchez Cotte, É. H., & Rondón Quintana, H. A. (18 de marzo de 2017). Residuos de la construcción y demoliación (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión. Barranquilla, Barranquilla, Colombia.
- Peñalvo-López, E., Cárcel Carrasco, J., Beltrán-Rodríguez, M., & Beltrán-Rodríguez, J. M. (8 de noviembre de 2019). Estudio comparativo de la normativa europea en materia de. Valencia, España. doi:<http://dx.doi.org/10.4995/INN2019.2019.10268>
- Peters Quiroga, C. (20 de mayo de 2022). *Construcción Latinoamericana (CLA)*. Recuperado el 11 de octubre de 2022, de Residuos de la construcción y la demolición: <https://www.construccionlatinoamericana.com/news/Residuos-de-construccion-y-demolicion/8020692.article#:~:text=%E2%80%9CPor%20lo%20general%2C%20los%20residuos%20de%20construccion%20y,Son%20escasos%20los%20materiales%20que%20no%20pueden%20reciclarse.>
- Piquero, E., Colín, D., & Chinchilla, J. (2022). *Impuestos al carbono en México: desarrollo y tendencias*. Ciudad de México: Plataforma Mexicana del Carbono. Recuperado el 20 de diciembre de 2022, de <https://www.mexico2.com.mx/uploads/mexico/file/Impuestos%20al%20carbono%20en%20M%C3%A9xico%20-%20desarrollo%20y%20tendencias.pdf>
- Platt, R. (27 de March de 2017). *Construcción, pilar de la economía, el desarrollo urbano y el avance industrial*. Recuperado el 4 de March de 2023, de FIIC: <http://fiic.la/blog/2017/03/27/construccion-pilar-de-la-economia-el-desarrollo-urbano-y-el-avance-industrial/>
- Platt, R. (27 de marzo de 2017). *Construcción, pilar de la economía, el desarrollo urbano y el avance industrial*. (S. Foreno Ramírez, Entrevistador) Colombia. Recuperado el 18 de agosto de 2022, de

<http://fiic.la/blog/2017/03/27/construccion-pilar-de-la-economia-el-desarrollo-urbano-y-el-avance-industrial/>

- Poó Rubio, A. (2003). *El sector de la construcción en México*. Documento, Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapozalco, CDMX. Recuperado el 27 de agosto de 2022, de <http://hdl.handle.net/11191/250>
- Portal Ambiental. (15 de enero de 2021). *PORTAL AMBIENTAL.com.mx*. Obtenido de Industria de la construcción suma 38% de las emisiones de CO<sup>2</sup>: <https://www.portalam biental.com.mx/sabias-que/20210115/industria-de-la-construccion-suma-38-de-las-emisiones-de-co2>
- POSSEHL. (28 de abril de 2022). Tendencias de la construcción en México para 2022. Cuajimalpa, CDMX, México.
- Quang, D. V., Milani, D., & Zahra, M. A. (marzo de 2023). Una revisión de las rutas potenciales hacia las tecnologías de cero emisiones y negativas a través de la integración de energías renovables con procesos de captura de CO<sub>2</sub>. *Revista Internacional de Control de Gases de Efecto Invernadero*, 124, 103862. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583623000324>
- Quiroz, J. (2020). *Análisis del Sector de la Construcción*. Grupo Financiero monex. Recuperado el 24 de agosto de 2022, de <https://www.monex.com.mx/portal/download/reportes/200313b%20Sectorial%20-%20Construcci%C3%B3n.pdf>
- RECYTRANS. (02 de agosto de 2013). *RECYTRANS SOLUCIONES GLOBALES PARA EL RECICLAJE*. Obtenido de <https://www.recytrans.com/>: <https://www.recytrans.com/blog/clasificacion-de-los-residuos/>
- Residuos de construcción y demolición: así debe gestionarse*. (15 de March de 2023). Recuperado el 28 de April de 2023, de Eurofins Environment: <https://www.eurofins-environment.es/es/residuos-construccion-demolicion/>
- Rodríguez, L., & Meza, C. (16 de Octubre de 2018). La construcción sostenible frente a la mitigación del cambio climático. *MODULO ARQUITECTURA-CUC*, 21(1), 9-22. doi:10.17981/mod.arq.cuc.18.2.2018.01
- Rohan, B., Gurwinder, S., Mengyao, L., Dewei, C., Jiabo, Y., Ajay, K., & Ajayán, V. (15 de marzo de 2023). Carbono nanoporoso conjugado con nanoestructuras BCN con superficie oxigenada y alta área de superficie específica para mejorar el CO<sub>2</sub> captura y supercapacitancia. *Chemical Engineering Journal*, 460. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723005247>
- Román, G. E. (2021). *Estudio computacional de la estructura y reactividad de materiales porosos y su interacción con moléculas de interés farmacéutico*. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur.
- Romero Cano, L. (2018). *Preparación y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cáscaras de frutas para su uso en la remoción de metales y aplicaciones a procesos ambientales*. Tesis doctoral, Universidad de Granada, Santiago de Querétaro. Recuperado el 4 de septiembre de 2022, de

<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/259/1/Preparaci%C3%B3n%20y%20caracterizaci%C3%B3n%20de%20materiales%20absorbentes%20a%20partir%20de%20c%C3%A1scaras%20de%20frutas%20para%20su%20uso%20en%20la%20remoci%C3%B3n%20de%20metales%2>

S&P. (jul de 20 de 2020). *S&P Blog*. Recuperado el 04 de noviembre de 2022, de La economía circular en la construcción. Aplicaciones, materiales y beneficios.: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/economia-circular-construccion/#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20est%C3%A1%20C3%ADntimamente%20ligada%20a%20la,uno%20de%20los%20sectores%20que%20m%C3%A1s%20residuos%20genera.>

S. Walaa, I. E., & Kassim, N. (1 de abril de 2023). Un plan de gestión ambiental para la gestión de residuos de construcción. *Revista de ingeniería Ain Shams*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923001338>

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (6 de febrero de 2020). Ciudad de México, Ciudad de México, México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Recuperado el 02 de septiembre de 2022, de De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México, entre el 60-70% de la composición de los RCD son materiales minerales, tierras, hormigón, ladrillos, cerámicos; el resto está formado por cantidades variables de residuos

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1 de febrero de 2013). *profepa.com.mx*. Obtenido de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf>

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. CDMX: Lucart Estudio S.A de C.V. Recuperado el 15 de agosto de 2022, de [www.gob.mx/semarnat](http://www.gob.mx/semarnat)

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. México: Lucart Estudio S.A. de C.V.

Seretaría del Medio Ambiente. (2021). *NACDMX-007-RNAT-2019*. CDMX: Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Recuperado el 25 de mayo de 2023, de [http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX\\_007\\_RNAT\\_2019.pdf](http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX_007_RNAT_2019.pdf)

Shitaw, T., Yidnekachew, G. E., & Eliyas, D. (marzo de 2022). Análisis de los impactos socioeconómicos y ambientales de los residuos de construcción y las prácticas de gestión. *Heliyon*, 8(3). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022004571>

Sistema de Ingenieria y control Ambiental, S.A de C.V. (2009). *“ESTUDIO DE ANÁLISIS, EVALUACIÓN Y DEFINICIÓN DE*. CDMX: Semarnat. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD000933.pdf>

Srisuriyachot, J., McNair, S. A., Chen, Y., Barthelay, T., Gray, R., Bénézech, J., . . . Lunt, A. J. (5 de noviembre de 2022). Mapeo de deformación de la red de fibra de carbono mediante difracción

- de rayos X sincrotrón de microfoco de un compuesto reforzado. *Carbón*, 200, 347-360. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622322006650>
- Suárez-Salgado, S. S., Betancourt-Quiroga, C., Molina-Benavides, J., & Mahecha-Vanegas, L. (junio de 2019). La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión. *Entramado*, 15(1), 224-244. doi:<http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5408>
- Suélen M. Amorim, M. D. (2016). Lithium orthosilicate for CO<sub>2</sub> capture with high regeneration capacity: Kinetic study and modeling of carbonation and decarbonation reactions,. *Chemical Engineering Journal*, 388-396. doi:[doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.083](https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.083).
- Suescum Morales, D. (2022). *Materiales de construcción captadores de CO<sub>2</sub> para mitigación del*. Universidad de Córdoba, De Ingeniería Rural, Construcciones Civiles y. Editorial Universidad de Córdoba. Recuperado el 28 de mayo de 2023, de <https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
- Ting, W., Jiayuan, W., Peng, W., Jun, W., Qinghua, H., & Xiangyu, W. (20 de enero de 2018). Estimación de los costos y beneficios ambientales de los residuos de demolición utilizando la evaluación del ciclo de vida y la disposición a pagar: un estudio de caso en Shenzhen. *Revista de Producción Más Limpia*, 172, 14-26. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617324757>
- Tong, Y., Chen, S., Huang, X., He, Y., Chen, J., & Qin, C. (24 de agosto de 2022). CO<sub>2</sub> capture by Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> Sorbents: From fundamentals to applications. *Separation and Purification technology*, 121977. doi:[doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121977](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121977)
- Trujillo, K. L., & Quintero, A. P. (2021). *Análisis del manejo de Residuos de Construcción y Demolición RCD y sostenibilidad en la construcción de Bogota D.C.* Universidad la Salle, Bogota. Recuperado el 23 de mayo de 2023, de [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1921&context=ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1921&context=ing_civil)
- Universidad Autónoma de Tlaxcala. (27 de mayo de 2014). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Tlaxcala. 1, 260. (T. Morales Acoltzi, & R. Bernal Morales , Recopiladores) Tlaxcala de Xicotencalt, Tlaxcala, México. Recuperado el 25 de agosto de 2022, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170321/2014\\_tlx\\_peacc.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170321/2014_tlx_peacc.pdf)
- van den Bos, A. (2023). *México 2050 Juntos por cero emisiones netas*. Alianza para la Acción Climática, Ciudad de México. Recuperado el 14 de agosto de 2022, de [https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/aca\\_mexico\\_juntos\\_por\\_cero\\_emisiones\\_netas\\_2023.pdf](https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/aca_mexico_juntos_por_cero_emisiones_netas_2023.pdf)
- Wang, N., Feng, Y., Chen, Y., & Guo, X. (1 de junio de 2019). Sorbente a base de litio de materiales de cáscara de arroz para la producción de hidrógeno a través del reformado con vapor mejorado por sorción de etanol. *FUEL*, 245, 263-273. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119302522>
- Yang, X., Liu, W., Jian, S., Hu, Y., Wang, W., Chen, H., . . . Xu, M. (17 de junio de 2016). Preparation of Novel Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> sorbents with Superior Performance at Low CO<sub>2</sub> Concentration. *Chemistry*

*Europe*, 9(13), 1607-1613. Obtenido de <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cssc.201501699>

Yuan, W., Chen, S., Qin, C., & Hanakxu Zhou, D. P. (2 de julio de 2021). Mecanismo de reacción y cinética de la sulfatación de  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  para la adsorción de  $\text{CO}_2$  a alta temperatura. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9386-9394. doi:<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02528>

Zenix, L., Wenqiang, L., Shun, Y., Yuandong, Y., Qiuwan, L., & Shimeng, Z. (15 de octubre de 2021). Síntesis de cerámica basada en  $\text{LiSiO}$  derivada del bagazo residual para la captura cíclica de  $\text{CO}$ : investigación sobre los efectos de diferentes enfoques de pretratamiento442. *Ceramics International*, 47(20), 28744-28753. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884221020617>

Zhang, Y., Gao, Y., Pfeiffer, H., Louis, B., Sol, L., O Hare, D., & Wang, Q. (22 de febrero de 2019). Recent advances in lithium containing ceramic based sorbents for high-temperature  $\text{CO}_2$  Capture. *Journal of Materials Chemistry A*, 7962-8005. doi:10.1039/c8ta08932a

Zhentao, L., Dameng, L., Yidong, C., Yunpeng, W., & Juan, T. (1 de diciembre de 2019). Estructura de poros de adsorción y sus características fractales de carbones por adsorción/desorción de  $\text{N}_2$  y análisis de imágenes FESEM. *Fuel*, 257. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119313857>

## Anexos

### Anexo a) Clasificación de los recursos de la construcción y demolición

Esta lista procede de la decisión de la comisión por la que se establece una lista europea de residuos (Decisión 200/523/CE de la Comisión). La tierra excavada esta incluida en la lista, pero se excluye del presente protocolo.

Compendio de residuos de la construcción y demolición

|  |
|--|
| <b>17 01 HORMIGÓN, LADRILLOS, TEJAS Y MATERIALES CERÁMICOS</b>   |
| ▪ 17 01 01 Hormigón  |
| ▪ 17 01 02 Ladrillos   |
| ▪ 17 01 03 Tejas y materiales cerámicos  |
| ▪ 17 01 06 Mezclas, o fracciones separadas, de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos que contienen sustancias peligrosas |
| ▪ 17 01 07 Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, distintas de las especificadas den le código 170106         |
| <b>17 02 MADERA, VIDRIO Y PLÁSTICO</b>   |
| ▪ 17 02 01 Madera  |
| ▪ 17 02 02 Vidrio  |
| ▪ 17 02 03 Plástico  |
| ▪ 17 02 04 Vidrio, Plástico, y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas                             |
| <b>17 03 MEZCLAZ BITUMINOSAS, ALQUITRAN DE HULLA Y OTROS PRODUCTOS ALQUITRANADOS</b>   |
| ▪ 17 03 01 Mezclas bituminosa que contienen alquitrán de hulla   |
| ▪ 17 03 02 Mexclas de bituminosa distintas de las especificadas en el código 17 03 01  |
| ▪ 17 03 03 Alquitrán de hullas y productos alquitranados   |
| <b>17 04 METALES (INCLUIDAS SUS ALEACIONES)</b>  |
| ▪ 17 04 01 Cobre, Bronce, latón1   |

|  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 02 Aluminio</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 03 Plomo</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 04 Zinc</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 05 Hierro y acero</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 06 Estaño</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 07 Metales mezclados</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 09 Residuos metálicos contaminados con sustancias peligrosas</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 10 Cables que contienen hidrocarburos, alquitrán de hulla y otras sustancias peligrosas</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 04 11 Cables distintos de los especificados en el código 17 04 10</li> </ul>   |
| <p><b>17 06 MATERIALES DE AISLAMIENTO Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN QUE CONTIENEN AMIANTO</b></p>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 06 01 Materiales aislantes que contienen amianto</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 06 03 Otros materiales de aislamiento que consisten en sustancias peligrosas o contienen dichas sustancias</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 06 04 Materiales de aislamiento distintos en los especificados en los códigos 17 06 01 y 17 06 02</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 06 05 Materiales de construcción que contienen amianto</li> </ul>  |
| <p><b>17 08 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN A BASE DE YESO</b></p>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 08 01 Materiales de Construcción a base de yeso contaminados con sustancias peligrosas</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 08 02 Materiales de construcción a base de yeso distintos de los especificados en el código 17 08 01</li> </ul>  |
| <p><b>17 09 OTROS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b></p>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 09 01 Residuos de construcción y demolición que contienen mercurio</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 09 02 Residuos de construcción y demolición que contienen PCB (por ejemplo, sellantes que contienen PCB, revestimientos de suelos a base de resinas que contienen PCB, condensadores que contienen PCB)</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 17 09 03 Otros residuos de construcción y demolición (incluidos residuos mezclados) que contienen sustancias peligrosas</li> </ul>  |

- 17 09 04 Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03

## Anexo b) Propiedades Peligrosas

El Anexo b) Describe 15 propiedades (numeradas de la H1 a la H15) de los residuos que los convierten en peligrosos. El cuadro siguiente incluye un resumen de las propiedades peligrosas.

| <b>Propiedades peligrosas</b> |  |
|-------------------------------|--|
| H1                            | Explosivo  |
| H2                            | Comburente   |
| H3                            | Inflamable   |
| H4                            | Irritante-irritación cutánea y lesiones oculares   |
| H5                            | Toxicidad específica en determinados órganos (Stop en su sigla inglesa)<br>/Toxicidad por aspiración   |
| H6                            | Toxicidad aguda  |
| H7                            | Carcinógeno  |
| H8                            | Corrosivo  |
| H9                            | Infeccioso   |
| H10                           | Tóxico para la reproducción  |
| H 11                          | Mutágeno   |
| H 12                          | Liberación de un gas de toxicidad aguda  |
| H 13                          | Sensibilizante   |
| H 14                          | Ecotóxico  |
| H15                           | Residuos que pueden presentar una de las características de peligrosidad antes mencionadas que el residuo original no presentaba directamente. |

Los residuos peligrosos de construcción y demolición comprenden el suelo contaminado y dragado, materiales y sustancias que pueden incluir componentes adhesivos, sellantes o másticos (inflamables, tóxicos o irritantes), emulsiones de alquitrán (tóxico, cancerígeno), materiales a base de amianto que contienen fibras que pueden pasar las vías respiratorias (tóxico, cancerígeno), madera tratada con fungicidas, pesticidas, etc. (tóxico, ecotóxico, inflamable), revestimientos halogenados ignífugos (tóxicos, ecotóxico, cancerígeno), equipamiento que contiene policlorobifenilos (ecotóxico, cancerígeno), sistemas de iluminación que contienen mercurio (tóxico, ecotóxico), sistemas con clorofluorocarbonos, materiales de construcción a base de yeso (que pueden presentar una posible fuente de sulfuro en los vertederos, tóxicos, inflamable), contenedores para sustancias peligrosas (solventes, pinturas, adhesivos, etc.) y el embalaje de residuos que puedan haber sido contaminados. Normalmente estos materiales se encuentran en las obras de demolición, principalmente debido a la ausencia de legislación que regule el uso de ciertos materiales peligrosos, como el amianto y el plomo. Sin embargo, no debe dejarse de lado la reutilización de material, pero en algunos casos estos proyectos también pueden generar residuos peligrosos similares (Comisión Europea, 2016).