

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

## TRABAJO DE DIPLOMA

# Calculadora de impactos ambientales y financieros de la producción del cemento de bajo carbono (LC3)

**Autora: Ana Esther Montero Betancourt**

**Tutora: Dr. C. Sofía Sánchez Berriel**

Santa Clara, Diciembre, 2023  
Copyright©UCLV

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Construcciones

Academic Department of Civil Engineering

## **DIPLOMA THESIS**

# **Calculator of environmental and financial impacts of low carbon cement production (LC3)**

**Author: Ana Esther Montero Betancourt**

**Thesis Director: Dr. C. Sofía Sánchez Berriel**

Santa Clara Diciembre, 2023  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



## ACTA DE CONFORMIDAD PARA ESTUDIANTES DE PREGRADO

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Por una parte: Ana Esther Montero Betancourt estudiante de la carrera de: Ingeniería civil en la facultad de: Construcciones en lo adelante **EL ESTUDIANTE**. Con número de identidad permanente: 0003287292 o pasaporte: \_\_\_\_\_ Y por otra parte Armando J Velázquez Rangel, jefe del Departamento Docente de: Ingeniería Civil en la ya mencionada facultad, en lo adelante **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**, y Sofía Sánchez Berriel profesor encargado de tuturar el Trabajo de Diploma **DEL ESTUDIANTE**, en lo adelante **EL TUTOR**.

Reconocen que:

- I. A **EL ESTUDIANTE** se le ha aprobado como tema de investigación para su Trabajo de Diploma titulado Calculadora de impactos ambientales y financieros de la producción del cemento de bajo carbono (LC3).
- II. **EL ESTUDIANTE** no divulgará información concerniente a la investigación, tanto durante el desarrollo como tras la culminación de esta sin la debida autorización **DEL TUTOR** o **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**.
- III. Que el Trabajo de Diploma fruto de la labor investigativa de **EL ESTUDIANTE** y la asesoría de **EL TUTOR**, resulta de **TITULARIDAD EXCLUSIVA** de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- IV. **EL ESTUDIANTE** una vez aprobada su tesis para la defensa, depositará una copia electrónica de la misma en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- V. A partir de la defensa y aprobación del Trabajo de Diploma, la publicación total, parcial o la elaboración de cualquier obra que se derive de esta investigación por parte de **EL ESTUDIANTE**, contará con la coautoría de **EL TUTOR** y viceversa, resultando de referencia obligada esta obra en cualquier otra que se elabore. El incumplimiento de esta cláusula, puede llevar consigo el inicio de procesos de plagio. Todo lo anterior de acuerdo a la normativa de Derecho de Autor vigente en Cuba.

Y para que así conste se firma la presente en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, a los 27 días del mes de noviembre del año 2023

EL ESTUDIANTE

JEFE DE DEPARTAMENTO

TUTOR

CONSULTANTE

## PENSAMIENTO

*“No es posible esperar, pues mañana podría ser demasiado tarde. Nuestras decisiones de hoy no pueden convertirse en letra muerta; han de tener un seguimiento concreto y resultar en la creación de efectivos instrumentos de trabajo conjunto”*

*Fidel Castro*

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a los que aman y fundan, a los que están seguros que hay sobre la tierra más flores que serpientes, a los que ven en el cielo más nubes azules que oscuridades anunciadoras de huracán.

También lo dedico a Martí, al Che, a Fidel, a todos los que abonaron con su sudor y su sangre el sendero glorioso de la Patria, y a los que hoy desandamos con sus pasos el camino a la utopía de hacer un mundo mejor.

A mi familia: padres, hermano, mis abuelos, mis tías y muy en especial a mi tío Pedro, mi bisabuela Anita, mi abuela Argelia que siempre están presente en mí.

A todas aquellas personas que aportaron su granito de arena dándome siempre ánimo para seguir hasta el final de la meta, en especial a mami y papi, y la tía Osiri.

## AGRADECIMIENTOS

***“No hay hermosura mayor que el agradecimiento, ni paga más merecida que la que sirve una nación a los que se quedaron por defenderla sin piernas ni brazo”***

***José Martí***

Agradezco en primer lugar a la Revolución por darme la oportunidad de elevar mi nivel escolar y estar mejor preparada para enfrentar el desafío de la educación y formación de las nuevas generaciones de cubanos.

A todas las personas que colaboraron para llevar a término este trabajo, mi tutora Sofia Sánchez que fue capaz de iluminar con sus conocimientos y tenacidad el camino a seguir, por confiar en mí y apoyarme desde el primer momento y hacer que me enamorara de la investigación. A mis profesores por inspirar el amor que siento por esta carrera.

A mis padres por tantos sacrificios, mis abuelos, mi hermano, mis tías Nancy y Violeta por inspirarme a crecer, por su esmerada educación y ayuda para ser una joven de bien.

A mi esposo que estuvo presente en el último momento de esta hermosa etapa de mi vida dándome apoyo.

A la tía Osiris por su gran ayuda y sus consejos para lograr ser una profesional.

A mis compañeras Dariana, Leidy, Ledianna y Roxana por su compañía y ayudaron a dar vida a este sueño.

A todos, gracias.

## RESUMEN

La sostenibilidad de la industria cementera constituye una necesidad ya que emite grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Varias acciones se han trazado con este objetivo como: el uso de combustibles alternativos, mejoras tecnológicas, secuestro y captura de carbono y la reducción del factor clínquer. El Cemento de Bajo Carbono (LC3, por sus siglas en inglés) es un producto novedoso que permite reducir el factor de clínquer en altos niveles utilizando recursos minerales abundantes en la corteza terrestre. Ha demostrado contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible al reducir en un 35% aproximadamente las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación al Cemento Portland Ordinario. El LC3 es un producto reconocido por la ciencia pero aún se trabaja en su diseminación en la industria. El siguiente trabajo investigativo tiene como objetivo contribuir a la evaluación de los impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento bajo carbono (LC3) a través de la creación de una herramienta calculadora y de esta manera contribuir a su diseminación. Para ello, se analizan los principales fundamentos teóricos – metodológicos asociados al cálculo de impactos ambientales y financieros, se diseña una calculadora de los impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento LC3 y se valida a través de un caso de estudio. Los principales resultados que se obtienen son la sistematización sobre los principales fundamentos teóricos asociados al cálculo de impactos ambientales y financieros y la herramienta de cálculo. Se implica métodos científicos tanto nivel teórico como empírico para su realización.

**Palabras clave:** herramienta, impacto ambiental, impacto financiero, calculadora, desarrollo sostenible, economía circular.

## Abstract

The sustainability of the cement industry is a necessity since it emits large amounts of CO<sub>2</sub> into the atmosphere. Several actions have been outlined with this objective, such as: the use of alternative fuels, technological improvements, carbon sequestration and capture, and the reduction of the clinker factor. Low Carbon Cement (LC3) is a novel product that allows the clinker factor to be reduced to high levels using abundant mineral resources in the Earth's crust. It has proven to contribute to sustainable development objectives by reducing CO<sub>2</sub> emissions by approximately 35% compared to Ordinary Portland Cement. LC3 is a product recognized by science but work is still being done on its dissemination in the industry. The following investigative work aims to contribute to the evaluation of the environmental and financial impacts associated with the production of low carbon cement (LC3) through the creation of a calculator tool and in this way contribute to its dissemination. To do this, the main theoretical-methodological foundations associated with the calculation of environmental and financial impacts are analyzed, a calculator of the environmental and financial impacts associated with the production of LC3 cement is designed and validated through a case study. The main results obtained are the systematization of the main theoretical foundations associated with the calculation of environmental and financial impacts and the calculation tool. Scientific methods are involved both at a theoretical and empirical level for its realization.

**Keywords:** tool, environmental impact, financial impact, calculator, sustainable development, circular economy.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO I: SISTEMATIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES FUNDAMENTOS TEÓRICO - METODOLÓGICOS ASOCIADOS AL CÁLCULO DE IMPACTOS AMBIENTALES Y FINANCIEROS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. El desarrollo sostenible como paradigma .....</b>	<b>5</b>
1.1.1. La Agenda 2030 y los ODS .....	6
1.1.2. Economía circular.....	10
<b>1.2. La sostenibilidad en la industria cementera.....</b>	<b>14</b>
1.2.1. Alternativas para reducir el impacto ambiental del cemento .....	18
<b>1.3. Cálculo de impactos ambientales y financieros en la industria .....</b>	<b>39</b>
1.3.1. <i>Calculadoras de CO<sub>2</sub></i> .....	39
1.3.2. <i>Calculadoras financieras</i> .....	43
<b>CAPÍTULO II: PROPUESTA DE CALCULADORA DE IMPACTOS AMBIENTALES Y FINANCIEROS ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DEL CEMENTO DE BAJO CARBONO (LC3).....</b>	<b>45</b>
<b>2.1. Procedimiento de creación de la herramienta.....</b>	<b>45</b>
<b>2.2. Calculadora de los impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento de bajo carbono (LC3) .....</b>	<b>50</b>
2.2.1. Ambiente operacional de la herramienta.....	54
<b>CAPÍTULO III: APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA. ESTUDIO DE CASO: COSTA DE MARFIL.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1. Supuestos para la evaluación económica y ambiental del LC3 en Costa de Marfil.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2. Resultados de la aplicación de la herramienta propuesta .....</b>	<b>64</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>71</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>77</b>

## INTRODUCCIÓN

La industria cementera hoy en día ha demostrado ser una de las industrias de mayor producción y, aunque es una industria intensiva en capital y energía, reporta un significativo aumento de la eficiencia energética. Es una de las industrias con mayor impacto ambiental y constituye la base para el sector de la construcción debido a su protagonismo en la composición del hormigón (IPCC, 2021). Aunque otros materiales como el acero reportan mayores emisiones en su producción, el cemento es uno de los materiales constructivos más contaminantes por sus altos niveles de consumo.

Varias investigaciones se han realizado para mitigar los daños que la producción de cemento ocasiona al medio ambiente y para potenciar la reducción de su consumo energético. Uno de los resultados más relevantes y satisfactorios ha sido la creación del cemento LC3<sup>1</sup>.

El Cemento bajo carbono ha sido desarrollado por un equipo de especialistas de Cuba, India y Suiza a través de un proyecto de colaboración internacional. Dicho equipo internacional ha demostrado que este cemento tiene menor consumo energético, costos y daños al medio ambiente en comparación con el Cemento Portland, esto se debe al alto nivel de sustitución del clínquer que alcanza un 45%, un 30% de arcilla calcinada (caolinita) de baja pureza y 15% de caliza en su estado natural.

En nuestro país se lleva cabo este proyecto a través de investigaciones en el Centro de Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) liderado por el profesor Fernando Martirena de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Este equipo, unido al resto del equipo internacional del proyecto, ha demostrado la viabilidad de este nuevo material (LC3) a través de la publicación de resultados científicos en numerosas revistas y el intercambio con la comunidad científica y la industria a través de eventos, conferencias internacionales y reuniones específicas llamadas “LC3 Day” (Antoni et al. 2012), (Sánchez et al. 2016), (Cancio et al., 2017), (Scrivener et al. 2019).

No obstante, todavía es necesario sensibilizar a la industria para lograr la producción a gran escala de este cemento. Numerosas acciones son necesarias en la búsqueda de

---

<sup>1</sup> Para más información visitar la página <http://www.lc3.ch>

este objetivo. La creación de una herramienta que permita calcular los principales impactos positivos de producir LC3, dígase reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y aumentar la rentabilidad financiera, puede tributar en gran medida a que pequeños, medianos y grandes productores conozcan las ventajas de este cemento y así ayudar a su diseminación en el mundo.

### **Problema científico**

¿Cómo contribuir a la evaluación de los impactos ambientales y financieros de la producción del cemento bajo carbono?

### **Objeto de investigación**

La producción del cemento LC3.

### **Campo de acción**

Cálculo de impactos ambientales y financieros.

### **Objetivo general**

Crear una calculadora de los impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento de bajo carbono (LC3).

### **Objetivos específicos**

1. Analizar los principales fundamentos teórico - metodológicos asociados al cálculo de impactos ambientales y financieros en la industria cementera.
2. Diseñar una calculadora de los impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento de bajo carbono (LC3).
3. Validar la calculadora de impactos ambientales y financieros que se propone a través de un caso de estudio.

### **Hipótesis**

Si se diseña una herramienta que permita calcular los impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento de bajo carbono (LC3) es posible contribuir a la diseminación de esta tecnología en el mundo.

## **Novedad científica**

La novedad científica de la investigación radica en la creación de una herramienta que calcula con enfoque integrador y sistémico los impactos ambientales y financieros de la producción del cemento con especial énfasis en la producción del cemento LC3.

## **Aportes**

Desde el punto de vista teórico-metodológico, se realiza un análisis crítico de los antecedentes en la literatura asociados a las herramientas de cálculo de impactos ambientales y financieros de la producción del cemento.

Desde el punto de vista económico-social, permite fundamentar estrategias de inversión asociadas a la introducción del LC3 a través del cálculo de indicadores de rentabilidad financiera.

Desde el punto de vista medioambiental, permite fundamentar estrategias de reducción de emisiones en la industria cementera a través del cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## **Métodos Científicos:**

Del nivel teórico: análisis-síntesis, histórico-lógico, inducción-deducción, teórico-práctico.

Del nivel empírico: observación, revisión de documentos y de los resultados de la experimentación, entrevistas, técnicas estadísticas (base de datos), consulta a expertos.

## **Estructura de los capítulos:**

El informe de investigación se estructura esencialmente en tres capítulos:

- Capítulo I: Sistematización de los principales fundamentos teórico - metodológicos asociados al cálculo de impactos ambientales y financieros en la industria cementera.
- Capítulo II: diseño de la calculadora de los impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento de bajo carbono (LC3).
- Capítulo III: Validación mediante su aplicación a diferentes casos de estudio.

## **Principales resultados**

- Sistematización sobre los principales fundamentos teóricos asociados al cálculo de impactos ambientales y financieros en la industria cementera.
- Creación de la herramienta de cálculo

### **Estructura del trabajo**

Resumen: Se expone abreviadamente en qué consiste el trabajo para dar una idea general de lo que se hizo en el transcurso de esta Tesis de Diploma. Introducción: Se esbozan los antecedentes al trabajo.

Capítulo I: Sistematización de los principales fundamentos teórico - metodológicos asociados al cálculo de impactos ambientales y financieros en la industria cementera.

Capítulo II: Propuesta de calculadora de impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento de bajo carbono (LC3).

Capítulo III: Aplicación de la herramienta propuesta. Estudio de caso: Costa de Marfil.

Recomendaciones.

Referencias bibliográficas: se conformó con el gestor bibliográfico EndNote.X4

Anexos

# **CAPÍTULO I: SISTEMATIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES FUNDAMENTOS TEÓRICO - METODOLÓGICOS ASOCIADOS AL CÁLCULO DE IMPACTOS AMBIENTALES Y FINANCIEROS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA**

En el presente capítulo se exponen fundamentos teóricos-metodológicos relacionados con el cálculo de impactos ambientales y financieros en la industria cementera a partir de la revisión de un amplio volumen bibliográfico, tomando en consideración el criterio de un conjunto de autores en torno a la problemática en cuestión.

## **1.1. El desarrollo sostenible como paradigma**

El concepto de desarrollo construido en el mundo occidental estaba basado en el paradigma mecanicista y racionalista, desde una visión de dominio sobre la naturaleza, y dejaba a un lado el cuidado del medio ambiente, pues proponía su uso como objeto de explotación sin límites. La construcción de un nuevo paradigma exige un cambio radical en el pensamiento y las actitudes de los seres humanos. En este sentido el paradigma ambiental exige ver al desarrollo como un proceso en el cual se evitan o minimizan los impactos sobre la naturaleza, de manera que los descendientes reciban un mundo igual o mejor que el nuestro.

El concepto de desarrollo sostenible concibe el desarrollo como un proceso armónico, donde la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación del cambio tecnológico y las transformaciones institucionales deben corresponderse con las necesidades de las generaciones presentes y futuras. Así, se presenta el desarrollo como un proceso que requiere un progreso global, tanto en materia económica y social como los órdenes ambiental y humano (Miranda, 2007)

La sostenibilidad es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social. (Acciona, 2020)

El desarrollo sostenible es un concepto que aparece por primera vez en 1987 con la publicación del informe Brundtland, que alertaba de las consecuencias medioambientales negativas del desarrollo económico y la globalización y trataba de

buscar posibles soluciones a los problemas derivados de la industrialización y el crecimiento de la población.

Muchos de los retos a los que se enfrenta el ser humano, tales como el cambio climático, la escasez de agua, las desigualdades o el hambre, solo pueden resolver desde la perspectiva global y previendo el desarrollo sostenible: una apuesta por el progreso social, el equilibrio medioambiental y el crecimiento económico.

Como una nueva hoja de ruta para lograr un desarrollo sostenible, Naciones Unidas aprobó la Agenda 2030 que contiene los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), una serie de metas comunes para proteger el planeta y garantizar el bienestar de todas las personas. Estas metas comunes necesitan la implicación activa de las personas, las empresas, las administraciones y los países de todo el mundo (Caballero, 2023). Por su importancia los ODS y la Agenda 2030 se analizan con mayor profundidad en el próximo epígrafe.

#### 1.1.1. La Agenda 2030 y los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas son el esfuerzo global más importante hasta el momento para promover el desarrollo sostenible global. Los 17 ODS (United Nations, 2022) pueden resumirse en:

1. Fin de la pobreza: poner fin a la pobreza en todas sus formas, en todo el mundo; mediante el compromiso de no dejar a nadie atrás.
2. Hambre cero: busca poner fin al hambre, lograrla seguridad alimentaria y la mejor de la nutrición y promover la agricultura sostenible.
3. Salud y bienestar: garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.
4. Educación de calidad: garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.
5. Igualdad de género: lograr la igualdad entre los géneros y el empoderamiento de todas las mujeres y niñas.
6. Agua limpia y saneamiento: garantizar la disponibilidad de agua y su ordenación sostenible y el saneamiento para todos.

7. Energía asequible y no contaminante: garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.
8. Trabajo decente y crecimiento económico: promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.
9. Industria, innovación e infraestructura: construir infraestructura resiliente, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.
10. Reducción de las desigualdades: reducir la desigualdad en y entre los países.
11. Ciudades y comunidades sostenibles: lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
12. Producción y consumo responsables: garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.
13. Acción por el clima: adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
14. Vida submarina: conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible.
15. Vida de ecosistemas terrestres: proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una ordenación sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas: promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles.
17. Alianzas para lograr los objetivos: fortalecer los medios de ejecución y revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible

Aunque los 17 objetivos están interconectados en un sistema de manera que tributen al desarrollo, en la presente investigación se hace énfasis en los objetivos 11, 12 y 13 que guardan especial relación con el tema objeto de estudio: la sostenibilidad en las viviendas.

*Objetivo 11: “Ciudades y comunidades sostenibles”*

Hoy en día la mitad de la humanidad vive en las ciudades y se estima que para el 2030 cerca del 60% de la población mundial vivirá en zonas urbanas; las ciudades del mundo ocupan solo el 2% de la superficie terrestre, sin embargo, representan entre 60%-80% del consumo de energía y 75% de las emisiones de carbón (United Nations, 2022). La rápida urbanización ejerce presión sobre suministros de agua potable, el alcantarillado, las condiciones de vida y la salud pública. (Desafíos de la agenda 2030, 2019)

#### *Objetivo 12: “Producción y consumo responsables”*

Los patrones de consumo presentes en la economía actual conllevan al consumo irracional de los recursos y al agotamiento de los mismos. Se ha pronosticado que, en caso que la población mundial alcance los 9,6 millones para el 2050, se necesitaría el equivalente a casi tres planetas para proporcionar los recursos naturales necesarios con el fin de mantener los estilos de vida actuales (United Nations, 2022). Por tanto, la producción y consumo responsables, sostenibles y racionales es una necesidad en todos los sectores productivos. (ONU/CEPAL, 2019)

#### *Objetivo 13: “Acción por el clima”*

Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la actividad humana están impulsando el cambio climático y siguen incrementándose hasta alcanzar valores récord. Las emisiones mundiales de dióxido de carbono han aumentado en casi 50% desde 1990. Las concentraciones de dióxido de carbono han aumentado 40% desde tiempos pre-industriales, principalmente de las emisiones de combustibles fósiles y, en segundo lugar, de las emisiones netas por cambio de uso de la tierra (United Nations, 2022). El océano ha absorbido aproximadamente 30% del dióxido de carbono antropogénico emitido, lo que ha provocado su acidificación. Cada una de las tres últimas décadas ha sido sucesivamente más caliente en la superficie terrestre que cualquier década anterior desde 1850. En el Hemisferio Norte, el período de 30 años entre 1983-2012 fue probablemente el más cálido de los últimos 1.400 años. De 1880 a 2012, la temperatura promedio global aumentó en 0,85°C. Si no se actúa, se prevé que la temperatura media de la superficie terrestre aumente durante el siglo XXI y es probable que aumente en 3 grados Celsius durante este siglo –con algunas zonas del mundo, incluso en los trópicos y sub-trópicos, donde se espera un calentamiento aún mayor. Las personas más pobres

y vulnerables están siendo las más afectadas. (Desafíos de la agenda 2030 N°132cprimavera 2019)

El diagrama de la Figura 1.1, revela que los 10 primeros países del índice de los ODS están muy lejos del cuadrante de desarrollo sostenible global en la parte inferior derecha; los 10 últimos países tienen una huella baja y un IDH bajo. Para decirlo en términos estadísticos, si el logro de los ODS no estuviera correlacionado con el nivel de demanda de recursos de cada país, la probabilidad de que 19 de los 20 primeros países clasificados en el índice de los ODS tuvieran una Huella superior a 5 hag por persona sería inferior a 1/ 5.000 de una billonésima. (La excepción de la Huella de menores de 5 hag entre los 20 países principales es el Reino Unido, con una Huella de 4,9 hag por persona. También tenga en cuenta que el Reino Unido, según la edición de las Cuentas Nacionales de Huella de 2017, tenía una Huella de 5,1 hag por persona. en 2013.)

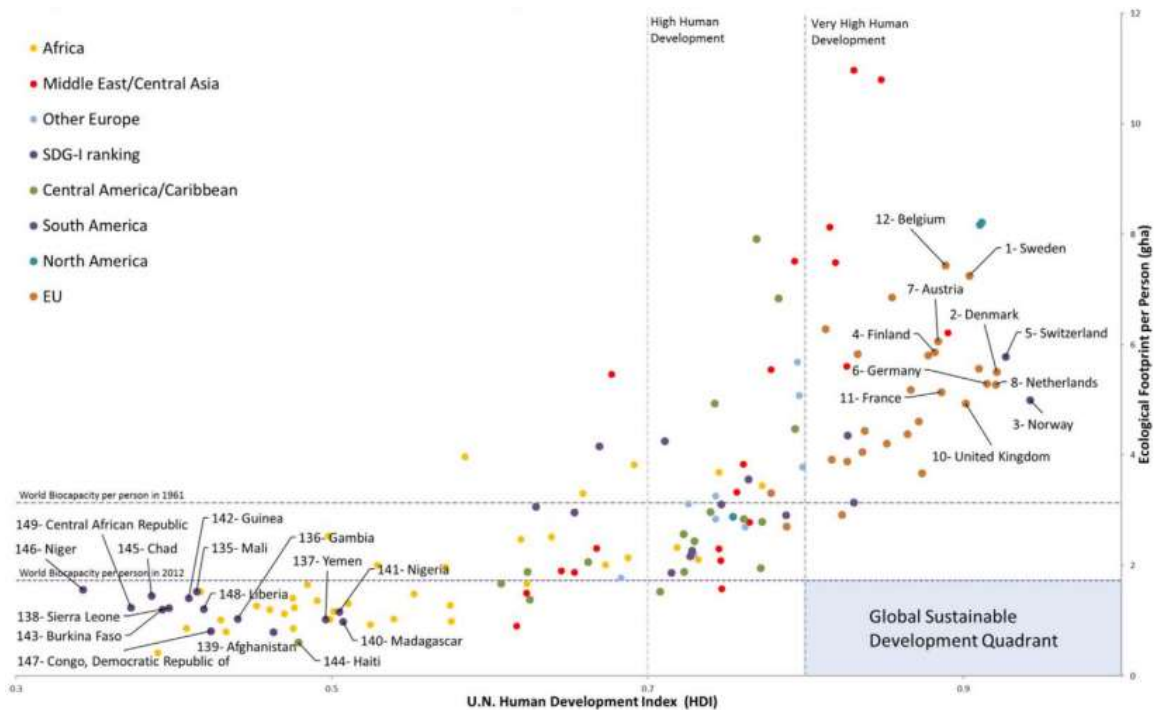


Figura 1.1. Relación IDH con Huella Ecológica por regiones, 2017

Fuente: Wackernagel M, Hanscom L and Lin D (2017) Making the Sustainable Development Goals Consistent with Sustainability. Front. Energy Res. 5:18.doi: 10.3389/fenrg.2017.00018

Adicionalmente, la Agenda 2030 de las Naciones Unidas está completamente alineada con la transición hacia un modelo económico más circular. Así, los ODS se benefician de

la economía circular y esta de los ODS, por lo que hay un beneficio mutuo. Si se analizan estas metas en los ODS citados todavía será más fácil de visualizar las conexiones con la circularidad.

La economía circular está presente de forma implícita en diversos ODS (ODS 6: Agua limpia y saneamiento, ODS 7: Energía asequible y no contaminante, ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico, ODS 12: Producción y consumo responsables, ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres) y otros 3 están relacionados indirectamente (ODS 1: Fin de la pobreza, ODS 2: Hambre cero, ODS 14: Vida submarina).

Particularmente en el sector de la construcción y en las viviendas, la unión de acciones asociadas a los ODS y la circularidad puede maximizar la sostenibilidad.

### 1.1.2. Economía circular

Para el funcionamiento de nuestra economía, en la actualidad extraemos materiales de la Tierra, fabricamos productos a partir de ellos y finalmente lo desechamos como residuos. A este proceso se le conoce como economía lineal (extracción, fabricación, utilización y eliminación) y su acción desmedida ha contribuido al agotamiento de una serie de recursos naturales y de los combustibles fósiles (Ellen MacArthur Foundation, 2023). Por lo tanto, un nuevo paradigma denominado “economía circular”, surge para proponer un nuevo origen de sociedad que utiliza y optimiza los stocks y los flujos de materiales, energía y residuos y su objetivo es la eficiencia de usos de recursos.

En resumen, la economía circular es aquel modelo económico que:

- Utiliza la mínima cantidad de recursos naturales necesarios (incluidos el agua y la energía) para satisfacer las necesidades requeridas en cada momento.
- Selecciona de forma inteligente los recursos, evitando los no renovables y las materias primas críticas, y favorece la utilización de materiales reciclados siempre que sea posible y cumplan para una finalidad determinada.
- Gestiona eficientemente los recursos utilizados, manteniéndolos y recirculándolos en el sistema económico el mayor tiempo posible, generando menos residuos y evitando utilizar recursos que sean innecesarios.

- Reduzca los impactos ambientales, además de que permita restituir el capital natural y fomentar su regeneración.

Los beneficios de la economía circular son múltiples (Repsol, 2023), dentro de los cuales se destacan:

- Protege al medio ambiente: Reduce las emisiones y minimiza el consumo de recursos naturales y disminuye la generación de residuos.
- Beneficia la economía local: Puede beneficiar la economía local a fomentar modelos de producción basados en la reutilización de residuos cercanos como materia prima.
- Fomenta el empleo: Estimula el desarrollo de un nuevo modelo industrial más innovador y competitivo, así como mayor crecimiento económico y más empleo.
- Favorece la independencia de recursos: La reutilización de recursos locales puede favorecer una menor dependencia de la importación de materias primas.

Uno de los motivos para avanzar y hacer un cambio a una economía circular es por el aumento de la demanda de materias primas y la escasez de recursos. Varias materias primas cruciales son finitas, como la población mundial crece, la demanda también aumenta. El impacto al clima es otro de los factores. La extracción y el uso de materias primas tienen importantes consecuencias medioambientales, aumenta el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que un uso más inteligente de las materias primas puede reducir las emisiones de contaminación. Podría generar beneficios como reducir la presión sobre el medioambiente, ya que actualmente la producción de los materiales que se usan diariamente es responsable del 45% de las emisiones del CO<sub>2</sub>, mejorar la seguridad de suministro de materias primas, estimular la competitividad, la innovación, el crecimiento económico (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

El diagrama del sistema económico circular, conocido como diagrama de mariposa, ilustra el flujo continuo de materiales en una economía circular. Tal como se observa en la Figura 1.2, de lo que trata la economía circular es de generar la mayor cantidad de ciclos dentro de un mismo proceso productivo de forma que se maximice el

aprovechamiento y la vida de los recursos. Esto a su vez se refleja en la reducción de los impactos ambientales asociados a dicho proceso durante todo su ciclo de vida.

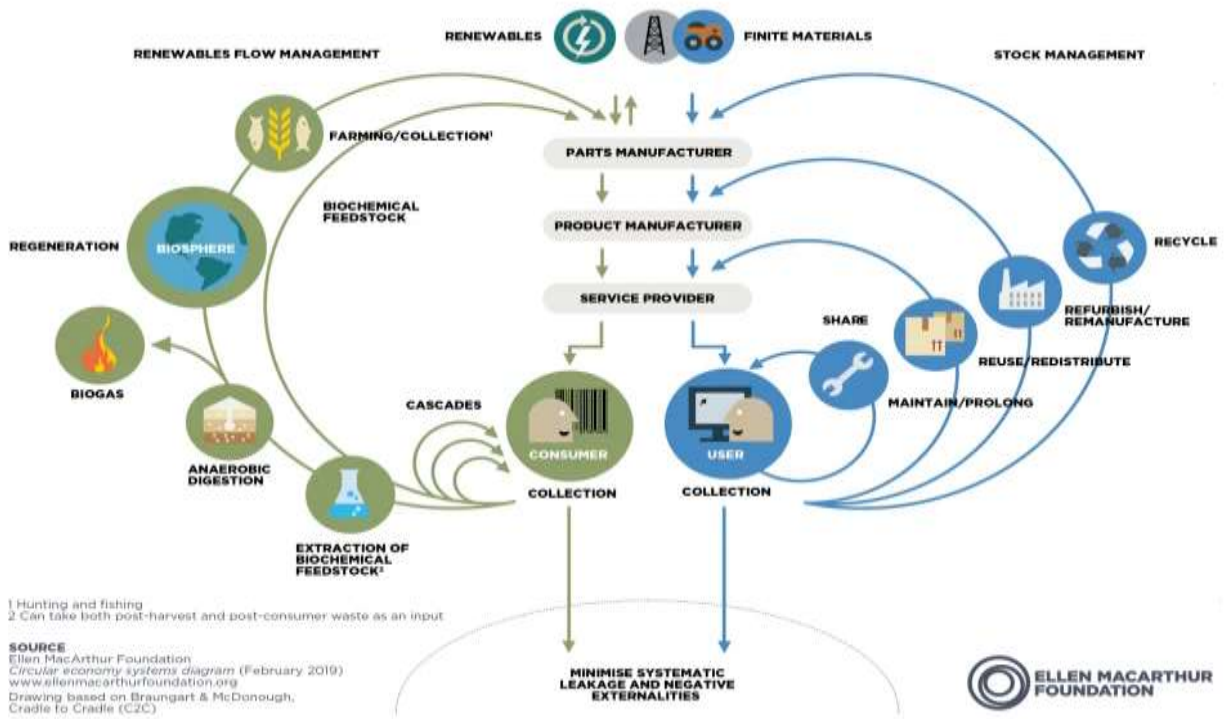


Figura 1.2. Diagrama de sistemas de la economía circular  
 Fuente: Fundación Ellen MacArthur.

Hay dos ciclos principales: el ciclo técnico y el ciclo biológico. En el ciclo técnico, los productos y materiales se mantienen en circulación a través de procesos como la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje. En el ciclo biológico, los nutrientes de los materiales biodegradables se devuelven a la Tierra para regenerar la naturaleza.

El sector de la construcción se presenta como uno de los sectores claves de nuestra economía, que movilizan recursos naturales, especialmente no renovables, siendo este el sector que más recursos consume y más residuos genera es necesario la aplicación de la economía circular, pues persigue la disminución de desechos, el reciclaje de materias y su posterior de reutilización; en otras palabras; buscar incrementar el ciclo de vida de los recursos y también el ciclo de vida de los edificios.

Toda la cadena de valores dentro del sector de la construcción consume recursos y genera residuos. Desde la producción de materiales hasta la demolición de la

infraestructura. Los proyectos de la construcción pensado desde la economía circular prestan especial atención y cuidado al proceso de separación de sobrante. (Econava, 2022).

Según un estudio realizados por CONAMA en el año 2018 se conoce que la construcción y el uso de los edificios en la Unión Europea representan:

- El 40% del consumo final de energía.
- El 35% de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- El 50% de todos los materiales extraídos.
- El 30% del consumo de agua.
- El 35% del total de los residuos generados.
- El 54% de los materiales de demolición son enviados a vertedero, mientras que en algunos países sólo son enviados a vertedero un 6%.
- La edificación produce el 71% de los residuos de construcción y demolición producidos frente al 29% de la obra civil.

Al aplicar los principios de la economía circular a la forma en que diseñamos edificios, infraestructura y otros elementos del entorno construido, podemos reducir las emisiones de efecto invernadero, al tiempo que creamos áreas urbanas más habituales, productivas y convenientes. Una economía circular podría disminuir las emisiones globales de CO<sub>2</sub> de los materiales de construcción en un 38% para el 2050, al reducir la demanda de acero, aluminio, cemento y plástico. También podría hacer que el sector sea más resistente a las interrupciones de la cadena de suministro y a la volatilidad de los precios de las materias primas (Ellen MacArthur Foundation, 2023)

Adoptar un enfoque de economía circular en un sector de alto crecimiento y desperdicio, como el entrono construido, presenta una gran oportunidad para capturar más valor. Para los inversores y los clientes de la construcción, esto significa una mayor contribución para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de carbón (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

## **1.2. La sostenibilidad en la industria cementera**

En 2019 las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria del cemento alcanzaron 2,4 Gt, lo que evidencia la urgencia del desarrollo bajo en carbono de dicha industria. Más del 90% de los países y regiones del mundo producen cemento, y la producción global del cemento alcanzó 4,1 Gt en 2019. China, India, Unión Europea y Estados Unidos son los principales productores de cemento; sus proporciones representan el 56.1%, 7.8%, 4.4% y 2.2% respectivamente. La producción de una tonelada de cemento emite un promedio entre 0.5 y 0.6 Toneladas de CO<sub>2</sub>, y la emisión real de carbono depende de numerosos factores, como la proporción del clínquer con respecto al cemento, el proceso de fabricación, la recuperación de calor y las materias primas y el tipo de combustible (Journal of Environmental Sciences, s.f).

La apuesta de las empresas cementeras por la sostenibilidad no es compromiso nuevo. “Hace años que la industria del cemento trabaja activamente en la mejora de su comportamiento ambiental y ha conseguido reducir sus emisiones totales de CO<sub>2</sub> un 30% (Zaragoza, 2023). No obstante, todavía existen reservas de eficiencia que permitirán trazar metas más ambiciosas como la de producir hormigones con cero carbón para 2100 (GCCA, 2021).

La Iniciativa de Sostenibilidad del Cemento (CSI), en colaboración con la Agencia Internacional de Energía (AIE), han lanzado una hoja de ruta tecnológica titulada “Transición baja en carbono en la industria del cemento”, su objetivo es identificar y desarrollar esfuerzos de colaboración internacional y proporcionar evidencia para que los tomadores de decisiones de los sectores públicos y privado avancen hacia una economía más sostenible, sector de cemento sostenible que pueda contribuir a los objetivos climáticos a largo plazo. El documento proporciona un camino hacia la disminución de la industria del cemento. Las emisiones de CO<sub>2</sub> un 24% por debajo de los niveles actuales para el 2050. (World Business Council for Sustainable, 2018)

Existe una estrategia común, sustentada en cuatro líneas de trabajo fundamentales (Hendriks et al., 1998; WBCSD 2009a, 2009b): la mejora en la eficiencia energética de los procesos, el uso de combustibles alternativos, la reducción del factor de clínquer

mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios y la captura y almacenaje de CO<sub>2</sub>.

Más tarde, nueve empresas líderes en el sector del cemento y el hormigón lanzaron una nueva asociación dedicada al desarrollo y fortalecer la contribución del sector a la sostenibilidad de la construcción, Nace GCCA, la Asociación Global del Cemento y Hormigón. Al respecto Thomas Guillot, CEO de la GCCA ha declarado que “antes de esta iniciativa teníamos acciones individuales, ambición y visión. Ahora además tenemos compromiso”.

La industria ha tenido sus avances y ha logrado reducciones proporcionales de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de cemento del 20 % en las últimas tres décadas. Dicho plan de trabajo pone de manifiesto una importante aceleración de las medidas de descarbonización, y se ha logrado la misma reducción en solamente una década. Se destaca una reducción proporcional de las emisiones de CO<sub>2</sub> a causa del hormigón del 25 % para 2030 respecto de la situación actual como hito clave en el camino hacia la plena descarbonización a mediados de siglo. Con las acciones del plan de trabajo de ahora a 2030, se evitará que casi 5 000 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> entren a la atmósfera (Ver Figura 1.3).

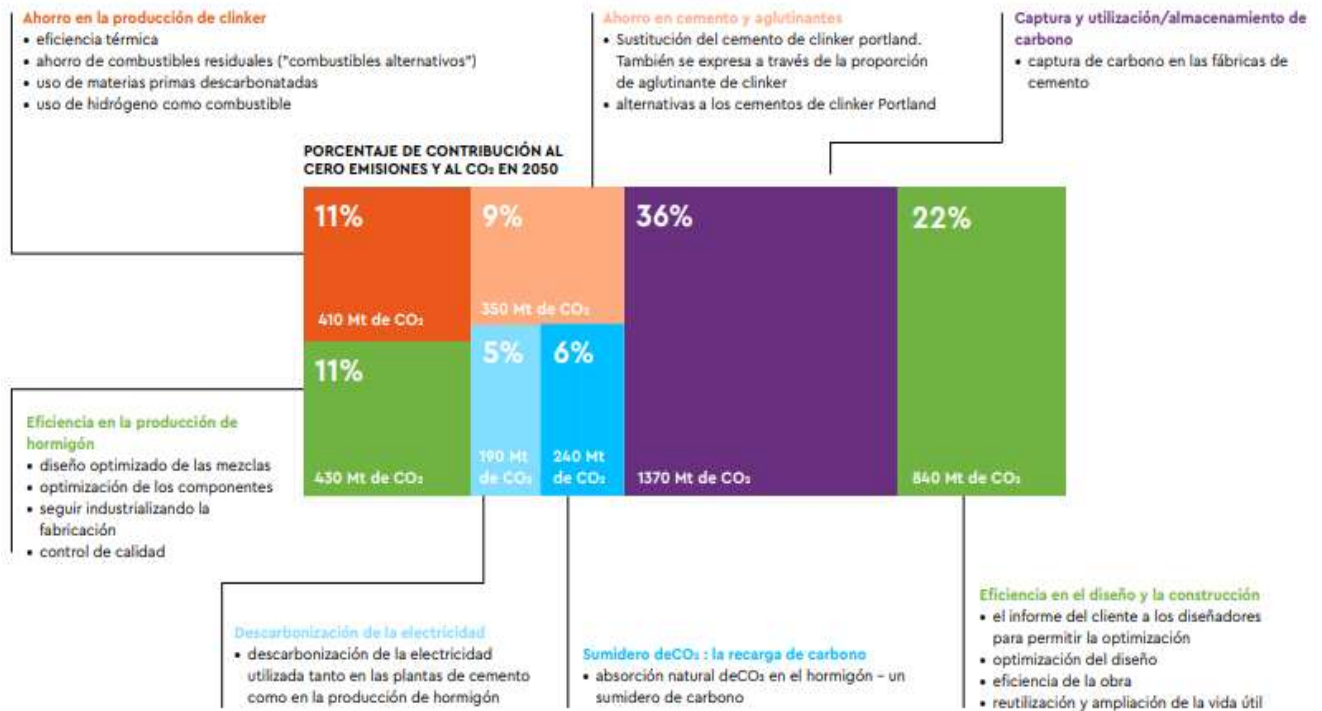


Figura 1.3. Acciones para un futuro sin emisiones de carbono

Fuente: <https://www.obrasurbanas.es/gcca-asociacion-global-cemento-hormigon/>

Los objetivos que se han trazado o avances que se han alcanzado y se pretenden esta industria se dividen en tres etapas:

**AVANCE INICIAL 1990-2020:** La industria del cemento fue el primer sector en controlar e informar públicamente de sus emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial y se ha mantenido durante los últimos 20 años, haciéndolo de forma transparente en la actualidad. A lo largo de las tres últimas décadas las industrias han logrado reducir sus emisiones proporcionalmente en alrededor de una quinta parte, sobre todo gracias a la sustitución del clínker y a las medidas relacionadas con el combustible. Las reducciones representan los esfuerzos de los productores de todo el mundo. La producción de hormigón también ha avanzado en las últimas tres décadas.

**LA DECADA PARA HACERLO REALIDAD 2020-2030:** En esta década clave, se pretende acelerar la reducción de CO<sub>2</sub> mediante las siguientes acciones e iniciativas: aumento de la sustitución de Clínker, incluyendo cenizas volantes, arcillas calcinadas, escoria granulada de alto horno y piedra caliza molida, reducción de los combustibles fósiles y aumento del uso de combustibles alternativos, mejora de la eficiencia en la

producción de hormigón, mejorar la eficiencia en el diseño de proyectos de hormigón y el uso del hormigón durante la construcción, incluido el reciclaje, inversión en tecnología e innovación, desarrollo de la tecnología y la infraestructura de la Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS). Además, se esfuerza en el establecimiento de un marco político para lograr el hormigón neutro en carbono.

Plantean que la eficiencia del diseño y el aprovechamiento de las ventajas y la versatilidad del hormigón pueden hacer que se utilice menos material. Esto significa considerar el hormigón y el cemento no sólo como productos que hay que producir, sino como componentes cruciales en una economía circular. Todo esto implica que en esta importante década se tenga que desarrollar un marco político global para alcanzar el objetivo común del hormigón neutro en carbono. Esto deberá ser un esfuerzo conjunto de la industria, los legisladores y los gobiernos.

**PLENO DESPLIEGUE DE TECNOLOGIAS PARA LOGRAR LA NEUTRALIDAD EN CARBONO 2030-2050:** En este periodo, se seguirá aprovechando los avances de la década anterior. La sustitución del clínquer continuará, si bien se reconoce que el suministro de cenizas volantes probablemente disminuirá, la disponibilidad de caliza molida y arcilla calcinada aumentará y se utilizará como herramienta clave. Incluso en la década de 2030 habrá margen para seguir utilizando combustibles alternativos para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Las alternativas a los cementos de clínquer Portland también pueden desempeñar un papel en la descarbonización, aunque limitado, quizá en torno a un 5% del mercado.

En última instancia, las emisiones de estos procesos significan que, aunque se haga todo lo posible por reducir las, habrá que capturar el CO<sub>2</sub>, reutilizarlo si es posible o almacenarlo. Una vez que ya este establecida la capacidad y el argumento comercial para 2030, y con el desarrollo de la infraestructura en marcha, consideran que estarán en el inicio del despliegue del CCUS a escala para garantizar que se podrá lograr el cero emisiones para 2050. El despliegue de la tecnología de captura de carbono a gran escala durante la fabricación de cemento podría eliminar por completo sus emisiones de proceso. Esto, junto con la biomasa y la recarbonatación, podría dar lugar a la entrega futura de hormigón con carbono negativo para nuestro mundo. Además, la inversión, la

colaboración y el trabajo centrado en la innovación de sus miembros a través de programas como Innovandi también podrían desencadenar nuevas tecnologías en nuestra misión de descarbonización. Por ejemplo, ellos prevén que el hidrógeno verde/limpio y la electrificación de los hornos desempeñen un papel a partir de 2040.

#### 1.2.1. Alternativas para reducir el impacto ambiental del cemento

Mejorar la eficiencia energética, cambiar a combustibles alternativos (combustibles que consumen menos carbono), reducir la proporción de clínquer a cemento e integrar la captura de carbono en la producción de cemento son las principales palancas de mitigación de carbono que apoyan la transición sostenible del sector del cemento. Se identifica que la integración de tecnologías emergentes e innovadoras como la captura de carbono y la reducción del contenido de clínquer en el cemento proporcionarán las mayores reducciones acumuladas de emisiones de CO<sub>2</sub> en el 2DS en comparación con el RTS para 2050, con contribuciones del 48% y el 37%, respectivamente. El resto de la reducción surge del cambio a combustible con bajas emisiones de carbono y, en menor medida, de la eficiencia energética (World Business Council for Sustainable, 2018).

##### 1.2.3.1. Uso de combustibles alternativos

Los combustibles fósiles son los más utilizados para la obtención de la energía térmica necesaria para la producción de cemento, debido a su disponibilidad y bajos precios. Para alcanzar un mínimo teórico de 1,76 GJ de energía y producir 1 tonelada métrica (t) de clínker de cemento portland, generalmente, se utiliza carbón o coque de petróleo. Esta industria está mirando hacia el uso de combustibles alternativos, ya que los recursos fósiles presentan una alta volatilidad en sus precios de mercado y son no renovables. A nivel mundial es utilizado en la manufactura de cemento un 7 % de combustibles alternativos y un 3 % de biomasa. Los combustibles alternativos se refieren a materiales de desecho como lodos de depuradora, aceites usados y biomasa (World Business Council for Sustainable, 2018).

El carbón es el combustible más utilizado en la producción de cemento, representando el 70% del consumo mundial de energía térmica del cemento. El petróleo y el gas natural contribuyen conjuntamente con el 24% de la demanda de energía térmica en la

producción mundial de cemento, y la biomasa y los residuos<sup>2</sup> (combustibles alternativos) contribuyen con poco más del 5% del uso global de energía térmica en el sector.

Las estrategias de eficiencia material, como la reutilización de bienes de consumo y productos que requieren menos uso de materiales en una sociedad con bajas emisiones de carbono, afectan el tipo y la cantidad de materiales de desecho disponibles en el medio ambiente futuro. Los residuos típicos que pueden utilizarse como combustibles alternativos en los hornos de cemento incluyen los siguientes, algunos de los cuales son total o parcialmente de naturaleza biogénica:

- neumáticos desechados o triturados.
- aceites usados y disolventes.
- residuos industriales preprocesados o crudos, incluidos lodos de cal procedentes de industrias papeleras e industrias similares.
- plásticos, textiles y papel no reciclables residuos
- combustibles derivados de residuos sólidos municipales.
- lodos de tratamiento de efluentes procedentes de plantas depuradoras de aguas y aguas residuales.

Los combustibles que en la industria del cemento se basan exclusivamente en biomasa incluyen residuos de madera, aserrín y lodos de depuradora. El uso de otras materias basadas en biomasa de especies cultivadas de rápido crecimiento (por ejemplo, determinadas maderas, pastos y algas) es posible desde una perspectiva tecnológica, pero actualmente no es globalmente económico para la industria del cemento. Hay requisitos técnicos que deben cumplirse, por ejemplo, un poder calorífico promedio mínimo alto de 20-22 GJ/t de combustible en la combustión del horno en comparación con los niveles proporcionados por los materiales orgánicos típicos (10-18 GJ/ t).<sup>3</sup> Los hornos de precalcificación pueden integrar hasta el 60 % de combustibles con bajo

---

<sup>2</sup> Los desechos incluyen fuentes de desechos biogénicos y no biogénicos. La biomasa y las fracciones biogénicas de los residuos se consideran neutras en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la combustión.

<sup>3</sup> . Los valores caloríficos se proporcionan en términos netos, considerando las pérdidas por evaporación del agua contenida

contenido calorífico, ya que el precalcinador opera a una temperatura de proceso más baja (ECRA y CSI, 2017)

La flexibilidad de los hornos de cemento para operar con una amplia gama de combustibles sin requerir una renovación importante de los equipos los convierte en usuarios de biomasa rentables en un mundo con restricciones de carbono en comparación con los procesos de fabricación industriales basados. La producción de cemento absorberá alrededor del 7% de la demanda de energía final relacionada con la biomasa del sector industrial en general a nivel mundial para 2050 en el 2DS.<sup>4</sup> en un solo combustible.

### **Desafíos para la implementación**

Aunque los hornos de cemento podrían utilizar hasta el 100% de combustibles alternativos, existen algunas limitaciones prácticas que impiden que eso suceda. Las propiedades físicas y químicas de la mayoría de los combustibles alternativos difieren significativamente de las de los combustibles convencionales. Si bien algunos (como la harina de carne y huesos) pueden ser utilizados fácilmente por la industria del cemento, muchos otros pueden plantear desafíos técnicos. Existen varias barreras para aumentar el uso de combustibles alternativos en la industria del cemento:

- La legislación sobre gestión de residuos afecta significativamente a la disponibilidad.
- Las redes locales de recogida de residuos deben adecuarse.
- Nivel de aceptación social del coprocesamiento: Los combustibles residuales en las plantas de cemento pueden afectar notablemente la absorción local.
- Burocracia compleja: en muchos casos, obtener un permiso para el uso de combustibles alternativos implica procedimientos largos y varios requisitos administrativos diferentes

---

<sup>4</sup> El uso de biomasa reportado aquí no incluye la demanda de biomasa para unidades de generación de energía en sitio en el sector industrial.

### 1.2.3.2. Mejora tecnológica o eficiencia energética

La eficiencia energética es una alternativa clave para la sostenibilidad, reduce el impacto del consumo de la energía eléctrica en las industrias, así como las emisiones de CO<sub>2</sub> en esta industria, ya que el consumo de energía térmica está íntimamente relacionado con este indicador, haciendo el proceso menos contaminante para el medio ambiente. Las mejoras en la eficiencia energética proporcionan 0,26 GtCO<sub>2</sub> o 3% del CO<sub>2</sub> acumulado ahorro de emisiones para 2050 a nivel global en la 2DS en comparación con el RTS, esto equivale al 12% de las actuales emisiones directas de CO<sub>2</sub> del cemento mundial producción. (Aristizabal-Alzate, CE, 2021)

El proceso de producción del cemento puede describirse en tres etapas fundamentales, dentro de la etapa 2 las materias primas pasan a un horno rotatorio a altas temperaturas térmicas, la fabricación de Clínquer en hornos húmedos utiliza alrededor de un 85% más de energía en comparación con la calcinación en un horno de proceso seco de última generación, por eso una de las medidas que se han tomado es reemplazar todos los hornos húmedos por hornos secos modernos y tecnológicamente avanzados debido a que se puede lograr una mejora del 10% para 2050 en el mejor de los casos a nivel mundial.

Los hornos rotatorios de proceso seco son actualmente la tecnología de proceso más utilizada para la producción de cemento. Los hornos secos tienen menor intensidad energética que los hornos de proceso húmedo, ya que operan con un menor nivel de contenido de humedad de la materia prima, reduciendo así el requerimiento de energía para la evaporación del agua.

Hornos de proceso seco con precalcinador, precalentador ciclónico multietapa y quemadores multicanal<sup>5</sup> se consideran tecnología de punta para la producción de clínquer. Conducen a los mejores niveles de rendimiento energético disponibles de 3,0-3,4 GJ/t de clínquer<sup>6</sup> basado en datos empíricos y modelos teóricos en el contexto europeo (ECRA y CSI, 2017).

---

<sup>5</sup> Los quemadores multicanal modernos pueden funcionar con combustibles alternativos al permitir condiciones de combustión óptimas con diferentes mezclas de combustibles (ECRA y CSI, 2017).

<sup>6</sup> Rango de intensidad de energía térmica basado en una etapa de seis ciclones precalentador.

Un requerimiento energético mínimo teórico de 1,85-2,80 GJ/t de clínquer está definido por reacciones químicas y mineralógicas y necesidades de secado, que varían dependiendo del contenido de humedad de las materias primas (ECRA y CSI, 2017).

Algunas de estas estrategias tienen un impacto en la intensidad eléctrica del cemento debido a efectos secundarios. Por ejemplo, la adición de mineralizantes<sup>7</sup> puede empeorar la capacidad de molienda del clínquer. Otras estrategias, como instalar un precalcinador, aumentar las etapas del precalentador o actualizar el enfriador de clínquer, implican necesidades adicionales de electricidad para operar el equipo nuevo o mejorado. Estas podrían compensarse en términos específicos, ya que muchas de estas medidas aumentan la capacidad de producción de clínquer.

La electricidad en la producción de cemento se utiliza para la molienda de cemento (31-44%), la molienda de materias primas (26%), la molienda de combustible (3-7%) y la producción de clínquer (28-29%), con molienda de combustible sólido, carga de cemento y el embalaje representa el resto (ECRA y CSI, 2017; Madloul et al., 2011). El uso de tecnologías eficientes de trituración y molienda disminuirá la intensidad eléctrica global del cemento en un 14% para 2050 en comparación con 2014 en el 2DS.

Las tecnologías de molienda de última generación consideradas en el análisis son los rodillos de molienda de alta presión y los molinos verticales de rodillos. Estos pueden teóricamente proporcionar hasta un 50% (rodillos de molienda de alta presión) y un 70% (molinos verticales de rodillos) de ahorro de electricidad en comparación con los molinos de bolas más utilizados actualmente (ECRA y CSI, 2017). La demanda de electricidad para la molienda de cemento depende en gran medida de los requisitos de calidad del producto. Cuanto mayor sea la clase de resistencia necesaria, más fino será el cemento que se deberá moler. Por lo tanto, los ahorros de electricidad que se pueden lograr en el campo mediante la instalación de una tecnología de molienda eficiente dependen de los requisitos de finura del producto.

---

<sup>7</sup> Conocido también como mineralizadores. Microorganismo que realiza el último paso de la descomposición, reduciendo la materia orgánica al estado inorgánico de sales minerales.

Las mejoras en la eficiencia energética se ven compensadas por requisitos energéticos adicionales relacionados con el uso de otras medidas de mitigación de carbono. Por ejemplo, un mayor uso de combustibles alternativos (del 6% al 30% a nivel mundial para 2050 en la 2DS), típicamente con menor contenido calorífico, da como resultado una mayor demanda de energía térmica específica de clínquer (0,11 GJ/t de clínquer adicionales a nivel mundial para 2050).

La reducción de la relación clínquer/cemento puede también generar una demanda de energía adicional, como la necesidad de calcinar arcillas crudas utilizadas como componentes del cemento.

La integración de equipos de captura de carbono en plantas de cemento<sup>8</sup> conduce de manera similar a una demanda adicional de electricidad y un uso de energía térmica, siendo el uso de energía térmica específico de las tecnologías de captura post-combustión para regenerar el sorbente saturado. Por ejemplo, la captura de CO<sub>2</sub> de las plantas de cemento en el 2DS a nivel mundial genera entre 15 y 19 kWh/t de cemento adicionales o entre el 19 y el 24 % de la intensidad eléctrica de la producción de cemento, considerando solo las ganancias de eficiencia para 2050. Regulaciones ambientales para reducir el polvo y las emisiones de Los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre también generan mayores niveles de demanda de electricidad específicos del cemento, ya que se requiere electricidad adicional para operar equipos para evitar o reducir las emisiones.

### **Desafíos para la implementación:**

- Los costos de capital pueden ser significativos.
- Se necesita mejorar las habilidades del sistema operativo y del operador para operar instalaciones mejoradas. La eficiencia energética se logra mediante una operación adecuada, así como el uso de equipos de proceso adecuados.
- Se necesita un mercado de tamaño adecuado para que las instalaciones funcionen a plena capacidad. Los equipos de proceso que funcionan con cargas continuas máximas de diseño ofrecen el máximo rendimiento energético.

---

<sup>8</sup> La visión 2DS considera que la captura de emisiones de CO<sub>2</sub> comenzará su implementación a escala comercial en 2030.

- Las condiciones locales, como las características de la materia prima, la composición del clínquer y el tamaño típico de la planta, así como los requisitos de finura del cemento, afectan la energía requerida por tonelada de cemento.
- Otras palancas de reducción de emisiones de carbono pueden correlacionarse con la eficiencia energética. Por ejemplo, un mayor uso de combustibles alternativos generalmente aumenta el consumo específico de energía debido a una mayor necesidad de aire y contenido de humedad. Las tecnologías actuales son lo suficientemente maduras como para recuperar el exceso de calor y servir a diferentes usos para mejorar la eficiencia energética. Por lo tanto, las menores emisiones globales de CO<sub>2</sub> gracias al mayor uso de combustibles alternativos compensan la desventaja del mayor consumo específico de energía.
- Requisitos medioambientales reforzados puede aumentar el consumo de energía en algunos casos (por ejemplo, los límites de las emisiones de polvo requieren más energía para la separación del polvo, independientemente de la tecnología aplicada).

#### 1.2.3.3. Secuestro y captura de carbono

Como tecnologías innovadoras de captura de carbono se están llevando a cabo desarrollos para fabricar cementos de próxima generación que tengan importantes reducciones de carbono. También conocido como cemento verde, se produce mediante la implementación de un proceso de fabricación con emisiones de carbono negativas y el uso de electricidad renovable. Los métodos avanzados de captura y almacenamiento de carbono también tienen el potencial de descarbonizar la industria del cemento. En este proceso de mitigación del cambio climático, el CO<sub>2</sub> se capta a partir de centrales eléctricas y procesos industriales para reutilizarlo o almacenarlo a largo plazo de forma segura. Estas tecnologías emergentes pueden proporcionar aproximadamente el 48% del ahorro acumulado de emisiones de CO<sub>2</sub> para 2050 en un 2DS.

Después de generarse en el horno de cemento (técnicas de captura poscombustión), el CO<sub>2</sub> puede capturarse o purificarse a partir de los gases de combustión del horno cuando la combustión se produce en condiciones de oxcombustible (tecnologías de captura de oxcombustible). Las tecnologías de captura por precombustión tienen un potencial de

mitigación limitado en la producción de cemento, ya que sólo se verían afectadas las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía, que representan alrededor del 35% de las emisiones totales de carbono del cemento.

Las tecnologías de captura poscombustión no requieren modificaciones fundamentales de los hornos de cemento y podrían aplicarse a las instalaciones existentes siempre que haya suficiente espacio físico disponible en el sitio:

- La absorción química<sup>9</sup> es la tecnología de captura postcombustión más avanzada y permite rendimientos de captura óptimos de hasta el 95%<sup>10</sup> (ECRA y CSI, 2017). Se requiere energía térmica para la regeneración del sorbente<sup>11</sup> utilizado, y se necesita electricidad para operar la unidad de captura<sup>12</sup>. Esto aumentaría a la planta importaciones de energía, ya que las simulaciones muestran que, en circunstancias normales, no más del 15% de la energía térmica adicional requerida puede recuperarse del horno de cemento (IEAGHG TCP, 2013). Una planta de cemento con una unidad de captura móvil en Brevik, Noruega, llevó a cabo con éxito pruebas de absorción química utilizando sorbentes a base de aminas entre 2013 y 2016 (Bjerge y Brevik, 2014). Una planta inició operaciones en 2015 en Texas para capturar y transformar químicamente 75 ktCO<sub>2</sub>/año de una planta de cemento en bicarbonato de sodio, lejía y ácido clorhídrico, que podrían venderse, de modo que los sorbentes, una vez saturados, no necesiten ser regenerados (Perilli, 2015).
- Uso de membranas como separador de CO<sub>2</sub>. En teoría, esta técnica podría producir un rendimiento superior al 80%. Sin embargo, las membranas solo se han probado a escala pequeña o de laboratorio, donde se lograron rendimientos de recuperación de hasta el 60-70 % (ECRA y CSI, 2017). Las membranas no

---

<sup>9</sup> Los procesos de absorción química se han utilizado comercialmente durante mucho tiempo como parte de operaciones básicas en otros sectores industriales.

<sup>10</sup> El rendimiento de captura se refiere a la corriente de gas que ingresa a la unidad de captura.

<sup>11</sup> Los sorbentes a base de aminas se utilizan con mayor frecuencia en CO<sub>2</sub>. Se están investigando procesos de separación, pero se están investigando sorbentes más eficaces, a base de amoníaco o carbonato de potasio activador.

<sup>12</sup> Sanciones energéticas relacionadas con la absorción química de CO<sub>2</sub> La captura en los hornos de cemento se informa como de 1,0 a 3,5 GJ/t de clínquer y de 50 a 90 kWh/t de clínquer en comparación con los niveles operativos promedio (ECRA y CSI, 2017)

requieren energía para su regeneración, pero pueden ser sensibles a compuestos de azufre y otros contaminantes potenciales y, en algunos casos, a altas temperaturas. Otra opción que se está investigando es la combinación de una unidad de separación de membrana única para la separación a granel con un tren de licuefacción de CO<sub>2</sub> desde el cual se recicla la corriente residual y se mezcla con la alimentación al sistema de membrana. Esta combinación permitiría a ambos sistemas operar en sus rangos óptimos en términos de concentración de CO<sub>2</sub> (Bouma et al., 2017).

- El circuito de calcio separa el CO<sub>2</sub> contenido en los gases de combustión de los sorbentes basados en óxido de calcio mediante ciclos secuenciales de carbonatación-calcinación<sup>13</sup> (Romano et al., 2013). En 2013 se puso en funcionamiento en el Taipéi Chino una planta piloto que utiliza circuitos de calcio para capturar 1 tCO<sub>2</sub> por hora (Chang et al., 2014). La infraestructura de investigación Zero Emission of Carbon with MIXed Technologies en Italia investiga el proceso de bucle de calcio para capturar CO<sub>2</sub> de procesos de gasificación de carbón y reformado de metano con vapor (Stendardo et al., 2016).

Las tecnologías de captura de oxcombustible se diferencian por el grado en que se aplica la oxcombustión en el horno de cemento. El oxcombustible parcial consiste en la aplicación de oxcombustión únicamente en la etapa de precalcinador. El oxcombustible completo también incluye oxcombustible en la combustión del horno de cemento. Mientras que el CO<sub>2</sub> Los rendimientos de separación para la opción parcial se informan en el rango del 55-75%, el oxcombustible completo puede alcanzar teóricamente el 90-99% (ECRA y CSI, 2017). Incluso si estas tecnologías no necesariamente implican un consumo adicional de combustible, su uso requiere una reingeniería de la planta para optimizar el sistema de recuperación de calor y minimizar la entrada de aire. El suministro de oxígeno también debe satisfacerse mediante la generación in situ o la importación de electricidad. Existe experiencia en la operación con condiciones de oxienriquecimiento en Europa y Estados Unidos, y en los últimos años se han realizado varias simulaciones

---

<sup>13</sup> La carbonatación es la reacción del óxido de calcio y el CO<sub>2</sub> para dar carbonato de calcio, o lo contrario a la calcinación.

y ensayos. La industria tiene planes específicos para un primer proyecto de demostración de tecnologías de captura de oxcombustible en Europa, pero la incertidumbre en torno a la financiación hace que sea poco probable que se realice antes de 2020.

Se están explorando otras tecnologías o configuraciones de captura de carbono que no encajan estrictamente dentro de las categorías de postcombustión u oxicorte discutidas anteriormente:

- Las ventajas de sustituir parte de la harina cruda por la purga de un circuito de calcio. En Italia se están investigando sistemas en un horno de cemento. Los resultados de optimización teóricos informados indican una reducción de hasta un 75% en el consumo de combustible y un 85% en las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con los niveles de rendimiento de las plantas de cemento convencionales (Romano et al., 2013).
- En una planta de cemento de Bélgica se está poniendo a prueba un nuevo concepto llamado separación directa que captura las emisiones de CO<sub>2</sub> del proceso mediante la aplicación de calentamiento indirecto en el calcinador (LEILAC, 2017).<sup>14</sup>

A medida que las limitaciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> se vuelven cada vez más estrictas con el tiempo en el 2DS, es necesario implementar estrategias de mitigación de carbono más costosas que proporcionen mayores reducciones de CO<sub>2</sub>, como la captura de carbono. Las emisiones de carbono capturadas para almacenamiento permanente en el 2DS representan entre 6 y 10 GtCO<sub>2</sub> para 2050 a nivel mundial o entre el 7% y el 12% del CO<sub>2</sub> total acumulado generado en el sector del cemento durante el mismo período. Los niveles absolutos de implementación de captura de carbono deben alcanzar 552-707 MtCO<sub>2</sub>/año a nivel mundial en 2050 en el 2DS (Figura #).

Los costos de reducción de CO<sub>2</sub> informados en estudios tecnoeconómicos realizados para plantas de cemento teóricas oscilan entre 55 y 70 dólares estadounidenses por

---

<sup>14</sup> Este acuerdo implica rediseñar el calcinador con un recipiente de acero especial para permitir el calentamiento indirecto de las materias primas, de modo que se pueda capturar el CO<sub>2</sub> puro a medida que se libera de la piedra caliza. Este sistema se puede complementar con otras tecnologías de captura de carbono, como el oxicorte, para gestionar las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía.

tonelada de dióxido de carbono (USD/tCO<sub>2</sub>) evitada<sup>15</sup> para tecnologías de oxcombustible y alrededor de 90-150 USD/tCO<sub>2</sub> evitado para la postcombustión, sujeto al tamaño de referencia de la planta y excluyendo el transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (ECRA y CSI, 2017; IEAGHG TCP, 2013).

Las técnicas de oxicorte podrían representar una mayor proporción de las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> capturadas de carbono para 2050 en el 2DS a nivel mundial, en contraste con la poscombustión, según el conocimiento actual del desempeño tecnoeconómico de las tecnologías de captura de carbono en plantas de cemento. Aunque las tecnologías de oxcombustible se consideran actualmente una opción de captura de carbono más económica en los hornos de cemento, los costos asociados con la integración de CO<sub>2</sub> La captura en plantas de cemento aún es incierta, ya que no hay datos reales de la planta disponibles, especialmente cuando se evalúan diferentes opciones para el suministro de vapor para apoyar la regeneración del sorbente en tecnologías de captura poscombustión. Sin embargo, una mayor experiencia en la integración de la captura de CO<sub>2</sub> en el proceso del cemento a medida que se desarrolle el despliegue del mercado podría conducir a sistemas mejor optimizados, lo que podría reducir los costos de inversión y la penalización energética relacionada.

El CO<sub>2</sub> capturado puede almacenarse geológicamente (CCS), ya sea de forma permanente o en escalas de tiempo geológico, y directamente o después de una aplicación comercial. Por ejemplo, se puede inyectar CO<sub>2</sub> en yacimientos de petróleo para mejorar el rendimiento de la recuperación de petróleo, y se puede almacenar geológicamente en el yacimiento una vez que se completa la explotación del campo. Actualmente, se almacenan 3,7 MtCO<sub>2</sub>/año en sitios geológicos exclusivos en todo el mundo, y casi 28 Mt de CO<sub>2</sub> antropogénico por año se captura y almacena mediante inyección para la recuperación mejorada de petróleo con CO<sub>2</sub> en todo el mundo. Esto es con base principalmente en América del Norte (91%) y relacionada con procesos de

---

<sup>15</sup> Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas se refieren a las emisiones directas de CO<sub>2</sub> generadas en la planta de cemento. Los costos se reportan en USD de 2015. Los costes informados en las fuentes originales son de 40 a 50 euros por tonelada (EUR/t) de CO<sub>2</sub> evitado para el oxcombustible y de 65 a 110 EUR/t de CO<sub>2</sub> evitado para la poscombustión (IEAGHG TCP, 2013); >50 a >70 EUR/t CO<sub>2</sub> evitado (ECRA y CSI, 2017).

procesamiento de gas natural y producción de gas sintético (79%) (Global CCS Institute, 2017)

El CO<sub>2</sub> capturado también puede almacenarse durante largos períodos en materiales inertes haciéndolo reaccionar con minerales alcalinos naturales ampliamente disponibles<sup>16</sup> o subproductos industriales reactivos, como las cenizas volantes, para formar carbonatos, que luego pueden usarse para la construcción o almacenarse bajo tierra. No existe ninguna planta de demostración a gran escala.

Se conoce, pero existen varias patentes. La literatura de I+D sobre esta técnica informa que se requieren grandes cantidades de materia prima mineral y energía (1,8-3,0 t de mineral relativamente puro por tonelada de CO<sub>2</sub> capturada y 3 GJ/tCO<sub>2</sub> más electricidad adicional para operaciones mecánicas) (ECRA y CSI, 2017).

El CO<sub>2</sub> capturado también se puede utilizar (captura y utilización de carbono; CCU) como materia prima para la producción de productos químicos y combustibles haciéndolo reaccionar con hidrógeno. Esto se denomina “ruta power-to-x”, en referencia a la producción de hidrógeno basada en electricidad en lugar de las rutas basadas en combustibles fósiles que se utilizan actualmente. Por ejemplo, a partir de CO<sub>2</sub> e hidrógeno se pueden producir productos como metanol, metano y otros hidrocarburos. Tras la combustión de estos combustibles, la posible incineración o degradación de los desechos de productos derivados o durante el uso de productos derivados, el CO<sub>2</sub> bloqueado se liberaría a la atmósfera, de modo que estas rutas no proporcionan un almacenamiento de carbono duradero<sup>17</sup>.

La mayoría de las rutas que utilizan CO<sub>2</sub> como materia prima se encuentran en las primeras etapas de desarrollo, siendo el principal impulsor de la investigación la exploración de las posibilidades de almacenamiento de energía que pueden ofrecer. Los combustibles producidos a partir de hidrógeno y CO<sub>2</sub> a partir de electricidad renovable se pueden utilizar para almacenar energía. Esto apoya la integración de una mayor

---

<sup>16</sup> Ejemplos de minerales alcalinos son los silicatos ricos en magnesio y calcio.

<sup>17</sup> Por ejemplo, la urea (principal precursor de los fertilizantes) se produce comercialmente a partir de CO<sub>2</sub> y amoníaco, pero el CO<sub>2</sub> se libera de nuevo a la atmósfera a medida que los fertilizantes se hidratan cuando se aplican en sitios agrícolas.

proporción de fuentes renovables variables y, por tanto, la descarbonización de la generación de energía. La economía actual no es muy favorable debido a los altos costos de la tecnología relacionados con la necesidad de explorar la viabilidad técnica a gran escala, los altos requisitos energéticos específicos y los costos actuales de la electricidad en comparación con los combustibles fósiles.

Si bien se deben aplicar enfoques sistémicos que abarquen estrategias impulsadas por el sector, desde una perspectiva directa de mitigación de carbono dentro del sector del cemento, lograr la visión 2DS implicaría un almacenamiento duradero del CO<sub>2</sub> capturado (por debajo del crecimiento esperado de la actividad), a menos que haya un cambio radical en la naturaleza de la producción de cemento que evita la generación de CO<sub>2</sub> del proceso.

La visión de la hoja de ruta considera que la integración de las tecnologías de captura de carbono en el sector del cemento alcance su implementación a escala comercial para 2030. Establece hitos clave dentro de ese marco de tiempo, incluida la realización de una demostración a escala comercial de tecnologías de captura de carbono con oxcombustibles en la producción de cemento y la obtención de beneficios. experiencia en la operación de tecnologías de postcombustión a gran escala en plantas de cemento.

### **Desafíos para la implementación**

- Las políticas efectivas que proporcionen incentivos económicos para reducir la huella de carbono de la producción de cemento y apoyen la cooperación público-privada intersectorial son el principal desafío para el despliegue en el mercado de CAC y la identificación de ubicaciones y diseños óptimos para las infraestructuras de transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> así como a la integración técnica de tecnologías de captura de carbono que se están demostrando a escala comercial en el proceso del cemento.
- Altos costos estimados para la captura de CO<sub>2</sub> en comparación con el costo específico de la producción de cemento. Sin embargo, se espera que el costo de la captura de carbono disminuya en el futuro debido al progreso técnico y científico. La conciencia pública sobre la CAC aún es baja y el público se ha

formado opiniones poco firmes sobre la CAC y su papel en la mitigación del cambio climático, excepto en unos pocos países europeos.

- Los obstáculos comerciales impiden que las rutas nuevas y emergentes de utilización de CO<sub>2</sub> avancen rápidamente y alcancen la madurez desde el laboratorio hasta el mercado, más allá de las limitaciones técnicas. Esto se debe en parte a los bajos precios de los combustibles alternativos y, a menudo, a la dependencia de una gran cantidad de electricidad renovable. Lograr una generación de hidrógeno con cero emisiones de carbono aseguraría el CO<sub>2</sub> reducciones de emisiones en esos casos.
- Disponibilidad de tierra y agua, y tamaño de Los mercados descendentes son otros factores limitantes para las aplicaciones de CCU. Se debe aplicar un enfoque de evaluación del ciclo de vida para medir la contribución específica de cada ruta CCU, para permitir la aceptación ambiental.

#### 1.2.3.4. Sustitución del factor de Clínquer

La formación de clínquer en el proceso de fabricación del cemento representa entre el 60 y el 70% de las emisiones totales de carbono. Esto se puede reducir sustituyendo parte del clínquer por materiales alternativos como cenizas volantes, piedra caliza o escoria.

La relación clínquer/cemento depende de estándares regionales para establecer la cantidad de cemento que debe integrarse en productos de hormigón para cumplir con las propiedades mecánicas y de durabilidad requeridas para diferentes aplicaciones de uso final. El PC común normalmente contiene más del 90% de clínquer y el resto es yeso y piedra caliza fina. Los cementos mezclados con proporciones más bajas de clínquer a cemento requieren menos clínquer y, por lo tanto, generan menos emisiones de CO<sub>2</sub> cuando se fabrican, ya que la huella de CO<sub>2</sub> de algunos sustitutos del clínquer es baja o incluso nula.

Para 2050 se alcanzará una relación global de clínquer a cemento de 0,60, gracias al mayor uso de componentes del cemento en lugar de clínquer y a una mayor penetración de cementos mezclados. Esto es inferior a 0,65 en 2014, lo que se traduce en una reducción de la intensidad de CO<sub>2</sub> del proceso del cemento en un 30 % durante ese

período, alcanzando una media de 0,24 t de CO<sub>2</sub> de proceso/t de cemento a nivel mundial. Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía también disminuyen debido a la reducción de la necesidad de producción de clínquer.

Las cenizas volantes resultan de la separación de partículas de polvo de los gases de combustión producidos en hornos de carbón pulverizado, como las centrales térmicas de carbón. Se estima que hay más de 675 Mt/año de cenizas volantes disponibles a nivel mundial, pero la calidad altamente variable reduce la cantidad de cenizas volantes utilizadas en el cemento, que se estima en alrededor del 5% de la producción mundial de cemento.<sup>18</sup> El uso de cenizas volantes La ceniza se limita al 25-35% en masa en los cementos por razones de rendimiento técnico (ECRA y CSI, 2017).

La penalización de energía térmica y eléctrica por el uso de GGBFS y cenizas volantes en el cemento relacionadas con el secado, la molienda y la mezcla se compensa con los ahorros de energía derivados de las menores necesidades de producción de clínquer (ECRA y CSI, 2017). Si bien los cementos que contienen GGBFS y cenizas volantes silíceas pueden tener una menor resistencia a corto plazo, una alta proporción de estos componentes conduce a una mayor resistencia a largo plazo y una mejor resistencia a la penetración de agentes corrosivos en el caso de GGBFS (ECRA y CSI, 2017).

La disponibilidad de GGBFS y cenizas volantes disminuirá, aumentando la competencia entre los actores industriales por estos subproductos. En tal escenario, el sector del hierro y el acero se aleja de la actual ruta ampliamente utilizada de altos hornos hacia hornos de arco eléctrico basados en chatarra, que consumen menos energía, y rutas optimizadas de reducción directa de hierro y fundición, que consumen menos carbono. en respuesta a las restricciones de las emisiones de carbono.

Las estrategias de eficiencia de materiales también ayudan a la industria del acero a reducir su huella de carbono. Esto se puede lograr poniendo a disposición de los consumidores más chatarra para refundición, y reduciendo la demanda general de acero

---

<sup>18</sup> Las cenizas volantes se utilizan en cantidades considerables en el hormigón en países como Estados Unidos, China y Alemania (ECRA y CSI, 2017).

bruto debido a mejores rendimientos de fabricación y semimanufactura, al mismo tiempo que se brinda el mismo servicio a los usuarios de productos de acero.

En lugar del clínquer se pueden utilizar materiales puzolánicos naturales, obtenidos a partir de compuestos volcánicos o de rocas sedimentarias con una composición adecuada. Su disponibilidad y reactividad varían ampliamente de una región a otra. Los materiales puzolánicos con propiedades interesantes para la fabricación de cemento son las cenizas de residuos agrícolas (por ejemplo, cenizas de cáscara de arroz) y el humo de sílice (un subproducto de los procesos de producción de sílice y aleaciones de ferrosílice). Sin embargo, su uso en la producción de cemento depende en gran medida de factores como la disponibilidad local variable, la estacionalidad y la competencia con otros usos industriales.

También se puede utilizar piedra caliza en lugar de clínquer en el cemento. Los cementos que contienen piedra caliza suelen tener una demanda de agua reducida, lo que da como resultado una mejor trabajabilidad del hormigón. Deben molerse más finamente para lograr la misma resistencia que el PC, pero la capacidad de molienda de la piedra caliza es mucho mayor que la del clínquer. Normalmente, el contenido masivo de piedra caliza en dichos cementos es del 25 al 35%; hasta un 50% es posible, pero debe ir acompañado de medidas sofisticadas tanto en el proceso de producción de cemento como en la fase de uso del hormigón (ECRA y CSI, 2017). Se estima que los cementos que utilizan piedra caliza como relleno actualmente representan el 25-30% de la producción mundial de cemento, y que la participación aumentará hasta un 48% para 2050.

El tratamiento térmico puede mejorar las propiedades reactivas de los materiales puzolánicos naturales. Esto implica una penalización de energía térmica de hasta 0,15 GJ/t de cemento en comparación con el rendimiento energético térmico de una planta de referencia de 2,64 GJ/t de cemento (ECRA y CSI, 2017). Tal es el caso de la arcilla calcinada, resultado del secado, trituración y calcinación de la arcilla.

La arcilla calcinada se ha utilizado en la producción de cemento durante mucho tiempo (las aplicaciones en la construcción de puentes se informaron ya en 1932 en San Francisco), y Brasil produce sistemáticamente alrededor de 2 millones de toneladas (Mt) de arcilla calcinada por año desde la década de 1970 (PNUMA, 2016). La resistencia a

la compresión temprana del cemento disminuye a medida que se utilizan mayores porciones de arcilla calcinada debido a la cinética de reacción más lenta de esta constituyente del cemento en comparación con el clínquer (ECRA y CSI, 2017). Sin embargo, los desarrollos recientes se benefician de combinaciones optimizadas de arcilla calcinada y piedra caliza molida como componentes del cemento, lo que potencialmente permite un desplazamiento de hasta el 50% del clínquer sin afectar las propiedades del cemento (PNUMA, 2016).

Estos son avances prometedores que apoyan la reducción de la proporción de clínquer a cemento en el 2DS. Las reservas globales de arcilla cruda se consideran efectivamente ilimitadas en comparación con los volúmenes de producción global de cemento; sin embargo, otros sustituyentes del clínquer, como GGBFS y cenizas volantes, son Se prevé que esté significativamente menos disponible en 2DS. Se considera que los cementos a base de arcilla calcinada y piedra caliza molida penetrarán el mercado en la 2DS, alcanzando el 27% de la producción mundial de cemento en 2050.

### **Desafíos para la implementación**

- Disponibilidad regional de mezclas de cemento. Los materiales siguen siendo críticos, en términos de cantidad/ Calidad y su impacto en los precios. Se espera que disminuya la disponibilidad de GGBFS y cenizas volantes.
- Se deben mejorar las prácticas comunes, el conocimiento y la aceptación del mercado porque, en algunas regiones, los consumidores y contratistas se muestran reacios a seleccionar cementos mezclados en lugar de PC. Esto puede atribuirse a la falta de concienciación de los consumidores y a la falta de formación/educación de los contratistas.
- Los estándares de construcción varían regionalmente en términos del tipo de cementos mezclados que se permiten para la construcción.
- Distancias entre fuentes de mezcla materiales y plantas de cemento y concreto, y la logística, pueden ser barreras para el uso de materiales de mezcla porque afectan la viabilidad económica.

La maximización de la sostenibilidad del sector cementero implica que todas las líneas de trabajo anteriores se desarrollen a niveles máximos, sin embargo, ha sido demostrado que la línea de mayor potencial es la reducción del factor de clínquer mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios. (Scrivener et. al. 2016) han demostrado que dentro de los materiales cementicios suplementarios solo las arcillas calcinadas tienen la disponibilidad para producir los niveles de cemento necesarios a largo plazo. Por esta razón, el cemento de bajo carbono, LC3 por sus siglas en inglés, se presenta como una excelente opción para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria.

#### 1.2.3.4.1. El Cemento de Bajo Carbono, LC<sup>3</sup>

El cemento LC3 o también conocido como cemento verde bajo en carbono constituye una de las alternativas de sostenibilidad para la industria cementera y a la contribución para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (figura 1.4). En 2013, los Institutos Indios de Tecnología de Delhi, Bombay y Madrás, junto con la ONG india *Technology and Action for Rural Advancement*, se unieron a la alianza de investigación entre la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) y la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas – alianza financiada por la COSUDE– y contribuyeron al desarrollo, las pruebas, la producción y la diseminación del LC3. La participación de la Fundación Nacional de Ciencias de Suiza (SNSF por sus siglas en inglés) en la fase inicial ayudó a fortalecer la alianza del proyecto, a aprovechar al máximo la innovadora comunidad investigadora de Suiza y a expandir el compromiso a nivel mundial. El enfoque de código abierto y el continuo intercambio de conocimientos entre Suiza, India y Cuba estimulan la investigación internacional y el avance de soluciones sostenibles.



Figura 1.4. Contribución del LC3 al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible  
Fuente: LC3 sustainable alternative PDF

Es un nuevo tipo de cemento a base de una mezcla de piedra caliza y arcilla calcinada. LC<sup>3</sup> puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 40%, se fabrica utilizando piedra caliza y arcillas de baja calidad que están disponibles en cantidades abundantes, es rentable y no requiere modificaciones intensivas de capital en las plantas de cemento existentes. Las principales actividades de investigación se centran no sólo en áreas temáticas específicas de la investigación del cemento, sino también en la producción, la sostenibilidad medioambiental y la rentabilidad de este nuevo cemento. (Figura 1.5)

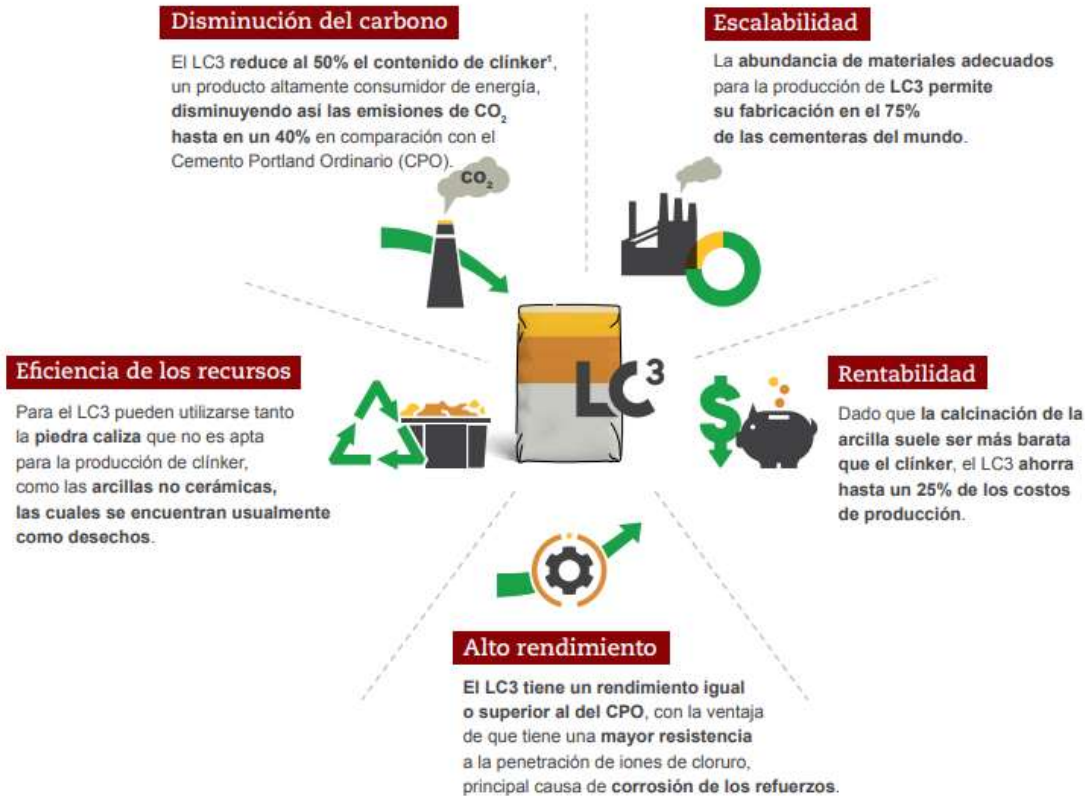


Figura 1.5. Principales ventajas del LC3

Fuente: LC3 sustainable alternative PDF

La diferencia entre LC3 y cemento Portland convencional El cemento Portland tradicional está compuesto en un 95% de clínquer. Su producción consume mucha energía y es responsable de la mayor parte del CO<sub>2</sub> del cemento (figura #). Al reducir el contenido de clínquer con los llamados materiales cementosos suplementarios (SCM), se pueden lograr grandes ahorros de CO<sub>2</sub>. Además, LC3 utiliza materiales de desecho industriales que aumentan así la eficiencia de los recursos y reducen la utilización de las escasas materias primas necesarias para producir clínquer.

Aunque la arcilla calcinada y la piedra caliza ya se utilizan comúnmente como materiales cementantes suplementarios, la principal innovación en el LC3 es la de reducir el contenido de clínquer al 50 por ciento y añadir una mezcla de 30 por ciento de arcilla de caolinita de bajo grado, 15 por ciento de piedra caliza y 5 por ciento de yeso. Los materiales tienen un efecto sinérgico y se comportan de manera similar al CPO. Al usar menos clínquer se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> liberadas (hasta en un 40 por ciento

en comparación con el CPO) por el uso de piedra caliza y por una menor utilización de combustible para la quema del clínquer. Se logran importantes ahorros de energía porque las arcillas calcinadas son más maleables y se calientan a unos 700-800 °C, mientras que la fabricación de clínquer requiere una temperatura de 1400 a 1500 °C. El LC3-50, con un contenido de clínquer del 50 por ciento, está siendo ampliamente promocionado y aceptado bajo los estándares de cemento aplicables en Europa, India, Estados Unidos, Cuba y gran parte de América del Sur. Actualmente se estudia la posibilidad de formular LC3 con contenidos de clínquer inferiores al 50 por ciento, lo que permitiría reducir aún más las emisiones de CO<sub>2</sub>. Al utilizar materiales industriales de desecho tales como los residuos de arcilla, el LC3 aumenta la eficiencia de los recursos y reduce la utilización de las escasas materias primas que se requieren para producir el clínquer. Las arcillas calcinadas y la piedra caliza se encuentran ampliamente disponibles, mientras que las cenizas volantes –un componente de los cementos mezclados– escasean en algunas zonas y es probable que haya cada vez menos a medida que se vayan eliminando las centrales térmicas de carbón. Del mismo modo, la escoria como agente mezclador actualmente escasea, lo que se hará más evidente con la descarbonización de la industria siderúrgica. Además, la alta resistencia del LC3 a los cloruros y su densa microestructura con alta resistividad superficial lo hacen adecuado para condiciones climáticas severas en los entornos marinos (LC3 sustainable alternative, 2022)

El LC3 se ha utilizado en muchas regiones diferentes y a diferentes escalas. En total, ya se han creado más de 25 aplicaciones con LC3. En India, el proyecto más destacado es el modelo Jhansi, India. Esta casa está hecha 98% de LC3 y utilizó 26,6 t de residuos industriales (192 kg/m<sup>2</sup>) y ahorró 15,5 t de CO<sub>2</sub> (114 kg/m<sup>2</sup>). Estos ahorros de CO<sub>2</sub> son similares a las emisiones de 10 pasajeros que viajan en avión de Suiza a Sudáfrica. En América Latina se han construido varias aplicaciones. Están principalmente en Cuba, pero también en otros países. Entre esas aplicaciones se encuentran una casa LC3, sitios de pruebas en el mar, esculturas artísticas y aceras (LC3 sustainable alternative, 2022)

El Cemento de Bajo Carbono (LC3) es un novedoso producto que permite duplicar la cantidad de cemento producido por métodos tradicionales, a partir de reducir el contenido de clínquer al 50 % (figura #) sustituyéndolo por arcilla calcinada y Carbonato de Calcio (CaCO<sub>3</sub>). Resultados experimentales de laboratorio han demostrado que es posible sustituir hasta un 50 % del clínquer sin que se produzca una significativa disminución del volumen de productos de reacción que se produce en la hidratación del cemento, por lo que no se compromete la resistencia del material. Con sustituciones de un 60 % se logra alcanzar hasta un 90 % de la resistencia del Cemento Portland Ordinario (Vizcaíno-Andrés et al., 2015).

### **1.3. Cálculo de impactos ambientales y financieros en la industria**

Como parte del estudio de los antecedentes de la investigación se analizan las diferentes calculadoras de CO<sub>2</sub> y financieras que pudieron encontrarse en Internet. Se analizan un total de 8 calculadoras de CO<sub>2</sub> y 3 calculadoras financieras. A continuación, se detallan las calculadoras analizadas y los resultados obtenidos.

#### *1.3.1. Calculadoras de CO<sub>2</sub>*

Luego de una búsqueda exhaustiva se realiza un análisis crítico de las principales calculadoras de CO<sub>2</sub> encontradas en Internet. Para el análisis se tienen en cuenta diferentes aspectos metodológicos y prácticos como la forma de cálculo, las funciones de cada herramienta, sus bondades, si están disponibles gratuitamente o no, que nivel de actividad o producto evalúan, entre otros factores. Las calculadoras de carbón o CO<sub>2</sub> que se analizan son:

*Concrete CO<sub>2</sub> Saver* (Holcim, 2023). Es una Calculadora de ahorro de CO<sub>2</sub> en el concreto, que brinda la información de cuánto ahorro de CO<sub>2</sub> puede lograr utilizando el concreto ECOPact. El ECOPact es la gama más amplia de hormigón ecológico de la industria con productos que proporcionan entre un 30% y un 100% menos de emisiones de carbono en comparación con el hormigón estándar (OPC), sin comprometer el rendimiento.

*Concrete Embodied Carbon Footprint Calculator* (Circular ecology, 2023). Circular Ecology ha creado una calculadora de carbono incorporado para hormigón, como parte de la base de datos gratuita de carbono incorporado para materiales conocida como base de datos ICE. La base de datos ICE fue creada originalmente como un proyecto de investigación en la Universidad de Bath por el Dr. Craig Jones, Ecología Circular y el Profesor Geoffrey Hammond. La última versión de la base de datos ICE, V3, fue actualizada por Circular Ecology y fue cofinanciada por el

aeropuerto de Heathrow, la Junta de Normas y Seguridad Ferroviaria y la Agencia de Medio Ambiente.

*Climate hero carbon footprint calculator* (Climate hero, 2023). ClimateHero utiliza unas 30 fuentes públicas para calcular tu huella de carbono. Basándonos en estas fuentes y en tus respuestas en la calculadora climática, podemos estimar las emisiones de tu consumo privado, que ascienden a unas 10 toneladas de CO<sub>2</sub>e por persona y año para muchos de nosotros. La media mundial, incluidos los que viven en la más absoluta pobreza, es de unas 5 toneladas de CO<sub>2</sub>e por persona y año.

*Greenly carbon footprint calculator* (Greenly, 2023). Mida su huella de carbono utilizando tecnología punta, lo que permite contabilizar fácilmente 3 alcances de emisiones. Permite elaborar planes de acción personalizados para trabajar en su reducción con la ayuda de nuestro equipo de expertos en clima. Integra más de 100 softwares específicos del sector como Amazon Web Services, Google Cloud o Shopify para cuantificar automáticamente la mayor parte de las actividades que generan emisiones. Finalmente, permite validar los balances de carbono empresariales por un experto autorizado para obtener certificados.

*United States Environmental Protection Agency (EPA) Greenhouse Gas Equivalencies Calculator* (EPA, 2023). Permite convertir datos sobre emisiones o energía en la cantidad equivalente de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) derivadas del uso de esa cantidad. La calculadora ayuda a traducir medidas abstractas en términos concretos que pueda entender, como las emisiones anuales de coches, hogares o centrales eléctricas. Esta calculadora puede ser útil para comunicar estrategias de reducción de gases de efecto invernadero, objetivos de reducción u otras iniciativas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

*Nature conservancy carbon footprint calculator* (Nature conservancy, 2023). Es una calculadora interactiva para conocer su huella de carbono y las medidas que puede tomar para reducirla. Se encuentra disponible de forma interactiva.

*United Nations Greenhouse Gas Emissions Calculator* (UNFCCC, 2021). Esta es una calculadora de la huella de carbono para individuales. Esta calculadora está construida como un simple cuestionario, en el que el usuario proporciona información sobre sus actividades y obtiene una estimación de la cantidad de sus emisiones como resultado.

*Carbon Footprint Calculator For Individuals And Households* (Carbon footprint, 2023). Esta calculadora se encuentra disponible para su libre uso y permite calcular la huella de carbono de

individuos y hogares. De manera interactiva se preguntan aspectos sobre la vivienda, viajes, medios de transporte, alimentos, gastos mensuales del hogar para obtener la huella de carbón por persona. Se establecen como referencia la media nacional y mundial de esta huella.

Los principales resultados se muestran en la Tabla 1.1. Se analizan tres aspectos fundamentales el nivel de análisis de cada herramienta su accesibilidad y aspectos relativos a la metodología de cálculo y sus resultados.

*En cuanto al nivel de análisis*, de las herramientas analizadas el 63% evalúa las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente a nivel individual, el 25% para cemento, el 38% para hormigón y el 38% para viviendas. Algunas permiten hacer evaluaciones multinivel como *Circular Ecology* (2023), *Greenly* (2023) y *Carbon footprint* (2023).

*En cuanto a la accesibilidad*, el 75% se encuentran disponibles online, una requiere ser pagada *Greenly* (2023) y tres proveen de un archivo Excel para su trabajo offline como *Climate hero* (2023), EPA (2023) y UNFCCC (2021).

*En cuanto a los aspectos metodológicos*, se puede ver que el 100% calcula la huella de carbono y considera todos los gases de efecto invernadero, el 63% analiza el potencial de reducción, el 50% lanza reportes de resultados, el 38% plantea ejemplos de equivalentes de reducción evalúa escenarios y considera datos económicos, el 25% incentiva la economía circular y el 13% permite el análisis de documento y la certificación climática a partir de su evaluación.

Si se miran las calculadoras de CO<sub>2</sub> analizadas la calculadora, es la más completa seguida de la calculadora de la huella de carbono de *Greenly carbon footprint calculator* y *Nature conservancy carbon footprint calculator* son las más completas. El mayor obstáculo de *Greenly* (2023) es que requiere del pago a los profesionales de esa compañía para acceder a la herramienta y a su asesoría. La segunda herramienta es de libre acceso, pero calcula la huella de CO<sub>2</sub> solo a nivel personal.

Como promedio las herramientas consideran el 50% de los aspectos evaluados del punto de vista metodológico por lo que puede concluirse que existe potencial de mejora de estas calculadoras.

Tabla 1.1. Análisis de calculadoras de CO<sub>2</sub> existentes.

Calculadoras	Nivel de análisis				Accesibilidad			Metodología										
	Individual	Cemento	Hormigón	Vivienda	Online	Pagada	Archivo Excel offline	Analiza potencial de reducción	Huella de Carbono	Ejemplo de equivalente de reducción	Considera todos los GEI	Incentiva la economía circular	Análisis de documentos	Evalúa escenarios	Considera datos económicos	Permite certificación climática	Lanza reporte de resultados	% del TOTAL
Concrete CO <sub>2</sub> saver			X		X			X	X	X	X							40
Concrete Embodied Carbon Footprint Calculator		X	X		X		X		X		X							20
Climate hero carbon footprint calculator	X			X				X	X		X	X					X	50
Greenly carbon footprint calculator		X	X	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	80
(EPA) Greenhouse Gas Equivalencies Calculator	X				X		X	X	X	X	X			X				50
Nature conservancy carbon footprint calculator	X				X			X	X	X	X	X		X	X			70
UNFCCC Greenhouse Gas Emissions Calculator	X				X		X		X		X						X	30
Carbon footprint	X			X	X				X		X				X		X	40
Porcentaje del total (%)	63	25	38	38	75	13	38	63	100	38	100	25	13	38	38	13	50	

Fuente: Elaboración propia.

### 1.3.2. Calculadoras financieras

*Plantillas de Finanzas en Excel de ZebraBi* (ZebraBi, 2023). Propone una serie de plantillas de informes gratuitas. Son totalmente personalizables, se elaboran siguiendo las mejores prácticas y son fáciles de usar. ZebraBi ofrece varias plantillas de excel: plantilla de EBITDA ajustado y ejemplo de cuenta de resultados, plantilla Excel de Informe de Activos a Largo Plazo y CapEx, estado de Flujo de Caja desde Tabla Dinámica (Jerárquica), plantilla de Estado de Flujo de Caja, entre otras.

*Hojas de cálculo listas para usar para modelos financieros de Someka* (Someka, 2023). Someka proporciona una amplia gama de Modelos Financieros en Excel personalizados para las necesidades particulares de diferentes tipos de negocios. Los modelos constan de una sección de entrada para sus previsiones de ventas y costes y una sección de salida que incluye un análisis financiero profesional. Todo funciona en Excel, por lo que no es necesario instalar ningún software complicado. La cartera de modelos financieros de Excel incluye modelos financieros para diferentes tipos de propietarios de negocios.

*Software de contabilidad en línea Odoo* (Odoo, 2023). Odoo es un software de contabilidad moderno. Tan ordenado que vivirás tu trabajo de forma diferente. todas las operaciones se procesan en menos de 90 milisegundos, más rápido que un abrir y cerrar de ojos. Los contables pueden hacer mucho más en menos tiempo. Está pre configurado para los requisitos de cada país: Planes de cuentas, impuestos, informes específicos de cada país, facturación electrónica, archivos de auditoría y elementos fiscales para aplicar automáticamente las tasas de impuesto y las cuentas correctas.

Los principales resultados se muestran en la Tabla 1.2. Se analizan tres aspectos fundamentales el nivel de dificultad de cada herramienta, su accesibilidad y aspectos relativos a la metodología de cálculo y sus resultados.

Tabla 1.2. Análisis de calculadoras financieras para inversiones.

	<b>Calculadoras</b>	<b>Zebra BI</b>	<b>Someka</b>	<b>Software Odoo</b>	<b>% del total</b>
<b>Metodología</b>	Cálculo de utilidades brutas	X	X	X	100
	Cálculo de utilidades netas	X	X	X	100
	Calculo de flujos de caja	X	X	X	100
	Cálculo de indicadores financieros	X	X		67
	Brinda información gráfica de los resultados	X	X	X	100
	Lanza reporte de resultados	X	X		67
	Por ciento del total (%)	100	100	80	-
<b>Nivel de dificultad</b>	Alta	X	X	X	100
	Media				-
	Baja				-
<b>Accesibilidad</b>	Online			X	33
	Requiere ser pagada	X			33
	Archivo Excel offline	X	X	X	100
	Por ciento del total (%)	67	33	67	-

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de las calculadoras financieras evaluadas arroja las siguientes conclusiones:

*Sobre los aspectos metodológicos*, el 100% de las calculadoras estima utilidades brutas y netas, calcula flujos de cajas de caja y brinda información gráfica de los resultados. El 67% calcula indicadores financieros y lanza reportes de resultados.

*Sobre el nivel de dificultad*, el 100% de las herramientas evaluadas tienen una dificultad alta ya que están concebidas para usuarios calificados en la temática.

*Sobre la accesibilidad*, el 100% ofrece archivos Excel que pueden trabajarse de manera *offline*, una calculadora requiere ser pagada y una puede ser trabajada online de manera gratuita.

Atendiendo a los aspectos evaluados las herramientas más completas son ZebraBi (2023) y software Odoo (2023). Sin embargo, ninguna cumple con los requisitos que demanda la evaluación de inversiones en el contexto de la industria cementera. Es por ello que en el próximo capítulo se propone una herramienta para evaluar la factibilidad ambiental y financiera de producir LC3.

## CAPÍTULO II: PROPUESTA DE CALCULADORA DE IMPACTOS AMBIENTALES Y FINANCIEROS ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DEL CEMENTO DE BAJO CARBONO (LC3)

En el presente capítulo se realiza una propuesta metodológica que contempla los pasos, componentes, indicadores, referentes y todo el proceso de construcción de una herramienta de cálculo sencilla, operacional y de fácil entendimiento que pueda ser usada por los distintos productores de cemento o plantas molineras para evaluar los impactos económicos y ambientales de introducir la producción de LC3.

### 2.1. Procedimiento de creación de la herramienta

La herramienta de cálculo que se propone en esta investigación constituye un elemento esencial para la diseminación del LC3 por el mundo y tiene como objetivo: contar con un instrumento sencillo y de fácil manejo que tribute a la caracterización, análisis y difusión de información de calidad sistemática y oportuna relacionada con el LC3 para facilitar la toma de decisiones en los procesos de políticas públicas y medir la eficacia de las acciones implementadas a nivel empresarial.

El diseño de dicha herramienta consta de varios pasos que se han delimitado a partir del estudio teórico y las necesidades de los usuarios finales con el propósito de que estén bien estructurados y se presentan en la figura 2.1 a continuación:

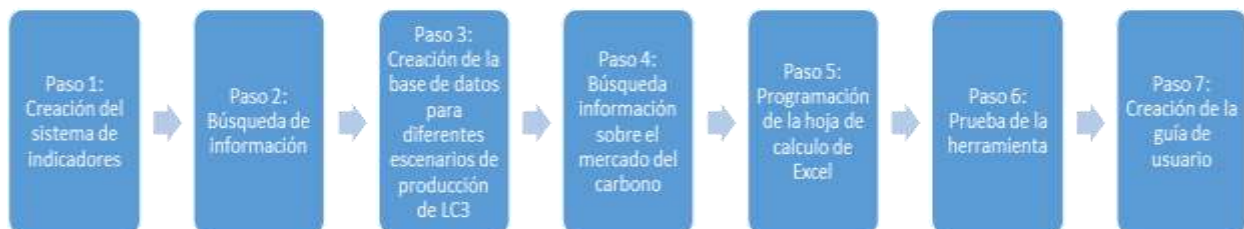


Figura 2.1. Procedimiento de creación de la herramienta

Fuente: Elaboración propia.

#### Paso 1: Creación del sistema de indicadores

Un sistema de indicadores es una herramienta de gestión que permite medir, monitorear y evaluar el rendimiento de una organización, proyecto o proceso. Está compuesto por un conjunto de indicadores cuidadosamente seleccionados que reflejan aspectos clave

del desempeño. Estos indicadores proporcionan datos concretos que ayudan a comprender como se están logrando los objetivos y a identificar áreas que necesitan atención.

Un sistema de indicadores resume la intervención de distintas variables en un mismo contexto, haciendo comparable el estado de una situación o de algún aspecto particular, un momento y un espacio determinados, ya sea por país, por período o por algún parámetro en común.

Los sistemas de indicadores son importantes por varios motivos:

- Proporcionan una visión clara del rendimiento y el progreso hacia los objetivos.
- Facilitan la toma de decisiones basadas en datos concretos.
- Ayudan a identificar áreas que requieren atención o mejora.
- Promueven la transparencia y la rendición de cuentas.
- Brindan la oportunidad de realizar ajustes estratégicos en función de los resultados obtenidos.

## **Paso 2: Búsqueda de información**

La búsqueda de información puede realizarse a través de diferentes fuentes, como libros, artículos, sitios web, bases de datos, entrevistas, encuestas, entre otros. Algunos pasos para realizar una búsqueda de información efectiva incluyen:

1. Definir claramente el tema o la pregunta de investigación.
2. Identificar las palabras clave relacionadas con el tema.
3. Utilizar diferentes fuentes de información, como bibliotecas, bases de datos en línea, buscadores web, etc.
4. Evaluar la relevancia y confiabilidad de la información encontrada.
5. Organizar y sintetizar la información recopilada.

Es importante tener en cuenta que la búsqueda de información puede variar dependiendo del contexto y el propósito de la investigación. También es fundamental citar adecuadamente las fuentes utilizadas para evitar el plagio y dar créditos a los autores originales.

### **Paso 3: Creación de la base de datos para diferentes escenarios de producción de LC3**

Las bases de datos juegan un papel fundamental en el mundo de la tecnología y la gestión de la información. Algunas de las razones clave por las cuales las bases de datos son importantes:

1. Almacenamiento estructurado de información: una base de datos proporciona un método organizado y estructurado para almacenar grandes volúmenes de información. Permite almacenar datos de manera eficiente, asegurando su integridad y facilitando el acceso y la manipulación de la información.
2. Acceso rápido y eficiente a los datos: las bases de datos están diseñadas para permitir un acceso rápido y eficiente a los datos almacenados. Utilizando consultas y filtros, es posible recuperar información específica de manera rápida y precisa, lo que facilita la toma de decisiones y el análisis de datos.
3. Consistencia de datos: las bases de datos ayudan a mantener la consistencia de los datos almacenados. Al utilizar reglas y restricciones, se pueden garantizar la integridad de los datos, evitando inconsistencias y duplicaciones. Esto es especialmente importante cuando múltiples usuarios acceden y actualizan la misma base de datos al mismo tiempo.
4. Mejoras de la seguridad: las bases de datos ofrecen mecanismo de seguridad para proteger la información almacenada. Se pueden establecer permisos y privilegios de acceso para controlar quien puede ver, modificar o eliminar los datos. Además, las copias de seguridad regulares de la base de datos aseguran que los datos estén protegidos contra pérdidas o daños.
5. Escalabilidad y flexibilidad: las bases de datos son escalables, lo que significa que pueden manejar grandes cantidades de datos y crecer a medida que aumenta la demanda. También ofrecen flexibilidad para adaptarse a diferentes necesidades y cambios en la estructura de los datos, permitiendo agregar, modificar o eliminar información según sea necesario.
6. Integración de datos: las bases de datos facilitan la integración de datos provenientes de diferentes fuentes. Puedes combinar datos de diversas fuentes

en una sola base de datos, lo que permite obtener una visión más completa y precisa de la información.

7. Apoyo a la toma de decisiones: una base de datos bien diseñada y actualizada proporcionan información confiable que respalda la toma de decisiones empresariales. Los análisis y reportes generados a partir de los datos permiten identificar patrones, tendencias y oportunidades de mejora.

#### **Paso 4: Búsqueda de información sobre el mercado de carbono**

La industria cementera es una de las mayores fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que los mercados de carbono son especialmente relevantes para este sector. Al participar en un mercado de carbono, las empresas de la industria cementera pueden comprar créditos de carbono para compensar sus emisiones, lo que les da un incentivo económico para reducir su huella de carbono.

Además, los mercados de carbono también pueden fomentar la adopción de tecnologías más limpias en la producción de cemento, como el uso de combustibles alternativos o la captura y almacenamiento de carbono. Esto puede ayudar a reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de cemento.

En algunos países, los ingresos generados por la participación en mercados de carbono también pueden ser utilizados para financiar la implementación de tecnologías más limpias en la industria cementera, lo que puede acelerar la transición hacia una producción más sostenible.

#### **Paso 5: Programación de hoja de cálculo de Excel**

Microsoft Excel es la hoja de cálculo más utilizada alrededor del mundo en el ámbito empresarial, permite mediante la carga de datos realizar cálculos matemáticos, elaborar tablas, aplicarles formatos y representar la información mediante gráficos para simplificar el análisis de la misma (Cetys, 2021).

La programación en Excel ofrece funcionalidades adicionales enfocadas a automatizar tareas repetitivas. Para ello, el programa Microsoft permite desarrollar pequeños comandos, conocidos como macros, que, a partir de unas instrucciones lógicas, ejecutan de manera automática las acciones señaladas en las hojas de cálculo. Permiten generar

formularios y funciones personalizadas para trabajar de manera fácil con los datos almacenados en una hoja de cálculo, con el fin de abordar tareas repetitivas de una forma más automatizada y rápida (Santander Universidades, 2023).

### **Paso 6: Prueba de la herramienta**

En el desarrollo de una herramienta uno de los pasos más importantes es la prueba de la misma una vez que se haya diseñado, pues posibilita los procesos y la retroalimentación e indica los métodos de trabajo necesarios a seguir para garantizar la calidad de su desarrollo. Dentro de estos, las encuestas ayudan a obtener conocimientos específicos de grupos de personas o beneficiarios para recopilar información valiosa cuyas respuestas servirán para analizarlas, interpretarlas y tener un programa que ayude a tomar decisiones o a generar alguna estrategia o acción específica, además la verificación de los proveedores, el criterio de los beneficiarios, los test y las pruebas físicas.

El seguimiento de una herramienta es un proceso organizado para verificar que una actividad o secuencia de actividades transcurre como se había previsto dentro de un determinado periodo de tiempo, permite comprobar si se está manteniendo la ruta hacia el objetivo establecido, estima la posibilidad de alcanzar los objetivos planeados, identifica las debilidades que deben ser atendidas y recomienda cambios y propone soluciones.

Con estas pruebas se analizan los efectos esperados y no esperados en relación con las expectativas de los ciudadanos, partiendo del aprendizaje y logrando los procesos orientados a la mejora continua, tanto de las actividades en marcha, como de la programación, planificación y desarrollo de políticas.

### **Paso 7: Creación de la guía de usuarios**

Una guía permite a los usuarios conocer el detalle de qué actividades deberán desarrollar para la consecución de los objetivos. Reúne la información, normas y documentación necesaria para que el usuario conozca y utilice adecuadamente la aplicación desarrollada.

Una guía bien diseñada y fácil de usar puede marcar la diferencia, esta debe usar un lenguaje sencillo, simplificado, añadir elementos visuales, centrarse en el problema del

usuario, mantener una estructura y un flujo lógico, incluir un índice, facilitar las búsquedas, hacer el contenido accesible, tener en cuenta la opinión de usuarios reales, incluir enlaces a otros documentos y añadir instrucciones paso a paso (TechSmith Newsletter, 2023).

En su estructura los principales aspectos que debe contener son:

- Tabla de contenido
- Introducción
- Instrucciones para el uso de la guía
- Cuerpo de la guía
- Flujograma
- Glosario de términos
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Anexos

## **2.2. Calculadora de los impactos ambientales y financieros asociados a la producción del cemento de bajo carbono (LC3)**

Para crear este sistema de indicadores se parte de la revisión, análisis y selección de los propuestos y analizados por Sánchez *et al.* (2016), Sánchez (2018), Scrivener *et al.* (2019).

La selección de los indicadores que se incluyen se realizó a través de un proceso participativo y de consenso, tomando en cuenta los siguientes criterios:

- **Pertinencia:** los indicadores de la herramienta propuesta deben responder a los objetivos del sector cementero y su estrategia de desarrollo sostenible.
- **Relevancia:** se identificaron indicadores que están ligados a las características de la producción cementera, así como a sus determinantes relevantes.
- **Disponibilidad:** se seleccionaron indicadores que son de dominio de cualquier empresario que pretenda invertir en introducir el LC3, por tanto, se asume que son confiables estadísticamente al elaborarse conforme metodologías internacionalmente aceptadas.

-

- Cobertura geográfica: se identifican indicadores disponibles a diferentes niveles y para diferentes tipos de compañías como molineras o plantas integradas.

De manera más detallada, mostrando su definición y método para el cálculo, así como la fuente de información de donde pueden obtenerse, se presentan en la Tabla 2.1 que se presenta a continuación:

Tabla 2.1. Sistema de indicadores seleccionados y ajustados.

Indicadores	Definición conceptual	Fuente de información
Costo de producción	Monto asociado al gasto de materias primas, combustibles, mano de obra, entre otros recursos durante el proceso productivo (Ministerio de Justicia, 2015)	Herramienta de cálculo
Costo de inversión	Monto destinado para la Construcción y Montaje, Equipos y Otros gastos iniciales de una inversión.	Proveedor de la maquinaria
Consumo de energía	Cantidad de energía demandada para producir una tonelada de producto	Proveedor de la maquinaria
Emisiones de CO <sub>2</sub>	Cantidad de emisiones asociadas a la producción de cemento o algún producto intermedio como arcilla calcinada	Productor
VAN	VAN representa la rentabilidad en términos absolutos de un proyecto de inversión. Según este criterio la decisión de inversión se apoya en el siguiente razonamiento: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si VAN &gt;0, la inversión debe llevarse a cabo ya que es rentable para la empresa.</li> <li>• Si VAN &lt;0, la inversión no debe realizarse porque no es rentable para la empresa.</li> <li>• Si VAN =0, es igual que la inversión se realice o no ya que no modifica el patrimonio de la empresa.</li> </ul>	Herramienta de cálculo
	Es la rentabilidad obtenida sobre el capital mientras esté invertido. La decisión sobre el proyecto teniendo en cuenta el criterio de la TIR se plantea así: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si TIR &gt; r, la inversión puede realizarse porque la rentabilidad que ofrece el</li> </ul>	Herramienta de cálculo

	<p>proyecto es mayor que la que ofrece el mercado.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si <math>TIR &lt; r</math>, no interesa llevar a cabo la inversión porque la rentabilidad que ofrece el proyecto es menor que la que ofrece el mercado.</li> <li>• Si <math>TIR = r</math>, la situación es de indiferencia, por lo que con decisores con aversión al riesgo tampoco se realizaría.</li> </ul>	
PRD	<p>Se basa en determinar el plazo de recuperación o <i>pay back</i> de una inversión, es decir el tiempo en que se tarda en recuperar el desembolso inicial. Este se calcula acumulando los FE/FE descontados en el tiempo hasta que su suma sea igual a dicho desembolso inicial. Este criterio se basa en que la inversión más conveniente es aquella cuyo PER/PERd sea más corto.</p>	Herramienta de cálculo

Fuente: Elaboración propia.

Para manejar la información estadística de la herramienta propuesta se trabajó en el diseño, desarrollo e implementación de los siguientes componentes que se muestran en la figura 2.2:

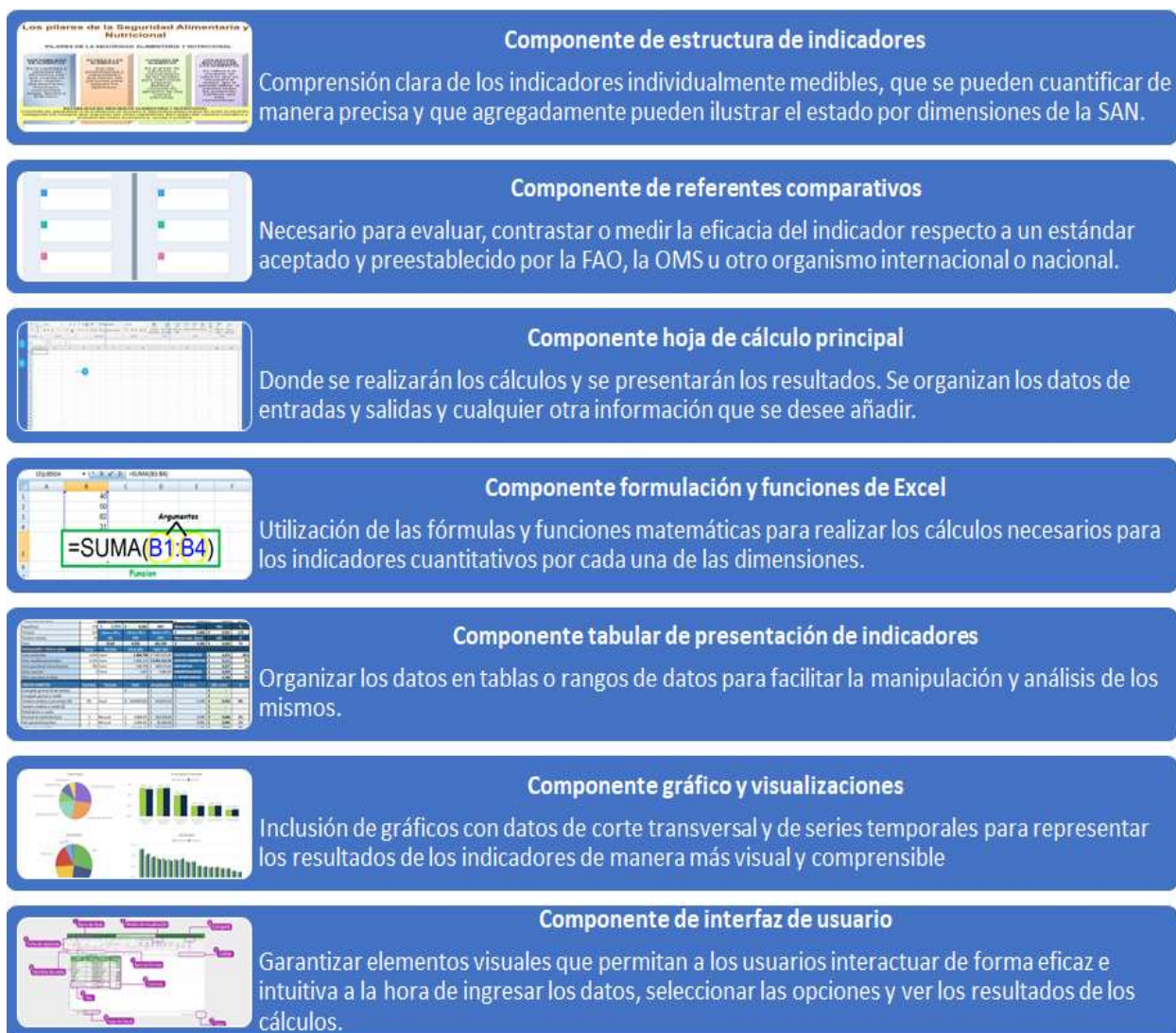


Figura 2.2. Componentes para el manejo de la información.  
Fuente: Raya, García y Sánchez (2023)

La estructura de indicadores ha sido analizada anteriormente y más adelante se realizarán otras precisiones. En cuanto a los referentes comparativos se utiliza para la evaluación del LC3 siempre un cemento de referencia que se considera la planta esté produciendo o pudiera potencialmente producir.

Para correr la herramienta es preciso definir cuáles serán las variables de entradas y salidas (*input* y *output*). Las mismas se presentan en la siguiente tabla 2.2:

Tabla 2.2. Principales variables de entrada y salida de la herramienta de cálculo

Variables de entrada	Variables de salida
----------------------	---------------------

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composición del cemento de referencia y LC3</li> <li>- Capacidad de producción de cemento</li> <li>- Número de trabajadores y salario medio</li> <li>- Costo de inversión</li> <li>- Precio de las materias primas como: yeso, clínquer, caliza, arcilla, combustibles, etc.</li> <li>- Mix energético de la planta</li> <li>- Impuesto sobre el carbono (USD/t)</li> <li>- Costo de capital</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumo de energía por tonelada de cemento</li> <li>- Costo de producción de la arcilla calcinada</li> <li>- Emisiones por tonelada de cemento</li> <li>- Ahorro de emisiones</li> <li>- Rentabilidad (TIR, VAN, plazo de amortización)</li> <li>Ingresos asociados al <i>Carbon tax</i></li> </ul>
--	--

Fuente: Elaboración propia.

Estos grupos de variables se combinan en la herramienta mediante un sistema de fórmulas considerado como una "caja negra". Los indicadores de rentabilidad (TIR, VAN) utilizan funciones programadas en Excel.

Es importante señalar que todas las variables de entrada son variables independientes que permiten evaluar análisis de sensibilidad univariados y multivariados. Esta útil herramienta de momento sólo puede ser utilizada por usuarios altamente cualificados y conocedores del proceso de producción de cemento y sus variables fundamentales.

### 2.2.1. Ambiente operacional de la herramienta

Se escoge el Excel como *software* para la herramienta de cálculo propuesta. Luego del diseño metodológico que explica los componentes "estructura de indicadores" y "referentes comparativos", en este epígrafe se ilustra su ambiente de trabajo, así como sus componentes "hoja de cálculo principal", "formulación y funciones de Excel", "tabular de presentación de indicadores", "gráfico y visualizaciones" e "interfaz de usuario".

La herramienta consta de 12 hojas de cálculo en un archivo Excel integrado: 1) hoja introductoria que explica las principales características de la herramienta, 2) hoja con resumen de datos de entrada y resultados fundamentales, 3) hoja dedicada a la

información de la compañía que se evalúa, 4) hoja dedica al análisis de las variables productivas, 5) hoja que evalúa la fuerza de trabajo, 6) hoja que evalúa la energía, 7) hoja que evalúa los costos de producción, 8) hoja que evalúa los costos de inversión, 9) hoja que evalúa las emisiones de CO2, 10) hoja dedicada al componente gráfico, 11) hoja con datos compilados sobre proyectos de calcinación de arcillas publicados como referencia y 12) hoja de exención de responsabilidad. A continuación se explica cómo se ha configurado la herramienta para realizar la evaluación económica y ambiental del LC3.

En primer lugar, se presenta una hoja de descargo de responsabilidad. Esta hoja proporciona una aclaración del escenario evaluado. A continuación, se presenta un resumen en el que se pueden observar fácilmente los principales resultados. Ver Figura 2.3.

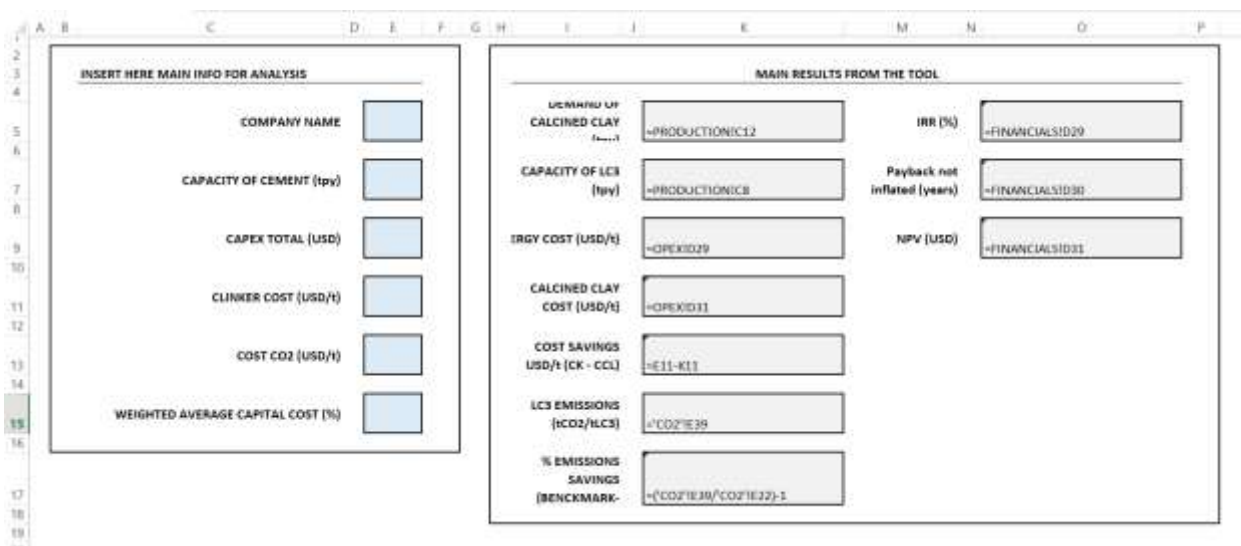


Figura 2.3. Página resumen con principales variables de entrada y resultados.

Fuente: Herramienta de cálculo propuesta.

En las hojas siguientes, se evalúan los detalles sobre la empresa, su producción, mano de obra y energía. A partir de datos anteriores, se estiman los costos de producción de la arcilla calcinada, el cemento de referencia y el LC3. Se calcula el ahorro por unidad de producción y la producción total. Ver Figuras 2.4 y 2.5.

		(t/year)	
<b>Volumen arcilla cruda</b>	USD/ton	=PRODUCTION!C12	
Humedad			
<b>Costos variables</b>			
Arcilla		=D13*E8	
Combustibles	=ENERGY!M18	=D14*E\$8	
Diesel (Transporte)		=D15*E\$8	
Electricidad	=ENERGY!M30	=D16*E\$8	
Piezas de repuesto		=D17*E\$8	
Mano de obra subcontratada		=D18*E\$8	
Concesiones mineras		=D19*E\$8	
<b>Subtotal costos variables</b>	=SUMA(D13:D19)	=SUMA(E13:E19)	
<b>Costos fijos</b>			
Electricidad fija	=E23/E\$8		
Gastos de mano de obra	=E24/E\$8	=LABOUR!D14	
Mantenimiento	=E25/E\$8		
Otros costos fijos	=E26/E\$8	0	
<b>Subtotal costos fijos</b>	=SUMA(D22:D26)	=SUMA(E23:E26)	
<b>Costo de pre-procesamiento de arcilla</b>	0	=D29*E8	
<b>Costo de producción total</b>	=D27+D20+D29	=E27+E20+E29	

Figura 2.4. Cálculo del costo de producción de arcillas calcinadas.

Fuente: Herramienta propuesta.

Cement production				
Costo del clínker		USD /T clinker		
Costo de molienda		USD /T benchmark cement		
Costo del yeso		USD /T gypsum		
Costo de la caliza		USD /T limestone		
<b>Costo del cemento de referencia</b>	<b>Volumen</b>	<b>Costo /t</b>	<b>Costo total</b>	<b>Costo /t Cemento referencia</b>
Costo de clínker	=PRODUCTION!C7	=J7	=K14*J14	=L14/PRODUCTION!C55
Costo de yeso	=PRODUCTION!C8	=J10	=K15*J15	=L15/PRODUCTION!C55
Costo de caliza	=PRODUCTION!C9	=J11	=K16*J16	=L16/PRODUCTION!C55
Costo de extensor	=PRODUCTION!C10	0	=K17*J17	=L17/PRODUCTION!C55
Costo de molienda	=PRODUCTION!C11	=J18	=K18*J18	=L18/PRODUCTION!C55
<b>Costo de producción total cemento de referencia</b>			=SUMA(L14:L18)	=L19/PRODUCTION!C56
		<b>USD /t</b>	<b>USD</b>	
Total cash cost benchmark cement	=M19		=J22*PRODUCTION!C16	
<b>Final cost benchmark cement</b>	=J22		=SUMA(K22)	
<b>Costo af LC3</b>	<b>Volumen</b>	<b>Costo /t</b>	<b>Costo total</b>	<b>Costo /t LC3</b>
Costo de clínker	=PRODUCTION!C9	=J7	=K26*J26	=L26/PRODUCTION!C58
Costo de yeso	=PRODUCTION!C8	=J10	=K27*J27	=L27/PRODUCTION!C58
Costo de arcilla calcinada	=PRODUCTION!C12	=D31	=K28*J28	=L28/PRODUCTION!C58
Costo de caliza	=PRODUCTION!C11	=J11	=K29*J29	=L29/PRODUCTION!C58
Costo de molienda	=PRODUCTION!C11	=J18	=K30*J30	=L30/PRODUCTION!C58
<b>Costo de producción total LC3</b>			=SUMA(L26:L30)	=L31/PRODUCTION!C58

Figura 2.5. Cálculo del costo de producción de cemento de referencia y LC3.

Fuente: Herramienta propuesta.

La siguiente hoja calcula las emisiones de carbono y el ahorro de la producción de LC3 (Figura 2.6). En esta hoja, el impuesto sobre el carbono puede introducirse como variable importante para la evaluación financiera.



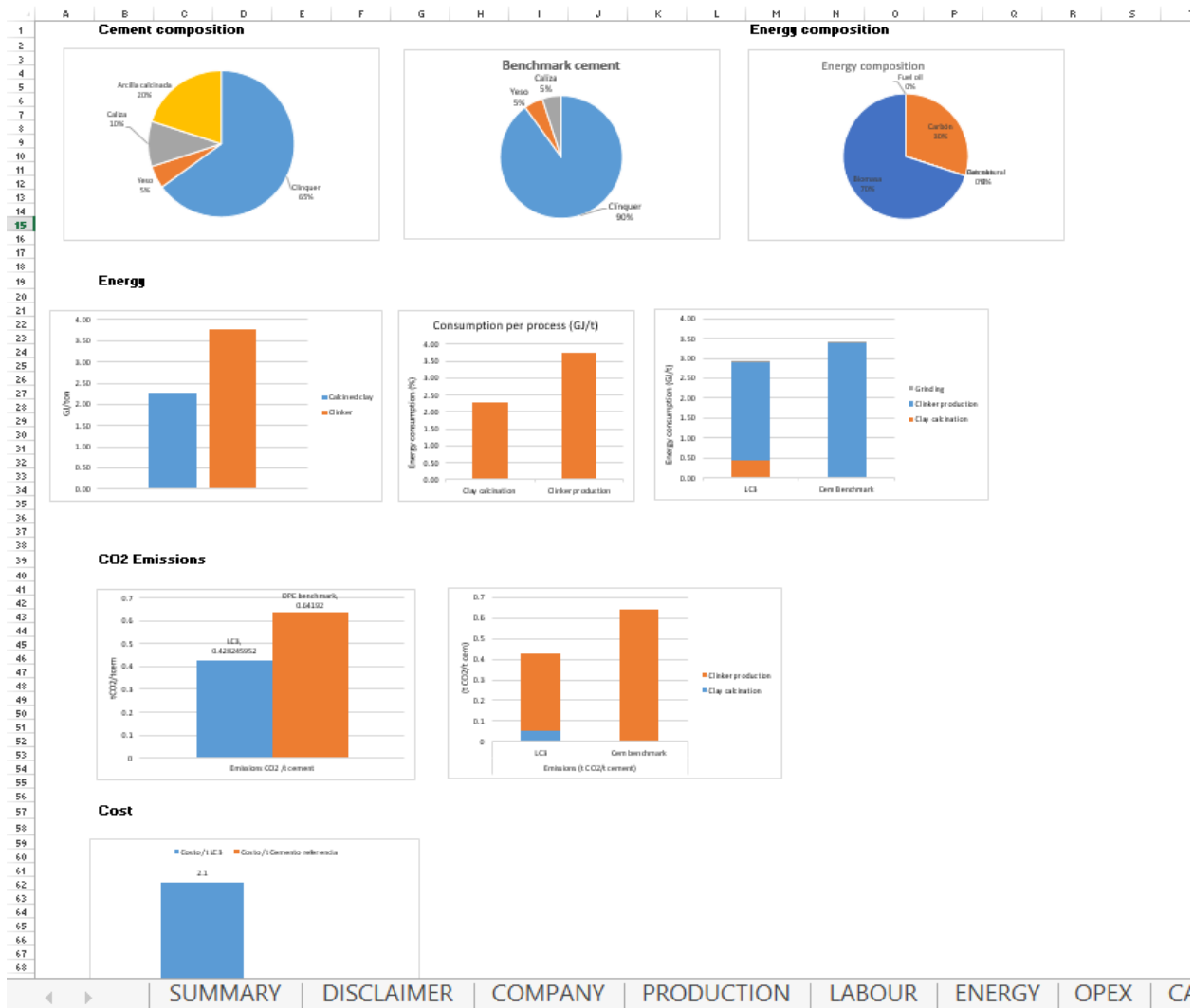


Figura 2.8. Resumen de los gráficos de resultados proporcionados por la herramienta.

Fuente: Herramienta propuesta.

La herramienta ha sido probada por un usuario del mundo académico (RMI, 2023). Se están buscando nuevas oportunidades para probarla y perfeccionarla. La guía del usuario está en proceso de redacción, pero hay que perfeccionarla a partir de los comentarios de los sujetos de prueba.

Finalmente, aunque no se muestren de manera explícita, existen múltiples interconexiones entre los indicadores que se interconectan en una evaluación de este tipo. Para facilitar la evaluación se realizan, por separado, los análisis de cada indicador, pero sin negar el carácter sistémico de los procesos que se evalúan donde cada indicador está condicionado o influye comúnmente sobre la factibilidad económica y ambiental del

LC3. La última sección de la herramienta intenta ofrecer, de manera simplificada, una fotografía de dicha integración de manera que facilite la toma de decisiones.

En el capítulo siguiente de la investigación, se disponen de los elementos necesarios para validar a través de la evaluación de un estudio de caso, la herramienta propuesta para la evaluación de la factibilidad económica y ambiental del LC3 en una inversión en Costa de Marfil. Lo hasta aquí expuesto constituye una herramienta práctica y metodológica, por lo que la autora considera que contribuye a impactar en los estudios futuros a realizar, en cualquier nivel, donde se realicen estudios que evalúen la viabilidad económica y ambiental del LC3.

## **CAPÍTULO III: APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA. ESTUDIO DE CASO: COSTA DE MARFIL**

En el presente capítulo se evalúa un caso de estudio hipotético para validar la herramienta propuesta. El caso de estudio que se selecciona es la producción de LC3 en una planta molinera en Costa de Marfil. Primeramente, se describen los supuestos asumidos para la evaluación del LC3 y su cemento de referencia y luego se analizan los principales resultados obtenidos de la evaluación.

### **3.1. Supuestos para la evaluación económica y ambiental del LC3 en Costa de Marfil**

Para probar y validar la herramienta que se propone se realiza la evaluación de una inversión que pretende introducir el LC3 en una planta molinera en Costa de Marfil. El escenario se basa en informaciones publicadas sobre la inversión realizada en Abidjan, Costa de Marfil donde la compañía Oyak ha instalado un calcinado de arcillas de la empresa IPIAC S.A. con capacidad de 1 000 000 de toneladas de cemento por año (Cemnet, 2020).

Los principales supuestos de la evaluación son:

- Se asume la misma capacidad productiva de cemento (1 millón de toneladas por año) antes y después de la inversión.
- Se utiliza como cemento de referencia el cemento tipo I (CEM I) que produce Oyak con resistencia de diseño de 42.5 MPa a los 28 días (Oyak, 2023). La composición de este cemento se muestra en la Figura 3.1a.
- Se propone introducir el LC3-65, es decir, LC3 con 65% de clínquer como sustituto del CEM I que actualmente produce la planta (Ver Figura 3.1b). Este cemento permite alcanzar resistencias similares al cemento de referencia.

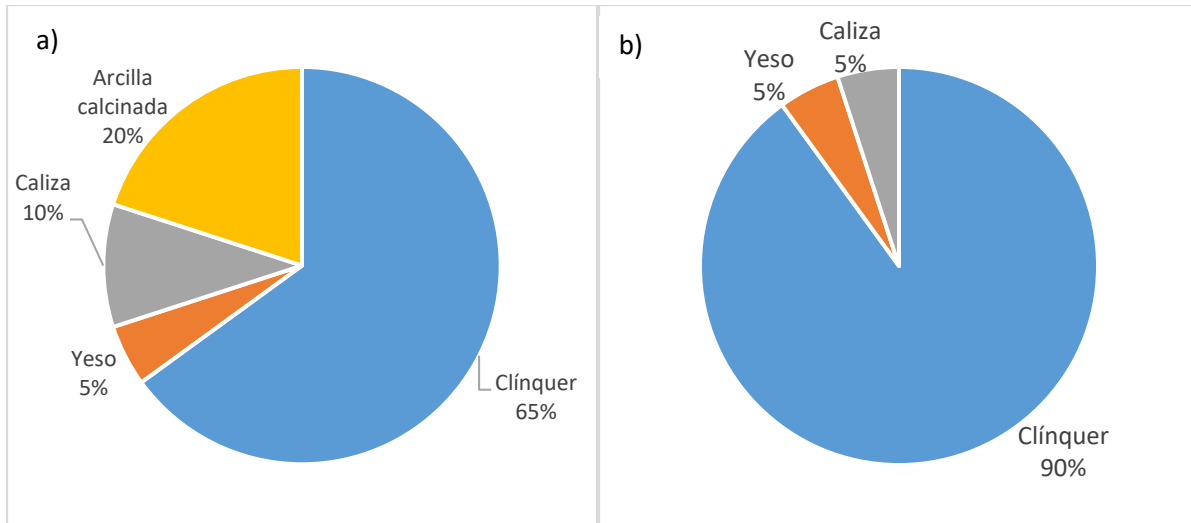


Figura 3.1 Composición de los cementos comparados. a) Cemento de referencia; b) Cemento LC3-65.

Fuente: Herramienta de cálculo

- El calcinador instalado es de tecnología de la empresa IPIAC. Es un calcinador rotatorio con doble eje. Esta tecnología permite calcinar arcilla caolinítica con consumos energéticos entre 500-550 kcal/kg y 20-22 KWh/ton (Putin, 2023).
- El combustible que se usa para alimentar el quemador del horno presenta una combinación de biomasa y carbón en una proporción 70-30 respectivamente tal como se observa en la Figura 3.2.

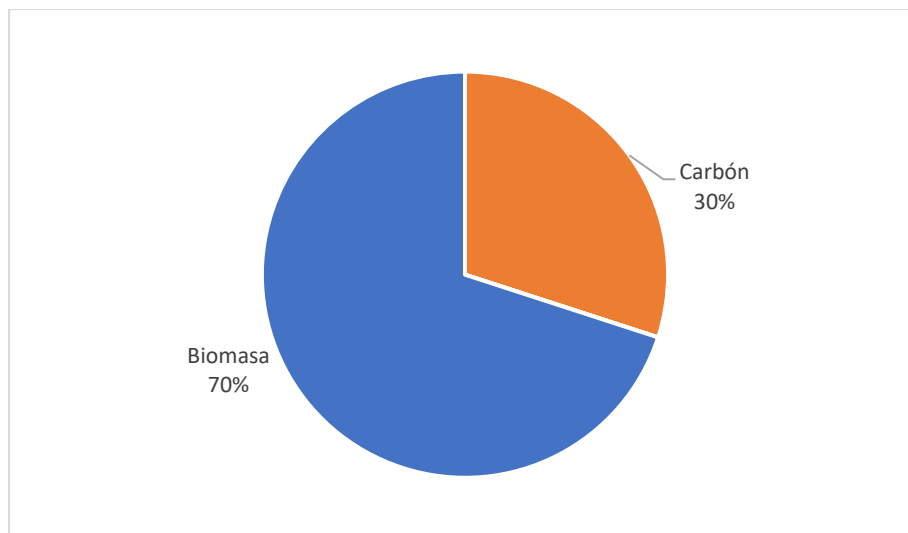


Figura 3.2. Composición del combustible para la producción de cemento en la planta objeto de estudio.

Fuente: Herramienta de cálculo

- El costo de inversión estimado es de 12 millones de dólares, lo que dividido la capacidad instalada de 1 millón de toneladas por año resulta en un índice de 12 USD/t cemento.
- Se estiman gastos de salario atendiendo a los salarios promedio de 4 categorías de trabajadores (Ver Tabla 3.1). La cantidad de trabajadores por categoría responden al criterio de los oferentes de la tecnología ajustados a las condiciones específicas de este escenario productivo.

Tabla 3.1. Gasto de salario asociado a la producción del nuevo calcinador.

Personal	Trabajadores	Salario (USD/año)	Total (USD)
Cat 1 = Director de planta	0	100,000	-
Cat 2 = Jefe de departamento	1	47,273	47,273
Cat 3 = Ingeniero	2	35,455	70,909
Cat 4 = Trabajadores no calificados	29	8,273	239,909
<b>Total</b>	<b>32</b>		<b>358,091</b>

Fuente: Elaboración propia.

- Los precios asociados a la energía se estiman a partir de [www.globalpetrolprices.com](http://www.globalpetrolprices.com) para la región objeto de estudio.
- Para estimar las emisiones de CO2 se consideran los factores de emisión publicados en Protocolo de CO2 del *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* y la Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento (CSI en inglés) (WBCSD/CSI, 2013) y los publicados por el IPCC como guía metodológica (IPCC, 2014). En la tabla 3.2 se muestran los factores de emisión por tipo de combustible.

Tabla 3.2. Factores de emisión de GEI por tipo de combustible utilizados en la evaluación.

<b>Tipos de combustible</b>	<b>Factor de emission (t CO2 / GJ)</b>
Diesel	0.074
Steam coal	0.096
Petcoke	0.093
Natural gas	0.056
AFR mix	0.000

Fuente: Elaboración propia.

- Los costos de las materias primas fundamentales así como los combustibles se presentan a continuación:

Tabla 3.3. Costo estimado de materias primas y combustibles fundamentales

<b>Materias primas</b>	<b>Costo (USD/t)</b>
Clínquer	60.0
Arcilla caolinítica	4.0
Yeso	19.0
Caliza	4.0
Electricidad (KWh)	0.12
Carbón (GJ)	4.8
Biomasa (GJ)	3.4

Fuente: Elaboración propia.

- Para el análisis financiero se utiliza un costo de capital de 14% asociado a la región africana teniendo en cuenta lo establecido en el Observatorio del Costo de Capital para proyectos de energía limpia en economías emergentes y en desarrollo (IEA, 2022).
- Se considera una vida útil de 20 años para la construcción de los flujos financieros.
- Los gastos de mantenimiento estimados ascienden al 3% del costo total de inversión los primeros 5 años, luego se aplica un 5% de costo de inversión hasta el final de la vida útil de la planta.
- La construcción del flujo de caja parte de flujos incrementales de sustituir el cemento de referencia por el LC3 y que los ahorros reportados permitan cubrir la inversión en el tiempo así como generar dividendos a la empresa.

Una vez determinados los principales supuestos de la evaluación se muestran a continuación los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la herramienta de cálculo propuesta.

### 3.2. Resultados de la aplicación de la herramienta propuesta

A continuación se analizan los resultados obtenidos de la evaluación de la introducción del LC3 en una planta en Costa de Marfil.

#### *Análisis productivo*

Se parte del análisis de producir 1 millón de toneladas de cemento por año, tal como se muestra en la tabla 3.4 donde se explicitan las cantidades necesarias de cada materia prima.

Tabla 3.4. Volúmenes de producción anual por componentes de cada cemento.

<b>Materiales</b>	<b>% en cemento</b>	<b>Producción (t/año)</b>
<b>LC3</b>	<b>100.0%</b>	<b>1,000,000</b>
Clínquer	65.0%	650,000
Yeso	5.0%	50,000
Caliza	10.0%	100,000
Arcilla calcinada	20.0%	200,000
<b>CEM I 42.5</b>	<b>100%</b>	<b>1,000,000</b>
Clínquer	90%	900,000
Yeso	5%	50,000
Caliza	5%	50,000
Extensor	0%	0
<b><i>Clínquer restante luego de la producción de LC3 (t)</i></b>		<b>250,000</b>

Fuente: Herramienta de cálculo.

Como puede observarse en la tabla 3.4 la producción de LC3 permite sustituir 250 mil toneladas de clínquer por año, lo que podría traducirse en un aumento de la capacidad productiva si se contara con mayor capacidad de molienda. Esta es una de las mayores ventajas del LC3, que permite aumentar los niveles de producción de cemento sin necesidad de grandes inversiones asociadas al aumento de las capacidades de producción de clínquer.

## Energía

El análisis del consumo energético se realiza en dos niveles:

- Comparación de la producción de clínquer vs producción de arcilla calcinada
- Comparación del cemento de referencia vs. LC3.

En la Figura 3.3 se detallan los resultados obtenidos en el consumo de energía por proceso, donde se evidencia una reducción de 1.3GJ/t al producir arcilla calcinada en comparación con el clínquer.

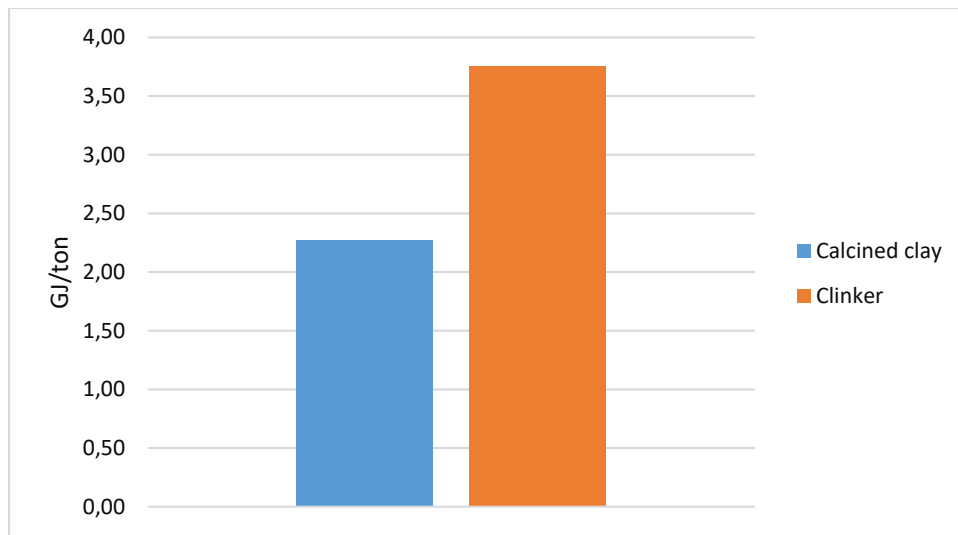


Figura 3.3. Consumo de energía térmica (GJ/t) Clínquer vs. Arcilla calcinada.

Fuente: Herramienta de cálculo

A nivel de cementos se evidencian los mayores ahorros de energía asociados a la sustitución del clínquer. El consumo de energía de la molienda es mínimo comparado con el reportado en la producción de clínquer y arcilla calcinada. Se reporta una reducción del 15% en el consumo de energía por tonelada de cemento, ver detalles en Figura 3.4.

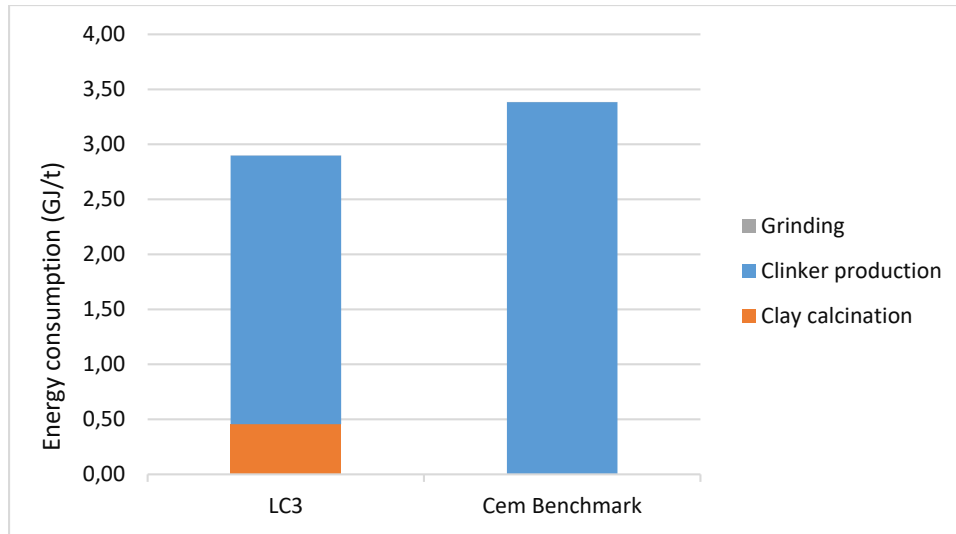


Figura 3.4. Consumo total de energía (GJ/t) LC3 vs. Cemento de referencia.

Fuente: Herramienta de cálculo

Asociado al consumo de energía se encuentra el costo de producción pues una gran parte del costo se relaciona con la compra de combustibles para la calcinación. A continuación se detallan los resultados del costo de producción de la arcilla calcinada y los cementos comparados.

#### *Costo de producción*

El análisis del costo de producción de la arcilla calcinada se presenta en detalles en la tabla 3.5. Se detalla el costo para una tonelada de arcilla calcinada y el costo para la producción anual de 200 00 t, necesarias para producir 1 millón de toneladas de LC3. El costo de producción estimado es de 21.31 USD por tonelada. Este costo es muy competitivo si se considera que en este escenario la empresa importa el clínquer a precios muy elevados (60USD). A estos precios la producción de arcilla calcinada reporta ahorros de más del 60% con relación al clínquer.

Tabla 3.5. Costo de producción de arcilla calcinada para 1 y 200 000 toneladas.

Partidas de costo	Costo de 1t	Costo de 200 000 t
<b><u>Costos Variables</u></b>		
Arcilla	4	800,000
Energía	8.42	1,684,014
Diésel (transporte)	0.50	100,000
Electricidad	2.54	508,200

Piezas de repuesto	1.00	200,000
Mano de obra subcontratada	1.00	200,000
Concesiones mineras	1.61	321,831
<b>Subtotal costos variables</b>	<b>19.07</b>	<b>3,814,045</b>
<b>Costos Fijos</b>		
Electricidad fija	0.15	30,000
Mano de obra	1.79	358,091
Mantenimiento	0.30	60,000
Otros costos fijos	-	0
<b>Subtotal Costos Fijos</b>	<b>2.24</b>	<b>448,091</b>
<b>Costo pre-procesamiento de arcilla</b>	<b>-</b>	<b>0</b>
<b>Costo Total Producción de Arcilla Calcinada</b>	<b>21.31</b>	<b>4,262,136</b>

Fuente: Herramienta de cálculo

Los ahorros se trasladan a la producción de cemento donde se reportan ahorros aproximados del 11%. El costo del cemento de referencia se estima en 78 USD/t mientras que el LC3 se estima en 62 USD/t. Ver figura 3.5.

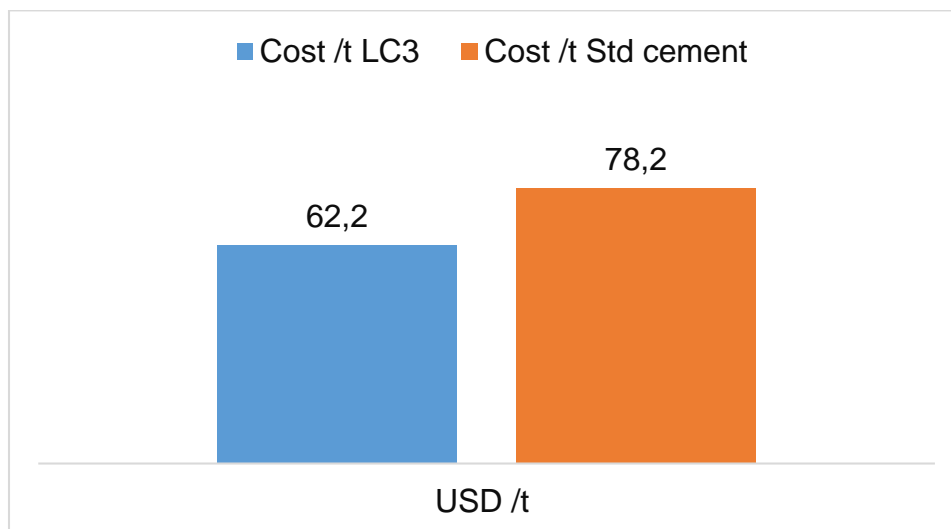


Figura 3.5. Costo de producción del cemento LC3 vs. Cemento de referencia.

Fuente: Herramienta de cálculo

Como se ha definido en los supuestos de la evaluación, los ahorros estimados multiplicados por el nivel de producción constituirán los ingresos al ser costos evitados. No obstante, otras fuentes de ingreso se consideran en la herramienta, por ejemplo de existir un bono de carbono estos ingresos adicionales se suman en el flujo de caja.

### *Emisiones de CO2*

Las emisiones de CO2 y su reducción es uno de los mayores impactos de producir LC3. Tomando en cuenta el ahorro de energía reportado y los factores de emisión de IPCC y WBCSD/CSI se obtienen los resultados mostrados en la Figura 3.6. Se evidencia la reducción de emisiones de CO2 en un 33%. Las emisiones llegan a ser notablemente bajas por el uso de un 30% de biomasa como fuente de energía pues se consideran cero emisiones asociadas a este recurso.

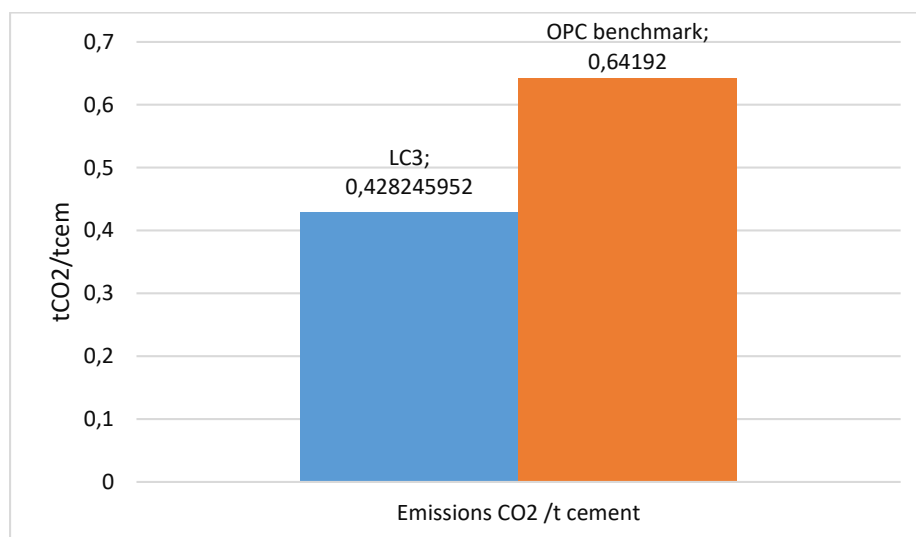


Figura 3.6. Emisiones de CO por tipo de cemento. LC3 vs. Cemento de referencia.

Fuente: Herramienta de cálculo

A partir de la herramienta se estima un volumen de emisiones reducidas de 142 528 toneladas por año, a partir de la producción del LC3. Esto, a lo largo de 20 años significaría 2.8 millones de toneladas de CO2 ahorradas.

### *Análisis financiero de la inversión*

Una vez evidenciados los impactos sobre la productividad, el costo, la energía y las emisiones, corresponde analizar los flujos financieros del proyecto y demostrar su factibilidad. La Figura 3.7 muestra el flujo de caja de la inversión considerando los 20 años de vida útil. No son considerados ahorros adicionales asociados a bonos de carbono pero la herramienta está programada para calcular el efecto de estos sobre la factibilidad de la inversión.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Simplified DCF</b>										
Costo de inversión	-12,000,000									
Ahorros anuales por UCI	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48
Ahorros adicionales asociados a bonos de carbono	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gastos de mantenimiento	360,000.00	360,000.00	360,000.00	360,000.00	360,000.00	360,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00
Flujo de caja simplificado	-12,000,000	10,637,664.48	10,637,664.48	10,637,664.48	10,637,664.48	10,637,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48
Flujo de caja descontado	-12,000,000	9,331,284.63	8,185,337.40	7,186,120.52	6,298,351.34	5,524,869.59	4,737,036.06	4,155,294.79	3,644,966.42	3,197,364.42
Flujo de caja acumulado	-12,000,000	-2,668,715.37	5,516,622.03	12,696,742.55	18,995,093.88	24,519,963.48	29,256,999.54	33,412,294.33	37,057,289.77	40,254,654.18
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48	10,997,664.48
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	600,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00	600,000.00
	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48	10,397,664.48
	2,460,268.09	2,158,129.91	1,893,096.41	1,660,610.89	1,456,676.22	1,277,786.15	1,120,865.05	983,214.95	862,469.26	756,551.98
	45,519,627.90	47,677,757.81	49,570,854.22	51,231,465.10	52,688,141.32	53,965,927.47	55,086,792.52	56,070,007.47	56,932,476.73	57,689,028.71

Figura. Flujo de caja de la inversión a 20 años.

Fuente: Herramienta de cálculo

A partir de la estimación de los flujos de caja anuales de la inversión se calculan los siguientes indicadores financieros: 1) Valor presente neto, que muestra la rentabilidad absoluta de la inversión; 2) Tasa interna de retorno, que muestra la rentabilidad relativa de la inversión; y 3) Período de recuperación, que expresa el tiempo en que demora recuperar la inversión realizada. En la tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.6. Resultados de la evaluación financiera

Indicador financiero	Valor
Tasa interna de retorno (TIR)	89%
Periodo de recuperación (años)	1.1
Valor actual neto (USD)	\$57,689,028.7

Fuente: Herramienta de cálculo

Los resultados muestran que la inversión es factible. La TIR resulta en 89%, valor mucho mayor que el costo de capital considerado que es 14%. La inversión se recupera en poco más de un año y se esperan beneficios sobre los 57 millones de USD.

El análisis del estudio de caso para la aplicación de la herramienta de cálculo propuesta en Costa de Marfil, arroja resultados coherentes por lo que se considera que se valida la herramienta. No obstante, como parte de su proceso de creación se concibe la prueba de diferentes tipos de usuarios como clientes, académicos, decisores. En futuros pasos de esta investigación, se prevé que la herramienta sea probada por varios de estos usuarios para continuar su perfeccionamiento y elaborar una guía para los mismos a partir de la retroalimentación obtenida.

El estudio de caso que se presenta en esta investigación se considera un test realizado a nivel académico pues, aunque se trabaja con datos reales sus resultados solo se utilizan con fines teóricos por el momento.

## CONCLUSIONES

1. La sustitución de una porción de clínker por arcilla calcinada y caliza es una de las soluciones más viables para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y el costo por tonelada en la industria del cemento.
2. La herramienta que se propone permite evaluar diferentes escenarios tecnológicos, tipos de interés, distancias de las materias primas, mix energético, mecanismos de financiación como el impuesto sobre el carbono de forma simplificada y rápida de calcular.
3. La evaluación de la factibilidad económica y ambiental de producir LC3 en Costa de Marfil se demuestra a través de la herramienta propuesta al demostrar una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en 33%, del costo de producción en 10% e indicadores de rentabilidad que permiten afirmar que la inversión se recupera rápido y genera grandes dividendos.
4. La herramienta ha sido probada por usuarios potenciales y a través de un estudio de caso demostrando su validez a la hora de proporcionar datos precisos y rápidos sobre la posible introducción de LC3 en plantas de cemento integradas o unidades de molienda.

## RECOMENDACIONES

1. Considerar la inclusión de la herramienta propuesta en esta investigación para su utilización en la evaluación de las inversiones asociadas a la introducción del LC3, en Cuba y el resto de mundo.
2. Sensibilizar a los actores del sector cementero sobre el uso y eficacia de la herramienta para lograr la validación del usuario.
3. Confeccionar, en otros estudios relacionados con la temática, una guía para usuario a partir de las experiencias derivadas de su prueba por parte de los usuarios.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acciona (2020) ¿Qué es el desarrollo sostenible? Consultado el 5 de septiembre en <http://www.acciona.com>
2. Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., & Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579–1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
3. Aristizabal-Alzate, CE (2021). Revisión de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial. *Revistas UIS Ingeniería*. Vol. 20 Núm. 3. Consultado el 17 de septiembre del 2023 en <https://revistas.uis.edu.co>
4. Caballero, A (2023) Desarrollo sostenible: definición, objetivos y ejemplos. *Climate consulting*. España. Consultado el 2 de septiembre del 2023 en <http://climate.selectra.com>
5. Cancio Díaz, Y., Sánchez Berriel, S., Heierli, U., Favier, A. R., Sánchez Machado, I. R., Scrivener, K. L., Martirena Hernández, J. F., & Habert, G. (2017). Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. *Development Engineering*, 2, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2017.06.001>
6. Carbon footprint (2023) Carbon Footprint Calculator For Individuals And Households. <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>
7. Cemnet (2020) Innovations driving clinker reduction. Consultado el 17 de octubre del 2023. Publicado en: <https://www.cemnet.com/News/story/169946/innovations-driving-clinker-reduction.html>
8. CETYS (2021) Introducción a las hojas electrónicas de cálculo. Consultado el 3 de octubre del 2023 en <https://www.cetys.mx>
9. CETYS (2021) Introducción a las hojas electrónicas de cálculo. <https://www.cetys.mx/educon/introduccion-a-las-hojas-electronicas-de-calculo/>
10. Circular ecology (2023) <https://circularecology.com/concrete-embodied-carbon-footprint-calculator.html>
11. Climate hero (2023) Calculate your carbón footprint. <https://climatehero.me/calculate/>
12. Climate hero (2023) Calculate your carbón footprint. <https://climatehero.me/calculate/>
13. Desafíos de la Agenda 2030 (2019), *Tiempo de paz*, N°132 primavera. Consultado el 5 de septiembre del 2023 en <https://www.ohchr.org>
14. Econova Institute (2022). *Economía circular en el sector de la construcción*. Consultado el 11 de septiembre del 2023 en <https://econova-institute.com>
15. Ellen MacArthur Foundation (2023) It's time for a circular economy. Consultado el 10 de septiembre del 2023 en <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>

16. EPA (2023) Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
17. Fundación Conama (2018). Economía circular. Consultado el 11 de septiembre del 2023 en <https://www.fundacionconama.org>
18. GCCA, (2021). The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap fo Net Zero Concrete. *Concrete Future*. Consultado el 16 de septiembre del 2023 en <https://gccassociation.org>
19. Global cement (2022) **Calcined clay projects in Africa** publicado en: <https://www.globalcement.com/news/item/13938-calcined-clay-projects-in-africa>. Consultado el 17 de octubre del 2023.
20. HOLCIM (2023) Concrete CO2 saver. <https://www.holcim.us/carbon-calculator>
21. <https://www.nature.org/en-us/get-involved/how-to-help/carbon-footprint-calculator/>
22. IEA (2022) Cost of Capital Observatory. Consultado el 12 de noviembre del 2023 Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/cost-of-capital-observatory-data-explorer>
23. IPCC. (2014). Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories (Issue April, pp. 1–5). Consultado el 9 de noviembre del 2023 en <https://ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/IPCC-Emissions-Factor-Database>
24. IPCC (2021). Resumen para responsables de políticas. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.
25. Journal of Enviromental Sciences (s.f). A review of Low-carbon technologies and projects for the global cement industry. Consultado el 15 de septiembre del 2023 en <http://silkradst.xjtu.edu.cn>
26. ONU/CEPAL (2019). La agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2019). Consultado el 5 de septiembre del 2023 en <https://repositorio.cepal.org>
27. Limestone Calcined Clay Cement (2022). A sustainable alternative for the cement industry Pdf. Consultado el 25 de septiembre del 2023 en <https://lc3.ch>
28. Ministerio de Justicia. (2015). Decreto 327/2014. Reglamento del proceso inversionista. In *Gaceta Oficial de la República de Cuba* (Issue 5). ISSN 1682-7511. <http://www.gacetaoficial.cu>
29. Miranda, T (2007) El desarrollo sostenible. Perspectivas y enfoques en una nueva época. *Pastos y Forrajes*. V.30 n.2. Consultado el 2 de septiembre del 2023 en <http://scielo.sld.cu/scielo.php>

30. Nature conservancy (2023) Calculate Your Carbon Footprint. <https://www.nature.org/en-us/get-involved/how-to-help/carbon-footprint-calculator/>
31. Odoo (2023) Software de contabilidad en línea. [odoo.com/es\\_ES/app/spreadsheet](https://www.odoo.com/es_ES/app/spreadsheet)
32. Oyak (2023) Fields of activity. Cement. Consultado el 20 de octubre del 2023 <https://oyakcimento.com/en/fields-of-activity/cement.html>
33. Producción sostenible de cemento (s.f). La recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera. Consultado el 17 de septiembre del 2023.
34. Putin, A. (2023) IPIAC's Technology. Presentación realizada en el evento LC3 Day en Costa Rica el 27 de marzo de 2023. Consultado el 26 de octubre del 2023.
35. Raya, García y Sánchez (2023) Herramienta de cálculo para el sistema de información de la SAN en Villa Clara. Tesis de diploma de Lic. en Economía.
36. Repsol (2023) ¿Qué beneficios tiene la economía circular? *Economía circular*. Consultado el 10 de septiembre del 2023 en <https://www.repsol.com>
37. RMI (2023) Scaling Limestone Calcined Clay Cement (LC3): Learnings from the first movers. Webinar disponible en <https://youtu.be/3Yz0ILBz1Vs>
38. Sánchez Berriel, S. (2018). Modelo de evaluación integrada de impactos aplicado al proceso de introducción del cemento de bajo carbono en la industria cementera en Cuba. Tesis doctoral UCLV:
39. Sánchez Berriel, S., Favier, A., Rosa Domínguez, E., Sánchez Machado, I. R., Heierli, U., Scrivener, K., Martirena Hernández, F., & Habert, G. (2016). Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 124, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>
40. Santander Universidades (2023) Programación en Excel: descubre sus ventajas y cómo empezar. Consultado el 8 de octubre el 2023 en <https://www.santanderopenacademy.com>
41. Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2016). Eco-efficient cements: Potencial, economically viable solutions for low-CO2, cement-based materials industry. <http://www.unep.org>
42. Scrivener, K., Dekeukelaere, A., Avet, F. y L. Grimmeissen (2019). Financial Attractiveness of LC3. <http://www.lc3.ch>
43. Scrivener, K., Dekeukelaere, A., Avet, F., & Grimmeissen, L. (2019). *Financial Attractiveness of LC3*. [www.lc3.ch](http://www.lc3.ch)
44. Someka (2023) Ready-to-use spreadsheets for Financial Models. <https://www.someka.net/product-category/excel-templates/financial-models-excel-templates/page/2/>

45. TechSmith Newsletter. (2023) ¿Cómo hacer un manual de usuario: guía completa. Recuperado de: <http://techsmith.es>
46. TechSmith Newsletter. (2023) ¿Cómo hacer un manual de usuario: guía completa? Consultado el 10 de octubre del 2023 en <http://techsmith.es>
47. The World Bank. (2022). State and Trends of Carbon Pricing 2022 (May), World Bank, Washington, DC. Consultado el 14 de noviembre del 2023 en <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37455>
48. UNFCCC (2021) Greenhouse Gas Emissions Calculator. <https://unfccc.int/documents/271269>
49. United Nations (2022) Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Consultado el 3 de septiembre del 2023 en <http://www.un.org>
50. United Nations (2022) Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenible. Consultado el 3 de septiembre del 2023 en <http://www.un.org>
51. United Nations (2022) Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Consultado el 3 de septiembre del 2023 en <http://www.un.org>
52. United Nations (2022) objetivos y metas de desarrollo sostenible consultado el 3 de septiembre del 2023 en <http://www.un.org>
53. WBCSD/CSI. (2013). Cement CO2 and energy protocol. Version 3.1. CO2 emissions and energy inventory. Consultado el 2 de noviembre del 2023 en <http://www.wbcsd.org>
54. World Business Council for Sustainable (2018) *Technology Roadmap Low Carbon Transition in the Cement Industry*. Consultado el 15 de septiembre del 2023 en <https://www.wbcsd.org>
55. Zaragoza, A (2023) El consumo de cemento en España. *Oficemen*. Consultado el 15 de septiembre del 2023 en <https://industrytalks.es>
56. ZebraBi (2023) [https://zebrabi.com/templates/?\\_level\\_of\\_knowledge=finance](https://zebrabi.com/templates/?_level_of_knowledge=finance)

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1. ANÁLISIS SOBRE EL CARBÓN TAX Y LOS PRECIOS DEL CARBÓN EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS.**

*Carbon tax* o impuesto al carbono por su traducción es un impuesto que grava las emisiones de carbono necesarias para producir bienes y servicios. Los impuestos al carbono tienen como objetivo hacer visibles los costos sociales "ocultos" de las emisiones de carbono, que de otro modo sólo se sienten de manera indirecta, como eventos climáticos más severos. De esta manera, están diseñados para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero aumentando los precios de los combustibles fósiles que los emiten al quemarse.

Esto disminuye la demanda de bienes y servicios que producen altas emisiones e incentiva a hacerlos menos intensivos en carbono. En su forma más simple, un impuesto al carbono cubre sólo las emisiones de CO<sub>2</sub>; sin embargo, también podría abarcar otros gases de efecto invernadero, como el metano o el óxido nitroso, gravando dichas emisiones en función de su potencial de calentamiento global equivalente al CO<sub>2</sub>.

Los impuestos al carbono son, por tanto, un tipo de impuesto pigoviano. Las investigaciones muestran que los impuestos al carbono reducen efectivamente las emisiones. Muchos economistas sostienen que los impuestos al carbono son la forma más eficiente (de menor costo) de abordar el cambio climático. Setenta y siete países y más de 100 ciudades se han comprometido a lograr cero emisiones netas para 2050. Hasta 2019, se han implementado o está programada su implementación en 25 países, mientras que 46 países ponen algún tipo de precio al carbono, ya sea a través de impuestos al carbono o esquemas de comercio de emisiones de carbono.

Los precios directos del carbono alcanzaron máximos históricos en varios sistemas en 2021. La mayor parte de este crecimiento se ha observado en los SCE (particularmente los de las economías avanzadas), donde los precios reaccionan a las condiciones del mercado (ver Figura #). Se observaron precios récord en los mercados vinculados del RCDE de la UE y Suiza, en los mercados vinculados de California y Quebec, en la Iniciativa Regional sobre Gases de Efecto Invernadero (RGGI) y en el RCDE de Nueva Zelanda. (The World Bank, 2022)

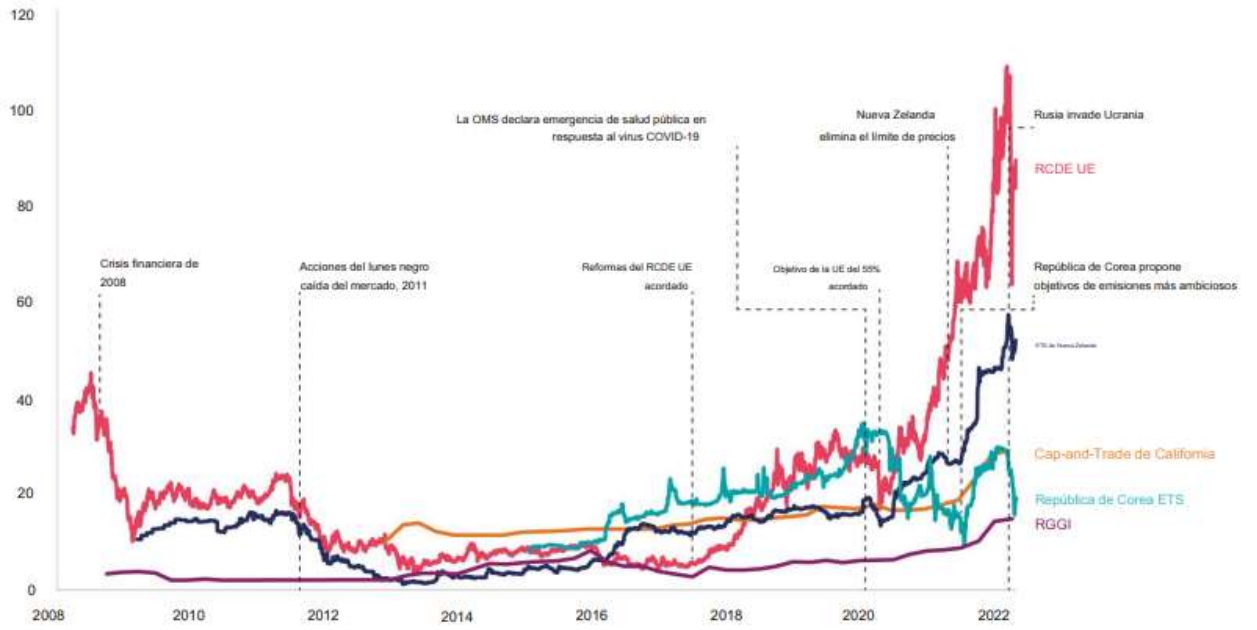


Figura #: Crecimiento de carbon taxes hasta el 2021 por región.

Fuente: Basado en datos del ICAP Allowance Price Explorer.