

# Industrial Symbiosis and Circular Production in Sustainable Cement Manufacturing: A TEMAC Approach

José Luis Rosales Barrero, Msc.  María Elena Palma Moreno, Dra.   
Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia, [rosales.jose@usfx.bo](mailto:rosales.jose@usfx.bo)  
Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia, [palma.maria@usfx.bo](mailto:palma.maria@usfx.bo)

*Abstract– Cement production contributes to approximately 8% of global CO<sub>2</sub> emissions, which has raised growing concern in the scientific community about the need to mitigate these emissions and the pollution associated with industries and transportation. Despite the lack of specific research in the cement sector aimed at cleaner and more sustainable production, interest in this area is growing among researchers.*

*In this study, a bibliometric review was carried out using the TEMAC Meta-Analytical Approach methodology, analyzing articles published since 2015. The VOSviewer software was used to identify the authors and the most cited topics in the scientific literature.*

*The results validated an integrative model and allowed the development of a Roadmap (ROADMAP) for the reduction of CO<sub>2</sub> in the cement industry, with the aim of achieving sustainability in the sector. The implementation of Industrial Symbiosis was proposed as a key strategy to promote cleaner and more efficient production in the use of resources. Likewise, the application of digital twin technologies was explored as an integral part of Industry 4.0 in the cement industry supply chain, supported by artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), deep learning (Deep Learning) and radio frequency identification (RFID).*

*Keywords- Sustainable cement production, Circular cement production, Industrial Symbiosis, TEMAC.*

# Simbiosis Industrial y Producción Circular en la Fabricación Sostenible del Cemento: Un Enfoque TEMAC

## Industrial Symbiosis and Circular Production in Sustainable Cement Manufacturing: A TEMAC Approach

José Luis Rosales Barrero, Msc.  María Elena Palma Moreno, Dra.   
Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia, [rosales.jose@usfx.bo](mailto:rosales.jose@usfx.bo)  
Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia, [palma.maria@usfx.bo](mailto:palma.maria@usfx.bo)

**Resumen**– La producción de cemento contribuye aproximadamente al 8% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, lo que ha suscitado una creciente preocupación en la comunidad científica por la necesidad de mitigar estas emisiones y la contaminación asociada a las industrias y el transporte. A pesar de la escasez de investigaciones específicas en el sector cementero orientadas hacia una producción más limpia y sostenible, el interés en este ámbito es creciente entre los investigadores.

En este estudio, se llevó a cabo una revisión bibliométrica utilizando la metodología del Enfoque Meta-Analítico TEMAC, analizando artículos publicados desde 2015. Se empleó el software VOSviewer para identificar a los autores y las temáticas más citadas en la literatura científica.

Los resultados validaron un modelo integrador y permitieron el desarrollo de una Hoja de Ruta (ROADMAP) para la reducción de CO<sub>2</sub> en la industria del cemento, con el objetivo de alcanzar la sostenibilidad en el sector. Se propuso la implementación de la Simbiosis Industrial como una estrategia clave para promover una producción más limpia y eficiente en el uso de recursos. Asimismo, se exploró la aplicación de tecnologías de gemelo digital como parte integral de la Industria 4.0 en la cadena de suministro de la industria del cemento, apoyadas por la inteligencia artificial (IA), el Internet de las cosas (IoT), el aprendizaje profundo (Deep Learning) y la identificación por radiofrecuencia (RFID).

**Palabras-clave**– Producción del cemento sostenible, Producción circular del cemento, Simbiosis Industrial, TEMAC.

**Abstract**– Cement production contributes to approximately 8% of global CO<sub>2</sub> emissions, which has raised growing concern in the scientific community about the need to mitigate these emissions and the pollution associated with industries and transportation. Despite the lack of specific research in the cement sector aimed at cleaner and more sustainable production, interest in this area is growing among researchers.

In this study, a bibliometric review was carried out using the TEMAC Meta-Analytical Approach methodology, analyzing articles published since 2015. The VOSviewer software was used to identify the authors and the most cited topics in the scientific literature.

The results validated an integrative model and allowed the development of a Roadmap (ROADMAP) for the reduction of CO<sub>2</sub> in the cement industry, with the aim of achieving sustainability in the sector. The implementation of Industrial Symbiosis was proposed as a key strategy to promote cleaner and more efficient production in the use of resources. Likewise, the application of digital twin technologies was explored as an integral part of Industry 4.0 in the cement industry supply chain, supported by artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), deep learning (Deep Learning) and radio frequency identification (RFID).

**Keywords**– Sustainable cement production, Circular cement production, Industrial Symbiosis, TEMAC.

### I. INTRODUCCIÓN

El cemento desempeña un papel vital en la construcción del hormigón y es ampliamente utilizado en todo el mundo. Las empresas cementeras, como una de las principales fuentes de contaminación, contribuyen significativamente al cambio climático [1]. Los procesos de combustión térmica y química utilizados para fabricar Clinker emiten grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [2], lo que resulta en más de 4 mil millones de toneladas de emisiones anuales, representando el 8% de todas las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Además, los contaminantes del aire generados por las plantas de cemento pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud [3].

Como sector industrial tradicional, la fabricación de cemento tiene características obvias de proceso de producción de alto consumo de energía, altas emisiones de gases de efecto invernadero y dependencia de recursos, lo que inevitablemente traerá una serie de problemas ambientales [4].

Lo anterior, es una preocupación ambiental importante, ya que un entorno construido, ha sido reconocido como un importante contribuyente a la pérdida de biodiversidad que debería desempeñar un papel importante en un mundo sostenible [5].

La sostenibilidad es un fenómeno ampliamente tratado, las empresas se transforman, para ser más sostenibles a través del cambio cultural, lo cual les permite liderar la sostenibilidad en tres dimensiones: económica, ambiental y social [6].

A su vez, la eficiencia ambiental es un indicador importante, que sirve para describir la generación y uso coordinado de la energía, el desarrollo del medio ambiente y la economía, que han sido temas candentes en el mundo académico y para los responsables de la formulación de políticas de sostenibilidad.

En este contexto, es relevante preguntarse cómo podría evolucionar la demanda futura de cemento. La piedra caliza, principal materia prima del cemento, representa el 75% de las materias primas utilizadas en la industria. Las emisiones de partículas y gases provienen de la descarbonatación de la piedra caliza y son responsables de aproximadamente el 60% de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el cemento. Las emisiones relacionadas con la energía provienen tanto de la combustión directa de combustible como indirectamente de la generación de electricidad necesaria para la fabricación de cemento tipo Portland a base de Clinker.

La preocupación por el medio ambiente ha llevado a considerar enfoques para reducir la demanda de cemento, y uno de ellos es el reciclaje del hormigón. En el caso del reciclaje de hormigón fresco, se gestionan los restos sobrantes de hormigón o mortero que aún no han endurecido y que se generan durante el lavado de los vehículos de transporte de este material, como los camiones hormigoneros. En este proceso de reciclaje, los áridos y el agua residual producidos se convierten en materias primas para reutilizar el hormigón endurecido resultante de la demolición de infraestructuras, un proceso conocido como reciclaje de hormigón endurecido.

Otra alternativa para contribuir a la mejora del medio ambiente es reducir el uso de hormigón en la construcción de edificios. Este podría ser reemplazado por materiales con menores emisiones, como ladrillos o madera. Además, se están desarrollando cementos bajos en carbono, también conocidos como “cementos verdes”. Se espera que estos geopolímeros reduzcan las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 80% a 90% en comparación con el cemento Portland tradicional. [7].

Es importante considerar medidas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la producción de cemento, ya que este proceso genera emisiones tanto por procesos químicos como por el uso de energía. Algunos estudios sugieren que las emisiones químicas resultan principalmente de la descarbonatación de la piedra caliza y contribuyen aproximadamente al 50% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> relacionadas con el cemento [7]. Las emisiones relacionadas con la energía provienen tanto de la combustión directa de combustible como indirectamente de la generación de electricidad necesaria. Nuestro objetivo principal es mejorar los indicadores ecológicos [7].

En las últimas décadas, la producción de cemento ha experimentado diversas modificaciones y mejoras con el

objetivo de reducir el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, aún se requieren mayores reducciones para garantizar la sostenibilidad futura de esta industria. Entre las diferentes estrategias para lograr la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, la simbiosis industrial (SI) ha ganado cada vez más atención. La SI es un enfoque sistémico que busca lograr beneficios mutuos entre el desempeño ambiental y económico mediante el intercambio físico de desechos y subproductos, así como el uso compartido de infraestructura entre entidades ubicadas en la misma área geográfica.

Este artículo tiene como objetivo desarrollar un modelo integrador que se materializará en una hoja de ruta (Roadmap) sobre las mejores prácticas de sostenibilidad en la industria del cemento, dentro del contexto de la simbiosis industrial y aprovechando los gemelos digitales. Para ello, se analizará la bibliografía publicada entre los años 2015 y 2023.

## II. MÉTODO

Realizamos un estudio exploratorio con enfoque cualitativo, utilizando como fuentes de recolección libros, revistas especializadas, artículos científicos y periódicos. Como instrumento de recopilación, utilizamos la base de datos Scopus y consideramos una muestra final de 115 artículos científicos seleccionados.

Como método de análisis se aplicó la Teoría del Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC)[8], en el cual el modelo se divide en tres etapas: 1) Elaboración de la investigación, 2) Presentación e interrelación de datos y 3) Detalle, modelo integrador y validación por evidencia, se utilizó el Software VOSviewer para el análisis de los datos y Mendeley como gestor bibliográfico.

## III. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Siguiendo la metodología TEMAC, el primer paso consiste en elaborar la investigación, que comienza con una revisión de la literatura en la base de datos SCOPUS. Utilizamos las siguientes palabras clave: “cemento verde” (green cement), “cemento ecológico” (ecological cement), “producción de cemento sostenible” (Sustainable cement) y “producción circular de cemento” (Circular cement).

La búsqueda inicial se realizó con la palabra clave “green cement”, obteniendo 195 artículos. Luego, se buscó con la palabra clave “ecological cement” y se encontraron 31 publicaciones. Con la palabra clave “sustainable cement”, se identificaron 318 artículos, mientras que “circular cement” arrojó solo 11 publicaciones. Al combinar todas las palabras clave con el operador booleano “OR”, obtuvimos un total de 549 artículos. Para enfocar nuestra investigación, excluimos los artículos publicados antes de 2015 y después de 2023, quedando una muestra inicial de 371 publicaciones.

Siguiendo nuestros objetivos, consideramos solo los artículos relacionados con Environmental Science, Energy, Business, Management and Accounting, resultando en una muestra final de 115 publicaciones.

El primer artículo que tocó el tema de green cement fue G. Nagel [9], destacando la importancia del cemento para proteger los tubos de hierro fundido contra la corrosión y cómo se van generando mejoras en la resistencia del concreto. S. H. Guo, D. Weng, and Y. M. Chen [10] proponen la idea de ecological cement en las industrias cementeras de China, mediante la disminución del uso de la cal para reducir el nivel de contaminación en la quema del Clinker reduciendo el uso de energía. En sustainable cement G. Sprigg [11] y [12] destacan la importancia del desarrollo sostenible, para que las necesidades del futuro no se sacrifiquen en satisfacer las demandas del presente, y el uso del cemento este en relación a las necesidades reales de la sociedad y no de su crecimiento económico.

El concepto de economía circular en la industria del cemento es nuevo y es planteado por primera vez por M. Rohan [13] recomendando la reutilización de residuos generados en la industria cementera, residuos minerales y otros que reducirán las emisiones de CO2. En la figura 1 se tiene una evolución histórica del concepto de sustentabilidad en la producción del cemento.

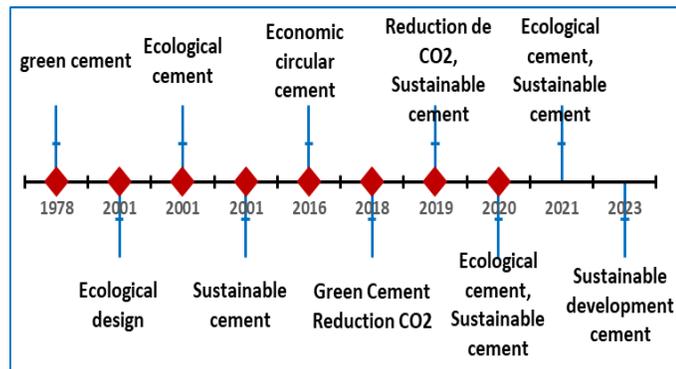


Fig. 1 Evolución de las palabras claves

La gestión sostenible técnica y administrativamente de la industria del cemento ha sido de interés científico en los últimos años, más relacionados a la sostenibilidad y la economía circular de la industria, Figura 2.

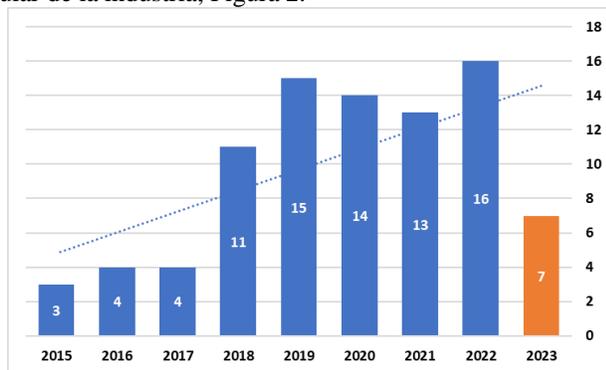


Fig. 2 Evolución histórica de investigaciones.

Como segundo paso de la metodología TEMAC, presentamos las interrelaciones de los datos recopilados. Las coocurrencias de las palabras clave más relevantes relacionan la industria del cemento con sus procesos de producción, propiedades, efectos inmediatos, emisiones de CO2, reutilización de energía y mitigación del impacto ambiental. Además, se aborda el desarrollo de un cemento más sostenible y el reciclaje en varios de sus procesos, incluyendo la sustitución de los métodos de hidratación por otros más eficientes en términos de consumo energético (ver Figura 3).

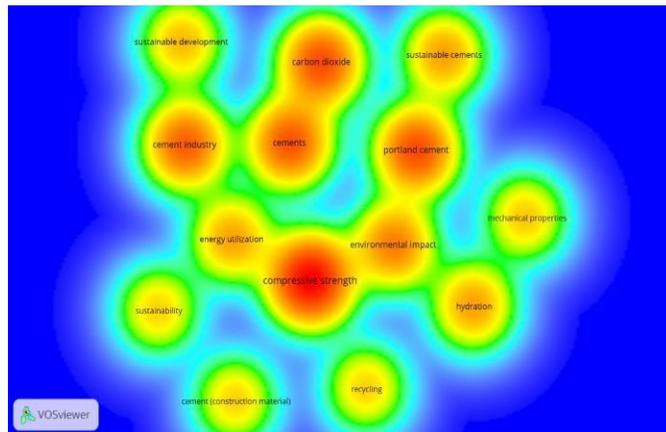


Fig. 3 Mapa de calor de coocurrencias

Los artículos con mayores citas están relacionados con proponer una producción más eficiente en sus procesos de fabricación principalmente con la fabricación del cemento y el Clinker[14], sugiriendo generar una economía circular al interior y fuera de la industria cementera, se centran también en la reducción del uso energético en dichos procesos con la finalidad de reducir las emisiones de CO2[15], recomiendan nuevas fórmulas y metodologías de fabricación de cemento orientado a un producto verde más amigable con el medio ambiente[16].

Sin embargo, no se tiene muchos artículos relacionados con la gestión administrativa de mejores procesos en la cadena de suministros que también influyen en la degradación del medio ambiente y la contaminación del aire con CO2 [17], centrándose más en la fabricación, mejoras de producto, optimizaciones [18] de los procesos de fabricación del cemento y el Clinker.

Los autores que más publicaron fueron, Li J., sus investigaciones están relacionadas con las propiedades de la cimentación de los suelos y sus características modeladas en polinomios, (MolaAbasi et al., 2020) trabajo acerca del uso de materiales reciclados para uso en el concreto, [4] abarcaron estudios sobre la aplicación sustentable en pilares escarados, [20] relacionadas a la preparación de cementos mezclados de alto rendimiento y recuperación de concentrado de hierro a partir de escoria de acero de horno de oxígeno básico y otro artículo más citado [21]. Se destaca Monteiro P.J.M cuyas investigaciones tratan sobre el estudio de la deformación del

concreto con uso de materiales diferentes al acero como estructuras. (Ouédraogo et al., 2022), [24], Yetilmezsoy K. estudiaron la proporción óptima de zeolita y zeolita-caolín como aditivos para muestras de clinker de cemento y yeso. (Sabah A. Abdul-Wahab†, 2019), uso del bio gas como energía sustentable en la industria del cemento, (Ali et al., 2020). Zhang W. estudiaron los óxidos de nitrógeno (NOx) con materiales en base de cemento, necesarios para optimizar estos materiales para el secuestro de NOx. (Jin et al., 2019), consideraron la preparación de aglutinantes compuestos sustentables y ecológicos en base de cemento con polvo de escoria de acero de alto volumen y polvo de escoria de alto horno ultrafino. [21], abordaron sobre reducción de los impactos ambientales y las emisiones de carbono: estudio de los efectos de las partículas de cemento superfina en mezclas de cemento que contienen aditivos minerales de alto volumen [15] Figura 4.

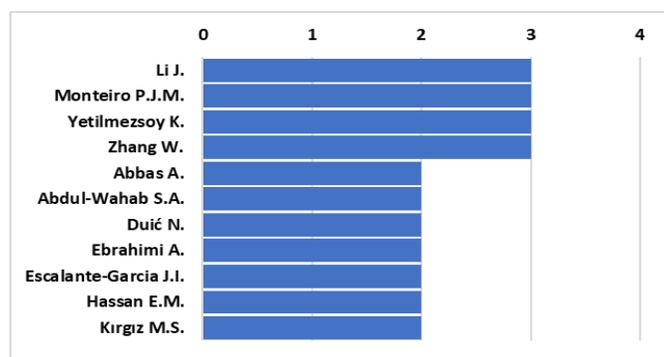


Fig. 4 Autores que más publicaron

Los resultados de las mayores publicaciones y los países de origen de los investigadores destacan a la China, que en los últimos tres años ha repuntado con 22 publicaciones relacionados con la reducción del CO2 y la producción sustentable y la economía circular en la industria del cemento [5] y la fabricación bajo el enfoque de cemento verde [14], [21], le sigue Estados Unidos con 12 publicaciones relacionados a innovación y la creación de nuevos productos relacionados con la industria del cemento [1], tema de suma importancia es el uso de energía, Turquía es otro país que dedica a la investigación sobre el sector cementero con 10 publicaciones sobre energías renovables y producción sustentable [23], [25], [26], Figura 5.

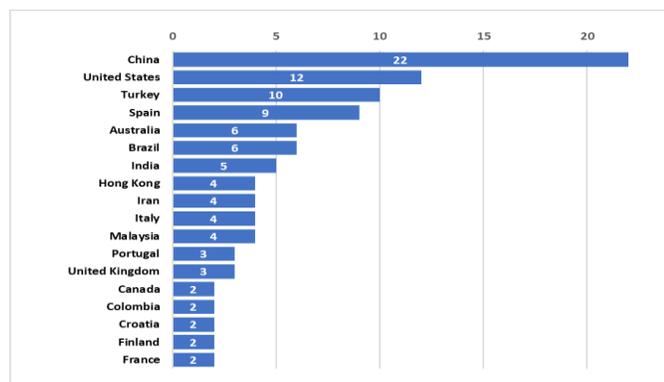


Fig. 5 Publicaciones por país

En la figura 6 y tabla 1 se tiene a los autores más citados destacan [28] con el artículo Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing microcrystalline cellulose for 3D-printing con 101 citas que trata sobre la aplicación de las impresoras 3D en la fabricación de objetos relacionados con cemento. [29] tuvieron 92 citas con la investigación Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement plantean la utilización de las cenizas de la cáscara de arroz como activo puzolánico en la generación de mayor calor en la fabricación de cemento. Otros autores más citados son [15] con 82 citas con el artículo Reducing environmental impacts and carbon emissions: Study of effects of superfine cement particles on blended cement containing high volume mineral admixtures, experimentando con diferentes dosis de sulfato de sodio para mejorar las propiedades de la hidratación y reducir la huella CO2.

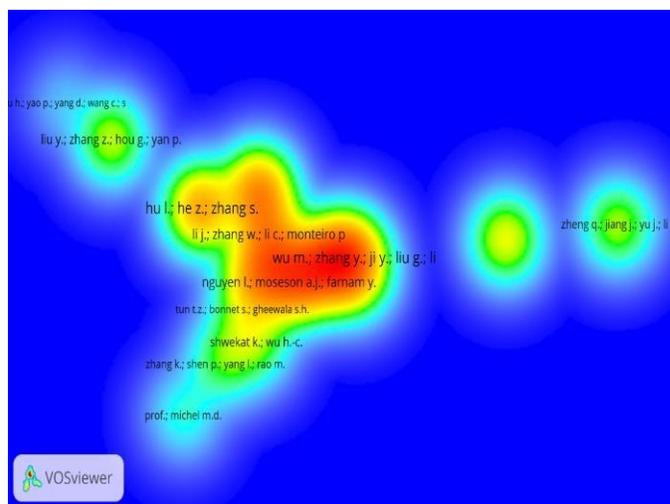


Fig. 6 Autores más citados

El Acoplamiento bibliográfico nos muestra a Z. Ahmadi [16] y a J. Ahmad [30] con sus trabajos investigativos A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production y Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite, estudian las propiedades aglutinantes del cemento, propiedades físicas de resistencia y estudios sobre los resultados de las propiedades de morteros de cemento que contienen un gran volumen de polvo de diatomita crudo como reemplazo del cemento, Figura 7.

Tabla 1  
Autores más citados en Scopus con ideas centrales.

Autor	Título del artículo	Idea central	Campo de aplicación	Citas
Long, W.-J., Tao, J.-L., Lin, C., ...Duan, H.-B., Xing, F.(2019)	Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing	Este estudio tiene como objetivo desarrollar compuestos a base de cemento sostenibles y de alta calidad que contengan celulosa microcristalina (MCC) que puedan satisfacer los requisitos de la impresión 3D, así como los beneficios ambientales, pueden promover la utilización industrial sostenible de materiales a base de cemento reforzados con MCC en la industria de la impresión 3D	impresión 3D ; Compuestos a base de cemento ; Evaluación ambiental	101
Hu, L., He, Z., Zhang, S.(2020)	Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement	Trata sobre la utilización de desechos agrícolas de cáscara de arroz para preparar cenizas de cáscara de arroz para obtener material sustentable a base de cemento a través de conjuntos de procedimientos: optimización de las cenizas de cáscara de arroz con una técnica de combustión mejorada, evaluación de la actividad puzolánica de las cenizas de cáscara de arroz preparadas	Economía circular del cemento	92
Wu, M., Zhang, Y., Ji, Y., ...She, W., Sun, W.(2018)	Reducing environmental impacts and carbon emissions: Study of effects of superfine cement particles on blended cement containing high volume mineral admixtures	En este estudio se investigó un nuevo cemento verde que se preparó con cemento Portland superfino y desechos sólidos de gran volumen (cenizas volantes y escoria de alto horno), se calcularon el consumo de energía y las emisiones de carbono del nuevo cemento verde. Esta investigación proporcionó orientación para desarrollar cemento con bajas emisiones de carbono y respetuoso con el medio ambiente.	Cemento verde, impactos	82
Wang, X., Yu, R., Shui, Z., ...Liu, Z., Wu, S.(2019)	Effects of sodium sulfate on the hydration and properties of lime-based low carbon cementitious materials	Estudia la forma de reducir la huella de carbono y el consumo de energía de la industria de fabricación de cemento, los materiales cementantes bajos en carbono a base de cal y sulfato de sodio aumentó efectivamente la resistencia cemento.	Bajas emisiones de carbono, cemento sustentable	80
Sandanayake, M., Gunasekara, C., Law, D., ...Setunge, S., Waniyuru, D. (2020)	Sustainable criterion selection framework for green building materials – An optimisation based study of fly-ash Geopolymer concrete	El estudio tiene como objetivo presentar un marco de optimización de criterios sostenibles que podría adoptarse para evaluar la sostenibilidad de los materiales ecológicos en la producción de hormigón. Y la importancia de mantener un equilibrio entre los beneficios ambientales y económicos de un diseño ecológico es fundamental para las partes interesadas que toman decisiones en un proyecto de construcción.	Cemento ecológico, Cemento sustentable	73
Ashraf, M.S., Ghouleh, Z., Shao, Y. (2019)	Novel modifications in a conventional clinker making process for sustainable cement production	La investigación propone modificaciones en el proceso de fabricación de clinker para separar la reacción de calcinación de la combustión del combustible en el calcinador, lo que da como resultado la producción de dióxido de carbono puro	Reducción CO2, producción sustentable	71
Kiventerä, J., Piekari, K., Isteri, V., ...Tanskanen, P., Illikainen, M. (2019)	Solidification/stabilization of gold mine tailings using calcium sulfoaluminate-belite cement	En este estudio, se utilizó cemento de sulfoaluminato de calcio y belita (CSAB) para estabilizar los relaves de las minas de oro, que son materiales difíciles de inmovilizar de manera efectiva debido al alto contenido de metales pesados y sulfatos	Cemento sostenible	67
Yu, J., Wu, H. L., Mishra, D.K., Li, G., Leung, C.K.(2021)	Compressive strength and environmental impact of sustainable blended cement with high-dosage Limestone and Calcined Clay (LC2)	Con el estudio se propone reemplazar la mitad del clinker por una mezcla de piedra caliza en polvo y arcilla calcinada de baja calidad (en proporciones de peso de 1:2) como una nueva versión de cemento económico y ecológico llamado cemento de piedra caliza y arcilla calcinada (LC2), también conocido como cemento	Cemento ecológico, Cemento sustentable	64
Li, J., Zhang, W., Li, C., Monteiro, P.J.M.(2020)	Granulated blast-furnace slag and coal fly ash ternary portland cements optimization	En este artículo se desarrolló un diseño factorial completo con dos niveles para la estimación de la resistencia a la compresión del mortero a los 2, 7 y 28 días. Se encontró una relación entre la resistencia a la compresión, la finura, el contenido de escoria granulada y el contenido de cenizas volantes	Cemento sostenible, Reducción CO2	52
Nguyen, L., Moseon, A.J., Farnam, Y., Spatari, S.(2018)	Effects of composition and transportation logistics on environmental, energy and cost metrics for the production of alternative cementitious binders.	El trabajo investiga la influencia de la ubicación de la fuente de materia prima y el modo de transporte dentro de la cadena de suministro afecta significativamente tanto los impactos ambientales (hasta el 80% de las emisiones de CO2 como los costos de producción (hasta el 65%), y por lo tanto debería ser una consideración importante optimizar la cadena de suministros.	Cemento verde, Impactos ambientales, Reducción CO2	51
Wang, L., Zhang, Q., Zhang, G., Wang, D., Liu, C.(2022)	Can industrial symbiosis policies be effective? Evidence from the nationwide industrial symbiosis system in China	Analizan el sistema simbiótico que incluye la industria de la energía térmica, la industria del cemento, la industria del hierro y el acero y el sector social en China Los enfoques políticos deberían pasar del estímulo económico a la orientación simbiótica.	Cemento Sustentable	19

Para determinar la concordancia de la selección de los documentos y artículos elegidos por los investigadores se aplicó el coeficiente kappa de Cohen (ecuación 1.)

$$Kappa=(Co-Ca)/(1-Ca) \quad (1)$$

Donde:

Co es la proporción de acuerdo observado, teniendo un 80,9%

Ca es la proporción de acuerdo aleatorio, se obtuvo un 46,9%.

El resultado proporcionado por la ecuación de kappa fue de 75,4 %, considerado como buena la concordancia en la selección de artículos [31].

Como paso final de la metodología TEMAC, contempla la propuesta de un modelo integrador y una hoja de ruta que se valida a partir de la relación de co-citaciones y acoplamiento entre los temas, autores, citas y palabras claves más relevantes.

Por los resultados obtenidos de los análisis anteriores, se tiene un enfoque técnico en cuanto a los problemas expuestos en la industria del cemento que es la reducción de las emanaciones de dióxido de carbono CO2.

Descarbonizar el sector del cemento y el hormigón es una prioridad. Si bien se trata de un desafío complejo y multifacético, también presenta importantes oportunidades para la industria, tanto a nivel país como en el mundo de manera general, planteando alternativas como la ecología industrial (IE) que opera en los niveles empresariales interempresariales y regionales, o una economía circular (CE) basados en energías renovables en las cuales, los materiales circulan en circuitos y los residuos se minimizan o eliminan, y la simbiosis industrial (SI) relativamente nueva, un concepto relacionado con el flujo de recursos y que apunta a lograr beneficios económicos , ambientales y sociales.

La industria ha tomado medidas significativas en etapas tempranas, incluyendo inversiones en cambios de combustible, ajustes en la formulación de productos y mejoras en la eficiencia energética. Esto también ha involucrado la optimización de las operaciones de las plantas y la consideración de efectos directos e indirectos.

En el sector cementero, se recomienda adoptar las últimas tecnologías disponibles. Esto incluye el desarrollo de cementos y hormigones con bajas emisiones de carbono, como la sustitución del Clinker por materiales cementantes más sostenibles. Además, se está produciendo una transición desde los combustibles fósiles tradicionales, como el carbón y el coque de petróleo, hacia el uso de combustibles residuales y biomasa parcialmente residual. Estas acciones pueden reducir las emisiones hasta en un 57,5%, según proyecciones optimistas basadas en investigaciones y fuertes inversiones en I+D (ver Figura 8).

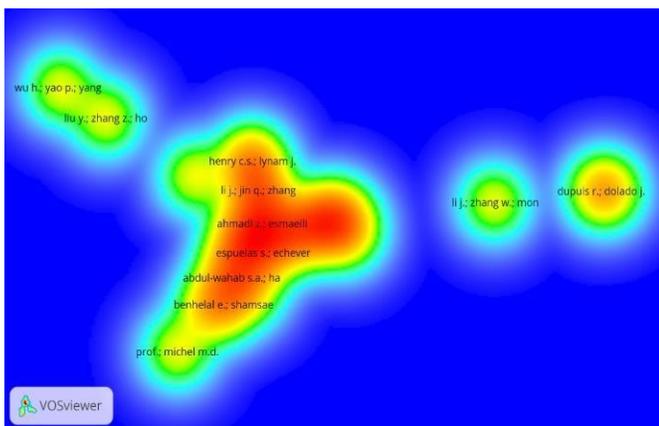


Fig. 7 Acoplamiento bibliográfico

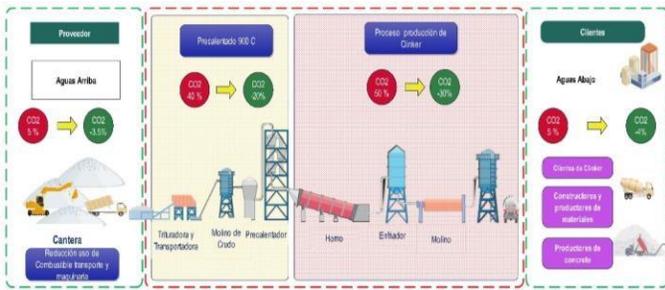


Fig. 8 Proceso de descarbonización en la Cadena de Suministro Sustentable de Cemento

Para lograr una producción sostenible de cemento, se proponen las siguientes medidas: i) Durante la producción de cemento, es necesario alcanzar altas temperaturas, que oscilan entre 900 °C para el precalentamiento y 1.500 °C para la calcinación del Clinker [21]. El proceso no es susceptible de electrificación y representa el 50% de las emisiones. Por lo tanto, la transición hacia combustibles alternativos y neutros en CO2 resulta esencial. Una premisa fundamental es explorar las posibilidades de captura de CO2. Aunque esta tecnología aún es novedosa y requiere un desarrollo intensivo, está asociada a un alto costo y necesitará priorización política y apoyo público para su implementación [32], ii) Sustitución de materias primas: El cemento Portland, producido a base de clinker y que requiere altas temperaturas en el proceso de calcinación, debe ser reemplazado por otras materias primas. Ejemplos incluyen cenizas de cáscara de arroz y arcilla calcinada, Nuevas tecnologías de producción: Explorar tecnologías basadas en sulfato de sodio, sulfoaluminio y otros materiales para reducir hasta un 30% las emisiones de CO2. iii) Simbiosis y Economía Circular: Aprovechar el calor excedente y la refrigeración urbana, expandir la economía circular y aumentar la producción de electricidad verde propia [33] y iv) Cadena de valor verde, la producción de cemento y el uso del mismo en el hormigón es un reto importante de optimización[34]. Figura 9



Fig. 9 Producción sostenible del cemento

Desde la perspectiva de una cadena de suministro sostenible (SSC), proponemos un modelo integrador que aprovecha las tecnologías de la Industria 4.0 (I4.0). Destacamos la incorporación de los Gemelos Digitales (Digital Twin, DT) en la gestión de la SSC. Mediante procesos de simulación y detección, abordamos situaciones críticas como las emisiones excesivas [35] y el uso desmedido de energía en la fabricación de Clinker, que representa el 50% del

consumo energético en el sector cementero. Dado que está vinculado a todo el flujo de la cadena de suministro (aguas arriba), monitoreamos constantemente los requerimientos de materiales de la cantera durante la fase de fabricación. Esto reduce el consumo de combustibles y disminuye las emisiones de CO2 (ver Figura 10).

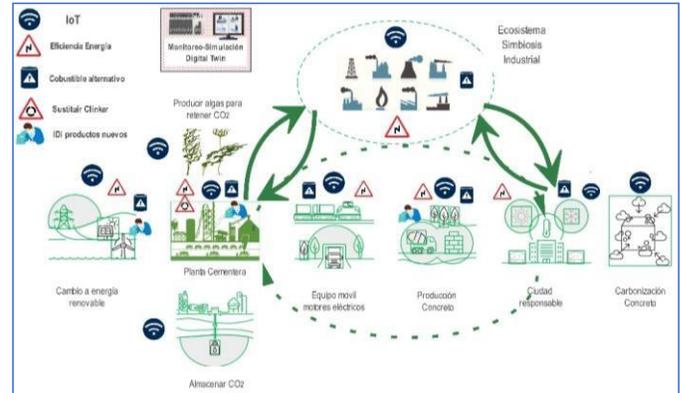


Fig. 10 Simbiosis Industrial de la Industria del Cemento Asistido por Digital Twin

La hoja de ruta se fundamenta en una revisión exhaustiva de las oportunidades para descarbonizar el proceso de fabricación del cemento. Para ello, se emplean referencias creíbles y la experiencia de la industria, con un objetivo de reducción del 57,5 % de las emisiones de CO2.

En esta hoja de ruta, se optimiza la aplicación de tecnologías de fabricación existentes y emergentes. Esto incluye mejoras en la eficiencia energética, cambios en los combustibles utilizados, y la promoción de cementos y hormigones con bajas emisiones de carbono. Además, se considera la captura, uso o almacenamiento de carbono como parte de las estrategias para lograr emisiones más bajas de CO2.

Un aspecto relevante es la carbonatación, que permite al hormigón absorber dióxido de carbono durante su uso. Además, aprovechar las propiedades térmicas del hormigón en los edificios contribuye a reducir las emisiones operativas [36].

No existen soluciones mágicas para mitigar el cambio climático o lograr emisiones netas cero. La descarbonización de los materiales cementosos y el hormigón requiere una cartera de ocho propuestas tecnológicas, supervisadas con la incorporación de un gemelo digital (DT) o “Digital Twin”. Estas palancas tecnológicas necesitarán el apoyo de gobiernos y políticas públicas locales a largo plazo, y todas requerirán acciones e inversiones concertadas. A continuación, se detallan algunas de estas palancas:

1. Descarbonización de la red eléctrica: Para fomentar la electrificación de la industria, es crucial descarbonizar la red eléctrica. Esto implica utilizar tecnologías de descarbonización

que requieren electricidad, como la energía renovable (solar, eólica, biomasa y otras emergentes).

2. Fabricación avanzada: Mediante tecnologías como la inteligencia artificial (IA) y la automatización, se puede mejorar la eficiencia en las operaciones de plantas de concreto y cemento. Estas innovaciones contribuyen a reducir las emisiones y a optimizar los procesos de producción. [6], [37].

3. Para reducir las emisiones de carbono en el transporte, se está abandonando gradualmente el uso de gasolina y diésel. La inversión en nuevas flotas y la disminución de los kilómetros de transporte por carretera también contribuyen a esta reducción. Además, la industria está aumentando su uso del transporte de mercancías por ferrocarril, lo que apoya un cambio modal de la carretera al ferrocarril y, en consecuencia, reduce las emisiones del transporte [38].

4. La reducción de emisiones de carbono en cementos y hormigones es posible gracias a innovaciones en el diseño de mezclas de concreto y a la revisión de estándares de productos y construcción. Cada vez más, se adoptan componentes con bajos niveles de carbono en el entorno construido. La investigación, desarrollo e innovación en Clinker también contribuyen mediante contenidos alternativos de aglutinantes y formulaciones que disminuyen las emisiones de carbono [2].

5. Para reducir las emisiones de carbono en la producción de cemento, es crucial considerar el cambio de combustible. La disponibilidad de residuos de biomasa es especialmente relevante, ya que puede generar más del 70% del calor utilizado en este proceso. Además, se recomienda invertir en la producción de hidrógeno, plasma y otros sistemas de energía de calor más eficientes. [6].

6. La captura y almacenamiento de carbono es una tecnología que puede reducir tanto las emisiones de combustión como las emisiones del proceso en la producción de cemento. A corto plazo, las oportunidades para capturar emisiones a gran escala se encuentran principalmente en el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas. Además, diversas tecnologías se centran en utilizar CO<sub>2</sub> capturado en la fabricación de cemento y hormigón, como la inyección de CO<sub>2</sub> en el concreto antes de su curado [39].

7. La carbonatación del hormigón se refiere al proceso mediante el cual el hormigón absorbe CO<sub>2</sub> de la atmósfera a lo largo de su ciclo de vida [40].

8. La masa térmica es una propiedad de materiales pesados como el hormigón y la mampostería. Estos materiales pueden absorber, almacenar y liberar calor, lo que reduce la energía necesaria para calentar y enfriar los edificios. Las evaluaciones del ciclo de vida y las revisiones posteriores a la ocupación demuestran los ahorros de carbono y energía asociados con la masa térmica inteligente, que contribuye a satisfacer la demanda en respuesta al cambio climático [40].

*La Simbiosis Industrial (SI) del cemento con los ecosistemas industriales será a través de:*

- Las actividades relacionadas con la industria siderúrgica tienen un impacto significativo en la producción de cemento. La reutilización de escorias generadas durante la producción

de acero no solo mejora las propiedades del cemento, como su durabilidad debido a un mayor tiempo de fraguado, sino que también conlleva importantes beneficios económicos y ambientales. En particular, se requiere hasta un 80% menos de energía para producir cemento Portland ordinario mediante esta práctica. Además, la utilización de lodos de aguas residuales como combustible alternativo para los hornos de cemento también contribuye a reducir el impacto ambiental de la industria [7].

- Las actividades de (SI) relacionadas con el sector de energía y calor incluyen el reciclaje de cenizas volantes y de fondo de plantas de cogeneración y energía alimentadas con carbón. Este enfoque es ampliamente aceptado y convencional. Por ejemplo, la reutilización de una tonelada de cenizas volantes en la fabricación de cemento puede reducir aproximadamente 770 kg de emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, las cenizas volantes mejoran la resistencia y durabilidad del hormigón, ya que aumentan su densidad y lo hacen menos susceptible al deterioro causado por el contacto con azufre [41][26]

- Las actividades (SI) relacionados con el procesamiento de residuos, el horno (rotativo) de cemento se destaca como el mayor consumidor de energía. Este horno genera energía térmica al quemar combustibles fósiles, principalmente carbón, durante los procesos de calcinación (900°C) y sinterización (1450°C). Debido a su prolongado tiempo de residencia a altas temperaturas y a la capacidad intrínseca del Clinker, el horno rotatorio utilizado en la fabricación de cemento puede quemar una amplia variedad de materiales. Por lo tanto, gran parte de las actividades relacionadas con el procesamiento de residuos se centran en la utilización de residuos recolectados y procesados como combustible alternativo para los hornos de cemento [38]. [23]

- Las actividades (SI) relacionados con el sector minero, se observa que debido a la naturaleza de las materias primas utilizadas y a los procesos de fabricación involucrados en la producción de minerales (como la extracción, trituración, molienda y secado), se producen principalmente intercambios de materiales. Estos intercambios se dan en forma de materias primas alternativas entre el sector minero y el sector del cemento [1], [29].

- Actividades de (SI) relacionados con el sector químico, se observa que la industria química es más diversa que cualquier otra industria de procesos. Por ejemplo, la industria química adquiere óxido de hierro (cenizas de pirita) de un fabricante de ácido sulfúrico y reutiliza el medio oleo de una planta de biodiésel como combustible alternativo para un horno de cemento. Además, la planta de cemento de Kwinana valora los catalizadores de la unidad de craqueo de residuos gastados de la cercana refinería como puzolana alternativa (Si,Al). Por otro lado, el molino de cemento de Zaozhuang recibe cenizas volantes y de fondo de las calderas de carbón de una planta de amoníaco [5].

- Actividades de (SI), las actividades involucran a actores de diversos sectores, que abarcan desde alimentos y textiles hasta caucho, vidrio y metales no ferrosos [33].

La aparición del concepto y la historia de gemelos digitales se remonta a la etapa del surgimiento de la simulación como una poderosa herramienta tanto en el mundo científico como en el industrial, a la década de 1960, cuando la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) creó una representación de vehículos espaciales para reflejar su desempeño e identificar fallas durante una misión [34], exactamente, esta tendencia tecnológica fue introducida por primera vez por Michael Grieves en 2002–2003 como parte de su curso sobre Product Lifecycle Management (PLM)[35].

Los gemelos digitales tienen una importancia significativa en la fabricación, debido a su capacidad para detectar cuellos de botella, optimizar el proceso de fabricación y simular situaciones para predecir el rendimiento operativo [42], [43], en la cadena de suministro, que comprende a vendedores, productores, mayoristas, minoristas y clientes finales, y su objetivo es sincronizar la oferta y la demanda [44].

El gemelo digital es un avance importante en la cadena de suministros, durante la industrialización y la digitalización, la idea detrás de la creación de este, es administrar los riesgos en las cadenas de suministro, haciéndolas así más confiables y sostenibles en caso de fallas [45].

La implantación del Gemelo Digital en la cadena de Suministro en la producción de cemento es la supervisión del proceso de fabricación de cemento y Clinker para el control del proceso, las emisiones de CO<sub>2</sub>, el precalentado del Clinker, la calcinación en el horno y, el uso óptimo de combustible y energía, en estos pasos se incorpora la tecnología gemelo digital en la cadena de suministro, aguas arriba apoyado en la IA y Deep Learning, IoT e IIoT y RFID para la dotación de materias primas e insumos en función de los requerimientos de la demanda y las condiciones del mercado real y virtual (aguas abajo) [34], propiciando una producción óptima y eficiente en el uso de materias primas e insumos, energía, combustible y una producción amigable con el medio ambiente que estarán vinculadas al ecosistema de industrias simbióticas relacionadas con la industria de cemento[6], [37].

#### IV DISCUSIONES

La investigación sistemática realizada con la metodología TEMAC, resaltó la importancia que han tenido las emisiones de CO<sub>2</sub> mundial asociadas a la producción de cemento y que tienen el potencial de disminuir significativamente debido a la utilización de residuos y subproductos por parte de la industria. Se descubrió que las asociaciones de beneficio mutuo el conformar las industrias simbióticas reducen el impacto ambiental general de la producción de cemento.

La producción de Clinker es el proceso que consume más energía en toda la producción de hormigón. El Clinker es un precursor intermedio del cemento y su producción es una fuente importante de CO<sub>2</sub> en relación al cemento. Las soluciones necesarias para descarbonizar la producción de Clinker y cemento incluyen reducir los volúmenes de Clinker,

aumentar el uso de combustibles alternativos, utilizar electricidad limpia, mejorar la eficiencia energética. Aumentar el volumen de materias primas descarbonatadas (particularmente aquellas que pueden obtenerse localmente y no transportarse a largas distancias) para reemplazar parte de la piedra caliza en el horno reduce las emisiones totales de la producción de Clinker. Los materiales descarbonatados, como los materiales de granulometría fina procedentes del hormigón reciclado, no emiten CO<sub>2</sub> cuando se calientan porque ya han tenido el CO<sub>2</sub> remoto.

La producción de cemento requiere niveles de temperatura significativamente elevados que actualmente sólo pueden alcanzarse mediante la combustión. El uso de fuentes de combustible limpias y de bajas emisiones en lugar de fuentes de energía tradicionales basadas en combustibles fósiles y de altas emisiones. La transición para abandonar el uso de combustibles fósiles es una de las oportunidades clave para la industria del cemento. Los combustibles con bajas emisiones de carbono incluyen materiales recuperados del flujo de desechos, en particular biomasa; sin embargo, estos todavía generalmente requieren cierta mezcla con combustibles fósiles tradicionales para lograr las condiciones requeridas en el horno de cemento.

Existen numerosas medidas de eficiencia energética que podrían considerarse en las plantas de cemento. Estas medidas varían en términos de la inversión de capital requerida e incluyen realizar modernizaciones eléctricas, como actualizar los motores a variadores de frecuencia y mejorar las operaciones de molienda (por ejemplo, cambiar de molinos de bolas a molinos verticales de rodillos). La descarbonización basada en redes, la producción de energía renovable en sitios específicos y la electrificación de equipos móviles también representan oportunidades de descarbonización.

Los modelos climáticos han demostrado que las tecnologías de almacenamiento de carbono (“Carbon Capture, Use and Storage”, CCUS) desempeñan un papel clave de mitigación en la descarbonización del cemento y el hormigón. La tecnología de captura de carbono puede mitigar tanto la combustión como las emisiones de proceso que se liberan en la producción de Clinker. Las oportunidades a corto plazo para secuestrar emisiones a gran escala se encuentran principalmente en el almacenamiento de CO<sub>2</sub> capturado en formaciones geológicas. También se están explorando tecnologías CCUS de segunda generación, como el bucle de calcio y el bucle químico, para su posible integración en la industria del cemento como alternativas más eficientes y menos tóxicas a los actuales procesos de captura poscombustión. Estos procesos, que en conjunto comprenden ciclos de bucle de alta temperatura, son dos de las tecnologías CCUS de segunda generación más prometedoras que se espera que estén listas para su implementación después de 2040.

Los sectores del hormigón y el cemento han estado trabajando, junto con otros materiales constituyentes como áridos, aditivos y acero de refuerzo, como parte de la Estrategia de Construcción Sostenible de la industria del hormigón. El hormigón desempeña un papel importante en el

entorno construido, proporcionando un material versátil, fuerte y resistente con muchos usos indispensables. El uso de hormigón en el entorno construido tiene cuatro fases (diseño, construcción, uso final y vida útil), cada una con la oportunidad de reducir las emisiones.

Las soluciones necesarias para descarbonizar la producción de hormigón y su uso en la construcción incluyen la optimización de la mezcla de hormigón, la fabricación y el transporte de hormigón, y la optimización del diseño y la construcción.

La recarbonatación es el proceso mediante el cual el hormigón reabsorbe parte del CO<sub>2</sub> que se liberó durante la producción de Clinker. Ocurre de manera natural y es conocido desde hace más de medio siglo. Todas las estructuras de hormigón y mortero absorben CO<sub>2</sub> permanentemente durante su vida útil.

## V CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica indican una marcada tendencia investigativa en torno a la sostenibilidad en la industria cementera. La sustitución del Clinker continuará siendo relevante. Aunque se prevé una disminución en el suministro de cenizas volantes, 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 empleando combustibles alternativos con el objetivo de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Las alternativas a los cementos de Clinker Portland también pueden desempeñar un papel en la descarbonización, aunque su impacto podría ser limitado, quizás alrededor del 5% del mercado. Sin embargo, las emisiones derivadas de los procesos son inevitables. Por lo tanto, será necesario capturar el CO<sub>2</sub>, reutilizarlo cuando sea posible o almacenarlo. Esto implica enormes inversiones y la implementación de políticas públicas que desempeñarán un papel fundamental en la capacidad de la industria y la cadena de valor en general para descarbonizar el cemento y el hormigón a lo largo de su ciclo de vida.

Será imperativo establecer un marco político global que involucre a la industria, legisladores y gobiernos. Este esfuerzo conjunto tiene varios objetivos clave:

- a) Fabricación de cemento con bajas emisiones de carbono: Se debe trabajar para que la producción de cemento sea más sostenible y reduzca su huella de carbono.
- b) Estimulación de la demanda de productos de hormigón sostenibles: Fomentar el uso de hormigón con bajas emisiones de carbono es esencial para la transición hacia una industria más ecológica.
- c) Infraestructura para la fabricación circular y cero emisiones: Es necesario crear las condiciones para una producción circular y sin emisiones contaminantes.
- d) Incorporación de tecnologías I4.0 en la cadena de suministro del cemento: La gestión, optimización y simulación de procesos dentro de la industria cementera deben aprovechar las tecnologías de la Industria 4.0.

Además, debemos reconocer que la responsabilidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> no recae únicamente en la industria del cemento. Todas las industrias, incluyendo gobiernos y ciudadanía en general, deben contribuir a este esfuerzo. Si bien hay desafíos y limitaciones en la investigación actual para cuantificar los objetivos a corto plazo, será en las próximas décadas cuando podamos evaluar plenamente los alcances de estas metas.

## REFERENCIAS

- [1] M. M. M. V. Jan Prusinski, "LIFE CYCLE INVENTORY OF SLAG CEMENT CONCRETE." Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/265097978\\_LIFE\\_CYCLE\\_INVENTORY\\_OF\\_SLAG\\_CEMENT\\_CONCRETE](https://www.researchgate.net/publication/265097978_LIFE_CYCLE_INVENTORY_OF_SLAG_CEMENT_CONCRETE)
- [2] Y. Bian, L. Dong, Z. Liu, and L. Zhang, "A Sectoral Eco-Efficiency Analysis on Urban-Industrial Symbiosis," *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 3650, vol. 12, no. 9, p. 3650, May 2020, doi: 10.3390/SU12093650.
- [3] C. Venkata Sudhakar and G. Umamaheswara Reddy, "Impacts of cement industry air pollutants on the environment and satellite data applications for air quality monitoring and management," *Environ Monit Assess*, vol. 195, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.1007/S10661-023-11408-1.
- [4] M. Saberian, L. Shi, A. Sidiq, J. Li, S. Setunge, and C. Q. Li, "Recycled concrete aggregate mixed with crumb rubber under elevated temperature," *Constr Build Mater*, vol. 222, pp. 119–129, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.06.133.
- [5] Y. Li et al., "Characteristics and potential sources of atmospheric particulate mercury in Jinan, China," *Science of the Total Environment*, vol. 574, pp. 1424–1431, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2016.08.069.
- [6] Y. Shi, C. Lu, H. Hou, L. Zhen, and J. Hu, "Linking business ecosystem and natural ecosystem together—a sustainable pathway for future industrialization," *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2021, doi: 10.3390/JOITMC7010038.
- [7] D. Xu, E. Liu, W. Duan, and K. Yang, "Consumption-Driven Carbon Emission Reduction Path and Simulation Research in Steel Industry: A Case Study of China," *Sustainability*, vol. 14, no. 20, pp. 1–20, 2022, Accessed: Sep. 26, 2023. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v14y2022i20p13693-d950122.html>
- [8] Mariano Ari Melo and María Rocha Santos, "Modelo TEMAC." Accessed: Apr. 29, 2023. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Modelo-TEMAC-Fuente-Mariano-Rocha\\_fig1\\_323542796](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Modelo-TEMAC-Fuente-Mariano-Rocha_fig1_323542796)
- [9] G. Nagel, "KORROSIONSSCHUTZ IN ROHREN DURCH BETONAUSKLEIDUNGEN.," *Werkstoffe und Korrosion*, vol. 29, no. 6, pp. 403–408, 1978.
- [10] S. H. Guo, D. Weng, and Y. M. Chen, "Ecological status and development directions of cement industry in China," *Kuei Suan JenHsueh Pao/ Journal of the Chinese Ceramic Society*, vol. 29, no. 2, pp. 172–177, Apr. 2001.
- [11] G. Sprigg, "Sustainable cement," *Quality World*, vol. 27, no. 10, p. 18, Oct. 2001.
- [12] A. K. Mullick, "Role of cement and concrete in sustainable societal development," *Proceedings First International Conference on Concrete and Development C and D I*, pp. 573–582, 2001.
- [13] M. Rohan, "Industria cimentului și betonului parte integrantă a economiei circulare," *Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials*, vol. 46, no. 3, pp. 253–258, 2016.
- [14] J. Wen et al., "New insights into the green cement composites with low carbon footprint: The role of biochar as cement additive/alternative," *Resour Conserv Recycl*, vol. 197, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2023.107081.
- [15] M. Wu et al., "Reducing environmental impacts and carbon emissions: Study of effects of superfine cement particles on blended cement containing high volume mineral admixtures," *J Clean Prod*, vol. 196, pp. 358–369, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.079.

- [16] Z. Ahmadi, J. Esmaili, J. Kasaei, and R. Hajialioghli, "Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 16, pp. 47–53, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.SUSMAT.2018.05.001.
- [17] L. E. Menchaca-Ballinas and J. I. Escalante-Garcia, "Low CO<sub>2</sub> emission cements of waste glass activated by CaO and NaOH," *J Clean Prod*, vol. 239, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.117992.
- [18] M. S. Ashraf, Z. Ghoulch, and Y. Shao, "Production of eco-cement exclusively from municipal solid waste incineration residues," *Resour Conserv Recycl*, vol. 149, pp. 332–342, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2019.06.018.
- [19] H. MolaAbasi, M. Saberian, A. Khajeh, J. Li, and R. Jamshidi Chenari, "Settlement predictions of shallow foundations for non-cohesive soils based on CPT records-polynomial model," *Comput Geotech*, vol. 128, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.COMPGEO.2020.103811.
- [20] R. Vali, E. Mehrinejad Khotbehsara, M. Saberian, J. Li, M. Mehrinejad, and S. Jahandari, "A three-dimensional numerical comparison of bearing capacity and settlement of tapered and under-reamed piles," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 236–248, May 2019, doi: 10.1080/19386362.2017.1336586.
- [21] Y. Liu, Z. Zhang, G. Hou, and P. Yan, "Preparation of sustainable and green cement-based composite binders with high-volume steel slag powder and ultrafine blast furnace slag powder," *J Clean Prod*, vol. 289, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.125133.
- [22] P. J. M. Monteiro et al., "Advances in characterizing and understanding the microstructure of cementitious materials," *Cem Concr Res*, vol. 124, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2019.105806.
- [23] A. L. Ouédraogo et al., "Comparative Study of the Thermal and Mechanical Properties of Foamed Concrete with Local Materials," *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 10, no. 03, pp. 550–564, 2022, doi: 10.4236/WJET.2022.103035.
- [24] J. Li, Q. Jin, W. Zhang, C. Li, and P. J. M. Monteiro, "Microstructure and durability performance of sustainable cementitious composites containing high-volume regenerative biosilica," *Resour Conserv Recycl*, vol. 178, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.106038.
- [25] E. M. H. K. S. A.-J. K. Y. Sabah A. Abdul-Wahab<sup>1†</sup>, "Application of zeolite/kaolin combination for replacement of partial cement clinker to manufacture environmentally sustainable cement in Oman," 2019.
- [26] M. M. Ali, M. Ndongo, B. Bilal, K. Yetilmezsoy, I. Youm, and M. Bahramian, "Mapping of biogas production potential from livestock manures and slaughterhouse waste: A case study for African countries," *J Clean Prod*, vol. 256, May 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.120499.
- [27] Q. Jin, E. M. Saad, W. Zhang, Y. Tang, and K. E. Kurtis, "Quantification of NO<sub>x</sub> uptake in plain and TiO<sub>2</sub>-doped cementitious materials," *Cem Concr Res*, vol. 122, pp. 251–256, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2019.05.010.
- [28] W. J. Long et al., "Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing," *J Clean Prod*, vol. 239, p. 118054, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.118054.
- [29] L. Hu, Z. He, and S. Zhang, "Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement," *J Clean Prod*, vol. 264, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.121744.
- [30] J. Ahmad et al., "A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/SU14148783.
- [31] C. Chavkin and J. M. Ehrich, "How does stress-induced activation of the kappa opioid system increase addiction risk?" *Biol Psychiatry*, vol. 76, no. 10, p. 760, Nov. 2014, doi: 10.1016/J.BIOPSYCH.2014.08.015.
- [32] M. Szuszkiewicz, T. Magiera, A. Kapička, E. Petrovský, H. Grison, and B. Gołuchowska, "Magnetic characteristics of industrial dust from different sources of emission: A case study of Poland," *J Appl Geophys*, vol. 116, pp. 84–92, May 2015, doi: 10.1016/J.JAPPGEO.2015.02.027.
- [33] H. Dong, S. Ohnishi, T. Fujita, Y. Geng, M. Fujii, and L. Dong, "Achieving carbon emission reduction through industrial & urban symbiosis: A case of Kawasaki," *Energy*, vol. 64, pp. 277–286, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.ENERGY.2013.11.005.
- [34] Suhaib, S. Amir Babak Rasmi, and M. Türkay, "Sustainability analysis of cement supply chains considering economic, environmental and social effects," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 8, p. 100112, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.CLSCN.2023.100112.
- [35] C. M. Woodall, N. McQueen, H. Pilorgé, and J. Wilcox, "Utilization of mineral carbonation products: current state and potential," *Greenhouse Gases: Science and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 1096–1113, Dec. 2019, doi: 10.1002/GHG.1940.
- [36] J. Du, M. Zhao, and J. Zhu, "The Impact of Carbon Quota Benchmark Allocation on Cement Company Competitiveness: A System Dynamics Approach," *Buildings*, vol. 12, no. 10, pp. 1–1599, Oct. 2022, doi: 10.3390/BUILDINGS12101599.
- [37] A. Taffuri, A. Sciallo, A. Diemer, and C. E. Nedelciu, "Integrating Circular Bioeconomy and Urban Dynamics to Define an Innovative Management of Bio-Waste: The Study Case of Turin," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, pp. 1–18, 2021, Accessed: Sep. 26, 2023. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v13y2021i11p6224-d566806.html>
- [38] I. Karlsson, J. Rootzén, A. Toktarova, M. Odenberger, F. Johnsson, and L. Göransson, "Roadmap for Decarbonization of the Building and Construction Industry—A Supply Chain Analysis Including Primary Production of Steel and Cement," *Energies* 2020, Vol. 13, Page 4136, vol. 13, no. 16, p. 4136, Aug. 2020, doi: 10.3390/EN13164136.
- [39] M. Zhang, C. Zhang, F. Li, and Z. Liu, "Green Finance as an Institutional Mechanism to Direct the Belt and Road Initiative towards Sustainability: The Case of China," 2022, doi: 10.3390/su14106164.
- [40] A. Silva et al., "Valorisation of Recycled Cement Paste: Feasibility of a Short-Duration Carbonation Process," *Materials*, vol. 15, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/MA15176001.
- [41] T. A. Branca et al., "Industrial Symbiosis and Energy Efficiency in European Process Industries: A Review," *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 9159, vol. 13, no. 16, p. 9159, Aug. 2021, doi: 10.3390/SU13169159.
- [42] VYTAUTAS. OSTASEVICIUS, "DIGITAL TWINS IN MANUFACTURING: virtual and physical twins for advanced manufacturing," pp. 10–21, 2022, Accessed: Apr. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.barnesandnoble.com/w/digital-twins-in-manufacturing-vytautas-ostasevicius/1140978972>
- [43] R. B. Roy et al., "Digital twin: current scenario and a case study on a manufacturing process," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 9–10, pp. 3691–3714, Apr. 2020, doi: 10.1007/S00170-020-05306-W.
- [44] J. Kandasamy, K. Muduli, V. P. Kommula, and P. L. Meena, "Smart manufacturing technologies for industry 4.0: integration, benefits, and operational activities." 2023. Accessed: Apr. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.routledge.com/Smart-Manufacturing-Technologies-for-Industry-40-Integration-Benefits/Kandasamy-Muduli-Kommula-Meena/p/book/9781032033082>
- [45] S. Y. Barykin, A. A. Bochkarev, E. Dobronravin, and M. Sergeev, "The place and role of digital twin in supply chain management," *Academy of Strategic Management Journal*, vol. 20, no. SpecialIssue2, pp. 1–19, 2021.