

8. La hoja de ruta hacia la descarbonización de la industria del cemento en México



J. AURELIO COLMENERO ROBLES*

MIGUEL ALVARADO CARDONA**

OBED PARDO SANTOS***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.08>

Resumen

El cemento es un producto primordial para el desarrollo de muchos países, debido a que es utilizado en la mayoría de las construcciones civiles como aeropuertos, puentes, carreteras, fábricas, viviendas, entre otras obras. Los impactos ambientales generados por la operación de plantas productoras de cemento han propiciado el surgimiento de movimientos sociales alrededor del mundo, que reivindican la lucha por el derecho a un medio ambiente sano, la defensa del territorio, sus recursos y las formas de vida tradicionales de la población. Entre las prioridades de la industria del cemento está llevar a cabo estrategias sostenibles e innovadoras más eficientes para reducir emisiones de NO_x , SO_x , CO_2 , polvos de SiO_2 y otros elementos tóxicos a fin de mejorar la competitividad de esta actividad industrial. Esta nueva visión deberá contemplar: 1) mejorar la eficiencia energética, cambiar a combustibles alternativos (combustibles carbono neto cero), 2) reducir la relación de *clinker* a cemento e integrar la captura de carbono en la producción de cemento como el eje principal de mitigación de carbono en este

* Licenciado en Biología. Analista en la Secretaría del Investigaciones y Posgrado de Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4959-7963>

** Maestro en Ciencias. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9747-260X>

*** Maestro en Administración y Políticas Públicas. Investigador en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4341-9368>

sector industrial y 3) priorizar las alternativas de producción del cemento, a fin de no afectar el medio ambiente y la salud humana.

Palabras clave: *industria limpia, reducción de CO₂, cambio climático, competitividad industrial, innovación tecnológica.*

Introducción

La historia del uso de conglomerantes y cemento Portland

La historia de los conglomerantes y cementos en la construcción se remonta a los tiempos de Egipto, Grecia y Roma. Las construcciones de esas civilizaciones y hasta mediados del siglo XVIII empleaban la cal como conglomerante. El gran personaje Vitrubio, en su tratado de arquitectura publicado en el siglo I antes de Cristo, da a conocer una dosificación de un “cemento romano” que se obtenía mezclando dos partes de puzolana y una parte de cal apagada. Las puzolanas procedían de las cenizas volcánicas que se encontraban al pie del Vesubio en la región Pozzuoli de donde proviene el término puzolana (Sanjuán y Menchón, 2014). Con el cemento romano se construyeron obras importantes, entre las que destaca el Foro Romano y el Panteón de Roma (27 a. C.). En la construcción se utilizó una mezcla de cal, agua, piedras, arena y ladrillos (Sanjuán y Chinchón, 2014).

Situación similar ocurrió hace unos 1500 años en la civilización china, en la que se ha descubierto la utilización del arroz como un tipo de mortero. En la civilización maya se han encontrado vestigios de la utilización de un elemento cementante bastante similar al cemento actual. En el siglo XVIII, el ingeniero John Smeaton, en 1758, aceptó reconstruir el Faro de Eddystone con un material resistente al viento, al fuego y al oleaje. Así empezó a investigar diferentes mezclas de mortero, hasta desarrollar un cemento hidráulico. Sin embargo, los ingleses James Parker y Joseph Aspdin, cuyo producto se obtuvo de la combustión conjunta de caliza y carbón, lo denominaron cemento Portland por su color oscuro, similar a la piedra de la isla de Portland del condado de Dorset. Este nuevo material lo patentaron en 1824 (Díaz, 2012).

En 1845, el británico Isaac Johnson —otro de los pioneros de la producción de cemento— calentó rocas calizas y arcilla hasta los 1 400 o 1 500 °C muy por arriba de lo que hizo Aspdin, con lo que consiguió llevar la mezcla al proceso químico llamado clinkerización, produciendo así la base del cemento que hoy conocemos. Aproximadamente, en 1855 se construyeron las primeras plantas productoras de cemento fuera de Inglaterra; se erigieron en Bélgica y Alemania. Estados Unidos inició la importación de cemento europeo a finales de 1860, pero en 1871, construyó la primera planta de cemento en Coplay, Pensilvania. El cemento generado por esta fábrica presentó propiedades deficientes en un inicio, sin embargo, fue mejorando su calidad de producción hacia 1900.

En 1873 se tuvo un gran avance en la capacidad de producción de cemento, gracias a una versión mejorada del horno rotatorio patentada por el inglés F. Ransome, que permitió una producción continua. A partir de 1900, los hornos rotatorios reemplazaron rápidamente a los hornos verticales porque la transferencia de calor por radiación era más eficiente y lograron que las altas temperaturas fueran uniformes para la clinkerización, lo que produjo cementos más resistentes. Posterior a la producción del *clínker*, se empleaba el molino de bolas para tritarlo y luego se agregaba yeso a la mezcla resultante para retardar el proceso de fraguado. En 1902, Thomas Alva Edison desarrolló los primeros hornos rotatorios de alta capacidad.

El cemento en la época más contemporánea es un conglomerante hidráulico de un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Los conglomerantes hidráulicos, el cemento Portland y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso, que son minerales muy abundantes en la naturaleza con costos relativamente bajos en su extracción (Polanco, Diego y Tomas, s/f). El cemento también tiene la propiedad de unir fragmentos sólidos para formar un material resistente y duradero (Jaimes y Montaña, 2022).

Este producto no sólo es impulsor de industrias sino también fuente de una demanda para los servicios y productos de otras industrias, como las empresas de transportes, las suministradoras de combustible y energía eléc-

trica, las proveedoras de sacos para envasar cemento y las productoras de maquinaria para el transporte (figura 8.1) (Nájera, 2002).

Figura 8.1. *Planta de manufacturación de cemento*



Fuente: Kunak (2022).

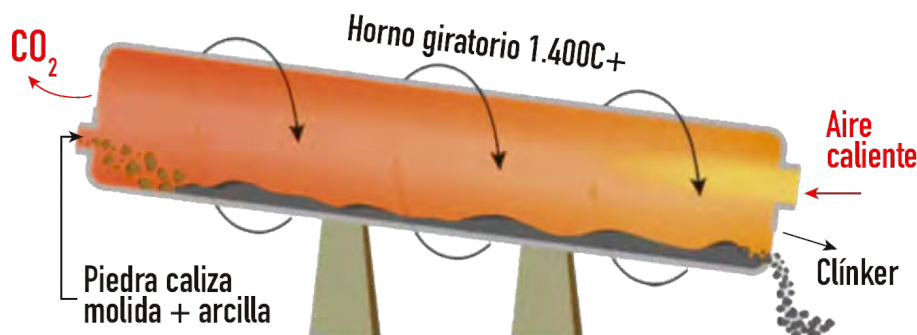
El proceso de fabricación del cemento Portland

La producción a nivel industrial

El proceso de elaboración del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en una cierta proporción y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión, a una temperatura de 1 300 a 1 400 °C, bajo la cual el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como *clínker*. El método de fabricación a seguir depende, además, de la naturaleza de las materias primas usadas. El proceso se realiza en tres etapas.

1ª etapa: Preparación de las materias primas. La extracción de las materias primas naturales se hace en canteras, normalmente, a cielo abierto próximas a la planta procesadora (caliza, marga y arcilla). Las operaciones de extracción incluyen perforación de rocas, explotación por dinamita, excavaciones, acarreo y trituración. Después de la trituración primaria, las materias primas se transportan a la planta de cemento para su almacenamiento y homogeneización. Se distinguen cuatro tipos de procesos de fabricación, en función de cómo se procesa el material antes de la entrada en el horno de *clínker*: vía seca, vía semiseca, vía semihúmeda o vía húmeda. La alimentación al horno se realiza a través del precalentado de ciclones de la materia prima para facilitar su cocción.

2ª etapa: Cocción del *clínker*. Uno de los componentes esenciales en la producción del cemento mediante el cocimiento como caliza cocida, pues en las operaciones de las plantas cementeras se desprenden partículas fugitivas de polvo y gases que contienen metales pesados como plomo, cadmio, arsénico y mercurio, además de los que se emiten por la chimenea (Storey y Colina, 2016). La química básica del proceso de la fabricación del cemento empieza con la descomposición del carbonato cálcico (CaCO_3) a altas temperaturas formando óxido cálcico (CaO) y liberando dióxido de carbono (CO_2) (figura 8.2). Sigue el proceso de clinkerización en el que el óxido de calcio reacciona a alta temperatura (1 400-1 500 °C) con óxido de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) para formar los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el *clínker* (Sanjuán y Chinchón, 2014).

Figura 8.2. Generación de CO_2 en el horno rotatorio

Fuente: adaptado de Carro Suárez (2022, p. 31).

El combustible inyectado a través del quemador principal (mechero), produce la llama principal (temperatura de llama de unos 2 000 °C) el tamaño se ajusta mediante la regulación del aire primario (10-15% del total del aire de combustión) que se introduce por multicanales situados alrededor de la boquilla inyectora de combustible y aire secundario en el quemador principal (Sanjuán y Chinchón, 2014). En el caso de utilizar carbón/coque de petróleo como combustible, se puede alimentar directa o indirectamente. El combustible pulverizado se inyecta directamente dentro del horno con el aire del molino (aire primario). La alimentación indirecta tiene como desventaja las pérdidas de calor del horno, que están alrededor de 200-250 MJ/tonelada de clínker (6 a 8% más alto que en los hornos modernos), por eso no se utiliza actualmente (Sanjuán y Chinchón, 2014).

3ª etapa: Molienda. El material obtenido en la etapa anterior es enfriado a una temperatura cercana a los 90 °C, a continuación es mezclado con coadyuvantes, por ejemplo, el yeso, para dar como producto final el cemento; posteriormente, este material es empacado para su venta. El cemento tipo Portland como producto final presenta una composición química promedio que está determinada por la mezcla de componentes a partir del tipo y cantidad de materias primas. Los elementos se originan a partir de distintas reacciones en el interior de los hornos de cocción. Las calizas y margas

proporcionan el calcio. Las arcillas, esquistos y otros materiales aportan el sílice, hierro y aluminio. El contenido de los elementos restantes proviene de las mismas materias, pero en menor proporción (tabla 8.1) (Romo, Romero y Samaniego, 2005).

Tabla 8.1. *Composición promedio del cemento tipo Portland*

<i>Compuesto</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Porcentaje</i>
Sílice	SiO ₂	21.92
Alúmina	Al ₂ O ₃	6.91
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	2.91
Óxido de calcio	CaO	62.92
Oxido de magnesio	MgO	2.54
Trióxido de azufre	SO ₃	1.72
Álcalis de R ₂ O ₃	R ₂ O ₃	0.82
Pérdida de combustible	*	(1.5)
Residuos insolubles	*	0.20

Fuente: Romo et al. (2005).

En términos de peso, se emiten aproximadamente 5 kg de NO_x y SO₂, 50 kg de H₂O, 250 kg de O₂, 700-900 kg de CO₂ y 1 550 kg de N₂ como subproductos por tonelada de cemento (Appadurai, s/f; Flores, 2003). A futuro los procesos modernos en la Unión Europea sobre la producción de un kilo de cemento se espera que solo generen 500 kg de CO₂ (Marmier, 2023).

La producción del cemento en el mundo

La producción de cemento está relacionada directamente con el desarrollo de cada país, ya que es uno de los materiales que en mayor o menor grado ha contribuido a conformar el perfil actual de las ciudades y multitud de grandes vías de comunicación (Nájera, 2002). Un importante porcentaje de productores de cemento se concentra en los países de Asia, otra fracción pertenece a Norteamérica, Europa, África del Norte y otros países de Latinoamérica (Flores, 2003). La producción del cemento es una actividad alrededor del mundo en la cual predominan las grandes empresas multinacionales cuya producción promedio oscila en los 4 millones de toneladas al

año (tabla 8.2). El envasado permite resolver la restricción peso-volumen que presenta el transporte de cemento, de modo que se favorece la ampliación del comercio más allá de lo local. México ocupa una posición relevante en el contexto global como país productor (Vera, 2013). En lo referente al comercio internacional la vía marítima ofrece una alternativa de transporte más económica en ambos sentidos de los países entre Asia, Europa y América. El comercio vía terrestre también ofrece sus ventajas; se trasporta vía ferrocarril (Vera, 2017). La producción para el sector de la construcción representa una fuerte actividad económica que beneficia a miles de trabajadores en varios países del mundo (El-Sayed et al., 2020).

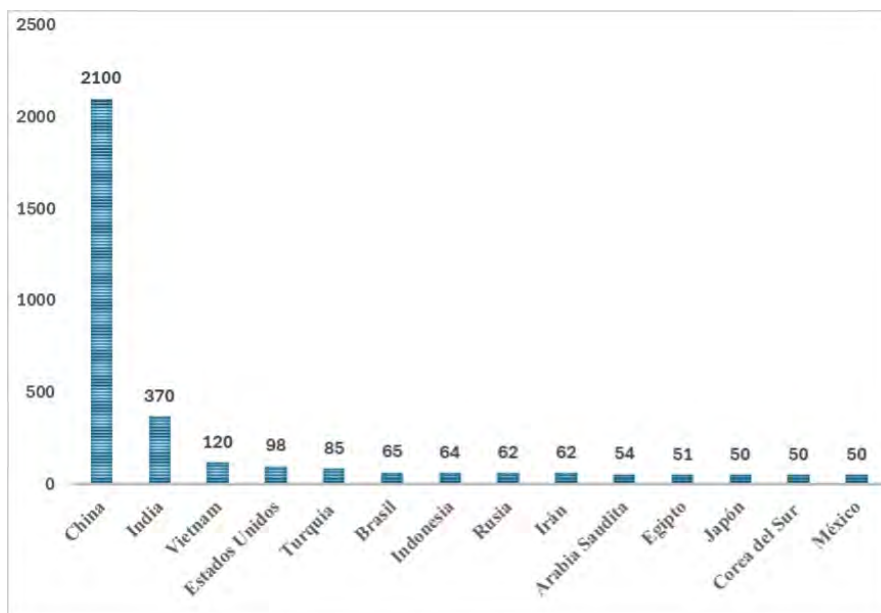
Tabla 8.2. *Cifras de producción mundial de cemento*

<i>Producción de cemento en el mundo (años / millones de toneladas métricas)</i>											
<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>
3.60	3.70	4.08	4.18	4.10	4.20	4.05	4.10	4.10	4.20	4.40	4.10

Fuente: Ige et al. (2024, p. 580).

Los estudios del Servicio Geológico de Estados Unidos y la Asociación Europea del Cemento resalta que China es el mayor productor de cemento con un poco más del 52% de la producción mundial, seguido de la India (7.0%), la Unión Europea (6.1%), Estados Unidos (2.1%) y el resto de los países con (27.6%). La producción de China produjo la cantidad de 2 100 millones de toneladas en 2022 al superar a cualquier de los otros países por un margen significativo. Esto significó que China logró más del 50% de la producción mundial del cemento. La India fue el segundo mayor productor de cemento del mundo con una producción de 370 millones de toneladas. Vietnam ocupó el tercer lugar, con una producción de 120 millones de toneladas. En este mismo año, Estados Unidos produjo aproximadamente 95 millones de toneladas y ocupó el cuarto entre los principales productores a nivel mundial. México se posicionó en el número 14 de la producción mundial (figura 8.3) (Ige et al., 2024).

Figura 8.3. Los países con mayor producción de cemento



Fuente: adaptado de Ige et al. (2024, p. 581).

Los efectos adversos de la producción del cemento en la sociedad

A pesar del gran impacto económico que representa la explotación de la materia prima para la industria cementera se menciona con poca frecuencia. A pesar del cumplimiento de la normatividad ambiental que exige cada país, la extracción conlleva graves impactos al medio físico, al medio biótico y a la sociedad (SE, 2013). Las enormes cantidades de materia prima necesaria para su transformación conlleva a la afectación del paisaje (Mendoza y Urbina, 2017), deforestación de la vegetación y la alteración de sitios del hábitat de la fauna (Díez, 2019). A consecuencia de la trituración de esa materia prima se genera grandes cantidades de polvos que llegan a los poblados cercanos con un alto riesgo de afectar la salud de sus habitantes. Para las comunidades cercanas causa divisiones entre

sus habitantes para quienes estas a favor o aquellos que se oponen a este tipo de actividad (Ventura, 2019).

Los riesgos de la emisión de los componentes químicos en la producción del cemento en la salud humana

Los efectos nocivos potenciales que generan los *combustibles derivados de residuos* (CDR) y las propias materias primas liberados durante el procesamiento del *clínker*, tanto para el ambiente como para la salud humana, efectos que han despertado gran interés sobre los efectos que causan, especialmente por parte de los grupos ecologistas, científicos especializados en el área, centros de investigación de universidades y empresas socialmente responsables (tabla 8.3) (Storey y Colina, 2016). En esta fase de la producción se generan grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como el monóxido de carbono (CO), otros contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO), dióxido de azufre (SO₂), cloruros y fluoruros, emisiones de COV. Así como distintos metales pesados (Pb, Cd, Pb, As, Cr, Cu, Ni, Se y Zn); así como partículas en suspensión (PM_{2.5}, PM₁₀) con un daño potencial a la calidad del aire y graves daños salud de las personas (EMEP/EEA, 2016; SEE, 2017).

Tabla 8.3. *Principales contaminantes con efectos a la salud*

<i>Contaminante proveniente de la producción de cemento</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Afectación a la salud humana y medio ambiente</i>
<i>Óxidos de nitrógeno</i>	(NO _x)	Irritación del sistema respiratorio, reducción de la función pulmonar, agravamiento de las alergias respiratorias y del asma, lesiona las células mucosas que cubren el interior de los pulmones, empeoramiento de las enfermedades respiratorias crónicas. Forma parte de la lluvia ácida que afecta la fertilidad de los terrenos, la vegetación y los ecosistemas acuáticos.
<i>Óxidos de azufre</i>	(SO _x)	Irritaciones oculares y vías respiratorias, rinitis, sinusitis, laringitis, bronquitis agudas y crónicas y bronquiolitis, desarrollo de asma y alergias respiratorias. Origina la lluvia ácida.
<i>Monóxido de carbono</i>	CO	Las personas que inhalan este peligroso gas pueden experimentar síntomas como: dolor de cabeza, mareo, agotamiento físico, náuseas, irritabilidad, confusión, pérdida de conciencia, daños neurológicos, trastornos sensoriales y motores.
<i>Dióxido de carbono</i>	CO ₂	El CO ₂ desplaza el oxígeno cuando se encuentra en concentraciones superiores a los 30.000 ppm, lo que puede provocar asfixia, falta de concentración, dolores de cabeza, somnolencia, problemas respiratorios y mareo.
<i>Partículas suspendidas</i>		Las partículas finas aisladas o en combinación con otros contaminantes pueden provocar muertes prematuras, agravamiento de crisis asmática, tos persistente, dificultad respiratoria, dolor al respirar, bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar.
<i>Dioxinas y furanos</i>		Cáncer, alteraciones neurológicas, hepáticas, inmunológicas, disfunciones hormonales, esterilidad, endometriosis, alteraciones cutáneas, entre otros.

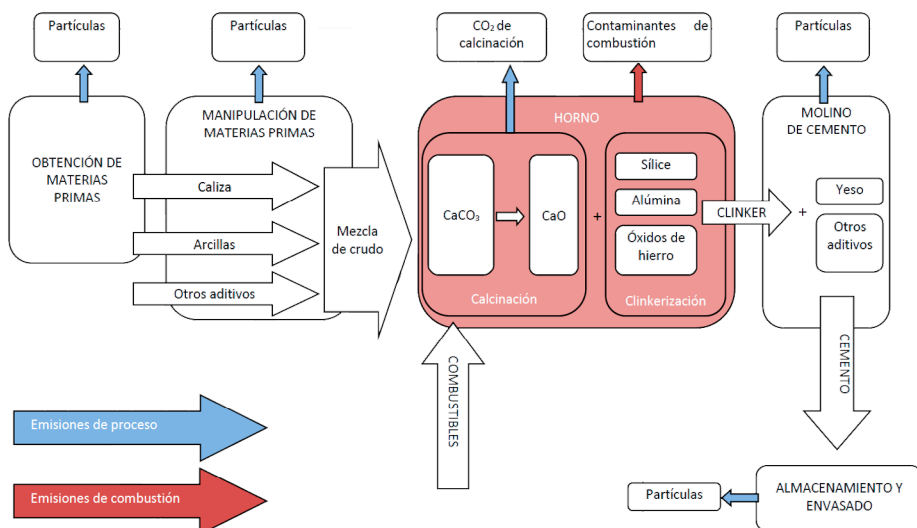
<i>Contaminante proveniente de la producción de cemento</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Afectación a la salud humana y medio ambiente</i>
<i>Metales y sus compuestos</i>	Talio (T)	Tóxico por ingestión, inhalación y absorción cutánea, afecta al sistema nervioso, genera sensibilidad cutánea y es bioacumulativo, a bajas dosis puede interactuar con el sistema enzimático y los neurotransmisores. Altamente tóxico para los organismos acuáticos, de alta movilidad en el suelo.
	Cadmio (Cd)	Irritación bronquial y pulmonar, disminución de la función pulmonar, disminución de la filtración urinaria proteinuria y litiasis renal, efectos reproductivos como bajo peso, crecimiento intrauterino retardado, riesgo de cáncer de pulmón.
	Plomo (Pb)	Bioacumulativo, dolor abdominal, vómitos, diarrea y en exposición grave muerte por envenenamiento, toxicidad en la sangre, disminución de las capacidades sensoriales y motoras, retraso en el crecimiento de los niños, toxicidad renal, alteración en la presión sanguínea, efectos reproductivos como disminución de los espermatozoides y el volumen del semen, incrementa los abortos y retraso físico y mental de los lactantes.
	Mercurio (Hg)	Bioacumulativo con gran persistencia medioambiental, sus efectos son afectaciones gastrointestinales, respiratorias y al sistema nervioso central como alteraciones visuales, ceguera, sordera, disminución de la conciencia, alucinaciones, delirio, tendencias suicidas y muerte. En sus efectos crónicos provoca alteraciones neurológicas y lesiones renales. Afectaciones reproductivas como abortos y malformaciones en los niños.
	Arsénico (As)	La vía de absorción puede ser a través de la piel, en el caso de ser ingerido se deposita en el tracto respiratorio. Se acumula también en hígado, riñón, pelo, dientes y uñas. Provoca carcinogénesis en piel y pulmón.
	Cromo (Cr)	Los compuestos de cromo pueden ingresar al organismo humano por exposición accidental o causar daño por exposición crónica y dañar diversos sistemas. Cuando los compuestos de cromo se ingieren por largo tiempo causan irritación, úlceras, hepatitis, nefritis y coloración amarilla de los dientes. En los ojos expuestos se observa conjuntivitis, lagrimeo y dolor.
	Zinc (Zn)	Un exceso en la ingesta de zinc, afecta a todos los mamíferos, ya que, genera trastornos neurológicos, hematológicos, inmunológicos, daños renales, afectaciones hepáticas, cardiovasculares y afecciones genotóxicas.
	Níquel (Ni)	Causa mareos, fallos respiratorios, embolia de pulmón, asma, defectos de nacimiento desordenes del corazón bronquitis crónica, alergias. La exposición al níquel puede desarrollar cáncer de laringe, próstata, nariz y pulmón.

Fuentes: Aguilar (2023, p. 34.), Albert (2008, pp. 171, 185) y Carrasco y Tadeo (2014-2015, p. 5).

Las fases de producción que generan emisiones de CO₂ de efecto invernadero de la industria del cemento

Una veintena de empresas a nivel mundial entre las que sobresalen las productoras de petróleo, gas, carbón y cemento fueron responsables en el año 2023 del 40.8% de las emisiones globales sumando 17.5 gigatoneladas de dióxido de carbono (CO₂). Además, 16 de esas 20 son compañías públicas (estatales). Entre todas destacan las empresas de China, con un aporte del 23% de CO₂ (Planelles, 2025). Las industrias del cemento a nivel mundial son un sector que genera enormes cantidades de CO₂. Las emisiones de CO₂ en la industria cementera provienen principalmente de la combustión directa de combustibles fósiles y de la calcinación de la piedra caliza en óxido de calcio ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Una cantidad indirecta de CO₂ proviene del consumo de electricidad obtenida de la quema de combustibles fósiles (figura 8.4). Este sector ha emitido 1.8 gigatoneladas de CO₂ anuales en 2011 (Ali et al., 2011). En el año 2019 generó 2.4 gigatoneladas de CO₂ (Ige et al., 2024).

Figura 8.4. La liberación de CO₂ a lo largo del ciclo de producción de cemento

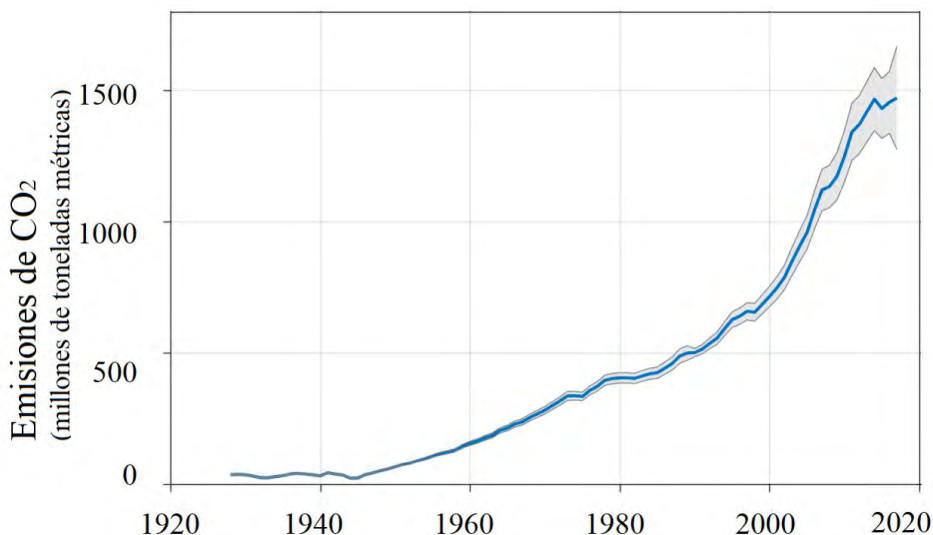


Fuente: adaptado de SEIE (2017, p. 1).

Las emisiones históricas de CO₂ por la industria del cemento

La industria del cemento contribuye aproximadamente con el 5% de las emisiones de CO₂ antropogénico a nivel global. Sin embargo, se ha documentado que los niveles se han elevado de hasta el 7% (Fennell, Davis, Mohammed, 2021). Del CO₂ emitido, el 50% corresponde en gran parte de la industria del cemento como resultado de la combustión de las distintas fuentes de combustibles (carbón, coque, neumáticos, aceites usados, solventes, lodos de plantas de tratadoras de aguas y otras fuentes). El 5% producto del transporte y un 5% adicional de la electricidad en las operaciones de manufactura (Bosoaga et al., 2009). Pero estimaciones más recientes indican que la característica especial de esta industria es el hecho de que aproximadamente dos tercios del CO₂ emitido se generan a partir de las reacciones químicas involucradas en la conversión de la piedra caliza en óxido de calcio, precursor de la formación del *clinker* y una tercera parte se emite por el consumo de combustibles fósiles y el resto generado por otras fases de operación (Cavalett et al., 2022).

Los registros históricos fueron elaborados por Andrew (2018) a pesar de las escasas bases de datos del registro de CO₂ del mundo. En la gráfica de la figura 8.5 se observan tres periodos de las emisiones de este sector. En el registro del año 1928 a la década de 1980 se mantuvieron por debajo de 500 millones de toneladas de CO₂. En las siguientes décadas, de casi 1990 a la década de 2016, se aprecia un incremento que se elevan a las 1 000 millones toneladas métricas. El último periodo, hasta 2018, la cifra de emisiones se incrementa a la cantidad de 1 500 millones de toneladas métricas de CO₂.

Figura 8.5. Comportamiento mundial de emisión de CO₂ durante el periodo de 1928 a 2018

Fuente: adaptado de Andrew (2018, p. 198).

La historia de la fabricación del cemento en México

Los inicios

En el año de 1887 es el primer ejemplo de la Compañía Manufacturera de Cal Hidráulica para producir cal y cemento, se instaló San Lorenzo de Tula, Hidalgo. Sin embargo, al no lograr la suficiente calidad de sus productos no logró prosperar. Los hermanos Enrique y Jorge Gibbon, hijos del empresario británico Henry J. Gibbon asentado en el país, adquirieron en 1882 la patente exclusiva para fabricar cemento Portland. En 1890 fundaron en Londres la Mexican Portland Cement Company y en nuestro país rentaron gran parte de la Hacienda de Denyi y el molino de Jasso, para establecer su fábrica. La inauguración de la planta fue a fines de 1893, pero debido a que el cemento no alcanzó la calidad requerida para el mercado local, la empresa quebró a un año de su apertura (Santa Ana y Santa Ana, 2020). Un nuevo intento de producción sucedió en 1895 al asociarse con G. Watson para

abrir una nueva planta denominada Fábrica de Buena Vista, con la cual obtuvieron contratos con el gobierno del Ayuntamiento de la Ciudad de México en 1897: debido a que nuevamente el producto no alcanzó los estándares requeridos no les fue posible cerrar los contratos y la compañía se disolvió en 1899. Hasta el año de 1900 el cemento aún no se producía en México el cual se importaba desde Europa. En 1905 los señores Watson y Gibbon se fusionaron con la Sociedad Pimentel, formando la Compañía Manufacturera de Cemento Portland (Santa Ana y Santa Ana, 2020). En el norte de nuestro país se fundó en 1906 la primera empresa productora de cemento con el nombre de la Fábrica de Cementos y Productos Refractarios en la ciudad de Monterrey. Entre los años de 1906 y 1907 se establecieron las fábricas de cemento en Gómez Palacio, Durango y en San Nicolás Hidalgo, Nuevo León. En Hidalgo, al centro del país, se creó la Compañía Manufacturera de Cemento Portland “La Cruz Azul” en Jasso y la fábrica de Cementos Tolteca en Tula (Nájera 2002, Santa Ana y Santa Ana, 2020). Al año de 1911, se consumían al año 75 000 toneladas de cemento, y tal demanda decreció durante la Revolución.

Posterior a la Revolución, en la década de 1920, restablecida la paz, las empresas existentes en el país habían reanudado sus operaciones y normalizado sus actividades; se crearon también Cementos Landa y Cementos Monterrey (Nájera, 2002). Para 1946 había en México seis empresas dedicadas a la fabricación de cemento; tres en el estado de Hidalgo, una en Monterrey, una en Puebla y la de Apaxco en el Estado de México. En el año 1951, con un equipo capaz de manufacturar 2.2 millones de toneladas, la industria nacional sólo logró producir 1.5 millones de toneladas (Nájera, 2002). La capacidad de producción industrial, en el año 1996, llegó a la cantidad de 44 millones de toneladas y justamente hacia el año de 1999 alcanzó la cifra de 46 millones de toneladas; al año 2001 se presenta una caída de 32.1 toneladas a consecuencia de la desaceleración económica de Estados Unidos y por la contracción de la industria de la construcción. Actualmente la industria nacional del cemento tiene presencia en al menos 30 plantas distribuidas en 17 entidades federativas y 33 plantas en el extranjero, distribuidas en Estados Unidos, España, Colombia, Filipinas, Costa Rica y otras naciones (Romo et al., 2005).

En el contexto económico, la industria mexicana del cemento es una de las más importantes por su capacidad productiva. A lo largo de los años ha tenido severas fluctuaciones en sus niveles de producción. El mayor impulso de esta industria ocurrió durante la época de industrialización por sustitución de importaciones que promovía la producción nacional a través de incentivos fiscales y apoyos financieros. La industria pasó de contar con una capacidad instalada de 574 millones a 17.02 millones de toneladas métricas en el periodo 1940-1980 (Salomón, 2006, citado por Vásquez y Corrales, 2017). En el año 2006 el valor de la producción aumentó 5.8% en términos reales. Sin embargo, hay un momento crítico entre 2009 y 2010 cuando se registraron fuertes caídas en la producción y en consecuencia sólo se logró el 52.4% en las exportaciones. Es comprensible que la crisis financiera desatada por Estados Unidos en el 2008 tuviera fuertes repercusiones en la economía mexicana y en particular en la industria cementera (Vásquez y Corrales, 2017).

Las emisiones de CO₂ de la industria del cemento en México.

Las cementeras contaminan el aire, el agua, el suelo y los organismos vivos. A pesar de los cambios tecnológicos que se fueron incorporando a los procesos (hornos rotativos y procesos húmedos en 1895), como los precalentadores de suspensión en la década de 1930 y los precalentadores con cuatro etapas ciclónicas durante la década de 1970. En esta misma época ya existía una gran variedad de plantas, incluidas las híbridas. Otras causas de la contaminación consistían en las deficiencias técnicas debido al inadecuado mantenimiento, constantes fallas técnicas, cortes en el suministro de combustible y fallas de procedimientos; por estas condiciones inherentes a los procesos de producción, los efectos de la contaminación siempre han estado presentes (Carrasco y Tadeo, 2016). Los registros de gases y compuestos de efectos de efecto invernadero toman en cuenta los 7 principales sectores principales (transporte, generación de energía eléctrica, industria, agricultura-ganadería, petróleo-gas, residuos y residencial-comercial). A partir del periodo de 2017 a 2021 se registran las emisiones de CO₂ del sector industria que comprende las 7 las ramas industriales (minerales-cemento, quí-

mica, metales, productos no energéticos-solventes, electrónica, refrigerantes no afectan capa de ozono y manufactura de productos diversos) alcanzó un valor total de 350.12 millones de toneladas métricas. En particular, las emisiones de CO₂ la industria del cemento registró la cantidad de 97 millones de toneladas métricas, esto representó el 27.58% de las emisiones de este sector de México (INEEC, 2024).

La hoja de ruta de la descarbonización en la producción del cemento de México

La hoja de ruta utiliza un enfoque a la producción del cemento al explorar las posibles vías de transición basada en el análisis de tecnologías de menor costo para que la industria cementera reduzca sus emisiones directas de CO₂, de acuerdo con el escenario de los 2 °C. Alcanzar este objetivo requeriría una combinación de soluciones tecnológicas, políticas de apoyo, colaboración pública y privada, mecanismos de financiación y aceptación social. La mejora de la eficiencia energética, el cambio a combustibles alternativos, la combinación con la reducción del contenido de *clínker* en el cemento, la implementación de tecnologías emergentes e innovadoras como la captura de carbono y el uso de materiales aglutinantes alternativos son los principales métodos de mitigación de carbono disponibles en la fabricación de cemento (AIE, 2018).

Los compromisos internacionales de México

Internamente, con base en la premisa de la hoja de ruta, la industria del cemento está transitando hacia retos importantes en el marco del cumplimiento de la Ley General de Cambio Climático y dar cumplimiento a los programas de Auditoría Ambiental promovidos por la Procuraduría Federal de Protección Ambiental (Profepa). En México, la NOM-040-SEMARNAT-2002 regula las emisiones derivadas del proceso de fabricación del cemento, las empresas tienen la obligación de reportar sus emisiones al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.

Asimismo, cuenta con el programa voluntario de Industria Limpia, a fin de incentivar la eficiencia de los procesos de producción (Vera, 2013; Pérez y Bejarano, 2008). Es importante considerar que la certificación de la norma ISO 14000 es una herramienta adicional del marco de la regulación y observancia ambiental al implementar el Sistema de Gestión Ambiental por su compromiso ante el Estado y con la Sociedad (Martínez et al., 2021). En este mismo contexto, la industria del cemento en México tiene compromisos internacionales importantes, los cuales se describen a continuación (tabla 8.4).

Tabla 8.4. *Organismos internacionales abocados a la reducción de CO₂*

<i>La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático</i>	El objetivo de la CMNUCC es “impedir interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático mediante la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera”. Las principales respuestas para abordar el cambio climático son la mitigación y la adaptación. La Convención no enumera los GEI que se deben regular, sólo hace referencia al dióxido de carbono y a otros gases de efecto invernadero (CO ₂ eq.).
<i>Contribuciones nacionalmente determinadas</i>	Las NDC son compromisos particulares por sector que los países presentan para reducir sus GEI al año 2030. Ellas son el núcleo del Acuerdo de París y de la consecución de esos objetivos a largo plazo. Las contribuciones determinadas a nivel nacional encarnan los esfuerzos de cada país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático.
<i>Mecanismos de desarrollo limpio</i>	Ellos se crean a través del artículo doce del Protocolo de Kioto, a objeto que los países desarrollados cumplan con parte de sus compromisos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y que los países en desarrollo se beneficien de las actividades de proyectos que generen certificados de carbono. Pueden participar en él, en forma voluntaria, países desarrollados y países en desarrollo que hayan ratificado dicho protocolo. En el caso de los análisis de los proyectos latinoamericanos MDL para el sector cementero, y de las técnicas que se utilizan en éstos, se indican las principales metodologías existentes para la reducción de emisiones mediante: a) Sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos (biomasa, llantas, residuos sólidos urbanos, por ejemplo). b) Aumentar el uso de adiciones minerales en la producción de cemento (Reducción de factor <i>clinker</i>). c) Reducción de emisiones de CO₂ en la producción de <i>clinker</i>. d) Mejorar la eficiencia energética (instalación de nuevos hornos).

Acciones nacionales de mitigación apropiadas	Este concepto fue introducido en la Conferencia de las Partes (COP) en Bali en el 2007 como un medio para que los países en desarrollo indiquen las acciones de mitigación que estaban dispuestos a tomar, como parte de su contribución a un esfuerzo global. Las NAMA son un conjunto de propuestas para alcanzar un desarrollo sostenible bajo en emisiones de GEI, de manera medible, reportable y verificable. Estas deben ser factibles, es decir, coherentes con las particularidades del país donde se implementan, y puedan ser apoyadas con financiamiento, tecnología y formación de capacidades por parte de la comunidad internacional.
Low Carbon Technology Partnerships	La iniciativa Low Carbon Technology Partnerships, dirigida por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés), la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN por sus siglas en inglés) y la IEA (Agencia Internacional de Energía) buscan, a través de esta iniciativa, canalizar acciones para el desarrollo de tecnologías bajas en carbono.
Race to Zero (UNFCCC)	Race to Zero impulsada desde las Naciones Unidas y liderada por la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), es una campaña global para reunir el liderazgo y el apoyo de empresas, ciudades, regiones e inversores para una recuperación saludable, resiliente y cero emisiones de carbono que prevenga amenazas futuras, cree empleos dignos y favorezca un crecimiento inclusivo y sostenible.

Fuente: Canacem (2023a).

Las organizaciones mundiales de soporte en la hoja de ruta en la descarbonización de la industria del cemento

Estas organizaciones se pueden considerar como el segundo primer pilar de las estrategias mundiales para enfrentar las causas y efectos del cambio climático, partiendo de la base del Acuerdo de París, sus antecedentes, partes interesadas y sus compromisos de Mitigación y Adaptación (tabla 8.5).

Tabla 8.5. *Organismos internacionales que apoyan la sostenibilidad de la producción del cemento*

<i>GCCA (Global Cement and Concrete Association)</i>	La GCCA es una asociación global dedicada al fortalecimiento y desarrollo de la industria del cemento y el concreto en su contribución a la sostenibilidad. Con este fin, la GCCA promueve la construcción de edificios e infraestructuras duraderas, resistentes y ambientalmente sostenibles a nivel global.
<i>CSI (Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento)</i>	La Cement Sustainability Initiative durante sus casi 20 años de historia se ha centrado en definir los contenidos para una gestión responsable en la producción de cemento a nivel global. Entre sus ejes de trabajo se destacó el cambio climático, el consumo de combustibles, la seguridad de los colaboradores, las emisiones en el aire, el reciclaje de concreto y la gestión de canteras.
<i>GNR (Getting the Numbers Right)</i>	GNR es una base de datos, sobre el desempeño en emisiones de CO ₂ y consumo de energía en la industria global del cemento (849 instalaciones individuales que representan el 19% de la producción mundial de cemento). Todas las compañías participantes y grupos de interés tienen acceso a reportes estandarizados; también es posible realizar y obtener solicitudes adicionales sobre temas específicos, siempre dentro de estrictos lineamientos de confidencialidad.
<i>LCTPI (Low Carbon Technology Partnerships)</i>	La iniciativa Low Carbon Technology Partnerships, dirigida por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés), la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN por sus siglas en inglés) y la IEA (Agencia Internacional de Energía) buscan, a través de esta iniciativa, canalizar acciones para el desarrollo de tecnologías bajas en carbono. LCTPI ha reunido a más de 150 empresas globales con 70 socios para trabajar colaborativamente, esta es una iniciativa del Programa de Soluciones para la COP21. Finalizada la COP21 se llevaron a cabo reuniones en Durban, San Paulo, Nueva Delhi, Nueva York, Pekín y Londres, donde los planes de acción fueron compartidos y conformados con los aportes de las partes interesadas.

Fuente: Canacem (2023a).

Los 3 ejes de la industria mexicana del cemento hacia descarbonización en la producción (kg de CO₂ / tonelada de cemento)

Eje 1: Coprocesamiento de la incineración combustibles alternativos

El coprocesamiento adoptado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA) en el marco del Convenio de Basilea, corresponde a un concepto de desarrollo sostenible basado en los principios de la ecología industrial, que se centra en el papel potencial de la industria para reducir las cargas ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, al convertir los residuos de una industria en materia prima o recursos ener-

géticos de otra (Grimmeissen et al., 2020). En la actualidad, la incineración de residuos en la industria cementera se da en dos sentidos, primero permite tener un ahorro al usarlos como Combustibles Derivados de Residuos (CDR) en vez de combustibles fósiles y el cobro por la incineración que se les denomina (CDR). El cobro oscila entre los 120 y 150 pesos por tonelada. La industria utiliza este servicio por la nula o inadecuada gestión dado que es común su presencia invadiendo ríos o lagunas ante la escasa cultural ambiental (Carrasco y Toledo, 2015).

En México, este modelo de gestión no aplica del todo a los residuos industriales o peligrosos; este procesamiento es regulado por la NOM-050-SEMARNAT-2018 (Carrasco y Toledo, 2015). Sin embargo, los riesgos potenciales conllevan a la generación de sustancia con riesgos de ser consideradas como cancerígenas (Ruiz, 2007). En la tabla 8.6 se pueden comparar las ventajas y riesgos ante el uso de este tipo de combustible alternativos.

Tabla 8.6. Los combustibles alternativos usados en la línea de producción de cemento

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones
Revestimiento de carbón gastado (SCL)	Requirió 2. 42 veces la cantidad de carbón.	Produjo 79% más de dióxido de carbono que el carbón puro.	El uso de SCL no proporciona una energía térmica significativa; más bien, reduce el flujo del material de alimentación y es una fuente de flúor. La desventaja de usar SCL es un aumento en las emisiones de dióxido de carbono. El factor limitante para el uso de SCL es el contenido de óxido de sodio o álcali.
Lubricante industrial.	Se requieren 2 kg menos de material que el carbón para generar la energía térmica demandada.	Las emisiones de CO ₂ aumentaron 13% para el caso en que el carbón fue completamente sustituido por lubricantes industriales usados.	La implementación de lubricantes usados como combustible es la alternativa más sencilla, debido a la naturaleza líquida del material; el equipo de almacenamiento y manejo requiere poco espacio y se puede incorporar fácilmente en una planta existente.

<i>Material</i>	<i>Energía térmica</i>	<i>Emisiones</i>	<i>Observaciones</i>
Llantas o neumáticos usados.	Se requieren 1.2 kg menos de material que el carbón para generar la energía térmica demandada.	Los neumáticos usados produjeron un 9% menos de dióxido de carbono que el carbón puro.	La incineración de neumáticos usados es una práctica sostenible, ya que las aplicaciones de reciclaje actualmente no pueden consumir la cantidad de material generado. Además, se encontró que la combustión de neumáticos en el horno era un proceso limpio debido a la temperatura muy alta y a los largos tiempos de residencia.
Plásticos (PET y PVC).	Se requiere un 50.28% más de material, si se compara con el carbón.	Las emisiones son un 20.89% inferiores que el equivalente para el uso de carbón.	—
Fibra de pape.l	Se requiere un 46.92% más de material, si se compara con el carbón.	Las emisiones son un 32.68% inferiores que el equivalente para el uso de carbón.	—
Lodos de plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR).	6.2-8.2 MJ/kg.	—	Los hornos que utilicen este material trabajan a temperaturas tan altas, que se logra la eliminación de organismos patógenos y otros orgánicos peligrosos.
Lodos de petróleo.	8.53-20.25 MJ/kg El uso de este material en un 14% w/w en la mezcla cruda logra que 1.6 ton de esta mezcla sea igual 0.12 ton de carbón.	La adición de lodos de aceite aumentó la concentración de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) durante la desgasificación en más del 90%. Sin embargo, la cantidad de COV disminuyó a medida que aumentó la temperatura de calcinación, lo que sugiere que el fango debe procesarse a altas temperaturas (por encima de 1 450 °C).	—

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones
Combustible a base residuos sólidos municipales, residuos de biomasa, lodos de plantas de tratamiento, residuos industriales peligrosos, entre otros	—	En 2006 varios países europeos con estos combustibles de rechazo cubrieron más del 70% de energía térmica requerida para la fabricación de cemento.	—
Mezcla de cascarilla de arroz con combustible	2530-5250 kcal/ kg	La adición de la mezcla disminuyó la concentración de emisiones de gas NOx, aunque la cantidad de gas SOx no se vio afectada a la temperatura de calcinación probada.	Produce inmensas cantidades de rendimiento de volátiles (cenizas> 96% en peso) y poco carbono fijo. El consumo de electricidad decreció un 13% con la utilización de mezclas de este combustible al 5%.
Residuos de alimentos	668-4919 kcal/ kg	—	Una sustitución del 20% por el coque disminuyó en un 2% la productividad en las plantas. Una mezcla de estos residuos (80%) y papel (20%) mostró un incremento en la productividad cercana al 2% en las plantas.

Fuente: Aristizábal y González (2021, p. 105).

Eje 2: Sustitución del *clínker*

Los materiales alternos al *clínker* pueden ofrecer mayores ventajas como materiales en la reducción de gases contaminantes. Estos tipos de materiales incluyen las escorias de los hornos de la fundición del hierro, cenizas volantes, puzolanas a partir de cenizas volcánicas, cenizas de cáscara de arroz, humo de sílice, entre otros. Asimismo las arcillas calcinadas son también un gran potencial en el desempeño y durabilidad del cemento (Vera, 2013). Estos materiales son conocidos como puzolanas de sílice y/o aluminas que no poseen alto poder cementante de manera individual, pero, si presentan un tamaño de partícula muy pequeña pueden reaccionar químicamente como compuestos cementantes en presencia de agua a temperatura ambiente. Al lograr realizar reemplazos parciales de *clínker* por estos materiales puzolánicos se ahorra energía en la producción del *clínker* y disminuyen las emisiones CO_x, SO_x, NO_x en el horno, esto también evita la

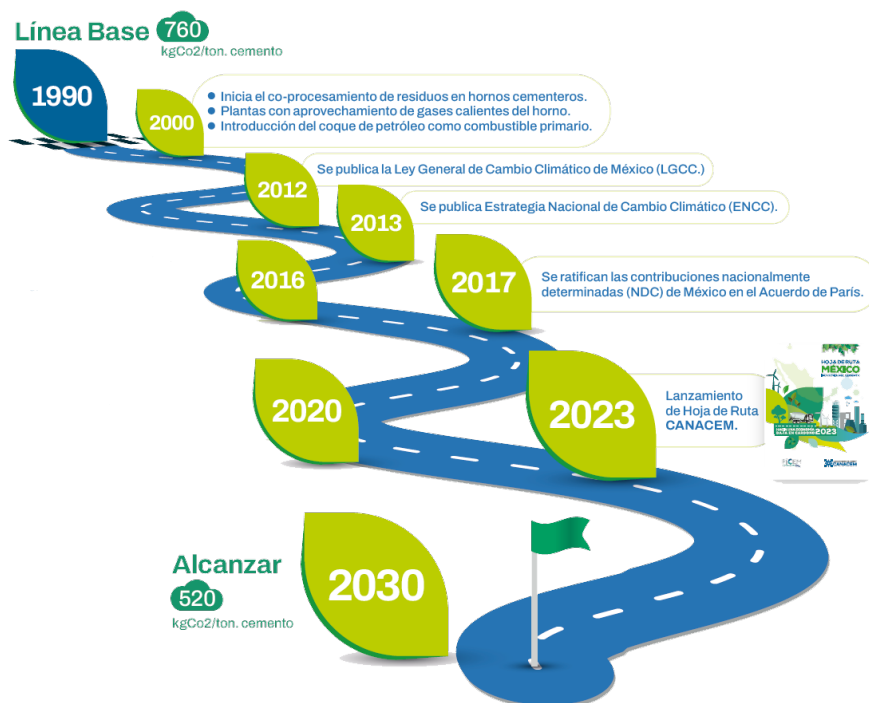
sobreexplotación de yacimientos de canteras (Revuelta, 2022). En esta etapa la meta de ecoeficiencia en el consumo 3.69 GJ/t de *clínker* (giga-Joules por toneladas de *clínker*).

Eje 3: Eficiencia térmica

Por recomendaciones de la Federación Interamericana del Cemento y el Instituto del Cemento y el Hormigón (FICEM e ICH), la mejora en el consumo energético térmico propuesto será de 3.550 GJ/t de *clínker*. Asimismo, la eficiencia energética eléctrica recomendada será de 102 kWh por tonelada de cemento (Grimmseissen et al., 2020). La industria cementera tradicionalmente es un sector con un alto consumo energético; suele representar aproximadamente el 40% de los costos de producción (incluido el costo de electricidad, pero no los costos de inversión). Parte de la hoja de ruta consiste en la mejora y eficiencia energética siendo este eje es uno de los principales involucrados para apoyar la sostenibilidad de este sector de México (Canacem, 2023a).

La tendencia a la baja del consumo energético implica las tres principales etapas del proceso de producción las cuales deberán enfocarse hacia (a) la inversión de equipos especializados en la disminución de consumo de energía y (b) la implementación de equipos especializados en la captura de CO₂ a fin de fomentar la conciencia ambiental, seguridad y salud de trabajadores y comunidades (Flores, 2003).

En México con la propuesta de estos tres ejes se puede aseverar que la integración de tecnologías emergentes e innovadoras, en la línea de producción industrial, como la captura de carbono, la reducción del contenido de *clínker* en el cemento y la eficiencia energética y eléctrica la meta a lograr las mayores reducciones de emisiones a partir de una línea base de 1990 era 760 kg CO₂ / tonelada-cemento podrá lograrse una relación producción de 520 kg CO₂/ tonelada-cemento para el 2030 (figura 8.6).

Figura 8.6. *Propuesta de la descarbonización de la industria del cemento de México*

Fuente: Canacem (2023b, p. 5).

Discusión

La propuesta de la hoja de ruta, para el sector de la industria mexicana del cemento, tiene un enfoque multifactorial que debe abarcar distintos niveles en los que se incluyen los compromisos internacionales en la baja emisión de los GEI y las organizaciones que apoyan a esta industria. El desempeño como industria nacional afronta nuevos retos prioritarios y desafíos con respecto a la investigación y la incorporación de la tecnología innovadora a los procesos de producción del cemento. La hoja de ruta traza un enfoque ascendente para explorar posibles vías de transición basada en el análisis de tecnologías de menor costo. Suele aplicarse para reducir emisiones directas

de CO₂ con efecto invernadero. Esta hoja de ruta ha requerido de una combinación de soluciones tecnológicas, políticas de apoyo, colaboración público-privada, mecanismos de financiación y aceptación social.

Los Acuerdos de París, en la COP21, especifican que es mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5 °C, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.

El subsecuente paso ante la anterior premisa abre el camino al uso de combustibles cero de CO₂. Este es un reto tecnológico complicado y quizá poco factible por el alto costo económico tanto para México como el resto de otros países de este sector. La tabla 8.7 se resumen las cuatro fuentes de energía (Aristizábal y González, 2021; Borowski y Karlikowska, 2023).

Tabla 8.7. Las 4 principales fuentes energéticas con tendencia a la baja emisión de CO₂

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones
1. Energía fotovoltaica, solar térmica y electroquímica	a) La piedra caliza de cemento se somete a una electrólisis de baja energía para producir cal, O ₂ y carbonato reducido sin emisión de dióxido de carbono.		b) La electrolisis es un proceso endotérmico y cuando la energía requerida es solar, el proceso es libre de dióxido de carbono originado por la combustión de recursos fósiles.
2. Sistema híbrido fotovoltaico y eólico	a) Es una solución tendencia para mitigar las emisiones de CO ₂ mediante el establecimiento de una red renovable que pueda satisfacer una fracción significativa de la demanda exigida por la industria.		b) En este tipo de instalaciones son más eficientes aquellas en las que se cuenta con un banco de baterías para el almacenamiento de la energía en las horas de mayor irradiación solar y de mayor velocidad y disponibilidad de vientos.
3. Calcinador solar	a) La implementación de la energía solar térmica en la planta de cemento tendría lugar a través de un reactor solar en el que el calor se suministra a través de energía solar concentrada.	Si el 50% de las plantas adopta la tecnología de calcinación solar, para 2050, las reducciones de emisiones sumarían el 7% (en el caso optimista) y el 2%, en el caso pesimista.	

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones
4. Hidrógeno	El uso del hidrogeno es una fuente importante que eliminará las emisiones nocivas que generan las fuentes no renovables a base de combustibles fósiles.		El hidrógeno es la fuente de energía que en los próximos años hará una contribución significativa y decisiva a la transformación energética global y llevará a una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Fuente: Aristizábal y González (2021, p. 106) y Borowski y Karlikowska (2023, p. 4).

La posibilidad de utilizar estas tecnologías, las modificaciones técnicas necesarias y su aplicación en la producción de cemento son una incógnita para este sector industrial.

Referencias

Aguilar, J. (2023). *Contaminación ambiental por la inadecuada gestión de llantas usadas por el parque del municipio de Villavicencio-Meta, Colombia* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/54711>

Agencia Internacional de Energía (AIE). (2018, 5 de abril). *La hoja de ruta de la tecnología del cemento traza un camino para reducir las emisiones de CO₂ en un 24% para 2050*. <https://www.iea.org/news/cement-technology-roadmap-plots-path-to-cutting-co2-emissions-24-by-2050>

Albert, L. (2008). *Curso básico de toxicología ambiental*. Organización Mundial de la Salud / Limusa.

Ali, M. B., Saidur, A. y Hossain, M. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252-2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>

Andrew, R. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Sciences Data*, 10(4), 195-217. <https://doi.org/10.5194/essd-2018-90>

Appadurai, A. (s/f). *Proceso de fabricación de cemento: Problemas ambientales*. <https://www.ennomotive.com/cement-manufacturing-emissions>

Aristizábal-Alzate, C. E. y González-Manosalva, J. (2021). Revisión de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3), 91-110. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021006>

Borowski, P. F. y Karlikowska, B. (2023). Clean hydrogen is a challenge for enterprises in

- the era of low-emission and zero-emission economy. *Energies*, 16(3), 1-15. <https://doi.org/10.3390/en16031171>
- Bosoaga, A., Masek, O y Oakey, J. (2009). CO₂ capture technologies for cement industry. *Energy Procedia*, 1(1), 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.020>
- Cámara Nacional de Cemento (Canacem). (2023a). *Hoja de ruta México: Industria del cemento: Hacia una economía baja en carbono*. Federación Interamericana del Cemento. <https://canacem.org.mx/site/wp-content/uploads/2023/03/Hoja-de-Ruta-Mexico-FICEM.pdf>
- Cámara Nacional de Cemento (Canacem). (2023b). *Hoja de ruta México: Industria del cemento: Hacia una economía baja en carbono* [folleto hoja de divulgación]. Federación Interamericana del Cemento. <https://canacem.org.mx/site/wp-content/uploads/2023/03/Folleto-Hoja-de-Ruta-CANACEM.pdf>
- Carrasco, B. y Tadeo, J. (2014-2015). Incineración de residuos en cementeras. *Entre Textos*, 6(18), 1-11. <https://revistasacademicas.iberoleon.mx/index.php/entretextos/article/view/448/378>
- Carro Suárez, A. (2022, septiembre). La industria cementera en la descarbonización. *Dinamo Técnica: Revista Gallega de Energía*, (28), 31-32. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8661280>
- Cavalett, O., Watanabe, M. D. B., Feiger, K., Hoenig, V. y Cherubini, F. (2022). LCA and negative emission potential of retrofitted cement plants under oxyfuel conditions at high biogenic fuel shares. *Scientific Report*, 12, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13064-w>
- Díaz, A. (2012). *La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica* [Tesis]. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala. https://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf
- Díez Urquiza, I. (2019, febrero). *Modificación del diseño de explotación del frente 2C, en la Concesión de Explotación "Larrako" No 12.675, en los municipios de Arrigorriaga y Bilbao (Bizkaia): Estudio de impacto ambiental* [Documento de síntesis]. Cementos Rezola y Heidelberg Cement Group. https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/modi_frente_2c_larrako_12675/es_def/adjuntos/Documento_sintesis.pdf
- El-Sayed, A., Fahein, A., Salman, A. y Saleh, H. (2020). Introductory chapter: Cement industry. En H. El-Din, M. Saleh y R. O. A. Rahman (Eds.), *Cement based materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73784>
- European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) y European Environmental Agency (EEA). (2016). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016: Technical guidance to prepare national emission inventories* (EEA Report, 21/2016). <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- Fennell, P. S., Davis, S. J. y Mohammed, A. (2021). Descarbonizing cement production. *Joule*, 5, 1301-1311. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.011>
- Flores Romero, Á. E. (2003). *La variable ambiental en la trayectoria tecnológica de la industria cementera* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco, México. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/795>
- Grimmeissen, L., Jensen, A. y Wehner, S. (2020, julio). *Hoja de ruta para el desarrollo de*

- bajas emisiones en la industria chilena del cemento*. Ministerio de Energía del Gobierno de Chile / Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) / Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania / Fundación Bariloche / Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) / Banco Interamericano de Desarrollo (BID). https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/09/TNA-Cemento_2020-07-20_Informe-FINAL.pdf
- Ige, O. E., Von Kallon, D. V. y Desai, D. (2024). Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, 579-597. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2024). *Análisis de los sectores productivos con mayor emisión de gases y compuestos de efecto invernadero*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/921220/03_2024_EmissionesPorSectoresEcon_micos_290524.pdf
- Kunak. (2022, 21 de febrero). *Impacto ambiental de la industria cementera: Desafíos y soluciones tecnológicas*. <https://kunakair.com/es/impacto-ambiental-industria-cementera/>
- Marmier, A. (2023). *Decarbonisation options for the cement industry*. Unión Europea. <https://doi.org/10.2760/174037>
- Martínez Rodríguez, M. C., Campos Villegas, L. E. y Castillo Monroy, J. (2021). Metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero: Descripción del proyecto de control en una industria productora de cemento. *Tecnología en Marcha*, 34(3), 177-189. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5313>
- Mendoza Castro, M. L. y Urbina Garrido, I. I. (2017). Diagnóstico geológico minero ambiental de las canteras de caliza en el departamento del Cesar. *Revista Agunkuyâa*, 2, 25-41. <https://revia.areandina.edu.co/index.php/Cc/article/view/1219/1095>
- Nájera, G. (2002). *Desarrollo integral de una organización: El caso de la industria del cemento* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. <http://eprints.uanl.mx/5224/1/1020148241.pdf>
- Pérez Uribe, R. y Bejarano, A. (2008, enero-abril). Sistema de gestión ambiental: Serie ISO 14000. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (62), 89-105. <https://www.redalyc.org/pdf/206/20611457007.pdf>
- Planelles, M. (2025, 4 de marzo). 20 empresas emiten ellas solas más del 40% de todo el CO₂ que expulsa el sector fósil mundial. *El País*. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2025-03-05/20-empresas-emiten-ellas-solas-mas-del-40-de-todo-el-co-que-expulsa-el-sector-fosil-mundial.html>
- Revuelta Muñoz, M. E. (2022, mayo). *Análisis de ciclo de vida de nuevo material cementante realizando reemplazos parciales con dos tipos de residuos agroindustriales puzolánicos* [Tesis de magister en Ingeniería Civil]. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Norte, Colombia. <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10833/1045704387.pdf>
- Romo Murillo, D., Romero Hernández, O. y Samaniego, R. (2005). *Industria y medio am-*

- biente en México. *Hacia un nuevo paradigma para el control de la contaminación*. Instituto Tecnológico Autónomo de México. Miguel Ángel Porrúa.
- Ruiz Lorenzo, M. L. (2007). *Determinación y evaluación de las emisiones de dioxinas y furanos en la producción de cemento en España* [Tesis de doctorado]. Universidad Complutense de Madrid, España. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/56371>
- Salomón, A. (2006). La industria del cemento en México. *Comercio Exterior*, 56(9), 812-824. http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/93/6/Horiz_CEMENTO.pdf
- Sanjuán Barbudo, M. Á. y Chinchón Yepes, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014_Sanjuan_Chinchon_Cemento-Portland.pdf
- Secretaría de Economía (SE). (2013). *Estudio de la cadena productiva de los materiales pétreos* (documento de análisis). Dirección General de Desarrollo Minero. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5489/cp_materiales_petreos_1013.pdf
- Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEIE). (2017). *Fabricación de cemento (proceso de descarbonatación)* [ficha técnica]. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040612-descarbonatac-fabric-cemento_tcm30-429851.pdf
- Storey Contreras, S. E. y Colina Arenas, B. E. (2016). Innovación sustentable en una industria cementera en el Estado Zulia (Venezuela). *Opción*, 32(10), 812-839. <https://www.redalyc.org/pdf/310/31048901045.pdf>
- Vásquez, B. y Corrales, S. (2017). Industria del cemento en México: Análisis de sus determinantes. *Problemas del Desarrollo*, 48(188), 113-138. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2017.01.006>
- Ventura Cortés, C. N. (2019, noviembre). *Cementeras: La falsedad del desarrollo territorial, reducción de bienes ambientales y la violencia de los derechos fundamentales de las mujeres*. Fundación Heinrich Böll Stiftung. https://sv.boell.org/sites/default/files/2020-05/Documentos_cemento_El_Salvador%20-%20EDITADORD11MA-YO%20IJH.pdf
- Vera Martínez, P. S. (2013). *La industria del cemento entre la sustentabilidad y la inestabilidad financiera: Cemex, Holcim y Lafarge* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000705167/3/0705167.pdf>
- Vera Martínez, P. S. (2017). Cadena de valor de la industria del cemento en México. En P. S. Vera Martínez (Coord.), *Cadenas de valor y sostenibilidad en Latinoamérica* (pp. 175-205). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/2652>