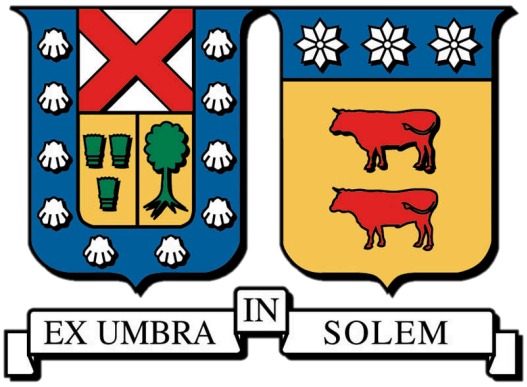
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL



CEMENTO LC^3 E HIDRÓGENO VERDE EN LA INDUSTRIA CEMENTERA CHILENA: ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO BAJO EL ARTÍCULO 6.2 DEL ACUERDO DE PARÍS

FERNANDO ALONSO PÉREZ ÁLVAREZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO/A CIVIL QUÍMICO/A

Guía: Dr. Ivan Cornejo García
Co-referentes: M.Sc. Isabella Boese Cortés

Este trabajo forma parte del Programa Internacional para el Impulso de Hidrógeno (H2Uppp), del Portafolio de Energía Chile de GIZ GmbH

Agosto-2026

Resumen

Esta investigación evaluó técnica, ambiental y económicamente la implementación de cemento de arcilla calcinada y caliza (LC^3) y de hidrógeno verde (H_2V) como alternativas para descarbonizar la industria cementera chilena, considerando el aporte potencial de los Resultados de Mitigación Transferidos Internacionalmente (ITMOs) bajo el Artículo 6.2 del Acuerdo de París. Para una producción referencial de 204 kt/año de cemento, se compararon cuatro escenarios: cemento Portland ordinario con petcoke (OPC-P), LC^3 con petcoke (LC^3-P), OPC con H_2V (OPC-H_2V) y LC^3 con H_2V (LC^3-H_2V). La evaluación se desarrolló mediante un estudio de caso aplicado y no experimental, basado en revisión documental, balances de masa y energía, balances estequiométricos, factores de emisión y una evaluación económica incremental respecto de OPC-P. El potencial de ITMOs se estimó para el período 2029–2038.

El análisis del mercado y la regulación mostró que las dos alternativas presentan condiciones de implementación diferentes. LC^3 cuenta con experiencias industriales internacionales y con una vía plausible de incorporación como cemento compuesto bajo la NCh 148:2021, aunque su aplicación en Chile requiere comprobar la disponibilidad y aptitud de las arcillas nacionales, validar el desempeño del producto y precisar la aceptación normativa de la formulación. Para el H_2V, el DS N.º 13 proporciona un marco general de seguridad, pero la sustitución total y continua de combustibles convencionales en hornos cementeros carece de demostración industrial representativa y mantiene incertidumbres asociadas a la estabilidad térmica, las emisiones de NO_x, la seguridad operacional y la calidad del clínker. En consecuencia, ambas alternativas presentan potencial, pero no un nivel equivalente de madurez para su implementación nacional.

La evaluación técnica y ambiental confirmó que la reducción del factor clínker constituye la medida más efectiva para disminuir simultáneamente las emisiones de proceso y parte de la demanda energética. Descontadas las fugas por transporte, LC^3-P, OPC-H_2V y LC^3-H_2V alcanzaron mitigaciones netas de 38,3%, 35,9% y 63,8%, respectivamente, equivalentes a potenciales anuales de 64.041, 60.009 y 106.526 ITMOs. El escenario combinado obtuvo el mayor abatimiento y redujo en 29,2% la demanda de H_2V respecto de OPC-H_2V, demostrando la complementariedad técnica de

ambas medidas. Sin embargo, el mayor potencial de mitigación no implicó la mayor conveniencia económica.

Bajo los supuestos centrales de 4,50 USD/kg de H_2V y 37,18 USD/tCO_2e por ITMO, LC^3-P fue la única alternativa con un resultado económico incremental positivo, con un VAN de 6,04 MMUSD, un período simple de recuperación de 3,19 años y un precio de equilibrio del ITMO de 22,48 USD/tCO_2e. OPC-H_2V y LC^3-H_2V registraron VAN de $-176,16$ y $-118,68$ MMUSD, respectivamente. Incluso con un precio del H_2V de 1,50 USD/kg, estos escenarios requerirían precios del ITMO de 230,33 y 105,38 USD/tCO_2e para alcanzar un VAN igual a cero. Por tanto, los ITMOs resultaron determinantes para mejorar la conveniencia incremental de LC^3-P, pero insuficientes para compensar el costo recurrente de la sustitución total por H_2V.

En respuesta al objetivo general, se concluyó que LC^3-P constituye la alternativa de implementación más favorable bajo las condiciones evaluadas, debido a que combina madurez industrial, reducción relevante de emisiones y conveniencia económica incremental. El escenario combinado representa la mayor capacidad técnica de mitigación, pero su desempeño económico está limitado por el precio del H_2V. En consecuencia, el H_2V presenta un papel potencialmente complementario para reducir emisiones térmicas residuales, condicionado a su validación industrial y a menores costos de suministro. Los ITMOs pueden acelerar alternativas maduras y cercanas al equilibrio, pero no transformar por sí solos una estructura de costos desfavorable. Tanto los volúmenes de ITMOs como los resultados económicos corresponden a estimaciones preliminares y no representan transferencias aseguradas ni demuestran la bancabilidad de una planta específica.

Abstract

This study assessed limestone calcined clay cement (LC^3) and green hydrogen (H_2V) as technical, environmental, and economic decarbonisation alternatives for the Chilean cement industry, including the potential contribution of Internationally Transferred Mitigation Outcomes (ITMOs) under Article 6.2 of the Paris Agreement. Four scenarios were compared for a reference cement output of 204 kt/year: ordinary Portland cement with petcoke (OPC-P), LC^3 with petcoke (LC^3-P), OPC with H_2V (OPC-H_2V), and LC^3 with H_2V (LC^3-H_2V). The applied, non-experimental case study combined documentary review, mass and energy balances, stoichiometric calculations, emission factors, and an incremental economic assessment relative to OPC-P. Potential ITMO volumes were estimated for 2029–2038.

The market and regulatory analysis showed that the two alternatives face different implementation conditions. LC^3 has international industrial experience and a plausible pathway for introduction as a composite cement under NCh 148:2021. Nevertheless, implementation in Chile requires confirmation of the availability and suitability of domestic clays, validation of product performance, and clarification of the regulatory acceptance of the formulation. For H_2V, Supreme Decree No. 13 provides a general safety framework, but full and continuous fuel substitution in cement kilns lacks representative industrial demonstration and remains subject to uncertainties regarding thermal stability, NO_x emissions, operational safety, and clinker quality. The alternatives therefore present potential, but not an equivalent level of readiness for implementation in Chile.

The technical and environmental assessment confirmed that reducing the clinker factor is the most effective measure for simultaneously decreasing process emissions and part of the energy requirement. After transport leakage was deducted, LC^3-P, OPC-H_2V, and LC^3-H_2V achieved net emission reductions of 38.3%, 35.9%, and 63.8%, respectively, corresponding to annual technical potentials of 64,041, 60,009, and 106,526 ITMOs. The combined scenario achieved the largest reduction and lowered H_2V demand by 29.2% relative to OPC-H_2V, demonstrating the technical complementarity of the two measures. However, the highest mitigation potential did not result in the strongest economic performance.

Under the central assumptions of 4.50 USD/kg for H_2V and 37.18 USD/tCO_2e for ITMOs, LC^3-P was the only alternative with a positive incremental economic outcome. It achieved an NPV of USD 6.04 million, a simple payback period of 3.19 years, and an ITMO break-even price of 22.48 USD/tCO_2e. OPC-H_2V and LC^3-H_2V yielded NPVs of USD −176.16 million and USD −118.68 million, respectively. Even at an H_2V price of 1.50 USD/kg, these scenarios would require ITMO prices of 230.33 and 105.38 USD/tCO_2e to reach a zero NPV. ITMO revenues were therefore decisive in improving the incremental performance of LC^3-P but were insufficient to offset the recurring cost of full H_2V substitution.

In response to the overall research objective, LC^3-P was identified as the most favourable implementation alternative under the assessed conditions because it combined industrial maturity, substantial emission reductions, and positive incremental economic performance. The combined scenario provided the greatest technical mitigation potential, but its economic performance was constrained by the cost of H_2V. Green hydrogen may therefore play a complementary role in addressing residual thermal emissions, subject to industrial validation and lower supply costs. ITMOs can accelerate mature alternatives that are close to break-even, but cannot independently transform an unfavourable cost structure. The estimated ITMO volumes and economic outcomes are preliminary and represent neither guaranteed transfers nor evidence of project-level bankability.

Agradecimientos

A mi mamá, a mis hermanas y a mi pareja, por estar siempre ahí para mí, de manera incondicional, acompañándome con amor, paciencia y confianza en cada etapa de este camino. A mis amigos y amigas, por transformar este viaje en una aventura inolvidable, llena de historias, risas y momentos dignos de contar. Y a mi padre, mi fiel confidente y pilar; sin él, nada de esto habría sido posible.

Gracias infinitas a todos quienes fueron parte de este proceso, y un abrazo eterno al cielo.

Tabla de Contenidos

1 Introducción **1**

1.1 Industria Cementera y Desafío de Descarbonización 1

2 Objetivos y Alcances **6**

2.1 Objetivo General 6

2.2 Objetivos Específicos 6

2.3 Alcances y limitaciones del estudio 6

3 Antecedentes **9**

3.1 Cambio Climático y el Acuerdo de París 9

3.2 Financiamiento climático y mercados de carbono en proyectos de mitigación 12

3.3 Industria Cementera Global 13

3.4 Panorama de la industria cementera en Chile 15

3.5 Principales fuentes de emisiones en la producción de cemento 16

3.6 Descarbonización de la industria cementera 18

3.6.1 Coprocesamiento 19

3.6.2 Reducción del factor clínker 19

3.6.3 Sustitución de combustibles fósiles 20

3.6.4 Reducción del contenido de cemento en el hormigón 20

3.6.5 Eficiencia energética térmica 20

3.6.6 Eficiencia energética eléctrica 20

3.6.7 Sustitución de combustibles fósiles como medida complementaria 21

3.6.8 Tecnologías emergentes y complementarias 21

3.7 Cemento LC^3: fundamentos, desarrollo y experiencias previas 21

3.7.1 Ventajas y desventajas ambientales y de proceso 23

3.7.2 Experiencias internacionales de producción y aplicación 24

3.8 Hidrógeno verde: desarrollo, aplicaciones industriales y experiencias previas 25

3.8.1 Definición y rutas de producción 25

3.8.2 Aplicaciones industriales del H_2V . . . 27
3.8.3 Industria del hidrógeno verde en Chile . . . 29

4 Marco Teórico **32**
4.1 Definición y clasificación del cemento . . . 32
4.1.1 Adiciones minerales empleadas en cementos . . . 33
4.2 Proceso de producción del cemento Portland . . . 35
4.2.1 Extracción y preparación de materias primas . . . 35
4.2.2 Molienda y homogeneización . . . 36
4.2.3 Calcinación y clinkerización . . . 37
4.2.4 Enfriamiento del clínker . . . 39
4.2.5 Molienda final y adición de yeso . . . 39
4.2.6 Almacenamiento y expedición . . . 40
4.2.7 Consumo energético del proceso cementero . . . 40
4.3 Cemento de Caliza y Arcilla Calcinada (LC^3) . . . 43
4.3.1 Composición típica y variantes de formulación . . . 45
4.3.2 Producción de arcilla calcinada . . . 46
4.4 Hidrógeno verde como combustible para procesos térmicos cementeros . . . 50
4.4.1 Rol del hidrógeno verde en la descarbonización térmica industrial . . . 50
4.4.2 Tecnologías para la implementación de hidrógeno en procesos cementeros . . . 53
4.4.3 Requerimientos de almacenamiento, suministro y adaptación en planta . . . 56
4.5 Mercados de carbono . . . 58
4.5.1 Concepto de ITMO y cooperación internacional bajo el artículo 6.2 . . . 58
4.5.2 Metodologías sectoriales de referencia para la industria cementera . . . 61
4.5.3 Ajustes correspondientes, doble conteo e integridad ambiental . . . 62
4.5.4 Transparencia, trazabilidad y autorización de transferencias . . . 63
4.5.5 Decisión 2/CMA.3: guía sobre enfoques cooperativos . . . 63
4.5.6 Decisión 6/CMA.4: materias operativas relativas al artículo 6.2 . . . 64
4.5.7 Requisitos de reporte, seguimiento y revisión técnica . . . 64

5 Metodología **65**
5.1 Enfoque y diseño de la investigación . . . 65
5.2 Metodología para el diagnóstico de mercado y regulación . . . 66
5.3 Definición de límites del sistema . . . 66
5.4 Metodología de evaluación técnica . . . 67
5.5 Base de cálculo . . . 69
5.6 Construcción de escenarios de análisis . . . 70

5.6.1 Composición de la materia prima para la producción de clínker 72
5.6.2 Perfil térmico simplificado del proceso de clinkerización 74
5.6.3 Propiedades energéticas y consumo de combustibles 76
5.6.4 Consumo eléctrico 77
5.7 Metodología de cuantificación de emisiones 78
5.7.1 Emisiones operacionales por escenario 78
5.7.2 Línea base y escenarios de proyecto 80
5.7.3 Fugas por transporte de adiciones 80
5.7.4 Reducción de emisiones 81
5.8 Metodología para la estimación de ITMOs 82
5.9 Metodología de prefactibilidad económica 83

6 Resultados y Análisis **90**
6.1 Estructura de Mercado 90
6.1.1 Modelo Productivo y Tipología de Cementos 91
6.1.2 Tipologías y Características de los Cementos en Chile 91
6.2 Análisis de los Actores Clave en la Industria del Cemento en Chile 93
6.2.1 Sector Privado 94
6.2.2 Sector Público 97
6.2.3 Sector Académico 101
6.2.4 Actores Internacionales 102
6.3 Principales Desafíos Estratégicos del Mercado 103
6.4 Marco regulatorio chileno relevante para cementos y H_2V 104
6.4.1 Factibilidad normativa del LC^3 para el mercado chileno 104
6.4.2 Análisis de la normativa de seguridad aplicable al H_2V 106
6.5 Marco climático chileno e implicancias para la adicionalidad de los escenarios evaluados 107
6.6 Resultados de prefactibilidad técnica 110
6.6.1 Balance final de materiales 110
6.6.2 Demanda energética y consumo de combustibles 111
6.6.3 Análisis y discusión técnica 112
6.7 Resultados ambientales y potencial de generación de ITMOs 113
6.7.1 Emisiones de GEI por escenario 114
6.7.2 Potencial de generación de ITMOs 115
6.7.3 Análisis y discusión ambiental 115
6.8 Resultados de prefactibilidad económica 117
6.8.1 Resultados económicos bajo supuestos base 117

6.8.2 Sensibilidades económicaS . . . 119
6.8.3 Análisis y discusión económica . . . 121
6.8.4 Matriz de apoyo a la decisión tecnológica . . . 123

7 Conclusiones y recomendaciones 125

Referencias 128

A Memoria de cálculo del proceso de clinkerización 142
A.1 Alcance y base de cálculo . . . 142
A.2 Representación general del proceso modelado . . . 143
A.3 Acondicionamiento de la harina cruda . . . 144
A.4 Balance estequiométrico y formación de las fases del clínker . . . 145
A.5 Balance térmico del precalentamiento y la clinkerización . . . 146
A.6 Consumo equivalente de combustible . . . 147
A.7 Anualización y comprobación del balance . . . 148

B Memoria de cálculo de la calcinación de arcilla y de los escenarios LC³ 149
B.1 Composición de la arcilla cruda y reacciones consideradas . . . 150
B.2 Balance de masa y rendimiento de calcinación . . . 150
B.3 Demanda térmica de la producción de arcilla calcinada . . . 152
B.4 Integración con la demanda térmica del clínker . . . 152
B.5 Consumo equivalente de petcoke y H_2V . . . 153
B.6 Anualización y comprobación del balance . . . 153

C Cálculo de emisiones, reducciones e ITMOs 155
C.1 Emisiones operacionales por escenario . . . 155
C.2 Línea base y emisiones de proyecto . . . 156
C.3 Fugas por transporte de adiciones . . . 156
C.4 Reducciones brutas y netas . . . 157
C.5 Potencial anual, específico y acumulado de ITMOs . . . 157
C.6 Calendarización referencial por vintage y año de entrega . . . 158

D Memoria de cálculo de la prefactibilidad económica 159
D.1 Supuestos económicos y componentes incluidos . . . 159
D.2 Costos operacionales variables . . . 160
D.3 CAPEX incremental de la unidad de calcinación de arcilla . . . 161
D.4 Dimensionamiento del almacenamiento y CAPEX de H_2V . . . 162

D.5 OPEX fijo y costo anual equivalente . . . 164
D.6 Ingresos potenciales por ITMOs y flujos incrementales . . . 165
D.7 VAN incremental y período simple de recuperación . . . 166
D.8 Costo de abatimiento y precios de equilibrio . . . 166
D.9 Análisis de sensibilidad y fronteras de VAN igual a cero . . . 167
D.9.1 Precio del ITMO . . . 167
D.9.2 Precio de suministro del H_2V . . . 168
D.9.3 Costo unitario del almacenamiento de H_2V . . . 168
D.9.4 CAPEX de referencia del calcinador . . . 168
D.9.5 Mantenimiento y reparaciones . . . 169
D.9.6 Frontera simultánea entre el precio del H_2V y del ITMO . . . 169

Lista de Tablas

3.1 Resumen de proyectos de hidrógeno verde ingresados al SEA a junio de 2026 [49]. . 30

4.1 Composición química referencial de la harina cruda de cemento (% en masa) [60]. . 37
4.2 Composición mineralógica del clínker (% en masa) [7]. 38
4.3 Consumo térmico específico según tecnología de fabricación de clínker [62]. 41
4.4 Consumo eléctrico específico por etapa para procesos secos y húmedos de producción de cemento [62]. 42
4.5 Formulaciones representativas de cementos LC^3 en porcentaje másico [27, 68]. . . . 45
4.6 Parámetros térmicos comparativos de la producción de clínker Portland y metacaolinita [68]. 47
4.7 Emisiones específicas reportadas para cementos OPC y LC^3 [68]. 48
4.8 Comparación técnico-económica de alternativas para la producción de LC^3 [69]. . . 50
4.9 Propiedades relevantes del hidrógeno como combustible industrial [72]. 52
4.10 Comparación referencial de combustibles para aporte térmico en procesos cementeros [70, 74, 75]. 53
4.11 Configuraciones tecnológicas para la producción de clínker evaluadas mediante simulación por Williams et al. [71]. 54
4.12 Principales parámetros técnicos modelados para el escenario H2-d de Williams et al. [71]. 56

5.1 Parámetros productivos utilizados como base de cálculo. 70
5.2 Definición de los escenarios de análisis. 71
5.3 Composición de la harina cruda adoptada para la producción de clínker [60]. 72
5.4 Perfil térmico simplificado adoptado para el precalentamiento y la clinkerización. . . 74
5.5 Poderes caloríficos inferiores utilizados en la modelación [82, 83]. 76
5.6 Factores de emisión utilizados en la cuantificación [82, 83, 84]. 78
5.7 Supuestos principales de la evaluación de prefactibilidad económica 84

6.1 Plantas cementeras en Chile, capacidad instalada, modelo productivo y fuente de abastecimiento de clínker. . . . 96
6.2 Clasificación de los cementos según su composición . . . 105
6.3 Cumplimiento preliminar de formulaciones LC^3-50 frente a los requisitos chilenos de fraguado y resistencia. . . . 106
6.4 Balance anual de materiales para las formulaciones OPC y LC^3. . . . 110
6.5 Emisiones anuales e intensidad de carbono de los escenarios evaluados. . . . 114
6.6 Mitigación neta y potencial de ITMOs de los escenarios evaluados. . . . 115
6.7 Indicadores económicos y financieros bajo los supuestos base. . . . 118

A.1 Base de cálculo de los escenarios OPC. . . . 143
A.2 Balance de masa del acondicionamiento de la harina cruda. . . . 144
A.3 Balance estequiométrico y térmico de las reacciones de clinkerización. . . . 145
A.4 Distribución calculada de las fases del clínker. . . . 146
A.5 Calores específicos utilizados en la modelación térmica del clínker. . . . 146
A.6 Desagregación del requerimiento térmico de la producción de clínker. . . . 147
A.7 Comprobación anual del modelo de clinkerización. . . . 148

B.1 Componentes del cemento en los escenarios LC^3. . . . 149
B.2 Composición efectiva de la alimentación de arcilla cruda. . . . 150
B.3 Composición calculada de la arcilla calcinada. . . . 151
B.4 Balance térmico de los escenarios LC^3. . . . 152
B.5 Comprobación anual de los escenarios LC^3. . . . 153

C.1 Emisiones operacionales anuales de los escenarios evaluados. . . . 155
C.2 Reducciones brutas, fugas y reducciones netas anuales. . . . 157
C.3 Potencial anual, específico y acumulado de ITMOs. . . . 158
C.4 Calendarización referencial del potencial de ITMOs por vintage y fecha de entrega. . . . 158

D.1 Supuestos centrales de la evaluación económica incremental. . . . 160
D.2 OPEX variable de los escenarios evaluados. . . . 161
D.3 Desglose indicativo del FCI de la unidad de calcinación de arcilla. . . . 162
D.4 Dimensionamiento del almacenamiento de H_2V. . . . 163
D.5 Desglose del FCI de los sistemas de almacenamiento y acondicionamiento de H_2V. . . . 164
D.6 Desagregación del OPEX fijo de la infraestructura incremental. . . . 164
D.7 Construcción del costo anual equivalente parcial. . . . 165
D.8 Ingresos potenciales por ITMOs y flujos incrementales del caso central. . . . 165
D.9 VAN incremental y período simple de recuperación. . . . 166

D.10 Costo incremental, costo de abatimiento y precio de equilibrio del ITMO. 167
D.11 Sensibilidad del VAN incremental al precio del ITMO. 167
D.12 Sensibilidad económica al precio de suministro del H_2V. 168
D.13 Sensibilidad al costo unitario del almacenamiento de H_2V. 168
D.14 Sensibilidad al CAPEX de referencia del calcinador. 169
D.15 Sensibilidad del OPEX fijo a la tasa de mantenimiento. 169
D.16 Combinaciones de precios que producen un VAN incremental igual a cero. 170

Lista de Figuras

1.1 Etapas del proceso productivo del cemento y distribución de emisiones 2
1.2 Emisiones de CO_2 por tonelada de cemento, 2014 [8] 3

3.1 (a) Aumento de las emisiones de CO2 1995-2024 [12]; (b) Variación de la temperatura media anual del aire en superficie a escala mundiaL 1880 - 2024[13]. 10
3.2 Evolución del consumo mundial de cemento, expresado en millones de toneladas [18]. 14
3.3 Participación por regiones de la producción de Cemento [18]. 15
3.4 Despachos de cemento y hormigón por empresa [21]. 16
3.5 Emisiones de CO_2 en kton atribuidas al cemento por sector, 2022 [23]. 18
3.6 Esquema composición LC^3-50 [4]. 22
3.7 Razones para la adopción de LC^3 [4]. 23
3.8 Cadena de valor del hidrógeno 28
3.9 Mapa de proyectos de hidrógeno verde en Chile [48]. 29
3.10 Comparación del costo nivelado proyectado del hidrógeno verde en Chile y costos de referencia del hidrógeno gris [52]. 31

4.1 Sistema de precalentamiento, precalcinación y horno rotatorio para la producción de clínker [61]. 39
4.2 Diagrama del proceso de producción de cemento portland ordinario (Elaboración propia) 40
4.3 Demanda energética y emisiones de CO_2 por etapa del proceso de producción de cemento Portland ordinario [5]. 42
4.4 Consumo energético para OPC, Cemento Portland Puzolánico (PPC) y formulaciones LC^3 con distintos factores de clínker [68]. 47
4.5 Esquemas de producción de OPC, cemento Portland puzolánico y LC^3 [28]. 49
4.6 Comparación de las emisiones de CO_2 y los costos de producción de OPC y LC^3, considerando la implementación de las mejores tecnologías disponibles en ambos casos [28]. 50

4.7 Comparación de la densidad energética gravimétrica y volumétrica del hidrógeno almacenado en distintas condiciones y de combustibles convencionales [73]. 52
4.8 Diagrama conceptual del escenario H2-d, basado en la sustitución completa del gas natural por hidrógeno y la combustión con oxígeno [71]. 55
4.9 Esquema Mercado de Carbono [11]. 60
4.10 Esquema Mercado de Carbono [77]. 61
4.11 Ilustración del ajuste correspondiente realizado al país transferIdor y al país adquirente [11] 63

6.1 (a) Modelo de planta integrado; (b) modelo de planta de molienda [54]. 91
6.2 (a) Importaciones de clínker en Chile 2008-2019; (b) Importaciones de cemento en Chile 2008-2019 [54]. 93
6.3 Mapa de actores relevante para la inserción de nuevas tecnologías en la industria cementera. 103
6.4 Consumo energético anual por fuente en los escenarios evaluados. 111
6.5 Emisiones anuales de GEI por componente y escenario. 114
6.6 Composición del costo anual equivalente de los escenarios evaluados. 117
6.7 Sensibilidad del VAN incremental al precio del ITMO. 119
6.8 Sensibilidad del VAN incremental al precio de compra del H_2V. 120
6.9 Fronteras de equilibrio del VAN incremental en función de los precios del H_2V y del ITMO. 121
6.10 Matriz de resultados cuantitativos. 123
6.11 Matriz de condiciones de implementación e incertidumbres de los escenarios de descarbonización. 124

A.1 Estructura de cálculo utilizada para el acondicionamiento de la harina cruda destinada a la producción de clínker. 143
A.2 Estructura de cálculo de los balances de descarbonatación y formación de las fases del clínker. 144

B.1 Estructura de cálculo de las reacciones y los flujos másicos y molares considerados en la calcinación de arcilla. 151

Nomenclatura

Las variantes de un mismo símbolo se agrupan en una sola entrada. Los subíndices e índices se definen después de las variables, mientras que las abreviaturas propias de la química del cemento se presentan en una tabla independiente.

Símbolo	**Significado, unidades**
a_s	Ordenada al origen de la frontera de equilibrio entre los precios del H_2V y del ITMO para el escenario s, USD/tCO_2e
b_s	Pendiente de la frontera de equilibrio del escenario s, kg H_2/tCO_2e
BE_y	Emisiones de la línea base durante el año y, tCO_2e/año
$C_{\text{anual},s}$	Costo anual equivalente parcial del escenario s, MMUSD/año
$C_{\text{electricidad}}$	Costo anual de la electricidad común a los escenarios, MMUSD/año
$C_{\text{H}_2,s}$	Costo anual de compra de H_2V en el escenario s, USD/año o MMUSD/año
CE_{el}	Consumo eléctrico específico del proceso cementero, kWh/t de cemento
$CE_{\text{th,arcilla}}$	Consumo térmico específico de la producción de arcilla calcinada, GJ/t de arcilla calcinada
$CE_{\text{th,clinker}}$	Consumo térmico específico calculado para la producción de clínker, GJ/t de clínker
$C_{p,i}$, $C_{p,j}$	Calor específico del componente i o de la fase de clínker j, kJ/(t·°C)
$C_{p,\text{mezcla}}$	Calor específico medio de la harina seca, kJ/(t·°C)
c_{tanq}	Costo unitario de compra de los recipientes de almacenamiento de H_2V, USD/kg H_2 de capacidad nominal
D_{add}	Distancia total de transporte de ida y vuelta de las adiciones adicionales, km
E_{comb}, $E_{\text{comb},j}$, $E_{\text{comb},s,y}$	Emisiones directas por combustión: kg CO_2/t de cemento en la relación específica o tCO_2/año en la cuantificación anual
$E_{\text{el},s}$, $E_{\text{el},s,y}$	Consumo eléctrico anual del escenario s, MWh/año

Símbolo	Significado, unidades
E_{elec}, $E_{\text{elec},s,y}$	Emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico: kg CO_2/t de cemento en la relación específica o tCO_2e/año en la cuantificación anual
$E_{\text{op},s,y}$	Emisiones operacionales totales del escenario s durante el año y, tCO_2e/año
E_{proc}, $E_{\text{proc},s,y}$	Emisiones de proceso: kg CO_2/t de cemento en la relación específica o tCO_2/año en la cuantificación anual
E_{total}, $E_{\text{total},s}$	Emisiones totales consideradas dentro del límite del sistema, kg CO_2/t de cemento o tCO_2e/año
E_{trans}	Emisiones específicas asociadas al transporte de materias primas y productos intermedios, kg CO_2/t de cemento
ER_s, ER_y	Reducción anual de emisiones del escenario s o del año y respecto de la línea base, tCO_2e/año
$ER_{\text{bruta},s,y}$	Reducción bruta anual de emisiones del escenario s, tCO_2e/año
$ER_{\text{neta},s,y}$	Reducción neta anual de emisiones del escenario s, después de descontar las fugas, tCO_2e/año
$FC_{s,t}$	Flujo incremental del escenario s durante el período t, MMUSD/año
$\text{FCI}_{\text{H}_2,s}$	Inversión fija instalada del sistema de almacenamiento y acondicionamiento de H_2V del escenario s, MMUSD
FCI_{ref}	CAPEX reportado para el calcinador *retrofit* de referencia y adoptado como aproximación de la inversión fija instalada, MMUSD
FCI_{ref}	Inversión fija instalada de referencia utilizada para escalar el calcinador, MMUSD
FCI_s	Inversión fija instalada incremental total del escenario s, MMUSD
$FE_{\text{comb},s}$, FE_j	Factor de emisión energético del combustible utilizado, kg CO_2/GJ
FE_{red}	Factor de emisión de la red eléctrica, tCO_2e/MWh
$FE_{\text{transporte}}$	Factor de emisión del transporte de carga, tCO_2/(t·km)
$FFCI$	Multiplicador de costo de equipo comprado a inversión fija instalada, adimensional
f_{cl}	Factor clínker del cemento, t de clínker/t de cemento
f_{escala}	Fracción de la producción efectiva representada por la escala del modelo, adimensional

Símbolo	Significado, unidades
f_{gg}	Fracción de gastos generales respecto del costo de mantenimiento, adimensional
f_{mant}	Fracción anual de mantenimiento y reparaciones respecto de la FCI, año^{-1}
$f_{\text{OPEX fijo}}$	Tasa agregada del OPEX fijo respecto de la FCI, año^{-1}
f_{seg}	Fracción anual de seguros e impuestos respecto de la FCI, año^{-1}
f_{sum}	Fracción de suministros de operación respecto del costo de mantenimiento, adimensional
f_{util}	Factor de utilización de la capacidad instalada en la base productiva; en el dimensionamiento del almacenamiento, fracción útil de la capacidad nominal, adimensional
FPA	Factor presente de una anualidad constante, adimensional
FRC	Factor de recuperación de capital, adimensional
H_{op}	Tiempo anual de operación, h/año
i	Tasa de descuento anual, adimensional
$I_{\text{ITMO},s,y}$	Ingreso potencial del escenario s por ITMOs durante el año y, MMUSD/año
$ITMO^{\text{pot}}_{s,y}$	Volumen potencial de mitigación transferible del escenario s durante el año y, ITMO/año o tCO_2e/año
$ITMO^{\text{pot}}_{\text{acum},s}$	Volumen potencial acumulado de mitigación transferible del escenario s, ITMO o tCO_2e
LE_y, $LE_{s,y}$	Emisiones por fugas durante el año y, tCO_2e/año
$M_{\text{ADD},s,y}$; Q_{ADD}	Masa anual de adiciones adicionales transportadas en el escenario s; Q_{ADD} corresponde a la notación usada en la sustitución numérica del Apéndice C, t/año
$M_{\text{alm},s}$; M_{nominal}	Capacidad nominal de almacenamiento de H_2V del escenario s, kg H_2
M_{CO_2}	Masa molar del CO_2, tCO_2/t-mol
$M_{H_2,s}$	Consumo anual de H_2V del escenario s, kg H_2/año
M_i	Masa molar del componente i, t/t-mol
$M_{\text{pet},s}$	Consumo anual de petcoke del escenario s, t/año
$M_{\text{útil}}$	Masa útil de H_2V requerida para la autonomía de almacenamiento adoptada, kg H_2
$\dot{m}_{\text{arcilla,calcinada},s}$	Flujo másico de arcilla calcinada requerido en el escenario s, t/h

Símbolo	Significado, unidades
$\dot{m}_{\text{cemento}}$	Flujo másico común de cemento, t/h
$\dot{m}_{\text{comb},s}$	Flujo másico de combustible requerido en el escenario s, t/h
$\dot{m}_{\text{H}_2,s}$	Consumo horario de H_2V del escenario s, kg H_2/h
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,elim}}$	Flujo másico de agua libre eliminado durante el acondicionamiento de la harina, t/h
$\dot{m}_{\text{harina,húmeda}}$	Flujo másico total de harina cruda antes del acondicionamiento, t/h
$\dot{m}_{\text{harina,seca}}$	Flujo másico de harina seca enviado al sistema térmico, t/h
$\dot{m}_{i,\text{húmeda}}$	Flujo másico del componente i en la harina húmeda, t/h
$\dot{m}_{i,\text{seca}}$	Flujo másico del componente seco i después del acondicionamiento, t/h
$\dot{m}_{i,s}$	Flujo másico del componente i del cemento en el escenario s, t/h
$\dot{m}_{j,s}$	Flujo másico de la fase de clínker j en el escenario s, t/h
$\dot{m}_{\text{LC}^3}$, $\dot{m}_{\text{cl}}$, $\dot{m}_{\text{ac}}$, $\dot{m}_{\text{cal}}$, $\dot{m}_{\text{yeso}}$	Flujos másicos de cemento LC^3, clínker, arcilla calcinada, caliza y yeso, respectivamente, t/año
$\dot{m}_{\text{pérdida,sólida}}$	Flujo másico de sólidos retirado durante el acondicionamiento de la harina, t/h
$\dot{n}_{\text{CaCO}_3,s}$	Flujo molar de $CaCO_3$ descompuesto en el escenario s, t-mol/h
$\dot{n}_{i,\text{seca}}$	Flujo molar del componente seco i, t-mol/h
N	Vida económica u horizonte del flujo de caja, años
n_{LC^3}	Exponente de escalamiento costo-capacidad del calcinador, adimensional
$\text{OPEX}_{\text{fijo},s}$	Costo operacional fijo anual de la infraestructura incremental del escenario s, MMUSD/año
$\text{OPEX}_{\text{var},s}$	Costo operacional variable anual del escenario s, MMUSD/año
P_{cemento}	Producción anual de cemento considerada en el modelo, kt/año
P_{efectiva}	Producción anual efectiva estimada para la planta de referencia, kt/año
$P_{\text{instalada}}$	Capacidad anual instalada de producción de cemento, kt/año
p_{el}	Precio de la electricidad, USD/MWh
p_{H_2}; $P_{\text{H}_2\text{V}}$	Precio de suministro del H_2V; $P_{\text{H}_2\text{V}}$ corresponde a la notación usada en la frontera de equilibrio del Apéndice D, USD/kg H_2
p_{ITMO}	Precio unitario considerado para el ITMO, USD/tCO_2e
p_{pet}	Precio del petcoke, USD/t

Símbolo	Significado, unidades
$P^{*}_{\mathrm{ITMO},s}$	Precio del ITMO que produce un VAN incremental igual a cero en el escenario s, USD/tCO_2e
PB_s	Período simple de recuperación de la inversión del escenario s, años
PCI_{comb}, $PCI_{\mathrm{H_2}}$	Poder calorífico inferior del combustible utilizado o del H_2V, GJ/t o GJ/kg H_2, según la ecuación
$Q_{\mathrm{deshidrox}}$	Energía asociada a la deshidroxilación de la arcilla, kJ o GJ
Q_{evap}	Energía requerida para evaporar la humedad libre de la arcilla, kJ o GJ
$Q_{\mathrm{LC^3},s}$	Capacidad anual requerida de arcilla calcinada para el escenario s, t/año de producto calcinado
Q_{perdidas}	Pérdidas térmicas del sistema de calcinación, kJ o GJ
Q_{ref}	Capacidad anual de producción del calcinador *retrofit* de referencia, interpretada como producto calcinado, t/año
Q_{sensible}	Energía requerida para el calentamiento sensible del sólido, kJ o GJ
$Q_{\mathrm{th,H_2}}$, $Q_{\mathrm{th},j}$	Demanda térmica anual cubierta por H_2V o suministrada por el combustible j, GJ/año
$Q_{\mathrm{calcinación}}$	Requerimiento térmico total de la calcinación de arcilla, kJ o GJ
$\dot{Q}_{\mathrm{arcilla},s}$	Demanda térmica asociada a la producción de arcilla calcinada en el escenario s, GJ/h
$\dot{Q}_{\mathrm{clinker},s}$	Demanda térmica asociada a la producción de clínker en el escenario s, GJ/h
$\dot{Q}_{\mathrm{horno},s}$	Flujo de calor neto requerido en la etapa de horno del escenario s, GJ/h
$\dot{Q}_{\mathrm{pre},s}$	Flujo de calor requerido para el precalentamiento de la harina seca en el escenario s, GJ/h
$\dot{Q}_{\mathrm{th},s}$	Demanda térmica total del escenario s, GJ/h
$R_{\mathrm{H_2V}}$	Reducción relativa del consumo de H_2V del escenario combinado respecto de OPC-H_2V, adimensional
$RMCR_{\mathrm{húmeda}}$, $RMCR_{\mathrm{seca}}$	Relación másica harina cruda/clínker sobre base húmeda y seca, respectivamente, t de harina/t de clínker
T_{clinker}	Temperatura final del clínker, °C
T_{entrada}	Temperatura de entrada a la etapa de clinkerización, °C
$T_{i,k}$, $T_{f,k}$	Temperaturas inicial y final de la etapa térmica k, °C
$V_{\mathrm{H_2}}$	Volumen nominal de almacenamiento de H_2V comprimido, m^3

Símbolo	Significado, unidades
VAN_s	Valor actual neto incremental del escenario s, MMUSD
$x_{\mathrm{add},s}$, $x_{\mathrm{add,base}}$	Fracción másica de componentes distintos del clínker en el escenario s y en la línea base, respectivamente, adimensional
$x_{\mathrm{H_2O,húmeda}}$	Fracción másica de humedad libre en la alimentación de harina cruda, adimensional
$x_{i,\mathrm{húmeda}}$, $x_{i,\mathrm{seca}}$	Fracción másica del componente i en la harina húmeda o seca, adimensional
$x_{i,s}$	Fracción másica del componente i en el cemento del escenario s, adimensional
α_y	Fracción de la reducción neta asumida como potencialmente autorizable y transferible durante el año y, adimensional
ΔH_r	Entalpía de la reacción r, GJ/t-mol
ΔT	Diferencia de temperatura entre dos etapas del proceso, °C
η_{acond}	Fracción de la alimentación húmeda retenida después de la pérdida sólida del acondicionamiento, adimensional
$\eta_{\mathrm{cal,arcilla}}$	Rendimiento másico de la calcinación de arcilla, t de arcilla calcinada/t de arcilla cruda
τ_{alm}	Autonomía del almacenamiento de H_2V, h
$\dot{\xi}_{r,s}$	Avance molar de la reacción r en el escenario s, t-mol/h

Índice	Significado
i	Componente de una corriente o formulación; en la evaluación económica, el símbolo sin subíndices representa la tasa de descuento
j	Fase mineralógica del clínker o combustible, según la expresión
k	Etapa del perfil térmico simplificado
r	Reacción química modelada
s	Escenario evaluado
t	Período del flujo de caja
y	Año calendario de evaluación

Notación	Significado
C_2S	Silicato bicálcico o belita, $2CaO{\cdot}SiO_2$
C_3S	Silicato tricálcico o alita, $3CaO{\cdot}SiO_2$
C_3A	Aluminato tricálcico, $3CaO{\cdot}Al_2O_3$
C_4AF	Aluminoferrito tetracálcico, $4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$
C–S–H	Silicato cálcico hidratado
C–A–H	Aluminato cálcico hidratado
C–A–S–H	Aluminosilicato cálcico hidratado
LC^3-35	Formulación de LC^3 con un factor clínker de 0,35
LC^3-50	Formulación de LC^3 con un factor clínker de 0,50; en el estudio contiene 50% de clínker, 30% de arcilla calcinada, 15% de caliza y 5% de yeso
MK	Metacaolinita

Escenario	Significado
OPC-P	Cemento Portland ordinario con petcoke; escenario base
LC^3-P	Cemento LC^3 con petcoke
OPC-H_2V	Cemento Portland ordinario con sustitución total del petcoke por H_2V
LC^3-H_2V	Cemento LC^3 con sustitución total del petcoke por H_2V; escenario combinado

Sigla	Significado
ACM0003	Metodología consolidada del Mecanismo de Desarrollo Limpio: *Partial substitution of fossil fuels in cement or quicklime manufacture*
ACM0005	Metodología consolidada del Mecanismo de Desarrollo Limpio: *Increasing the blend in cement production*
APL	Acuerdo de Producción Limpia
Art. 6.2	Artículo 6.2 del Acuerdo de París
BIS	Oficina de Normas de la India, del inglés *Bureau of Indian Standards*
BSA	BSA Cementos; denominación histórica asociada a la Planta Quilicura
CAPEX	Inversión de capital, del inglés *Capital Expenditure*

Sigla	Significado
CARP	Plataforma Centralizada de Contabilidad y Reporte, del inglés *Centralized Accounting and Reporting Platform*
Cbb	Cementos Bío Bío S.A.
CCUS	Captura, uso y almacenamiento de carbono, del inglés *Carbon Capture, Utilization and Storage*
CDM	Mecanismo de Desarrollo Limpio, del inglés *Clean Development Mechanism*
CDT	Corporación de Desarrollo Tecnológico
CHF	Francos suizos
CMA	Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes del Acuerdo de París
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNE	Comisión Nacional de Energía
CO_2	Dióxido de carbono
CO_2e	Dióxido de carbono equivalente
COP21	Vigésima primera Conferencia de las Partes de la CMNUCC
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
COSUDE/SDC	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, del inglés *Swiss Agency for Development and Cooperation*
DS N.º 13	Decreto Supremo N.º 13, Reglamento de Seguridad de Instalaciones de Hidrógeno
ECLP	Estrategia Climática de Largo Plazo
EPFL	Escuela Politécnica Federal de Lausana, del francés *École polytechnique fédérale de Lausanne*
FCI	Inversión fija instalada, del inglés *Fixed Capital Investment*
FICEM	Federación Interamericana del Cemento
GEI	Gases de efecto invernadero
GIZ	Agencia Alemana de Cooperación Internacional, del alemán *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*
H_2V	Hidrógeno verde
IEA	Agencia Internacional de Energía, del inglés *International Energy Agency*

Sigla	Significado
ICH	Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile
IDIEM	Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales
INN	Instituto Nacional de Normalización
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, del inglés *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPPU	Procesos industriales y uso de productos, del inglés *Industrial Processes and Product Use*
IRR	Tasa interna de retorno, del inglés *Internal Rate of Return*
ITMO	Resultado de Mitigación Transferido Internacionalmente, del inglés *Internationally Transferred Mitigation Outcome*
LC^3	Cemento de caliza y arcilla calcinada, del inglés *Limestone Calcined Clay Cement*
LCC	Proyecto de Cemento Bajo en Carbono, del inglés *Low Carbon Cement Project*
LOHC	Portador orgánico líquido de hidrógeno, del inglés *Liquid Organic Hydrogen Carrier*
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo
MMUSD	Millones de dólares estadounidenses
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
MOP	Ministerio de Obras Públicas
MOPA	Acuerdo de Compraventa de Resultados de Mitigación, del inglés *Mitigation Outcome Purchase Agreement*
MRV	Monitoreo, reporte y verificación
NCh	Norma Chilena
NDC	Contribución Determinada a Nivel Nacional, del inglés *Nationally Determined Contribution*
NG	Gas natural, del inglés *Natural Gas*
NO_x	Óxidos de nitrógeno
OGUC	Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones
OPC	Cemento Portland ordinario, del inglés *Ordinary Portland Cement*
OPEX	Costo operacional, del inglés *Operational Expenditure*

Sigla	Significado
PCC	Cemento Portland compuesto, del inglés *Portland Composite Cement*
PCI	Poder calorífico inferior
PIB	Producto Interno Bruto
PPC	Cemento Portland puzolánico, del inglés *Portland Pozzolana Cement*
RCA	Resolución de Calificación Ambiental
REP	Responsabilidad Extendida del Productor
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
tCO_2	Tonelada de dióxido de carbono
tCO_2e	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
USD	Dólares estadounidenses
VAN	Valor actual neto

Capítulo 1

Introducción

1.1 Industria Cementera y Desafío de Descarbonización

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales, económicos y tecnológicos del siglo XXI. La evidencia científica ha mostrado que el aumento de la temperatura media global está directamente relacionado con el incremento antropogénico en las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), lo que ha motivado una creciente presión internacional por reducir emisiones y transitar hacia sistemas productivos bajos en carbono [1, 2]. En este contexto, la descarbonización industrial se ha convertido en un componente central de las estrategias climáticas nacionales e internacionales.

Entre los sectores industriales intensivos en emisiones, la industria cementera ocupa un lugar prioritario. El cemento es un insumo esencial para el desarrollo de infraestructura, vivienda y obras civiles, y su demanda global continúa creciendo de la mano de la urbanización, el crecimiento demográfico y la expansión de la infraestructura, particularmente en economías emergentes [3, 4, 5]. Sin embargo, la producción de cemento presenta una particular dificultad para su abatimiento climático, puesto que combina emisiones de proceso asociadas a la descarbonatación de la caliza con emisiones energéticas derivadas del uso de combustibles fósiles en hornos de alta temperatura [6, 7].

La Figura 1.1 muestra las principales etapas productivas del Cemento Portland Ordinario (OPC, por sus siglas en inglés) y la distribución de las emisiones generadas durante el proceso. En particular, las emisiones de proceso, asociadas principalmente a la descarbonatación de la caliza durante la producción de clínker, representan entre un 50% y un 60% de las emisiones directas de CO_2, mientras que la combustión de combustibles fósiles aporta entre un 30% y un 40%, dejando el porcentaje restante a emisiones relacionadas a consumo eléctrico, extracción de materias primas, y

transporte.

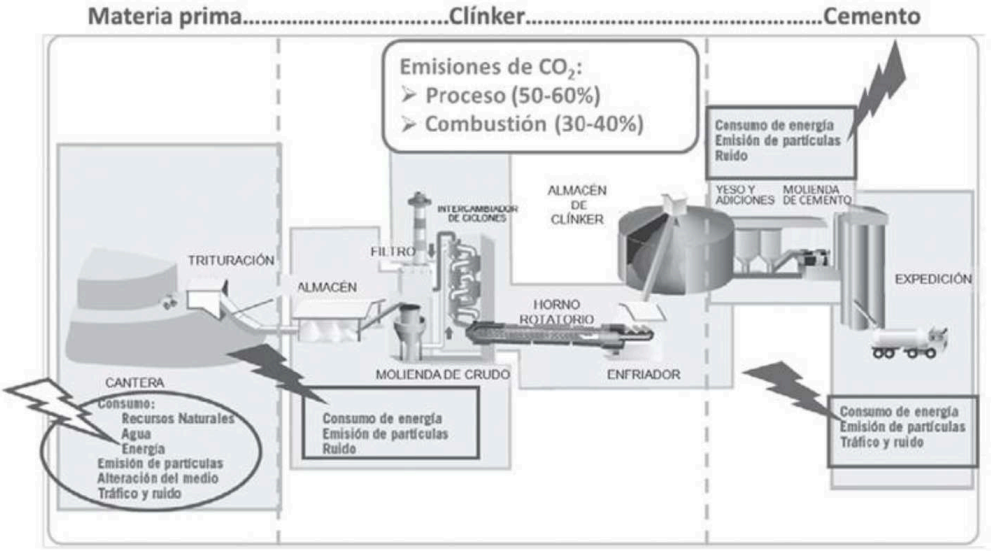


Figura 1.1: Etapas del proceso productivo del cemento y distribución de emisiones

Al analizar la distribución de las emisiones en la cadena de valor del cemento, se observa una aparente paradoja en la industria chilena. Como muestra la Figura 1.2, Chile registró en 2014 emisiones promedio de 581 kg CO_2/t de cemento, un 10% inferiores al promedio mundial. Este desempeño se explica, en gran medida, por el uso histórico de puzolanas naturales, que permitió alcanzar uno de los factores clínker más bajos del mundo, equivalente a 64,8% en 2017. Sin embargo, las emisiones específicas asociadas a la producción de clínker alcanzaron 893 kg CO_2/t de clínker, un 6% por sobre el promedio global. Así, aunque el menor contenido de clínker reduce la huella de carbono del cemento, la producción de clínker en Chile presenta una intensidad de emisiones superior al promedio mundial [8].

Para abordar esta problemática, se han desarrollado distintas estrategias orientadas a reducir las dos principales fuentes de emisiones de la industria cementera: la producción de clínker y el uso de combustibles fósiles (véase Figura 1.1).

La primera línea de acción busca disminuir la proporción de clínker en la composición del cemento. Si bien Chile presenta actualmente uno de los factores clínker más bajos del mundo, el uso de puzolanas naturales se encuentra próximo a su límite técnico. En este contexto, el Cemento de Arcilla Calcinada y Caliza, conocido como LC^3, surge como una de las alternativas más prometedoras para reducir significativamente el contenido de clínker. Se trata de un cemento ternario compuesto por clínker Portland, arcillas calcinadas de bajo grado y piedra caliza molida. La sinergia química entre estos componentes permite sustituir un 50% o más del clínker, sin deteriorar

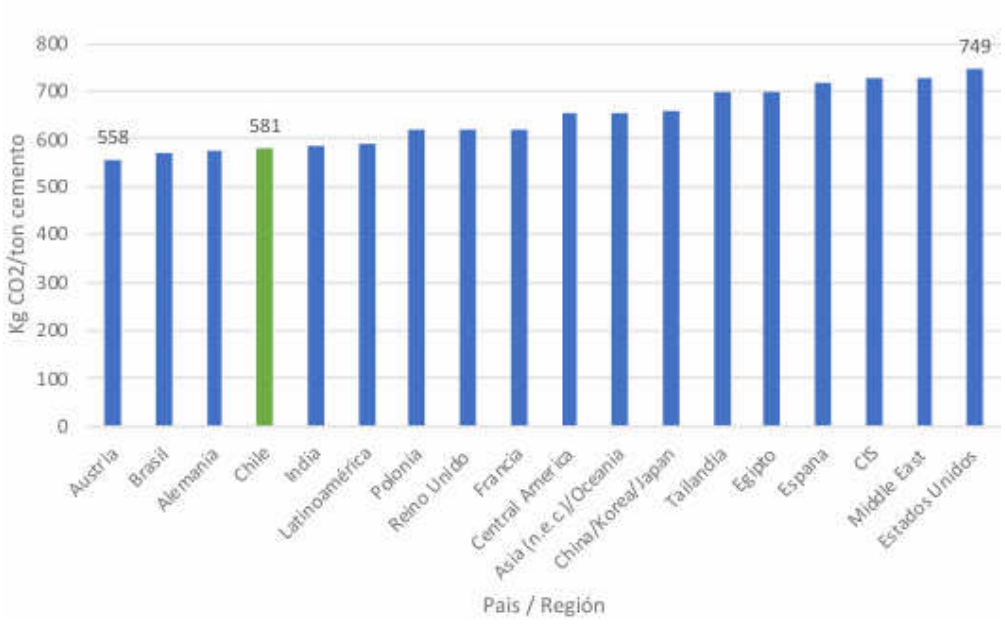


Figura 1.2: Emisiones de CO_2 por tonelada de cemento, 2014 [8]

las propiedades mecánicas ni la durabilidad del hormigón e, incluso, mejorándolas en determinadas condiciones.

Además de reducir las emisiones de CO_2 hasta en un 40% respecto del cemento Portland tradicional, esta tecnología permite valorizar recursos geológicos abundantes que suelen considerarse de baja calidad, lo que favorece un uso más eficiente de las materias primas y se alinea con los principios de la economía circular.

La segunda línea de acción aborda el componente energético del proceso. Mientras las reacciones químicas asociadas a la producción de clínker generan emisiones de proceso, la energía térmica necesaria para alcanzar las temperaturas requeridas proviene, en gran medida, de la combustión de combustibles fósiles con alta intensidad de carbono, como el petcoke. Una alternativa para reducir su consumo es el hidrógeno verde (H_2V), un vector energético cuya combustión no genera emisiones directas de CO_2, sino principalmente vapor de agua. Su incorporación permitiría, por tanto, disminuir o eliminar las emisiones asociadas a la quema de combustibles fósiles, dependiendo del nivel de sustitución alcanzado.

El LC^3 y el H_2V representan rutas de descarbonización distintas, pero potencialmente complementarias. El primero reduce las emisiones de proceso mediante la disminución del contenido de clínker, mientras que el segundo permite reducir las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles, al no generar emisiones directas de CO_2 durante su combustión. No obstante, la implementación

individual y combinada de estas alternativas en la industria cementera chilena no ha sido evaluada de manera integrada desde las perspectivas técnica, económica y ambiental. Cada tecnología presenta desafíos técnicos, operativos y económicos que deben analizarse tanto de forma individual como considerando su interacción y las particularidades del contexto nacional. En este sentido, cobra relevancia caracterizar las condiciones del mercado nacional, el marco regulatorio aplicable al cemento y al H_2V, y la factibilidad técnica y económica de estas alternativas bajo condiciones locales, dada la oportunidad que representan para la descarbonización de la industria cementera chilena.

A los desafíos técnicos, operativos y económicos asociados a estas alternativas se suma una dimensión financiera. En este contexto, el Artículo 6.2 del Acuerdo de París establece un marco para la cooperación voluntaria entre países en la transferencia internacional de resultados de mitigación (ITMOs, por sus siglas en inglés). Un ITMO corresponde a un resultado de mitigación cuantificado, expresado en toneladas de CO_2 equivalente, que puede ser autorizado por el país anfitrión para su transferencia y uso por otro país con la finalidad de cumplir con sus objetivos climáticos. En otras palabras, las medidas implementadas en instalaciones o sectores productivos que reduzcan emisiones de GEI pueden generar reducciones cuantificables que, una vez autorizadas por el país anfitrión, se convierten en ITMOs transferibles a otro país para apoyar el cumplimiento de sus metas climáticas. Esta transferencia no implica el traslado físico de emisiones o reducciones, sino su asignación contable entre las Partes involucradas, mediante la aplicación de ajustes correspondientes que eviten la doble contabilización de una misma reducción de emisiones [9, 10, 11].

En el caso de proyectos de descarbonización industrial, el potencial de los ingresos asociados a la transferencia de ITMOs no ha sido estudiado en profundidad para el sector cementero chileno, en particular respecto de medidas como la implementación de cemento LC^3 y la sustitución de combustibles fósiles mediante H_2V. Estos ingresos podrían complementar los flujos económicos derivados de la venta de cemento y contribuir a mejorar la viabilidad financiera de alternativas que, bajo condiciones convencionales de mercado, resultarían menos atractivas.

Es precisamente en esta intersección de oportunidad y complejidad, y sobre la base del trabajo realizado por la *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) en la elaboración de la *Hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la industria chilena del cemento*[8], así como de sus análisis previos sobre la aplicación de cemento LC^3 en otros mercados de producción cementera, donde se inserta la presente investigación. Sobre esta base, el estudio busca contribuir al cierre de la brecha identificada mediante un análisis técnico-económico que apoye la toma de decisiones estratégicas en la industria cementera chilena.

En particular, busca responder la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es la viabilidad técnica y económica de implementar hidrógeno verde y cemento LC^3 en la industria cementera chilena para reducir emisiones y en qué medida la transferencia de ITMOs, bajo el Artículo 6.2 del Acuerdo de París, puede contribuir a viabilizar financieramente dichos escenarios de descarbonización?

Capítulo 2

Objetivos y Alcances

2.1 Objetivo General

Evaluar técnica y económicamente la implementación de hidrógeno verde (H_2V) y cemento de arcilla calcinada y caliza (LC^3) para la descarbonización de la industria cementera en Chile, considerando su potencial financiamiento bajo el Artículo 6.2 del Acuerdo de París.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar el mercado y la regulación de la industria cementera en Chile, identificando brechas tecnológicas y normativas que limiten la adopción de H_2V y LC^3.
- Realizar un análisis técnico-económico comparativo del uso de H_2V y LC^3, considerando escenarios de implementación individuales y combinados frente al proceso convencional actual.
- Cuantificar el impacto financiero del comercio de ITMOs sobre la viabilidad de los escenarios de descarbonización analizados, aplicando el marco metodológico del Artículo 6.2 del Acuerdo de París.

2.3 Alcances y limitaciones del estudio

La investigación se desarrolla como un estudio de caso aplicado a la industria cementera chilena y evalúa, de manera preliminar, estrategias de descarbonización basadas en LC^3, H_2V y la combinación de ambas alternativas. El análisis se sustenta en revisión bibliográfica, antecedentes públicos, cálculos de ingeniería y modelación mediante planillas de Microsoft Excel.

El diagnóstico del mercado y del marco regulatorio se limita al análisis de información secundaria disponible públicamente para la industria cementera chilena. Se consideran antecedentes productivos, comerciales, tecnológicos, normativos e institucionales relacionados con la incorporación de LC^3, H_2V e ITMOs. No se realizaron entrevistas, encuestas ni levantamientos de información primaria, por lo que la caracterización depende del nivel de detalle y actualización de las fuentes consultadas.

Se utiliza como caso base el escenario OPC + petcoke, frente al cual se comparan tres alternativas: LC^3 + petcoke, OPC + H_2V y LC^3 + H_2V. Todos los escenarios consideran una misma producción anual de referencia y se evalúan desde las perspectivas técnica, ambiental y económica, incluyendo su potencial vinculación con la transferencia de ITMOs bajo el Artículo 6.2 del Acuerdo de París.

La modelación técnica estima los principales flujos de materia y energía, incluidos la producción de cemento y clínker, el consumo de materias primas y electricidad, la demanda térmica y el uso equivalente de petcoke e H_2V. El análisis ambiental cuantifica las emisiones de proceso, combustión, consumo eléctrico y transporte. Las emisiones por producción de clinker y LC^3 se calculan mediante balances estequiométricos, mientras que las restantes se estiman a partir de factores de emisión del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes y del Coordinador Eléctrico Nacional.

A partir de la cuantificación de las emisiones anuales de cada escenario, se calcula la reducción de emisiones respecto del escenario base OPC + petcoke. Estas reducciones se utilizan para estimar el volumen anual y acumulado de ITMOs potenciales de los escenarios LC^3 + petcoke, OPC + H_2V y LC^3 + H_2V. La estimación considera un período de implementación entre 2027 y 2028 y un período de acreditación entre 2029 y 2038, bajo el supuesto simplificado de que cada tonelada de CO_2 reducida equivale a un ITMO potencial. La transferencia efectiva de estos resultados queda sujeta a requisitos de autorización, elegibilidad, monitoreo, reporte, verificación y aplicación de ajustes correspondientes. Asimismo, el horizonte de estimación supone la existencia y continuidad de un marco bilateral de cooperación entre Chile y un país contraparte durante todo el período de acreditación.

La evaluación económica compara únicamente los costos que varían entre escenarios, considerando el consumo de combustibles y electricidad, las inversiones incrementales y los potenciales ingresos por ITMOs. Los resultados se expresan en dólares estadounidenses constantes, sin incorporar inflación ni variaciones reales de precios.

Para el escenario LC^3 + petcoke, la principal inversión corresponde a una unidad de calcinación de arcilla, cuyo costo se estima a partir de referencias bibliográficas, se ajusta a la capacidad

requerida y se anualiza mediante un factor de recuperación de capital. En los escenarios con H_2V, el hidrógeno se considera adquirido a un proveedor externo, por lo que el CAPEX incluye únicamente almacenamiento, tuberías y adaptaciones de la planta, mientras que el OPEX se concentra en la compra del combustible. Finalmente, los ingresos potenciales por ITMOs se analizan mediante sensibilidades de precio, sin asumir valores de mercado garantizados ni condiciones contractuales definitivas.

El estudio no contempla pruebas experimentales, operación o validación industrial, ingeniería de detalle, selección definitiva de equipos, cotizaciones formales de proveedores ni análisis contractual para la implementación de los escenarios evaluados.

La modelación técnica se basa en condiciones simplificadas y no representa una planta cementera específica. En consecuencia, no incorpora restricciones particulares de diseño y operación, como la configuración real de los equipos, la disponibilidad y calidad de las materias primas, la logística interna, la eficiencia efectiva de los hornos, las curvas de carga, las pérdidas y recuperación de calor, las condiciones de almacenamiento ni los requerimientos específicos de adaptación de la planta.

Para los escenarios con H_2V, no se evalúan en detalle la factibilidad de combustión en hornos cementeros, el diseño de quemadores, las condiciones de seguridad y suministro, el transporte y almacenamiento, la mezcla con otros combustibles ni sus posibles efectos sobre el control térmico del proceso y la calidad del clínker. Asimismo, se asume que la combustión de hidrógeno no genera emisiones directas de CO_2 dentro del límite operacional considerado.

La evaluación de ITMOs tiene un carácter conceptual y referencial. Por tanto, no incluye la implementación efectiva de un acuerdo de transferencia bajo el Artículo 6.2 del Acuerdo de París, la autorización del país anfitrión ni el desarrollo de un sistema formal de monitoreo, reporte y verificación. Tampoco aborda en profundidad los procesos de validación, registro, trazabilidad y ajustes correspondientes, los riesgos de doble contabilidad ni las condiciones contractuales con una eventual contraparte compradora.

Capítulo 3

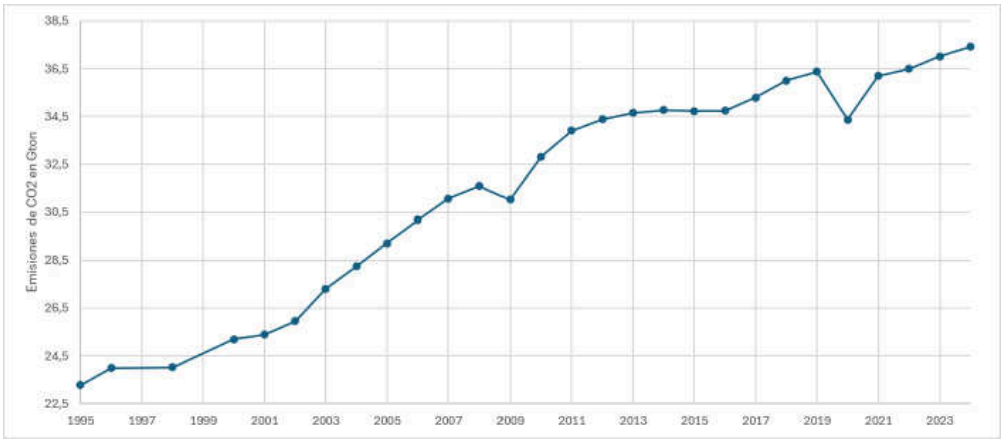
Antecedentes

3.1 Cambio Climático y el Acuerdo de París

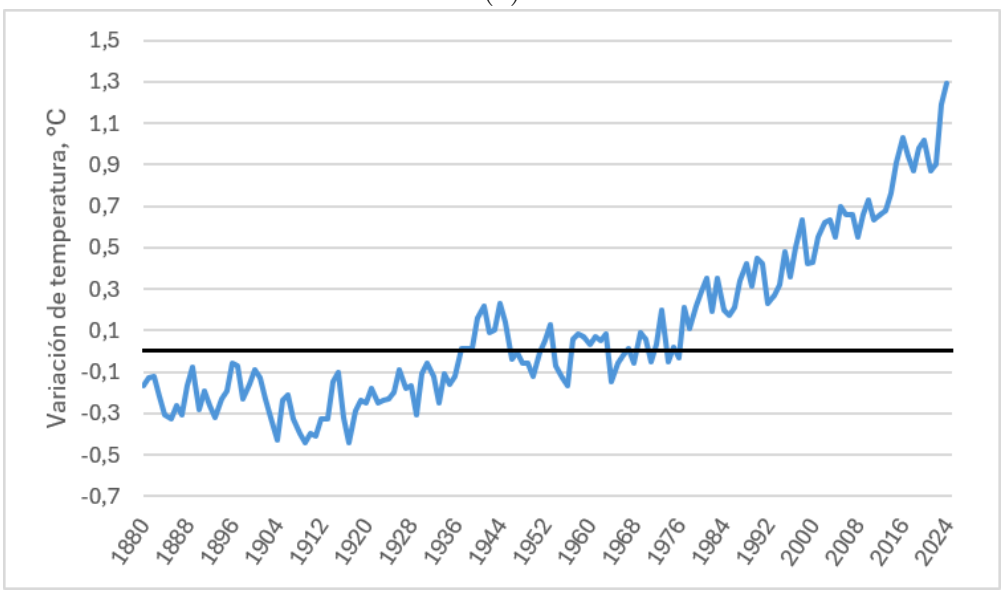
La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) establece en su artículo 1 que el cambio climático se refiere a las variaciones del clima atribuibles, directa o indirectamente, a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica global, complementando así la variabilidad climática natural observada en períodos comparables [2]. Esta definición institucionaliza formalmente la influencia antropogénica en la alteración del sistema climático, sentando las bases para la acción internacional coordinada.

Los avances científicos y tecnológicos han permitido comprender con mayor precisión los fenómenos atmosféricos y su relación con las actividades humanas. La evidencia recopilada por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) muestra una relación directa entre el aumento antropogénico de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), y el incremento de la temperatura media global durante las últimas décadas [1]. Estos gases de GEI comunmente suelen expresarse por medio de una base común denominada dióxido de carbobo equivalente (CO_2e). Como se observa en la Figura 3.1, el crecimiento sostenido de las emisiones globales de CO_2 está directamente relacionado con la tendencia ascendente de la temperatura media del planeta.

Aunque los ciclos climáticos naturales, como fluctuaciones en la actividad solar o actividad volcánica, pueden afectar la temperatura media global, el IPCC ha concluido enfáticamente que el cambio climático, desde mediados del siglo XX, responde principalmente a factores antropogénicos [1]. Este consenso científico cuenta con amplio respaldo de comunidades académicas, instituciones científicas y organismos internacionales, los cuales recalcan la urgente necesidad de implementar medidas eficaces para reducir emisiones y mitigar los impactos adversos asociados.



(a)



(b)

Figura 3.1: (a) Aumento de las emisiones de CO2 1995-2024 [12]; (b) Variación de la temperatura media anual del aire en superficie a escala mundiaL 1880 - 2024[13].

La relevancia de estas medidas se ve potenciada ante los efectos que ya se manifiestan globalmente: el acelerado derretimiento polar, el incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos como sequías e inundaciones, y la perturbación de patrones climáticos históricos. Estos efectos tienen implicaciones técnicas, ambientales, económicas y sociales profundas que afectan directamente a las condiciones para el desarrollo humano sostenible.

El Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008 del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [14] identifica el cambio climático como uno de los desafíos clave para el desarrollo humano, advirtiendo que la falta de una respuesta adecuada podría socavar seriamente los logros internacionales en otras materias descritas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, como la

reducción de la pobreza.

Estas consideraciones subrayan la importancia estratégica de acuerdos internacionales como el Acuerdo de París. Adoptado en 2015 durante la Conferencia de las Partes (COP21) y en vigor desde 2016, el Acuerdo de París es un tratado internacional legalmente vinculante. Su objetivo principal es mantener el aumento global de la temperatura media por debajo de 2°C respecto a los niveles preindustriales y realizar esfuerzos para limitar el calentamiento a 1,5°C. Entre los artículos establecidos dentro del acuerdo se encuentran:

- Artículo 2: establece el objetivo del Acuerdo, que consiste en reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza. Lo hace mediante tres vías principales:
  (a) mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 ºC respecto de los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitarlo a 1,5 ºC.
  (b) aumentar la capacidad de adaptación y resiliencia al clima.
  (c) alinear los flujos financieros con trayectorias de desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero y resilientes al clima.

- Artículo 3: establece que todas las Partes deben realizar y comunicar esfuerzos ambiciosos mediante sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC). Estas contribuciones reúnen los compromisos climáticos que cada Parte define y actualiza periódicamente para reducir sus emisiones de GEI y fortalecer su capacidad de adaptación al cambio climático, y deben representar una progresión en el tiempo. Asimismo, subraya la necesidad de apoyar a los países en desarrollo para lograr la aplicación efectiva del Acuerdo

- Artículo 4: detalla que cada Parte debe preparar, comunicar y mantener sucesivas NDC con creciente nivel de ambición, considerando sus capacidades nacionales y responsabilidades comunes pero diferenciadas. Se establece que las Partes deben reducir rápidamente las emisiones tras alcanzar su pico, buscando un equilibrio entre emisiones y absorciones en la segunda mitad del siglo. También establece requisitos de rendición de cuentas, transparencia y revisión periódica.

- Artículo 6: reconoce la posibilidad de cooperación voluntaria entre Partes para alcanzar sus metas climáticas, facilitando la Transferencia Internacional de Resultados de Mitigación (*Internationally Transferred Mitigation Outcomes*, ITMOs). Este artículo es central para los mecanismos de mercado y no mercado, e introduce principios como la integridad ambiental, la contabilidad robusta, la transparencia y la no doble contabilización.

3.2 Financiamiento climático y mercados de carbono en proyectos de mitigación

La descarbonización industrial requiere, en muchos casos, inversiones significativas en reconversión tecnológica, infraestructura, adaptación de equipos y cambios operacionales. En muchos proyectos, la barrera principal no es la inexistencia de alternativas técnicas, sino la dificultad de capturar económicamente los beneficios climáticos a largo plazo que dichas alternativas generan. En este contexto, los mercados de carbono y los mecanismos de financiamiento climático cumplen una función de señal económica al valorizar las reducciones de emisiones y transformarlas en flujos potenciales de ingresos.

En términos generales, los mercados de carbono permiten asignar un valor monetario a una tonelada de CO_2 equivalente evitada o removida. Esto puede ocurrir en esquemas regulatorios o voluntarios, así como también en arreglos bilaterales o multilaterales vinculados al cumplimiento de metas climáticas nacionales. Para sectores intensivos en emisiones y con elevados costos de abatimiento, la posibilidad de monetizar resultados de mitigación puede influir de manera decisiva en la evaluación financiera de proyectos que, bajo condiciones de mercado convencionales, no alcanzarían retornos suficientes.

El Acuerdo de París introdujo una arquitectura climática basada en las NDCs (*Nationally Determinated Contributions*) y reconoció la posibilidad de cooperación voluntaria entre Partes para aumentar la ambición de mitigación y adaptación [15]. En particular, el artículo 6.2 habilita el uso de ITMOs bajo principios de integridad ambiental, transparencia y no doble contabilización.

La operacionalización de este mecanismo fue precisada en Glasgow mediante la Decisión 2/CMA.3, que adoptó la guía sobre enfoques cooperativos referidos en el artículo 6.2, incluyendo definiciones sobre ITMOs, responsabilidades de participación, ajustes correspondientes, reporte, revisión y sistemas de registro [9]. Posteriormente, la Decisión 6/CMA.4, adoptada en Sharm el-Sheikh, desarrolló aspectos operativos adicionales, tales como directrices sobre registros, revisión técnica, formatos de reporte inicial y de información regular, así como orientaciones para la base de datos y plataforma centralizada del artículo 6 [10].

En conjunto, estas decisiones convierten el artículo 6.2 en una herramienta concreta para canalizar la cooperación internacional basada en resultados de mitigación, con potencial relevancia para proyectos industriales capaces de generar reducciones verificables y autorizables para su transferencia.

3.3 Industria Cementera Global

El desarrollo del mundo moderno está estrechamente vinculado al uso del hormigón, material esencial para la construcción de la infraestructura que sostiene la actividad económica y social. Su principal componente es el cemento, que, después del agua, constituye una de las sustancias más utilizadas a nivel mundial y cuya demanda se mantendría elevada durante las próximas décadas [3].

En términos absolutos, la industria cementera mantiene una escala global considerable. Sin embargo, durante la última década, el consumo mundial no ha seguido una trayectoria de crecimiento sostenido, sino que ha mostrado un comportamiento relativamente estable, acompañado de fluctuaciones interanuales. Como se observa en la Figura 3.2, esta estabilización se produce en niveles de consumo superiores a los 4 mil millones de toneladas anuales. Este comportamiento reciente no descarta la existencia de escenarios de crecimiento a mediano y largo plazo. Algunas estimaciones proyectan que el mercado mundial del cemento podría alcanzar los 5 mil millones de toneladas hacia 2050 [4]. De manera complementaria, otros análisis anticipan que la demanda mundial de hormigón podría aumentar entre un 12% y un 33% respecto de los niveles de 2014 [5]. También se han planteado escenarios con tasas de crecimiento anual cercanas al 4,5%, que podrían llevar a que la demanda mundial se cuadruplique respecto de los niveles de 1990 [16].

Otras fuentes plantean un escenario más moderado y diferenciado entre regiones. Según la World Cement Association, con base en análisis de On Field Investment Research®, se espera que la demanda mundial de cemento se mantenga relativamente estable entre 2024 y 2030, salvo por aumentos en regiones como Oriente Medio, India y África [17]. Bajo esta perspectiva, los mercados más débiles serían Turquía, China y Europa, mientras que las mayores perspectivas de crecimiento se concentrarían en África subsahariana, con un aumento proyectado de aproximadamente un 77% hacia 2030, seguida por India, con un 42%, y Norteamérica, con un 20%. En consecuencia, la evidencia no indica una tendencia global homogénea, sino la coexistencia de mercados estables o decrecientes con regiones emergentes en expansión, impulsadas principalmente por la urbanización, el crecimiento demográfico y el desarrollo de infraestructura.

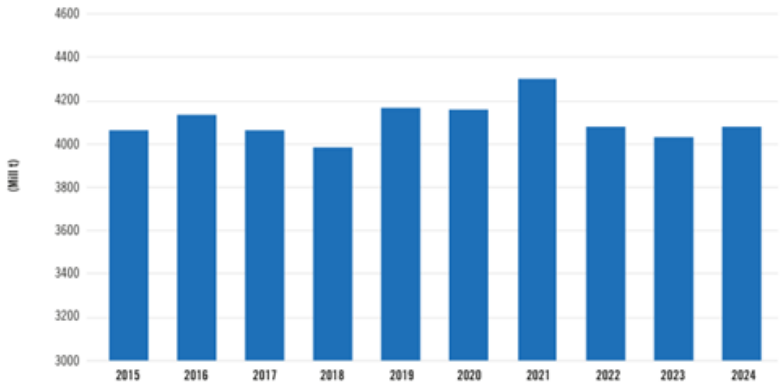


Figura 3.2: Evolución del consumo mundial de cemento, expresado en millones de toneladas [18].

La evolución futura de la demanda de cemento no responde a una dinámica homogénea a nivel global, sino que varía según el nivel de desarrollo económico, demográfico e infraestructural de cada país. En economías en expansión, el consumo de cemento tiende a crecer asociado al aumento del Producto Interno Bruto (PIB), debido a la construcción de infraestructura industrial, habitacional y de transporte requerida para sostener el proceso de desarrollo. En este contexto, el consumo de cemento puede interpretarse como un indicador indirecto del avance económico y urbano. Por el contrario, en economías industrializadas, donde gran parte de la infraestructura básica ya ha sido construida, la demanda tiende a desacoplarse del crecimiento del PIB y se relaciona principalmente con el mantenimiento, reposición y modernización de infraestructura existente, así como con la expansión urbana asociada al crecimiento demográfico [19].

La escala actual de producción de cemento, sumada al potencial de crecimiento proyectado en determinadas regiones, conlleva una profunda problemática ambiental. La industria cementera es una de las principales fuentes de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo con entre un 7% y un 8% del total de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO_2) [5]. Por un lado, se producen emisiones de proceso inherentes a la reacción química de descarbonatación de la caliza ($CaCO_3$), que representa entre el 50% y el 60% del CO_2 total. Por otro lado, se generan emisiones energéticas que constituyen cerca del 40%, derivadas de la combustión de combustibles fósiles, mientras que las emisiones restantes se relacionan con el uso de electricidad y transporte [6]. La dificultad del sector radica en que la demanda de calor de muy alta temperatura, la necesidad de mantener estándares de desempeño del material y la importancia del clínker como fase hidráulicamente activa limitan la velocidad con que se pueden sustituir procesos e insumos. Por ello, los caminos de descarbonización del cemento suelen requerir combinaciones de medidas: eficiencia térmica, combustibles alternativos, reducción del factor clínker, captura de carbono y nuevos materiales cementicios [20]. Es por lo anterior que la industria cementera se considera un sector "difícil de abatir", lo que hace necesario desarrollar e implementar soluciones tecnológicas de

mayor alcance.

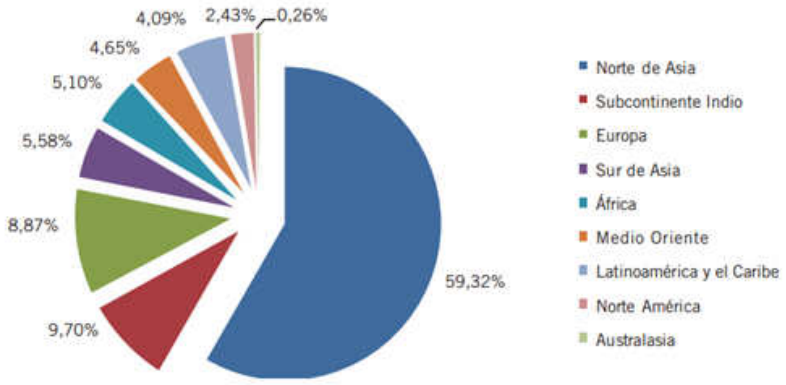


Figura 3.3: Participación por regiones de la producción de Cemento [18].

3.4 Panorama de la industria cementera en Chile

En Chile, la industria cementera constituye un sector clave para el abastecimiento de infraestructura, vivienda y obras públicas. Históricamente, el mercado ha estado dominado por tres conglomerados principales: Cementos Bío Bío (Cbb), Cemento Polpaico y Melón S.A., los cuales concentran una parte relevante de la capacidad instalada y de los despachos a nivel nacional [8]. Esta concentración se refleja en la Figura 3.4, donde se presentan los despachos de cemento y hormigón por empresa, permitiendo contextualizar el peso relativo de los principales actores del mercado [21]. No obstante, durante la última década, el sector ha experimentado una transformación estructural hacia un modelo mixto, en el cual la importación de clínker y de cemento terminado ha ganado relevancia como mecanismo de abastecimiento.



Figura 3.4: Despachos de cemento y hormigón por empresa [21].

Este cambio se explica, en parte, por la combinación de altos costos locales de producción de clínker y ventajas logísticas vinculadas a la importación marítima. La geografía lineal del país, su red portuaria y la disponibilidad de fletes de retorno desde Asia han favorecido la entrada de clínker importado a costos competitivos. Como resultado, la industria opera actualmente con una estructura híbrida en la que conviven plantas integradas con estaciones de molienda orientadas al procesamiento de clínker importado [8, 21].

La situación sectorial reciente ha estado marcada por una combinación de sobrecapacidad instalada, contracción de la demanda de la construcción y presión competitiva de importaciones. Este entorno condiciona de manera importante la adopción de nuevas tecnologías, ya que reduce los márgenes operacionales del sector e incrementa la sensibilidad frente a inversiones intensivas en capital.

3.5 Principales fuentes de emisiones en la producción de cemento

La fabricación de cemento Portland convencional comprende una cadena de procesos que incluye la extracción y trituración de materias primas, la preparación de harina cruda, la clinkerización en horno rotatorio y la molienda final del clínker con yeso y adiciones minerales. Desde el punto de vista climático, la etapa crítica es la clinkerización, ya que en ella convergen las dos principales fuentes de emisiones del sector [7].

La primera corresponde a las emisiones de proceso, generadas por la descarbonatación térmica

del carbonato de calcio ($CaCO_3$), reacción necesaria para formar las fases minerales del clínker. La segunda corresponde a las emisiones energéticas, derivadas de la combustión de combustibles fósiles utilizados para alcanzar temperaturas cercanas a 1.450 °C en el horno. A ello se suman emisiones menores asociadas al consumo eléctrico, transporte interno y procesos auxiliares [6, 8, 22].

Es por lo anterior que la huella de carbono de la industria cementera en Chile presenta una naturaleza dual: por una parte, se registra en el sector de Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU), debido a las emisiones de proceso asociadas a la descarbonatación de materias primas; y, por otra, en el sector Energía, debido al consumo intensivo de combustibles fósiles durante la producción de clínker. Según los datos más recientes del Inventario Nacional de GEI de Chile (2024) para el año 2022, el sector IPPU representó el 4% del balance nacional de gases de efecto invernadero. Dentro de este sector, la subcategoría "Industria de los minerales" aportó el 22,3% de las emisiones de IPPU, mientras que la producción de cemento fue responsable del 56,8% de las emisiones de dicha subcategoría, reafirmando su relevancia dentro del inventario nacional.

Adicionalmente, el Balance Nacional de Energía de 2020 indica que la industria del cemento consumió 3,2 GWh, principalmente asociados al uso de petcoke, lo que corresponde al 2,5% del consumo energético del sector Industrial y Minero, sector que a su vez representa el 40% del consumo energético nacional [23]. Esta contribución se resume en la Figura 3.5, donde se presentan las emisiones de CO_2 atribuidas a la producción de cemento según el sector de reporte. En conjunto, estos antecedentes evidencian que los esfuerzos de mitigación deben abordar tanto las emisiones de proceso como aquellas derivadas del consumo energético en la clinkerización.

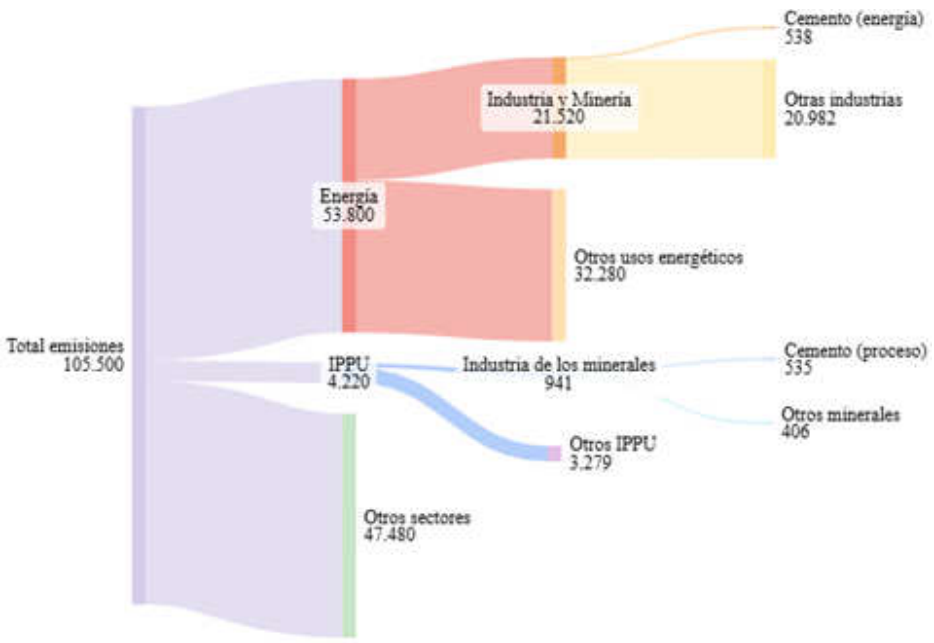


Figura 3.5: Emisiones de CO_2 en kton atribuidas al cemento por sector, 2022 [23].

Como se menciona en el Capítulo 1, pese a contar con una intensidad relativamente baja de emisiones por tonelada de cemento, la producción de clínker continúa concentrando una elevada intensidad específica de emisiones. De acuerdo con la hoja de ruta sectorial de FICEM e ICH, Chile registró un factor clínker del orden de 64,8% y emisiones promedio de 581 kg CO_2/ton de cemento, pero al mismo tiempo presentó emisiones del orden de 893 kg CO_2/ton de clínker, evidenciando que el principal desafío persiste en la etapa de producción del clínker [8].

Para abordar esta problemática, que no solo afecta a Chile, sino también a la industria cementera global, se han desarrollado diversas vías por las cuales se busca afrontar las dos fuentes principales de emisiones: el clínker y el combustible.

3.6 Descarbonización de la industria cementera

La literatura especializada coincide en que la descarbonización de la industria cementera requiere una combinación de medidas, ya que no existe una única solución capaz de abordar simultáneamente las emisiones de proceso, las emisiones energéticas, las restricciones en la disponibilidad de materias primas y las condiciones técnico-económicas de operación. En consecuencia, las estrategias de mitigación reportadas en la literatura científica, en hojas de ruta sectoriales y en documentos empresariales tienden a estructurarse como portafolios de soluciones complementarias, con distintos niveles de madurez tecnológica, potencial de abatimiento y factibilidad de implementación.

En el caso chileno, la *Hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la Industria Chilena del Cemento* identifica cinco ejes principales de acción: el coprocesamiento de combustibles alternativos, la eficiencia energética térmica, la reducción del factor clínker, la eficiencia energética eléctrica y la reducción del contenido de cemento en el hormigón. A continuación, se describen estos pilares y su rol dentro de una estrategia de descarbonización para la industria cementera nacional [8].

3.6.1 Coprocesamiento

El coprocesamiento corresponde al uso de residuos adecuados como combustibles o materias primas alternativas dentro del proceso cementero, con el objetivo de recuperar energía o recursos materiales y reducir el consumo de combustibles fósiles y materias primas vírgenes. El coprocesamiento se vincula directamente con la valorización de residuos y con esquemas de economía circular. En la industria cementera, ejemplos habituales incluyen combustibles derivados de residuos, neumáticos fuera de uso, aceites usados, solventes, residuos industriales, biomasa residual y fracciones no reciclables de envases y embalajes.

En Chile, la Hoja de Ruta plantea aumentar la tasa de sustitución térmica mediante coprocesamiento desde 12,6% en 2017 hasta 30% hacia 2030. Sin embargo, su implementación depende de superar barreras regulatorias, institucionales y de coordinación con la cadena de gestión de residuos, particularmente en lo referido a permisos, trazabilidad, preprocesamiento y reconocimiento del coprocesamiento como alternativa de valorización energética [8].

3.6.2 Reducción del factor clínker

La reducción del factor clínker constituye una de las medidas más relevantes para disminuir las emisiones de proceso, ya que actúa directamente sobre el componente de mayor intensidad de carbono del cemento. Esta estrategia se basa en reemplazar parte del clínker por materiales cementicios suplementarios, tales como puzolanas naturales, escorias, cenizas volantes, caliza y arcillas calcinadas.

3.6.3 Sustitución de combustibles fósiles

Otra línea de acción corresponde a la sustitución total o parcial de los combustibles fósiles utilizados en el horno, con el objetivo de reducir las emisiones energéticas del proceso. En la práctica industrial, esta transición ha incluido tanto el uso de combustibles alternativos derivados de residuos como la incorporación de biomasa. Más recientemente, la literatura también ha comenzado a explorar el uso de H_2V, ya sea como combustible puro o en mezclas con gas natural, como una alternativa de baja o nula emisión directa en combustión. No obstante, esta estrategia debe entenderse como complementaria, ya que actúa únicamente sobre la fracción energética de las emisiones y no sobre aquellas asociadas al proceso de calcinación [8, 24].

3.6.4 Reducción del contenido de cemento en el hormigón

La reducción del contenido de cemento en el hormigón busca disminuir la cantidad de cemento requerida por unidad de material producido, sin afectar el desempeño mecánico ni la durabilidad del hormigón. Esta medida incluye una mayor participación del hormigón premezclado, mejoras en la dosificación, uso de aditivos y reducción de prácticas menos controladas, como la preparación manual en obra con cemento en saco [8].

3.6.5 Eficiencia energética térmica

La eficiencia energética térmica busca reducir el consumo de energía asociado a la producción de clínker, etapa que concentra la mayor demanda térmica del proceso cementero. Esta línea considera mejoras en la operación del horno, optimización de la mezcla de materias primas, recuperación de calor y modernización de equipos [8].

3.6.6 Eficiencia energética eléctrica

La eficiencia energética eléctrica se relaciona principalmente con los procesos de molienda de materias primas, clínker y cemento. Esta estrategia considera el uso de tecnologías de molienda más eficientes, aditivos de molienda y esquemas como la molienda separada, que permiten reducir el consumo eléctrico específico. En Chile, la Hoja de Ruta identifica esta última como una medida relevante, aunque su implementación requiere abordar restricciones normativas y evaluar su compatibilidad con los estándares técnicos aplicables al cemento producido en el país [8].

3.6.7 Sustitución de combustibles fósiles como medida complementaria

Además de los ejes definidos en la Hoja de Ruta, existen medidas complementarias orientadas a reducir las emisiones energéticas asociadas a la generación de calor en el horno de clínker. Dentro de ellas se encuentra la sustitución parcial o total de combustibles fósiles por alternativas de menor intensidad de carbono o de emisión directa nula, como biomasa, gas natural, combustibles sintéticos o H_2V. Mientras el coprocesamiento se refiere específicamente a la valorización energética o material de residuos dentro del proceso cementero, la sustitución de combustibles fósiles comprende cualquier reemplazo del combustible convencional por otra fuente energética.

3.6.8 Tecnologías emergentes y complementarias

En horizontes de mayor complejidad técnica y económica, la industria también considera tecnologías como la electrificación parcial de procesos, hornos avanzados, captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) y nuevos aglutinantes de baja huella. Estas alternativas pueden ser relevantes para alcanzar niveles más profundos de descarbonización, especialmente en aquellas emisiones que no pueden ser abatidas mediante medidas convencionales. Sin embargo, su despliegue en contextos como el chileno todavía enfrenta restricciones asociadas a costos de inversión, disponibilidad de infraestructura, madurez tecnológica y escalabilidad industrial [25, 26].

3.7 Cemento LC^3: fundamentos, desarrollo y experiencias previas

El cemento LC^3 corresponde a una familia de cementos ternarios formulados para reducir de manera sustantiva el contenido de clínker sin sacrificar el desempeño mecánico ni la durabilidad del material [4, 27]. Su formulación más difundida, denominada LC^3-50, está compuesta típicamente por 50% de clínker, 30% de arcilla calcinada, 15% de caliza y 5% de yeso, como se esquematiza en la Figura 3.6 [4, 27]. No obstante, estudios asociados a experiencias de desarrollo en Cuba han evaluado formulaciones con contenidos de clínker inferiores al 50%, incluyendo mezclas límite del tipo LC^3-30, con aproximadamente 30% de clínker. Estas formulaciones permiten explorar mayores reducciones de emisiones, aunque requieren mayores exigencias sobre la reactividad de la arcilla calcinada, la optimización de la dosificación y la validación del desempeño mecánico y normativo del cemento [4, 28].

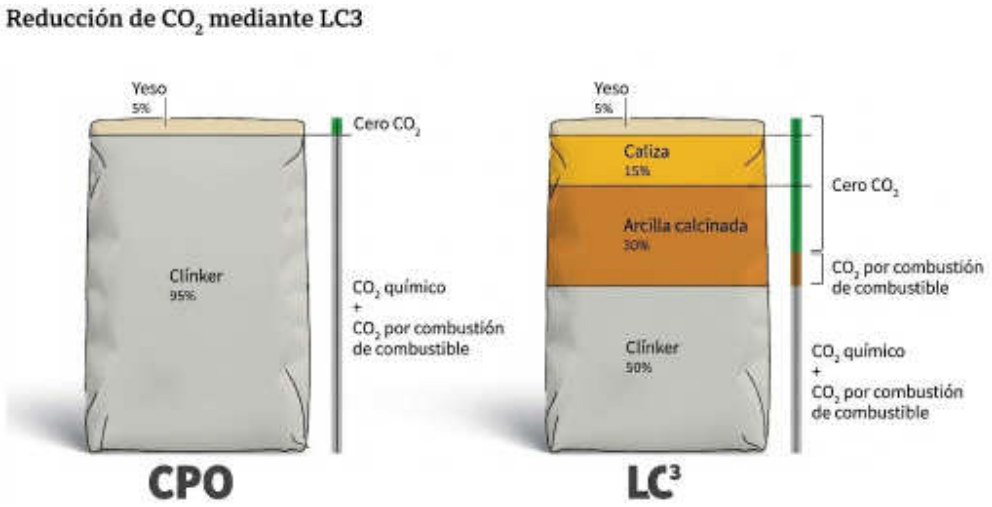


Figura 3.6: Esquema composición LC^3-50 [4].

El interés por el LC^3 se explica por razones ambientales, tecnológicas y económicas. Desde el punto de vista ambiental, esta tecnología puede reducir las emisiones del cemento en torno a un 30-40% respecto del OPC, principalmente por la disminución del factor clínker y por el hecho de que la arcilla se calcina a temperaturas del orden de 700–800 °C, considerablemente menores que las requeridas para la clinkerización convencional, situada en torno a 1400–1500 °C [4, 27].

A diferencia de otras adiciones minerales, como la escoria granulada de alto horno o las cenizas volantes, el LC^3 utiliza materias primas de amplia disponibilidad geológica, especialmente arcillas caoliníticas y caliza. Esta característica es relevante para países donde la disponibilidad de subproductos industriales cementicios es limitada o decreciente. Sin embargo, su implementación requiere caracterizar adecuadamente la mineralogía de las arcillas, controlar la temperatura de calcinación y adaptar el proceso industrial para garantizar una reactividad puzolánica adecuada [4].

Otro elemento central en el interés por esta tecnología es que la reducción del impacto ambiental no se logra necesariamente a costa del desempeño del material. La literatura reciente muestra que el LC^3 puede desarrollar resistencias mecánicas comparables e incluso superiores a edades avanzadas, junto con mejoras en indicadores de durabilidad, como la resistencia al ingreso de humedad y cloruros [27, 29]. En consecuencia, el LC^3 no debe entenderse únicamente como un cemento de menor huella, sino como una plataforma tecnológica capaz de combinar descarbonización con prestaciones técnicas competitivas. Estos beneficios se sintetizan en la Figura 3.7, donde se resumen las principales razones para su adopción a escala industrial [4].

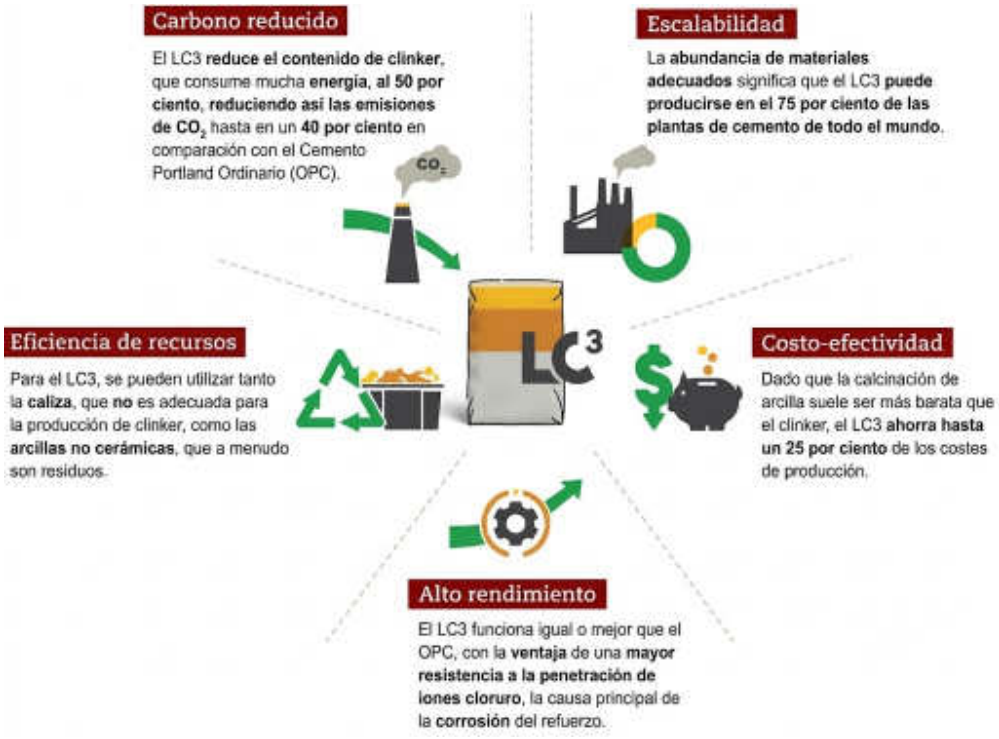


Figura 3.7: Razones para la adopción de LC^3 [4].

3.7.1 Ventajas y desventajas ambientales y de proceso

Desde el punto de vista de proceso, una de las principales ventajas del LC^3 es que la calcinación de arcilla ocurre a temperaturas considerablemente menores que la clinkerización, lo que reduce el requerimiento térmico del sistema y, con ello, el consumo de combustibles asociado. Asimismo, el uso de arcillas caoliníticas y caliza permite disminuir la dependencia de materiales cementicios suplementarios de disponibilidad limitada, como escorias o cenizas volantes. Esta característica resulta relevante para contextos donde dichos subproductos industriales no se encuentran disponibles en cantidad o calidad suficiente.

Otra ventaja operacional es su potencial compatibilidad con parte de la infraestructura cementera existente, especialmente en las etapas de molienda, almacenamiento y mezcla. No obstante, su producción requiere incorporar o adaptar unidades de calcinación de arcilla, además de implementar sistemas de caracterización y control de calidad adecuados para asegurar la reactividad puzolánica del material. En este sentido, su despliegue industrial no depende únicamente de la disponibilidad de arcilla, sino también de la capacidad de integrar nuevas operaciones térmicas y de control dentro de la planta.

Entre sus principales limitaciones se encuentra la dependencia de arcillas con contenido suficiente

de caolinita, usualmente del orden de 40–50%, ya que la reactividad del material calcinado está directamente condicionada por su composición mineralógica [30]. Además, la variabilidad natural de las arcillas puede afectar la estabilidad del producto final, por lo que se requiere una caracterización sistemática de los yacimientos, control de temperatura de calcinación y ajuste de la formulación del cemento según las propiedades de la materia prima disponible.

Finalmente, la implementación del LC^3 también enfrenta desafíos normativos y comerciales. Aunque existen avances internacionales en el reconocimiento de cementos con altos contenidos de materiales suplementarios, su adopción en América Latina todavía depende de la adecuación de normas técnicas, validaciones locales de desempeño y aceptación por parte del mercado. En consecuencia, su desarrollo debe evaluarse como una solución con alto potencial de mitigación, pero condicionada por factores geológicos, tecnológicos, normativos e industriales propios de cada país.

3.7.2 Experiencias internacionales de producción y aplicación

Los antecedentes de implementación más relevantes del LC^3 se concentran inicialmente en Cuba e India, países que actuaron como plataformas tempranas de desarrollo, validación y demostración industrial. En Cuba, los primeros ensayos confirmaron la viabilidad técnica del material a escala industrial, incluyendo una producción de 130 t de cemento bajo en clínker en una planta cementera. Posteriormente, el desarrollo cubano avanzó hacia experiencias demostrativas y aplicaciones constructivas, como la fabricación de bloques, elementos prefabricados y una vivienda construida con LC^3 en Santa Clara [4, 28].

La experiencia cubana también permitió avanzar desde la validación experimental hacia la instalación de capacidad productiva. Hacia 2019 se reporta la puesta en marcha de una planta de cemento ecológico asociada al desarrollo de LC^3, con una capacidad estimada de 8–10 t/día.

India constituye el segundo gran caso de estudio y escalamiento. A partir de la colaboración entre EPFL, instituciones cubanas, centros tecnológicos indios y empresas cementeras, el LC^3 avanzó desde la investigación experimental hacia producciones piloto y aplicaciones constructivas. En una de las campañas desarrolladas por JK Lakshmi Cement se produjeron aproximadamente 200 t de LC^3, utilizando tecnologías industriales existentes con ajustes menores en molienda y control de calidad. Posteriormente, una segunda experiencia piloto consideró la calcinación de 80 t de arcilla y la producción de 130 t de LC^3, material que fue distribuido a fabricantes, laboratorios y actores relevantes de la industria para su evaluación [4, 31].

Estas experiencias permitieron validar el uso del LC^3 en aplicaciones como pavimentos, caminos

menores, plataformas de hormigón, bloques, elementos de cubierta y edificaciones demostrativas. Entre los casos reportados se incluyen una vivienda en Jhansi y el uso de bloques LC^3 en dependencias de la cooperación suiza en Nueva Delhi. En paralelo, el proyecto impulsó procesos de estandarización mediante propuestas técnicas ante la Bureau of Indian Standards (BIS), contribuyendo a la posterior incorporación del LC^3 en normas de cemento en India [4].

En términos institucionales, destaca el *Low Carbon Cement Project* o Proyecto LCC, apoyado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE/SDC). Esta iniciativa articuló investigación científica, validación industrial, difusión técnica y apoyo regulatorio en Cuba, India, América Latina y otros mercados. Además, promovió centros de recursos técnicos en Delhi y Santa Clara, orientados a transferir conocimiento a la industria y facilitar la adopción empresarial del LC^3 [4].

La evolución posterior muestra que el LC^3 ha comenzado a transitar desde experiencias piloto hacia un despliegue internacional más amplio. La documentación de escalamiento reporta que en 2020 empresas como ARGOS iniciaron la producción de *Cemento Verde* en Colombia, mientras CIMPOR comenzó la producción de *DeOHclay* en Costa de Marfil. En conjunto, estos antecedentes muestran que el LC^3 ha pasado de ser una innovación académica a constituir una alternativa industrialmente demostrada, especialmente relevante para países con alta demanda de infraestructura y disponibilidad de arcillas aptas para calcinación [4, 27, 28].

3.8 Hidrógeno verde: desarrollo, aplicaciones industriales y experiencias previas

3.8.1 Definición y rutas de producción

El hidrógeno (H_2) es un gas diatómico, incoloro, inodoro, altamente inflamable y de muy baja densidad. Aunque es el elemento más abundante en la materia visible del universo, en la Tierra se encuentra principalmente formando parte de compuestos como el agua y los hidrocarburos, por lo que debe ser producido mediante procesos de conversión energética o química [32].

Las rutas de producción de hidrógeno se diferencian principalmente por la materia prima utilizada, la fuente de energía y la intensidad de emisiones asociada. Entre las rutas convencionales se encuentran el reformado de gas natural y la gasificación de carbón, ambas intensivas en emisiones si no incorporan captura de carbono. En contraste, el hidrógeno verde se obtiene mediante electrólisis

del agua utilizando electricidad proveniente de fuentes renovables, lo que permite producir H_2 con bajas emisiones directas de CO_2 [33, 34].

La electrólisis es un proceso electroquímico en el cual el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de una diferencia de potencial superior a 1,23 V (a 25 °C). La reacción global puede expresarse como:

$$2\,H_2O(l) \rightarrow 2\,H_2(g) + O_2(g) \tag{3.1}$$

En este proceso, la oxidación ocurre en el ánodo y la reducción en el cátodo, generando oxígeno e hidrógeno, respectivamente. Aunque el mecanismo de transporte iónico depende de la tecnología de electrólisis empleada, la reacción redox neta se mantiene constante [35].

El H_2V no debe entenderse únicamente como un combustible, sino como un vector energético y materia prima industrial capaz de conectar la generación eléctrica renovable con sectores de difícil electrificación. Su cadena de valor incluye la generación de electricidad renovable, la producción de hidrógeno por electrólisis, su acondicionamiento, compresión, almacenamiento y distribución, y finalmente su uso directo o conversión en derivados como amoníaco, metanol, combustibles sintéticos u otros productos químicos [34, 36].

Una vez producido, el hidrógeno requiere soluciones de almacenamiento y transporte que compensen su baja densidad volumétrica en estado gaseoso. Para aplicaciones locales o de corta distancia, las alternativas más comunes son el almacenamiento como gas comprimido, su distribución mediante tuberías y el transporte en camiones presurizados. Para mayores distancias o comercio internacional, se evalúan rutas como hidrógeno líquido, amoníaco, metanol o portadores orgánicos líquidos de hidrógeno (LOHC), las cuales aumentan la densidad energética transportada, pero incorporan costos y penalidades energéticas asociadas a conversión, reconversión, licuefacción, síntesis o deshidrogenación [37, 38, 39].

Por lo tanto, la selección de la ruta de almacenamiento y transporte depende de la distancia, escala, infraestructura disponible y uso final. Mientras el hidrógeno gaseoso comprimido puede ser adecuado para consumos industriales cercanos al punto de producción, sus derivados resultan más convenientes cuando se requiere transporte marítimo, comercio internacional o integración con cadenas químicas existentes [37, 40]. Esta flexibilidad explica el interés del H_2V como energético final y como insumo intermedio para la producción de moléculas de mayor densidad energética o valor comercial.

3.8.2 Aplicaciones industriales del H_2V

A escala internacional, el uso del hidrógeno de bajas emisiones se ha concentrado inicialmente en aplicaciones donde este gas ya cumple un rol industrial establecido, como la refinación de petróleo, la producción de amoníaco y la síntesis de metanol. En estos casos, la transición consiste principalmente en reemplazar hidrógeno gris, producido a partir de gas natural mediante reformado de metano con vapor (*Steam methane reforming*)., por hidrógeno de bajas emisiones o H_2V, manteniendo la función industrial del proceso y el producto final. Entre sus principales aplicaciones destacan el hidrotratamiento e hidrocracking en refinerías, la producción de amoníaco mediante el proceso Haber–Bosch y la síntesis de metanol renovable a partir de H_2V y CO_2 capturado [34, 40, 41, 42].

Además de su uso como materia prima, el H_2V se considera una alternativa para descarbonizar sectores industriales de difícil abatimiento. En la siderurgia, puede emplearse como agente reductor en procesos de reducción directa de mineral de hierro, mientras que en procesos térmicos industriales puede utilizarse como combustible para generar calor de alta temperatura cuando la electrificación directa enfrenta restricciones técnicas o económicas. No obstante, su uso en combustión requiere evaluar condiciones específicas de operación, como estabilidad de llama, transferencia de calor, eficiencia del sistema, formación de NO_x, compatibilidad de quemadores y seguridad operacional [38, 43].

La Figura 3.8 resume la cadena de valor del hidrógeno, desde su producción y acondicionamiento hasta sus rutas de almacenamiento, distribución y aplicaciones finales.

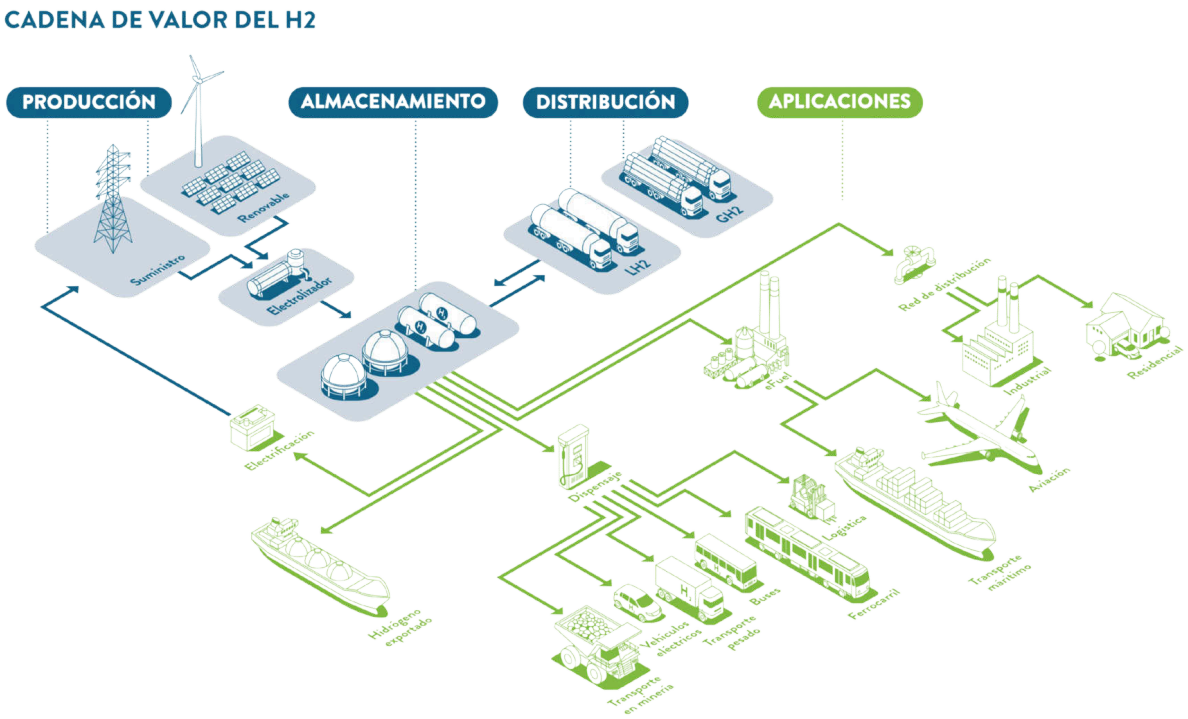


Figura 3.8: Cadena de valor del hidrógeno, considerando las etapas de producción, almacenamiento, distribución y aplicaciones finales [44].

En la industria cementera, el uso de hidrógeno se ha explorado principalmente como una alternativa para reducir las emisiones asociadas a la combustión en hornos de clínker. Entre los antecedentes disponibles destaca CEMEX, que inició pruebas en su planta de Alicante, España, en 2019, incorporando tecnología basada en hidrógeno como parte de la mezcla de combustibles del horno. Posteriormente, la compañía reportó el despliegue de esta solución en sus plantas cementeras europeas, señalando beneficios asociados a la mejora del proceso de combustión, la reducción del consumo de combustibles fósiles y la eliminación de emisiones directas de CO_2 asociadas a la fracción de hidrógeno utilizada [45].

Otro antecedente relevante corresponde a la prueba desarrollada por Heidelberg Materials, a través de Hanson UK, en la planta de Ribblesdale, Reino Unido. En este caso, el horno fue operado a escala comercial con una mezcla de combustibles de emisión neta cero, aumentando progresivamente su participación en el quemador principal. La prueba incluyó hidrógeno transportado en camión, junto con combustibles derivados de subproductos como harina de carne y hueso y glicerina. Estudios posteriores reportaron que el clínker y el cemento producidos cumplieron requisitos composicionales y de resistencia, lo que respalda la factibilidad técnica preliminar del uso de hidrógeno como parte de una estrategia de sustitución energética en la producción de cemento [46, 47].

Estos antecedentes muestran que el hidrógeno puede integrarse técnicamente en sistemas de combustión cementeros, especialmente como parte de mezclas de combustibles. Sin embargo, también evidencian que su aplicación industrial aún se encuentra en una etapa temprana y requiere evaluar variables como suministro continuo, origen renovable del hidrógeno, seguridad operacional, compatibilidad de quemadores, estabilidad térmica, formación de NO_x y efectos sobre la calidad del clínker. Por ello, en este estudio el H_2V se analiza como una alternativa complementaria para abatir emisiones energéticas del proceso, sin sustituir la necesidad de reducir las emisiones de proceso asociadas a la descarbonatación de la caliza.

3.8.3 Industria del hidrógeno verde en Chile

Entre 2021 y 2026, Chile ha registrado avances relevantes en el desarrollo de su industria de hidrógeno verde, reflejados en una cartera creciente de iniciativas en distintas etapas de maduración. Estas incluyen proyectos conceptuales, pilotos, de demostración, en evaluación ambiental, en construcción y algunos en operación. A diciembre de 2025, se identificaban 83 proyectos anunciados en el país, aunque con distintos grados de avance y con información pública variable respecto de su continuidad, por lo que parte de esta cartera podría encontrarse suspendida, reformulada o discontinuada. La distribución territorial de estas iniciativas se presenta en la Figura 3.9 [48].



Figura 3.9: Mapa de proyectos de hidrógeno verde en Chile [48].

El avance de la industria también se observa en el ingreso de proyectos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. A junio de 2026, el Servicio de Evaluación Ambiental registraba 19 iniciativas vinculadas al hidrógeno verde, con una inversión total asociada de aproximadamente US$44.782 millones. De estos proyectos, 10 contaban con aprobación ambiental, 3 se encontraban en calificación, 5 habían sido desistidos y 1 no había sido admitido a tramitación, tal como se resume en la Tabla 3.1 [49].

Tabla 3.1: Resumen de proyectos de hidrógeno verde ingresados al SEA a junio de 2026 [49].

Estado	Cantidad
Aprobados	10
Desistidos	5
En calificación	3
No admitidos	1
Total	19

Desde el punto de vista estratégico, la política pública chilena ha evolucionado desde una visión inicialmente orientada a la exportación hacia un enfoque más equilibrado entre demanda interna, desarrollo territorial y mercados internacionales. La actualización 2026–2030 de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y Derivados refuerza el desarrollo de aplicaciones locales en nichos competitivos, especialmente en sectores de difícil electrificación, como etapa habilitante para consolidar capacidades industriales y capturar posteriormente oportunidades de exportación de hidrógeno y derivados.

En paralelo, Chile ha avanzado en la construcción de un marco regulatorio habilitante. En particular, el Decreto Supremo N°13 (DS13) aprueba el Reglamento de Seguridad de Instalaciones de Hidrógeno, estableciendo requisitos mínimos para instalaciones asociadas a la producción, acondicionamiento, almacenamiento, transferencia y consumo de hidrógeno como recurso energético. Asimismo, la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) cuenta con una guía de apoyo para solicitudes de autorización de proyectos especiales de hidrógeno, orientada a entregar definiciones, recomendaciones, formatos y procedimientos para la tramitación de este tipo de iniciativas [50, 51].

Considerando el alto potencial renovable del país y los bajos costos proyectados de generación eléctrica solar y eólica, diversos escenarios estiman que el H_2V producido en Chile podría alcanzar niveles de competitividad de forma gradual a largo plazo. Como se ilustra en la Figura 3.10, hacia mediados de la década de 2040 se proyecta que el costo nivelado del hidrógeno verde podría ubicarse por debajo de los USD 2,0/kg, acercándose o incluso superando la competitividad del hidrógeno

gris bajo determinadas condiciones de mercado, precio de combustibles fósiles y costo de carbono [52].

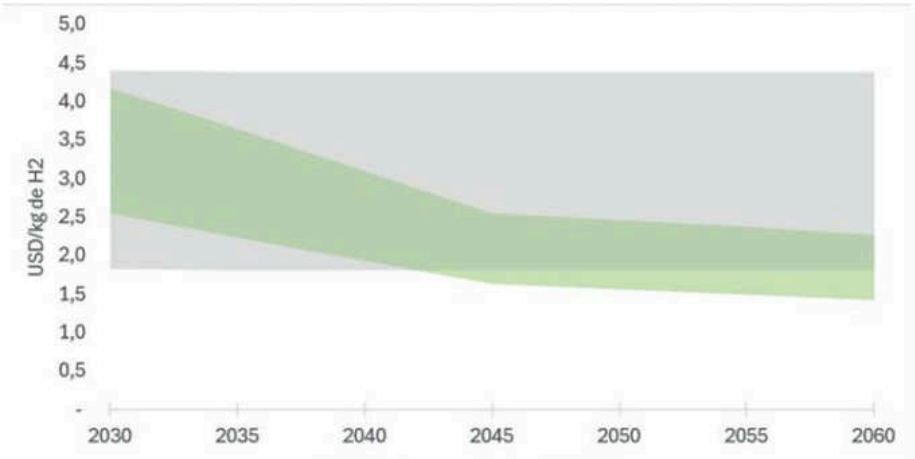


Figura 3.10: Comparación del costo nivelado proyectado del hidrógeno verde en Chile y costos de referencia del hidrógeno gris [52].

Capítulo 4

Marco Teórico

4.1 Definición y clasificación del cemento

De acuerdo con la NCh 148:2021, el cemento se define como un conglomerante hidráulico inorgánico, finamente pulverizado, que al mezclarse con agua forma una pasta capaz de fraguar y endurecer tanto en condiciones expuestas al aire como en ambientes húmedos [53]. Esta definición se basa en su carácter hidráulico, es decir, en la capacidad de desarrollar rigidez y resistencia mediante reacciones con el agua, a diferencia de los conglomerantes aéreos, cuyo endurecimiento depende principalmente de la exposición al aire. En términos generales, un conglomerante corresponde a un material capaz de unir partículas sólidas mediante procesos físico-químicos, formando un cuerpo cohesionado [22, 54].

En el caso del cemento, el fraguado corresponde a la etapa inicial en que la pasta pierde progresivamente su plasticidad y comienza a adquirir rigidez, mientras que el endurecimiento se refiere al desarrollo posterior de resistencia mecánica. Ambos procesos se explican por reacciones de hidratación entre el agua y las fases minerales del cemento, las cuales generan productos sólidos que densifican la matriz cementicia y permiten formar un material resistente, cohesivo y durable en el tiempo [7].

Dentro de los cementos hidráulicos, el cemento Portland ordinario (OPC) constituye la referencia más utilizada en la industria de la construcción. Este se obtiene mediante la molienda conjunta de clínker y una pequeña proporción de sulfato de calcio, usualmente yeso, cuya función principal es regular el tiempo de fraguado [8]. El clínker corresponde a un producto intermedio obtenido por la cocción a alta temperatura de materias primas ricas en calcio, sílice, alúmina y hierro, las cuales reaccionan para formar las principales fases minerales responsables del comportamiento del cemento.

El comportamiento del cemento depende de su composición química y mineralógica. Las principales fases del clínker son el silicato tricálcico (C_3S o alita), asociado al desarrollo de resistencia temprana; el silicato bicálcico (C_2S o belita), relevante para la resistencia a largo plazo; el aluminato tricálcico (C_3A), vinculado al fraguado y a la reacción inicial con el yeso; y el aluminoferrito tetracálcico (C_4AF), que participa en la composición mineralógica del clínker y en algunas propiedades físicas del cemento [55]. El control de estas fases, junto con la selección de adiciones minerales, permite ajustar el desempeño del cemento según los requerimientos de resistencia, durabilidad y exposición ambiental.

La clasificación normativa del cemento se relaciona directamente con las adiciones minerales empleadas en su fabricación. Por ello, a continuación se describen las principales adiciones reconocidas en la normativa chilena y su función dentro de los cementos adicionados.

4.1.1 Adiciones minerales empleadas en cementos

Las adiciones minerales son materiales incorporados al cemento durante su fabricación con el objetivo de modificar sus propiedades, reemplazar parcialmente el clínker o aportar compuestos reactivos al sistema cementicio. En la versión actualizada de la NCh 148, la clasificación del cemento considera cuatro adiciones principales: puzolana, escoria básica, cenizas volantes y agregado tipo A. A diferencia de la versión anterior de la norma, esta actualización incorpora explícitamente las cenizas volantes como adición y normaliza los cementos compuestos, permitiendo la combinación de dos o tres adiciones dentro de un mismo cemento [53, 56].

Esta actualización es relevante para el análisis de cementos de bajo contenido de clínker, ya que amplía el marco normativo para formulaciones con más de una adición mineral. En este contexto, el LC^3 tendría cabida preferentemente dentro de la categoría de cemento compuesto, debido a que su formulación combina clínker, arcilla calcinada, caliza y yeso. En particular, la arcilla calcinada puede cumplir una función puzolánica si satisface los requisitos técnicos aplicables, mientras que la incorporación de caliza y la combinación de adiciones deben evaluarse de acuerdo con las disposiciones normativas vigentes para cementos compuestos y adiciones potenciales.

Puzolana

La puzolana corresponde a un material natural o artificial, generalmente de composición silícea o silicoaluminosa, que por sí solo presenta baja o nula capacidad cementante. Sin embargo, cuando se encuentra finamente dividido y en presencia de agua, puede reaccionar con el hidróxido de calcio, $Ca(OH)_2$, liberado durante la hidratación del cemento Portland, formando compuestos

con propiedades cementantes. Esta reacción, conocida como reacción puzolánica, contribuye al desarrollo de resistencia y puede mejorar propiedades asociadas a la durabilidad del material cementicio [56].

Dentro de esta categoría pueden incorporarse materiales naturales o artificiales que cumplan los requisitos establecidos por la normativa. Para el caso del LC^3, la arcilla calcinada rica en caolinita puede entenderse como una adición de comportamiento puzolánico, siempre que su composición, reactividad y desempeño sean validados conforme a los requisitos técnicos aplicables.

Escoria básica granulada de alto horno

La escoria básica granulada de alto horno es una adición mineral de origen siderúrgico, obtenida como subproducto durante la fabricación de hierro en altos hornos. Cuando la escoria fundida se enfría rápidamente, se obtiene un material vítreo que, luego de ser molido finamente, puede desarrollar propiedades hidráulicas latentes. Esto significa que su reacción con agua es limitada por sí sola, pero puede hidratarse y formar compuestos cementantes en presencia de activadores alcalinos, como los generados durante la hidratación del cemento Portland [56].

Cenizas volantes

Las cenizas volantes corresponden a un material particulado fino generado principalmente durante la combustión de carbón pulverizado. Dependiendo de su composición química y mineralógica, pueden presentar comportamiento puzolánico o cementante. Su incorporación como adición permite valorizar un subproducto industrial y reducir parcialmente el contenido de clínker, contribuyendo a disminuir la intensidad de emisiones del cemento. La actualización normativa resulta relevante porque incorpora explícitamente las cenizas volantes dentro de las adiciones consideradas para uso en cementos [56].

Agregado tipo A

El agregado tipo A corresponde a una adición mineral empleada en la fabricación de cemento, cuyos requisitos se encuentran definidos en la NCh 160:2021 [57]. En términos generales, se asocia a materiales calcáreo-arcillosos calcinados y a compuestos ricos en óxidos de silicio, aluminio y hierro. Es importante distinguir este concepto de los agregados pétreos utilizados en la fabricación de hormigón, como arena, grava o gravilla, ya que en este caso se trata de un material incorporado durante la producción del cemento.

Cementos compuestos y adiciones potenciales

Una de las principales modificaciones de la actualización normativa corresponde a la incorporación de los cementos compuestos, los cuales permiten combinar dos o tres adiciones minerales en una misma formulación. Esta categoría entrega mayor flexibilidad para el desarrollo de cementos con menor contenido de clínker y propiedades ajustadas a distintos requerimientos técnicos y ambientales. Además, la norma abre la posibilidad de incorporar nuevas adiciones potenciales bajo condiciones específicas de validación, lo que resulta relevante para la innovación en cementos de baja huella de carbono [53].

En este marco, el LC^3 se relaciona directamente con la lógica de los cementos compuestos, ya que su desempeño depende de la combinación entre clínker, arcilla calcinada y caliza. No obstante, su uso normativo en Chile requeriría verificar que las materias primas empleadas cumplan los requisitos aplicables y que la formulación final satisfaga las exigencias químicas, físicas y mecánicas establecidas para cementos normalizados.

4.2 Proceso de producción del cemento Portland

La fabricación de cemento Portland es un proceso industrial de alta intensidad energética y complejidad fisicoquímica, en el cual materias primas minerales se transforman en un conglomerante hidráulico mediante una secuencia de etapas térmicas y mecánicas. El proceso completo se estructura en seis fases principales: (1) extracción y preparación de materias primas; (2) homogeneización y molienda cruda; (3) calcinación y clinkerización; (4) enfriamiento y almacenamiento de clínker; (5) molienda final con aditivos; y (6) almacenamiento, envasado y distribución del producto terminado.

4.2.1 Extracción y preparación de materias primas

La obtención de materias primas en la industria cementera se realiza principalmente en canteras a cielo abierto, mediante métodos convencionales de minería que incluyen perforación con martillos neumáticos o hidráulicos, voladura controlada con explosivos, y carguío mediante maquinaria pesada como excavadoras hidráulicas y cargadores frontales. Estas operaciones permiten la extracción de grandes volúmenes de roca caliza, compuesta principalmente de calcita ($CaCO_3$) y dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), y arcillas tales como caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), illita y montmorillonita, que constituyen las fuentes principales de óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro [7, 58, 59].

Los frentes de explotación pueden encontrarse en distintas ubicaciones geográficas dentro del yacimiento, separando la caliza de las arcillas u otros correctores minerales. Una vez extraídos, los

materiales se transportan en camiones de gran tonelaje hacia estaciones de trituración primaria, donde se reduce su tamaño a partículas de 100-150 mm mediante trituradoras de mandíbula o de impacto [8].

Si bien esta fase no involucra transformaciones químicas, representa una fracción relevante de las emisiones indirectas del proceso cementero. La maquinaria empleada en la perforación, extracción y transporte opera típicamente con motores diésel de alta potencia, generando emisiones de CO_2 y contaminantes atmosféricos como NO_x y material particulado. Adicionalmente, el consumo energético asociado a la trituración primaria incrementa la huella ambiental del cemento cuando se utilizan fuentes fósiles poco eficientes. Según estimaciones del análisis de ciclo de vida, la fase de extracción y transporte puede representar entre un 5 y 7% de las emisiones totales del cemento, dependiendo de la localización de la cantera, la logística interna y el tipo de combustible utilizado [8, 54, 58].

4.2.2 Molienda y homogeneización

Tras la etapa de trituración primaria, las materias primas se someten a un proceso de molienda fina para obtener una mezcla homogénea denominada *harina cruda* (*raw meal*), que debe presentar una granulometría inferior a 100µm y una composición química cuidadosamente controlada. Esta molienda se realiza en molinos de bolas o en molinos verticales de rodillos, normalmente en circuito cerrado con clasificadores dinámicos, lo que permite optimizar la eficiencia energética del proceso y mantener la distribución granulométrica requerida [7, 8].

Posteriormente, la harina molida se traslada a silos de homogeneización dotados de sistemas neumáticos o mecánicos de recirculación. Estos silos permiten reducir las variaciones composicionales mediante mezclado continuo, asegurando una alimentación estable al horno rotatorio y mejorando la eficiencia del proceso de sinterización.

La composición química de la materia prima utilizada para la producción de clínker suele expresarse en términos de óxidos equivalentes, principalmente CaO, SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3. En la Tabla 4.1 se presentan rangos referenciales de composición química de harina cruda de cemento reportados en la literatura [60].

Tabla 4.1: Composición química referencial de la harina cruda de cemento (% en masa) [60].

Óxido equivalente	**Rango**
CaO	41,44–43,90
SiO_2	11,57–13,79
Al_2O_3	2,50–3,44
Fe_2O_3	1,78–2,12

4.2.3 Calcinación y clinkerización

La calcinación y la clinkerización corresponden a las transformaciones térmicas centrales en la fabricación del cemento Portland. Aunque ambas ocurren dentro del sistema de horno, no representan el mismo fenómeno. La calcinación corresponde a la descomposición térmica del carbonato de calcio contenido en la caliza, mientras que la clinkerización corresponde a la formación de las fases minerales del clínker a partir de los óxidos presentes en la mezcla cruda.

En plantas modernas de vía seca, la mezcla cruda homogeneizada, también denominada *raw meal*, se alimenta primero a una torre de precalentamiento con ciclones, donde aumenta progresivamente su temperatura hasta aproximadamente los 800°C mediante el contacto con gases calientes provenientes del horno. Luego, el material pasa por el precalcinador, equipo en el cual se aporta calor adicional, oscilando entre los 800-900°C, y se desarrolla una parte importante de la descarbonatación antes de su ingreso al horno rotatorio. En este sentido, la precalcinación permite adelantar la calcinación del carbonato de calcio y reducir la carga térmica del horno principal.

La calcinación corresponde específicamente a la descomposición del carbonato de calcio ($CaCO_3$) para formar óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2). Esta reacción se intensifica a temperaturas del orden de 800–900°C, aunque su avance depende de la composición de la mezcla cruda, la presión parcial de CO_2, el tiempo de residencia y las condiciones de operación del sistema térmico [7]. De forma simplificada, la reacción puede expresarse como:

$$CaCO_3(s) \longrightarrow CaO(s) + CO_2(g) \tag{4.1}$$

El CO_2 liberado en esta etapa corresponde a una emisión de proceso, ya que proviene de la materia prima y no de la combustión del combustible utilizado para aportar calor. Por su parte, el CaO generado constituye uno de los principales reactivos para las etapas posteriores de formación del clínker.

La clinkerización corresponde al conjunto de reacciones mediante las cuales el CaO reacciona con

los óxidos de silicio, aluminio y hierro presentes en la mezcla cruda. Estas reacciones se desarrollan progresivamente en el horno rotatorio y culminan en la zona de mayor temperatura, donde el material alcanza condiciones de sinterización cercanas a 1.450°C. En esta etapa ocurre una fusión parcial de la mezcla, lo que favorece la formación de nódulos de clínker y de sus fases mineralógicas principales [7]. De forma simplificada, estas fases pueden representarse mediante las siguientes reacciones globales:

$$2\,CaO + SiO_2 \longrightarrow 2\,CaO \cdot SiO_2 \quad \text{(Belita, } C_2S\text{)} \tag{4.2}$$

$$3\,CaO + SiO_2 \longrightarrow 3\,CaO \cdot SiO_2 \quad \text{(Alita, } C_3S\text{)} \tag{4.3}$$

$$3\,CaO + Al_2O_3 \longrightarrow 3\,CaO \cdot Al_2O_3 \quad \text{(Aluminato tricálcico, } C_3A\text{)} \tag{4.4}$$

$$4\,CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \longrightarrow 4\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \quad \text{(Aluminoferrito tetracálcico, } C_4AF\text{)} \tag{4.5}$$

El clínker corresponde a los nódulos sinterizados obtenidos a la salida del horno. Su composición mineralógica depende de la dosificación de la mezcla cruda, la temperatura alcanzada, el tiempo de residencia y las condiciones de enfriamiento. La alita (C_3S) se asocia principalmente al desarrollo de resistencia temprana, mientras que la belita (C_2S) contribuye en mayor medida a la resistencia a edades posteriores. El aluminato tricálcico (C_3A) influye en la hidratación inicial y en el fraguado, mientras que el aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) participa en la composición de la fase ferrítica del clínker. Los rangos típicos de composición mineralógica se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Composición mineralógica del clínker (% en masa) [7].

Fase	**Fórmula**	**Abreviatura**	**Rango**	**Valor medio**
Silicato tricálcico	$3CaO\ SiO_2$	C_3S	46–79	61
Silicato bicálcico	$2CaO\ SiO_2$	C_2S	5–30	15
Aluminoferrito tetracálcico	$4CaO\ (Al_2O_3, Fe_2O_3)$	C_4AF	4–16	8
Aluminato tricálcico	$3CaO\ Al_2O_3$	C_3A	6–18	12
Cal libre	CaO	C	0,1–4	1
Óxido de magnesio libre	MgO	M	0,7–1,5	1,5

La configuración general de este sistema se presenta en la Figura 4.1.

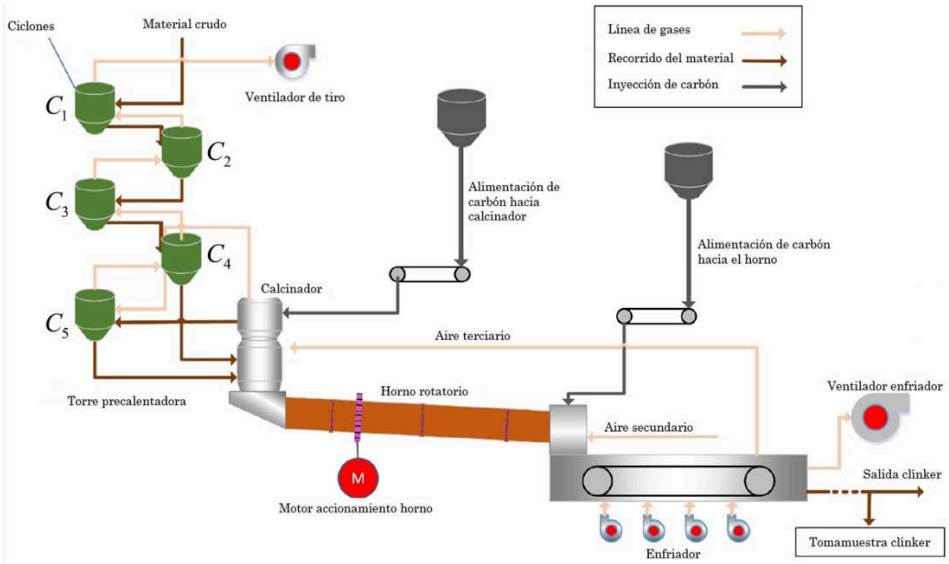


Figura 4.1: Sistema de precalentamiento, precalcinación y horno rotatorio para la producción de clínker [61].

4.2.4 Enfriamiento del clínker

Una vez completada la formación de las fases mineralógicas del clínker en el horno rotatorio, el material fundido alcanza temperaturas cercanas a los 1.450 °C. En este estado, el clínker debe ser enfriado de forma rápida para evitar la recristalización de fases no deseadas, como la belita secundaria, que afectaría negativamente su reactividad hidráulica y las propiedades mecánicas del cemento final.

El enfriamiento se realiza mediante sistemas de parrillas o enfriadores de lecho fluido, que inyectan grandes volúmenes de aire a contracorriente, reduciendo la temperatura del clínker hasta aproximadamente 100 °C. Esta etapa es crítica para estabilizar las fases deseadas como la *alita* (C_3S), principal responsable del desarrollo temprano de resistencias en el cemento [7].

4.2.5 Molienda final y adición de yeso

Una vez enfriado, el clínker se somete a una molienda final en molinos de bolas o de rodillos, proceso en el cual se incorpora una proporción controlada de yeso dihidratado ($CaSO_4 \cdot {}_2H_2O$), generalmente en el rango de 3–5%p/p. Esta molienda conjunta determina la finura del cemento, medida habitualmente como superficie específica (cm^2/g) mediante el método Blaine. La finura influye directamente en la velocidad de hidratación, en el desarrollo inicial de resistencia y en la reología de las mezclas cementicias [54].

4.2.6 Almacenamiento y expedición

El cemento terminado se almacena en silos metálicos herméticos, diseñados para prevenir la absorción de humedad del ambiente, la segregación de partículas y la contaminación cruzada entre diferentes tipos de producto. Estos silos están conectados a sistemas automatizados de pesaje, dosificación y despacho, lo que permite garantizar la homogeneidad y trazabilidad del cemento enviado al cliente final [8].

El flujo general del proceso se sintetiza en la Figura 4.2, correspondiente al diagrama de flujo de procesos (P&ID) incorporado en esta memoria.

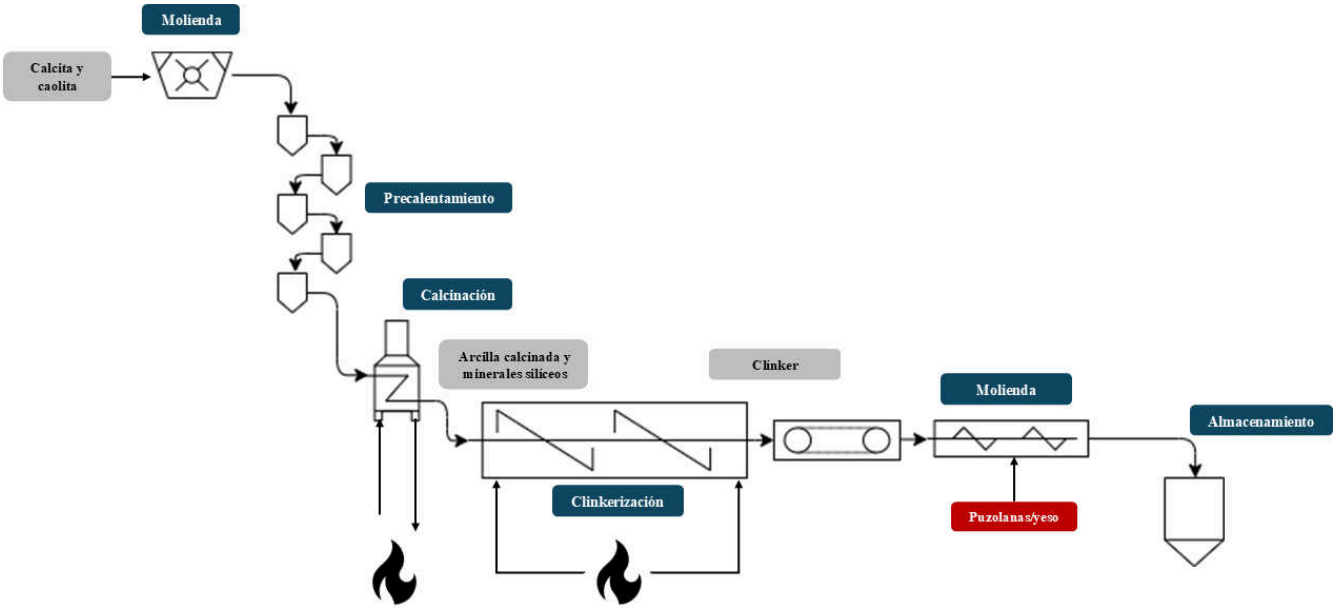


Figura 4.2: Diagrama del proceso de producción de cemento portland ordinario (Elaboración propia)

4.2.7 Consumo energético del proceso cementero

La producción de cemento Portland requiere energía térmica y eléctrica. La energía térmica se concentra principalmente en el sistema de horno, donde se aporta calor para la descarbonatación de la caliza y la formación del clínker. La electricidad, en cambio, se utiliza en operaciones mecánicas y auxiliares, como trituración, molienda de materias primas, ventiladores, enfriadores, captación de polvo, molienda final de cemento y transporte interno de materiales [62].

El consumo térmico depende fuertemente de la tecnología de horno empleada. Los procesos húmedos presentan mayores requerimientos energéticos, debido a la necesidad de evaporar el agua contenida en la alimentación antes de alcanzar las condiciones de calcinación y clinkerización.

En contraste, los procesos modernos de vía seca, equipados con torres de precalentamiento, precalcinadores y enfriadores eficientes, permiten recuperar mejor el calor del sistema y reducir el consumo específico de combustible. Esta diferencia tecnológica se resume en la Tabla 4.3 [62].

Tabla 4.3: Consumo térmico específico según tecnología de fabricación de clínker [62].

Tecnología de horno	**Consumo térmico (GJ/t clínker)**
Proceso húmedo	5,86–6,28
Proceso seco largo	4,60
Precalentador de ciclones de 1 etapa	4,18
Precalentador de ciclones de 2 etapas	3,77
Precalentador de ciclones de 4 etapas	3,55
Precalentador de 4 etapas + precalcinador	3,14
Precalentador de 5 etapas + precalcinador + enfriador eficiente	3,01
Precalentador de 6 etapas + precalcinador + enfriador eficiente	<2,93

Los valores de la Tabla 4.3 muestran una reducción progresiva del consumo térmico a medida que se incorporan etapas de precalentamiento, precalcinación y recuperación de calor. Para el caso chileno, la *Hoja de Ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la industria chilena del cemento* indica que los hornos integrados operan con tecnología de vía seca con precalentador, y reporta un consumo térmico promedio de aproximadamente 3,55 GJ/t clínker en 2017 [8].

En términos eléctricos, el consumo se distribuye entre la preparación de materias primas, la operación del sistema de horno, la molienda final de cemento y el transporte interno. Como se observa en la Tabla 4.4, Ali et al. reportan consumos específicos de 130 kWh/t cemento para procesos secos y 149 kWh/t cemento para procesos húmedos [62]. En el proceso seco, las mayores cargas eléctricas se asocian a la molienda de materias primas y a la molienda final de cemento.

Tabla 4.4: Consumo eléctrico específico por etapa para procesos secos y húmedos de producción de cemento [62].

Etapa del proceso	**Proceso seco (kWh/t cemento)**	**Proceso húmedo (kWh/t cemento)**
Tratamiento y trituración de materias primas	4	3
Molienda de materias primas	44	10
Ventiladores y enfriadores	23	25
Colector de polvo	6	8
Molienda de cemento	45	45
Transporte de materiales dentro de planta	8	58
Electricidad total requerida	**130**	**149**

Las Tablas 4.3 y 4.4 permiten distinguir las dos formas principales de consumo energético del proceso cementero. El consumo térmico se concentra en la producción de clínker y depende principalmente de la tecnología del horno, mientras que el consumo eléctrico se distribuye en operaciones como molienda, ventilación, enfriamiento, captación de polvo y transporte interno. Esta diferencia se sintetiza en la Figura 4.3, donde se observa que la etapa de horno y precalentamiento concentra la mayor demanda energética y las mayores emisiones de CO_2 del proceso.

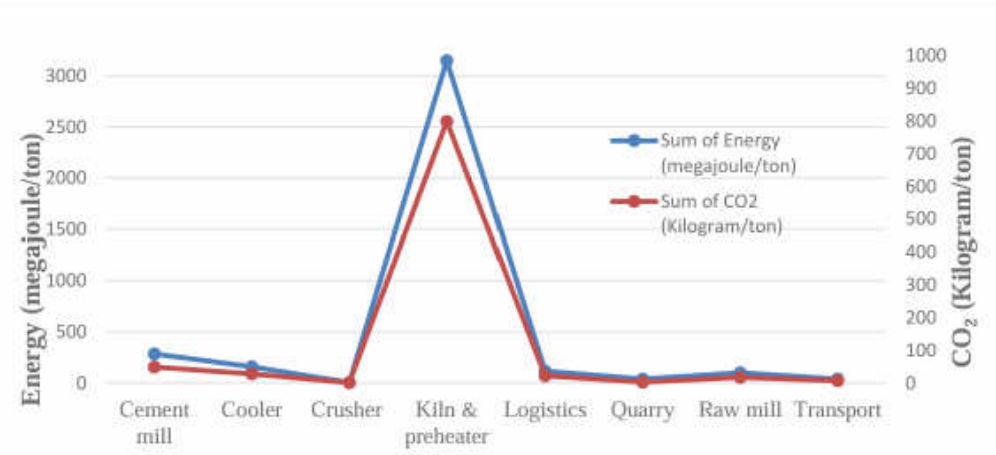


Figura 4.3: Demanda energética y emisiones de CO_2 por etapa del proceso de producción de cemento Portland ordinario [5].

Esta distribución permite entender por qué las emisiones del proceso cementero suelen diferenciarse entre directas e indirectas. Las emisiones directas corresponden a aquellas generadas dentro de los límites operacionales de la planta, principalmente por la descarbonatación de materias primas carbonatadas durante la calcinación y por la combustión de combustibles en el horno y el precalcinador. Las emisiones indirectas, en cambio, se asocian al consumo de electricidad adquirida

externamente y dependen tanto del consumo eléctrico específico de la planta como del factor de emisión de la red.

4.3 Cemento de Caliza y Arcilla Calcinada (LC^3)

El desempeño del LC^3 no se explica únicamente por un efecto de dilución del clínker, sino por la interacción sinérgica entre clínker, arcilla calcinada, caliza y yeso. En términos generales, la hidratación del clínker aporta los productos hidratados primarios, principalmente gel de silicato cálcico hidratado, C–S–H, y portlandita, $Ca(OH)_2$. La arcilla calcinada aporta sílice y alúmina reactiva, las cuales pueden consumir parte de la portlandita y generar productos hidratados secundarios. La caliza, además de actuar como material de relleno y superficie de nucleación, participa químicamente en la formación de fases carboaluminatadas, lo que explica parte de la sinergia entre caliza y arcilla calcinada en sistemas LC^3 [27, 63, 64].

La fase mineralógica clave en la arcilla cruda para la producción de LC^3 es la caolinita, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, debido a que durante la calcinación experimenta un proceso de deshidroxilación que da lugar a la formación de metacaolinita (MK). Esta fase, de carácter amorfo, puede representarse de forma simplificada como $Al_2Si_2O_7$ y constituye el principal aporte reactivo de la arcilla calcinada. Por esta razón, el contenido de caolinita en la arcilla cruda es uno de los principales criterios para evaluar su aptitud como materia prima para cementos LC^3. Se ha reportado que arcillas con contenidos de caolinita del orden de 40% o superiores pueden presentar un desempeño adecuado, particularmente en formulaciones tipo LC^3-50 [65]. No obstante, este valor no debe interpretarse como un límite absoluto, ya que arcillas con menores contenidos de caolinita también pueden ser técnicamente viables si presentan una mineralogía favorable y son calcinadas bajo condiciones adecuadas. Asimismo, incrementos adicionales en el contenido de caolinita no necesariamente se traducen en mejoras proporcionales del desempeño, por lo que la evaluación de la arcilla debe considerar tanto su composición mineralógica como su respuesta a la activación térmica [64, 66].

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4(s) \longrightarrow Al_2Si_2O_7(am) + 2\,H_2O(g) \quad \text{(deshidroxilación de la caolinita)} \tag{4.6}$$

La activación térmica de arcillas caoliníticas se realiza generalmente a temperaturas menores que las requeridas para la clinkerización, típicamente en torno a 700–850 °C, dependiendo de la mineralogía de la arcilla, el tiempo de residencia y el tipo de equipo utilizado. A diferencia de la producción de clínker, este proceso no requiere la descarbonatación masiva de carbonato de calcio, por lo que reduce de manera importante las emisiones de proceso asociadas a dicha reacción. No

obstante, la calcinación de arcillas no debe considerarse un proceso libre de emisiones, ya que puede generar emisiones energéticas según el combustible utilizado y, eventualmente, emisiones de proceso si la materia prima contiene carbonatos u otros compuestos que liberen CO_2 durante el tratamiento térmico [27, 64].

Posteriormente, la metacaolinita puede reaccionar con la portlandita producida durante la hidratación del clínker mediante reacciones puzolánicas. De forma conceptual, esta reacción puede representarse como:

$$\text{Metacaolinita} + \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C–A–S–H} + \text{C–A–H} \quad \text{(productos hidratados secundarios)} \tag{4.7}$$

Esta representación resume el consumo de portlandita y la formación de productos hidratados secundarios, principalmente geles de tipo C–A–S–H y C–A–H. Estos productos contribuyen al desarrollo de resistencia mecánica y a la densificación de la microestructura del material cementicio [63, 64].

Además, la caliza molida, compuesta principalmente por $CaCO_3$, interactúa con los aluminatos disponibles en el sistema, provenientes tanto del clínker como de la arcilla calcinada, favoreciendo la formación de fases carboaluminatadas. Una reacción simplificada para la formación de monocarboaluminato cálcico hidratado a partir del aluminato tricálcico puede expresarse como:

$$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaCO}_3 + 11\,\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O} \quad \text{(monocarboaluminato)} \tag{4.8}$$

El coeficiente 11 asociado al agua proviene de la fórmula hidratada convencional del monocarboaluminato cálcico, usualmente representado como $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ [67]. En sistemas LC^3, la formación de este tipo de fases contribuye a estabilizar productos hidratados ricos en aluminio y a mejorar el empaquetamiento y refinamiento de la matriz cementicia [63, 64].

Esta sinergia química y física entre clínker, arcilla calcinada y caliza permite que formulaciones tipo LC^3-50 alcancen resistencias mecánicas comparables a cementos Portland convencionales, incluso con reducciones importantes del factor clínker [63, 65]. Asimismo, la literatura reporta mejoras relevantes en indicadores de durabilidad, especialmente frente al ingreso de cloruros y a la expansión por reacción álcali-sílice, lo que posiciona al LC^3 como una alternativa de bajo clínker

para reducir la intensidad de emisiones de la industria cementera [64].

La presencia de yeso cumple un rol crítico en el balance de sulfatos del sistema. En cementos LC^3, el pico de hidratación asociado a las fases aluminato depende del contenido de yeso y de la reactividad de la arcilla calcinada. Si el sulfato disponible se agota demasiado temprano, el pico de aluminato puede adelantarse, lo que se ha asociado con un menor desarrollo de resistencia a edades posteriores. Por esta razón, la dosificación de yeso no debe tratarse como una constante arbitraria, sino como una variable de formulación que afecta la cinética de hidratación y el desempeño mecánico [27].

4.3.1 Composición típica y variantes de formulación

La formulación más estudiada en la literatura corresponde al LC^3-50, constituido típicamente por 50% de clínker, 30% de arcilla calcinada, 15% de caliza y 5% de yeso. Esta composición mantiene una relación másica arcilla calcinada/caliza de 2:1, que favorece la disponibilidad de alúmina reactiva para la formación de carboaluminatos [27, 28]. Sin embargo, el LC^3 debe entenderse como una familia de cementos y no como una formulación única. La relación óptima entre arcilla calcinada y caliza depende de la mineralogía de la arcilla, de la composición del clínker, de la finura de los componentes y del nivel de resistencia objetivo.

En la Tabla 4.5 se presentan formulaciones representativas reportadas en la literatura para cementos LC^3-50 y LC^3-35. En este último caso, el menor contenido de clínker aumenta el potencial de reducción de emisiones, pero también incrementa la importancia de la reactividad de la arcilla calcinada, del control de molienda y de la demanda de aditivos.

Tabla 4.5: Formulaciones representativas de cementos LC^3 en porcentaje másico [27, 68].

Tipo de cemento	**Clínker**	**Arcilla calcinada**	**Caliza**	**Yeso**
LC^3-50, relación 2:1	50,0	30,0	15,0	5,0
LC^3-50, relación 1,5:1	50,0	27,0	18,0	5,0
LC^3-50, relación 1:1	50,0	22,5	22,5	5,0
LC^3-35, relación 2:1	35,0	40,0	20,0	5,0
LC^3-35, relación 1,5:1	35,0	36,0	24,0	5,0
LC^3-35, relación 1:1	35,0	30,0	30,0	5,0

Desde el punto de vista de modelación, estas formulaciones permiten definir balances de masa directamente en función del factor clínker y de la relación arcilla/caliza. Para una tonelada de cemento LC^3, el balance global puede expresarse como:

$$\dot{m}_{\mathrm{LC3}} = \dot{m}_{\mathrm{cl}} + \dot{m}_{\mathrm{ac}} + \dot{m}_{\mathrm{cal}} + \dot{m}_{\mathrm{yeso}} \tag{4.9}$$

donde m_{cl} es la masa de clínker en t/año, m_{ac} la masa de arcilla calcinada en t/año, m_{cal} la masa de caliza molida en ton/añoy m_{yeso} la masa de yeso en ton/año. El factor clínker se define entonces como:

$$f_{\mathrm{cl}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{cl}}}{\dot{m}_{\mathrm{LC3}}} \tag{4.10}$$

4.3.2 Producción de arcilla calcinada

La producción de LC^3 requiere incorporar una etapa de activación térmica de la arcilla, adicional al proceso convencional de fabricación de cemento Portland. Durante esta operación, la caolinita se transforma mediante deshidroxilación en metacaolinita, un aluminosilicato de baja cristalinidad y elevada reactividad puzolánica. La temperatura de tratamiento depende de la mineralogía de la arcilla, el tiempo de residencia y la tecnología de calcinación, pero generalmente se encuentra entre 700 °C y 850 °C. Temperaturas superiores a aproximadamente 900 °C pueden disminuir la reactividad debido a fenómenos de sinterización o recristalización hacia fases menos reactivas, como espinela, mullita o cristobalita [27].

La principal diferencia respecto de la producción de clínker es que la activación de la arcilla ocurre a menor temperatura y no requiere la descarbonatación de la caliza ni la formación de fases minerales a temperaturas cercanas a 1450 °C. En la modelación desarrollada en esta tesis, la calcinación de arcilla se representa mediante la deshidroxilación de la caolinita, reacción que libera agua y no genera CO_2. Por esta razón, se consideran nulas las emisiones de proceso asociadas a esta etapa, mientras que sus emisiones directas dependen del combustible utilizado para suministrar la energía térmica. Este supuesto corresponde a la composición de arcilla adoptada en el modelo; la presencia de carbonatos en una materia prima real requeriría cuantificar separadamente las emisiones generadas por su descomposición térmica [27, 64].

Como referencia, un estudio de ciclo de vida aplicado a cementos LC^3 producidos con residuos caoliníticos de la Amazonía brasileña utilizó demandas energéticas específicas de 3.10 GJ/t para la producción de clínker y de 1.88 GJ/t para la producción de metacaolinita, a temperaturas de referencia de 1450 °C y 800 °C, respectivamente [68]. La Tabla 4.6 presenta la comparación entre ambos procesos.

Tabla 4.6: Parámetros térmicos comparativos de la producción de clínker Portland y metacaolinita [68].

Parámetro	**Clínker Portland**	**Metacaolinita**
Temperatura de referencia	1450 °C	800 °C
Demanda energética específica	3.10 GJ/t	1.88 GJ/t

El mismo estudio reporta reducciones del consumo energético de aproximadamente 28–33% para formulaciones con 50% de clínker y de 37–44% para formulaciones con 35% de clínker, ambas evaluadas respecto del OPC [68]. Estas diferencias responden tanto al menor requerimiento energético específico de la calcinación de arcilla como a la disminución de la cantidad de clínker producida por tonelada de cemento. La Figura 4.4 muestra este efecto para distintas formulaciones de LC^3 y relaciones másicas entre arcilla calcinada y caliza.

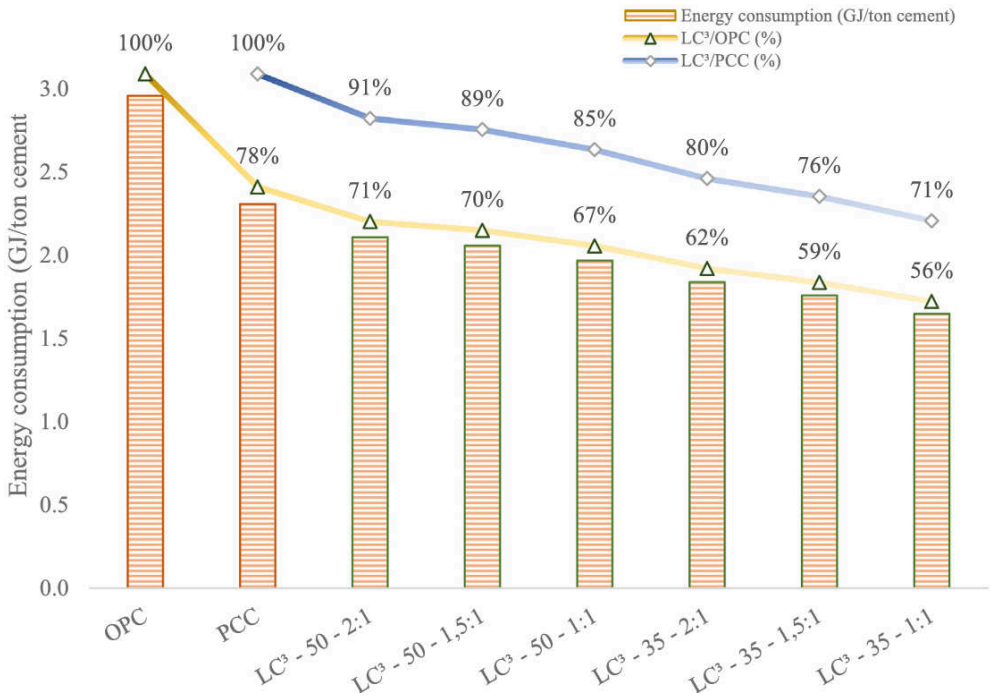


Figura 4.4: Consumo energético para OPC, Cemento Portland Puzolánico (PPC) y formulaciones LC^3 con distintos factores de clínker [68].

Nota: Las relaciones 2:1, 1,5:1 y 1:1 indican la proporción másica entre arcilla calcinada y caliza utilizada en cada formulación.

El requerimiento térmico total de la calcinación de arcilla se descompone en la energía necesaria para calentar el material, evaporar su humedad libre, producir la deshidroxilación y compensar las pérdidas térmicas del sistema:

$$Q_{\text{calcinacion}} = Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{evap}} + Q_{\text{deshidrox}} + Q_{\text{perdidas}} \tag{4.11}$$

En esta expresión, Q_{sensible} corresponde al calor requerido para elevar la temperatura del sólido; Q_{evap}, a la energía necesaria para eliminar la humedad libre; $Q_{\text{deshidrox}}$, a la energía asociada a la transformación de caolinita en metacaolinita; y Q_{perdidas}, a las pérdidas por gases de salida, radiación, convección e ineficiencias del equipo.

Desempeño ambiental y técnico-económico del LC^3

El beneficio ambiental del LC^3 se explica principalmente por la reducción del factor clínker, componente que concentra la mayor parte de las emisiones de proceso y de combustión del cemento. El clínker desplazado se reemplaza por arcilla calcinada y caliza, cuya preparación presenta una menor intensidad de emisiones debido a la menor temperatura de tratamiento de la arcilla y, cuando la materia prima no contiene carbonatos, a la ausencia de emisiones de proceso asociadas a la liberación de CO_2. La magnitud de la reducción depende, sin embargo, de la tecnología de calcinación, el combustible utilizado, la humedad y mineralogía de la arcilla, el consumo eléctrico y las distancias de transporte [28, 68].

Un estudio de ciclo de vida aplicado a cementos producidos con residuos caoliníticos de la Amazonía brasileña reportó emisiones de 810 kgCO2/t para OPC y de 657 kgCO2/t para un cemento Portland compuesto de referencia. Para las formulaciones LC^3-50 y LC^3-35, las emisiones se situaron entre 509–526 y 402–425 kg CO_2/t de cemento, respectivamente, como se resume en la Tabla 4.7 [68].

Tabla 4.7: Emisiones específicas reportadas para cementos OPC y LC^3 [68].

Tipo de cemento	**Emisiones (kg CO_2/t cemento)**	**Característica de referencia**
OPC	810	Cemento Portland ordinario
LC^3-50	509–526	Factor clínker de 50%
LC^3-35	402–425	Factor clínker de 35%

El transporte de materias primas puede reducir parcialmente las ventajas que presenta el LC^3. En el caso brasileño, las emisiones logísticas aumentaron en las formulaciones con mayor sustitución de clínker debido a la distancia entre los depósitos de material caolinítico y la planta cementera, aunque no llegaron a contrarrestar la reducción total obtenida. Los estudios desarrollados para Cuba también identificaron la distancia de abastecimiento de arcilla como una variable relevante y evaluaron configuraciones con yacimientos situados a distancias del orden de 100 km de la planta

[28, 68].

La Figura 4.5 compara las rutas de producción de OPC, cemento Portland puzolánico y LC^3. En este último caso, la incorporación de una etapa específica de calcinación de arcilla aumenta el número de operaciones requeridas, pero permite reducir la producción de clínker por tonelada de cemento. En consecuencia, parte de las emisiones evitadas en el horno de clínker se sustituye por emisiones asociadas a la activación térmica, molienda y transporte de las nuevas adiciones.

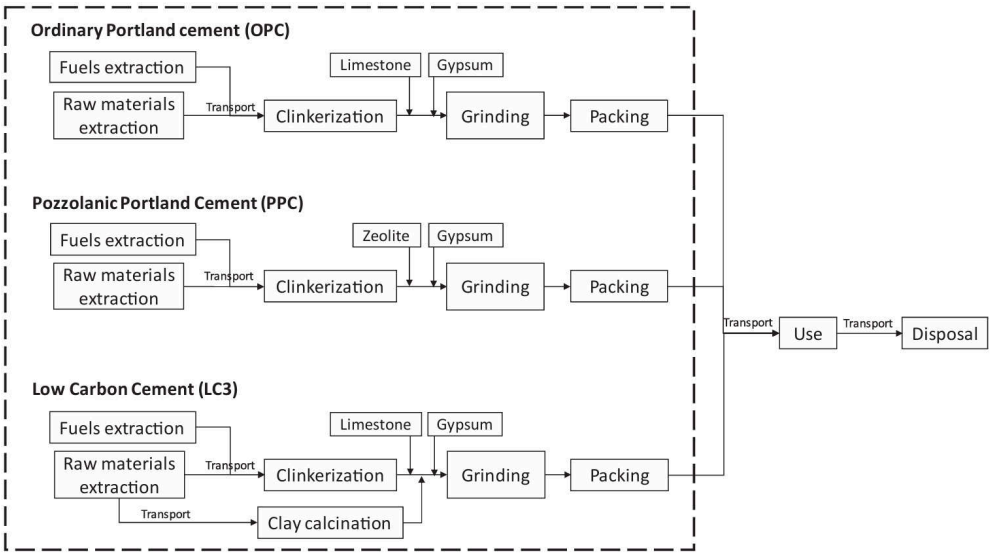


Figura 4.5: Esquemas de producción de OPC, cemento Portland puzolánico y LC^3 [28].

Para estructurar esta comparación, las emisiones totales por tonelada de cemento pueden desagregarse en emisiones de proceso, combustión, consumo eléctrico y transporte:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{proc}} + E_{\text{comb}} + E_{\text{elec}} + E_{\text{trans}} \tag{4.12}$$

En la Ecuación 4.12, todas las contribuciones se expresan en kg CO_2/t de cemento. En particular, E_{proc} corresponde principalmente a las emisiones derivadas de la descarbonatación de las materias primas utilizadas para producir clínker; E_{comb}, a las emisiones generadas por la combustión en las operaciones térmicas; E_{elec}, a las emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico de molienda y equipos auxiliares; y E_{trans}, a las emisiones derivadas del transporte de materias primas y productos intermedios.

La Tabla 4.8 presenta antecedentes técnico-económicos reportados para calcinadores flash y hornos rotatorios en tres configuraciones industriales: una planta cementera integrada, una estación de molienda existente y un proyecto *greenfield*. Los valores incluyen dos condiciones logísticas de

abastecimiento de arcilla, correspondientes a distancias de 10 y 200 km desde la planta.

Tabla 4.8: Comparación técnico-económica de alternativas para la producción de LC^3 [69].

Configuración	**Tecnología**	**Capacidad de LC^3 (Mt/año)**	**CAPEX (MMUSD)**	**Consumo térmico (MJ/kg arcilla)**	**Costo de LC^3 a 10/200 km (USD/t)**	**IRR a 10/200 km (%)**
Planta cementera integrada	Calcinador flash	1,00	10,30	2,0	23,4 / 27,3	63 / 22
Planta cementera integrada	Horno rotatorio	1,00	6,60	2,8	24,2 / 28,1	87 / 24
Estación de molienda existente	Calcinador flash	0,413	8,15	2,5	32,1 / 36,0	75 / 55
Estación de molienda existente	Horno rotatorio	0,413	6,10	3,0	32,6 / 36,5	98 / 71
Proyecto *greenfield*	Calcinador flash	0,413	27,00	2,5	32,1 / 36,0	17 / 9
Proyecto *greenfield*	Horno rotatorio	0,413	26,00	3,0	32,6 / 36,5	17 / 9

Nota: en las columnas de costo e IRR, el primer valor corresponde al abastecimiento de arcilla desde una distancia de 10 km y el segundo, desde 200 km.

Además de las configuraciones específicas de calcinación, la literatura también compara el desempeño ambiental y económico global de cementos OPC y LC^3. La Figura 4.6 presenta una comparación entre las emisiones de CO_2 y los costos de producción de ambas alternativas, considerando la implementación de las mejores tecnologías disponibles en cada caso.

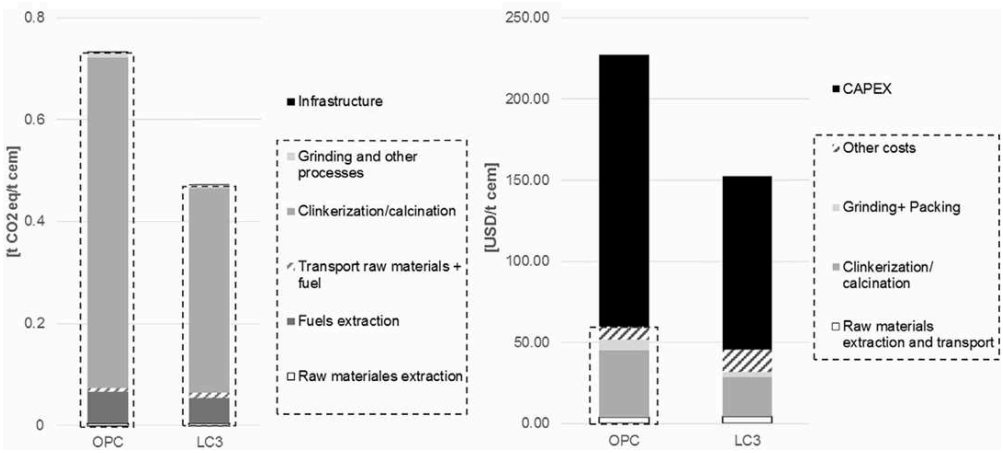


Figura 4.6: Comparación de las emisiones de CO_2 y los costos de producción de OPC y LC^3, considerando la implementación de las mejores tecnologías disponibles en ambos casos [28].

4.4 Hidrógeno verde como combustible para procesos térmicos cementeros

4.4.1 Rol del hidrógeno verde en la descarbonización térmica industrial

El hidrógeno verde corresponde al hidrógeno producido mediante procesos alimentados con energía renovable, principalmente electrólisis del agua. Su utilización se ha planteado como una alternativa

para la descarbonización de procesos industriales que requieren calor de alta temperatura y que presentan limitaciones para su electrificación directa. En la industria cementera, su aplicación se relaciona con la sustitución total o parcial de combustibles fósiles en equipos como el horno rotatorio y el precalcinador, así como en sistemas de calcinación de arcilla destinados a la producción de LC^3 [5].

La combustión del hidrógeno corresponde a una reacción exotérmica de oxidación, en la cual el H_2 reacciona con oxígeno para formar agua y liberar energía térmica:

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O + \text{calor} \tag{4.13}$$

Debido a que la molécula de H_2 no contiene carbono, su combustión no genera emisiones directas de CO_2. Sin embargo, cuando se utiliza aire como comburente, las altas temperaturas de llama pueden favorecer la formación de óxidos de nitrógeno, NO_x. Por esta razón, su implementación industrial requiere considerar el diseño de los quemadores, la relación aire-combustible, la distribución térmica y las condiciones de operación del sistema [70, 71].

El hidrógeno presenta propiedades energéticas distintas de las de los combustibles fósiles convencionales. Por unidad de masa, posee un poder calorífico inferior de aproximadamente 120 MJ/kg, valor definido para su combustión completa en condiciones de referencia cercanas a 25 °C y 1 bar. Este valor es superior al del gas natural, la gasolina o el diésel. Sin embargo, en condiciones ambientales, el hidrógeno gaseoso presenta una baja densidad física y ocupa un volumen considerable. En consecuencia, aunque contiene una elevada cantidad de energía por unidad de masa, requiere compresión o licuefacción para almacenar y suministrar cantidades relevantes de energía en un volumen reducido [72].

La Figura 4.7 compara la densidad energética gravimétrica y volumétrica del hidrógeno con la de distintos combustibles líquidos y gaseosos. El H_2 presenta un mayor contenido energético por unidad de masa que los demás combustibles representados, pero una menor cantidad de energía almacenada por unidad de volumen, especialmente cuando se encuentra comprimido a 350 o 700 bar. Su almacenamiento en estado líquido aumenta la densidad energética volumétrica, aunque esta continúa siendo inferior a la de combustibles líquidos como el diésel, la gasolina o el propano.

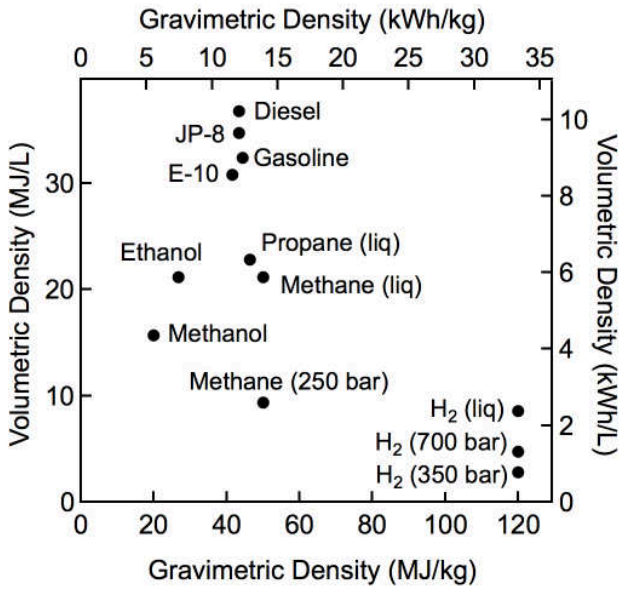


Figura 4.7: Comparación de la densidad energética gravimétrica y volumétrica del hidrógeno almacenado en distintas condiciones y de combustibles convencionales [73].

La Tabla 4.9 presenta propiedades relevantes para el uso industrial del hidrógeno. Además de su poder calorífico y densidad, se incluyen parámetros relacionados con su inflamabilidad, ignición y velocidad de propagación de llama.

Tabla 4.9: Propiedades relevantes del hidrógeno como combustible industrial [72].

Propiedad	**Valor referencial**
Poder calorífico inferior	120 MJ/kg
Rango de inflamabilidad en aire	4–75% vol.
Energía mínima de ignición	0.02 mJ
Velocidad laminar de llama	3.51 m/s
Densidad del H_2 gaseoso (20 °C y 1 atm)	0.083 75 kg/m^3
Densidad del H_2 líquido (−253 °C y 1 atm)	67.8 kg/m^3

Desde el punto de vista ambiental, el desempeño del hidrógeno depende del límite utilizado para contabilizar las emisiones. Si se consideran únicamente las emisiones generadas en el punto de uso, su factor de emisión directa de CO_2 por combustión es nulo. En un enfoque de ciclo de vida, en cambio, deben incluirse las emisiones asociadas a la generación de electricidad, producción, acondicionamiento, compresión, almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno. La magnitud de estas emisiones depende de la fuente energética, la tecnología de producción y la configuración de su cadena de suministro.

La Tabla 4.10 presenta valores referenciales del poder calorífico inferior y del factor de emisión directa de CO_2 para el hidrógeno y algunos combustibles utilizados como fuente térmica en procesos industriales. Mientras los factores de emisión de los combustibles fósiles dependen de su contenido de carbono y composición, el factor de combustión del hidrógeno es igual a cero.

Tabla 4.10: Comparación referencial de combustibles para aporte térmico en procesos cementeros [70, 74, 75].

Combustible	**PCI referencial (MJ/kg)**	**Factor de emisión directa (kg CO_2/GJ)**
Hidrógeno verde	120	0
Gas natural	47,8	∼56
Carbón	21	∼95
Coque de petróleo	32.49 MJ/kg	∼98

4.4.2 Tecnologías para la implementación de hidrógeno en procesos cementeros

La incorporación de hidrógeno verde en la producción de clínker puede plantearse mediante distintas configuraciones tecnológicas, definidas por el grado de sustitución del combustible fósil, el punto de inyección del H_2, el uso de aire u oxígeno como comburente y la integración con sistemas de captura de CO_2.

Williams et al. evaluaron seis configuraciones mediante una simulación conceptual del proceso de producción de clínker desarrollada en Aspen Plus. Las configuraciones evaluadas incluyen un caso de referencia con gas natural, un caso de oxicombustión con gas natural y cuatro escenarios con distintos grados de sustitución por hidrógeno. El caso NG representa una planta alimentada con gas natural en el calcinador y el horno, con combustión con aire y captura postcombustión mediante absorción con aminas. El caso Oxy mantiene el gas natural como combustible, pero reemplaza el aire por oxígeno para aumentar la concentración de CO_2 en los gases de salida y facilitar su separación y compresión [71].

Los escenarios H2-a, H2-b, H2-c y H2-d incorporan hidrógeno en distintos grados. H2-a considera una sustitución parcial del gas natural por H_2 en el horno. H2-b utiliza H_2 en una configuración de calcinación indirecta, que mantiene separados los gases de combustión y el CO_2 liberado por la descarbonatación. H2-c emplea exclusivamente H_2 en el calcinador y una mezcla de gas natural e hidrógeno en el horno. Finalmente, H2-d considera la sustitución completa del gas natural por H_2 tanto en el calcinador como en el horno. En los escenarios modelados, el hidrógeno se produce

dentro de la planta mediante electrólisis y el oxígeno coproducto se utiliza como comburente [71].

La Tabla 4.11 resume las características principales de las seis configuraciones consideradas en el estudio.

Tabla 4.11: Configuraciones tecnológicas para la producción de clínker evaluadas mediante simulación por Williams et al. [71].

Caso	**Calcinador**	**Horno**	**Descripción general**
NG	100% gas natural	100% gas natural	Caso de referencia con combustión convencional y captura postcombustión mediante absorción con aminas.
Oxy	Gas natural + O_2	Gas natural + O_2	Oxicombustión con gas natural, seguida de separación y compresión de CO_2.
H2-a	Gas natural + O_2	80% gas natural + 20% H_2	Sustitución parcial del gas natural por hidrógeno en el horno.
H2-b	H_2 + aire	80% gas natural + 20% H_2	Calcinación indirecta con combustión separada de H_2 para suministrar calor al calcinador.
H2-c	100% H_2 + O_2	80% gas natural + 20% H_2	Sustitución completa por H_2 en el calcinador y parcial en el horno.
H2-d	100% H_2 + O_2	100% H_2 + O_2	Sustitución completa del gas natural por H_2 en el calcinador y el horno.

Escenario H2-d: sustitución completa del combustible fósil por hidrógeno

El escenario H2-d representa la configuración con mayor sustitución de combustible fósil dentro del estudio de Williams et al. En este caso, el modelo elimina el consumo de gas natural en el calcinador y el horno, y representa el suministro de energía térmica mediante combustión de hidrógeno con oxígeno en una configuración de calcinación directa.

La simulación establece temperaturas de aproximadamente 900 °C en el calcinador y 1500 °C en la zona de sinterización. Bajo los balances de masa y energía y los supuestos incorporados en el modelo, el hidrógeno suministra la energía requerida para alcanzar las temperaturas de referencia del proceso. Sin embargo, el estudio no evalúa experimentalmente la estabilidad de la llama, la transferencia de calor al material, el desempeño de los quemadores, la calidad del clínker ni la operación continua del sistema [71].

La Figura 4.8 presenta el diagrama conceptual utilizado para modelar la configuración H2-d. El esquema incluye la producción de hidrógeno mediante electrólisis, el uso del oxígeno coproducto

como comburente, la combustión de H_2 en el calcinador y el horno rotatorio, la recirculación de gases, la recuperación de calor mediante un ciclo orgánico de Rankine y la separación y compresión del CO_2 generado en el proceso.

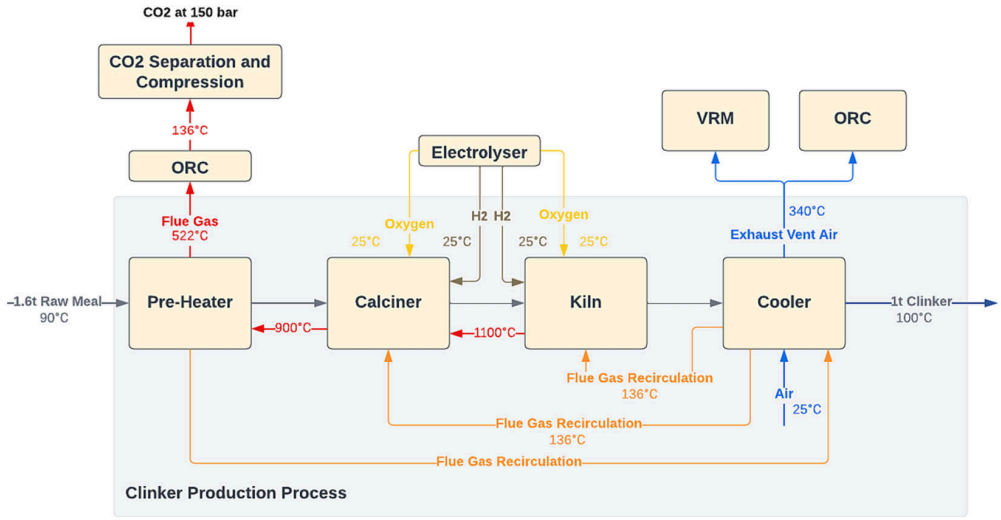


Figura 4.8: Diagrama conceptual del escenario H2-d, basado en la sustitución completa del gas natural por hidrógeno y la combustión con oxígeno [71].

La producción conjunta de H_2 y O_2 mediante electrólisis permite utilizar directamente el oxígeno como comburente, sin incorporar una unidad adicional de separación de aire. La oxicombustión reduce la presencia de nitrógeno en los gases de salida y genera una corriente con mayor concentración de CO_2, facilitando su acondicionamiento posterior. El esquema también considera la recirculación de parte de los gases para controlar las condiciones térmicas del proceso [71].

Los resultados de la simulación para H2-d estiman consumos de 19.08 kgH2/t de clínker en el calcinador y de 14.94 kgH2/t de clínker en el horno, equivalentes a un consumo total de 34.02 kgH2/t de clínker. El aporte energético total del combustible alcanza 4082.40 MJ/t de clínker, frente a 3877.05 MJ/t de clínker en el caso de referencia con gas natural. Esta diferencia se relaciona, dentro del modelo, con la composición y recirculación de los gases y con la configuración de oxicombustión adoptada [71].

La Tabla 4.12 presenta los principales parámetros técnicos obtenidos para esta configuración.

Tabla 4.12: Principales parámetros técnicos modelados para el escenario H2-d de Williams et al. [71].

Parámetro	**Valor reportado para H2-d**
Combustible en el calcinador	100% H_2
Combustible en el horno	100% H_2
Comburente	O_2
Modo de calcinación	Directa
Hidrógeno en el calcinador	19,08 kg H2/t de clínker
Hidrógeno en el horno	14,94 kg H2/t de clínker
Hidrógeno total	34,02 kg H2/t de clínker
Aporte energético del combustible	4082,40 MJ/t de clínker
Temperatura de calcinación modelada	899,01 °C
Temperatura de sinterización modelada	1502,61 °C
CO_2 generado	559,11 kg CO2/t de clínker

Para el escenario H2-d, la simulación estima una generación de 559.11 kgCO2/t de clínker, atribuida principalmente a la descarbonatación de la materia prima. El caso de referencia con gas natural presenta una generación de 771.82 kgCO2/t de clínker, por lo que la diferencia modelada alcanza 212.71 kgCO2/t de clínker, equivalente a 27,6% [71].

En conjunto, el estudio proporciona una referencia conceptual para representar la sustitución completa de un combustible fósil, como lo es el gas natual, por hidrógeno en la producción de clínker. La configuración integra la producción de H_2 mediante electrólisis, el aprovechamiento del oxígeno coproducto, la oxicombustión y la separación de CO_2.

4.4.3 Requerimientos de almacenamiento, suministro y adaptación en planta

El uso de hidrógeno como combustible industrial requiere infraestructura específica para su recepción, almacenamiento, acondicionamiento y distribución. Debido a su baja densidad en estado gaseoso, normalmente se emplean sistemas presurizados que incluyen estanques, regulación de presión, tuberías dedicadas, válvulas compatibles y equipos de detección de fugas. Su amplio rango de inflamabilidad y baja energía de ignición también exigen medidas de ventilación, control de fuentes de ignición, selección de materiales y distancias de seguridad [72].

La sustitución de combustibles convencionales por H_2 también puede requerir modificaciones en los quemadores y sistemas de control. Su mayor velocidad de llama puede alterar la estabilidad de la combustión, la distribución de temperatura y la formación de NO_x, por lo que su implementación

debe considerar el diseño del quemador y las condiciones operacionales del horno o calcinador [70, 71].

Cuando el hidrógeno es suministrado por terceros, los principales componentes económicos corresponden al costo de compra del combustible y a la infraestructura requerida para su utilización dentro de la planta. Esta infraestructura puede incluir almacenamiento, acondicionamiento de presión, redes de distribución, sistemas de seguridad y modificaciones en los equipos de combustión. En esta modalidad de suministro, las inversiones asociadas a electrólisis, generación eléctrica renovable y tratamiento de agua se encuentran fuera de la planta cementera.

La cantidad de hidrógeno requerida depende de la demanda térmica que debe ser suministrada por este combustible y de su poder calorífico inferior. Esta relación puede expresarse mediante la Ecuación 4.14:

$$m_{\mathrm{H_2}} = \frac{Q_{\mathrm{th,H_2}}}{PCI_{\mathrm{H_2}}} \tag{4.14}$$

donde $m_{\mathrm{H_2}}$ corresponde a la masa de hidrógeno requerida, en kg H_2/año; $Q_{\mathrm{th,H_2}}$, a la demanda térmica anual cubierta por hidrógeno, en GJ/año; y $PCI_{\mathrm{H_2}}$, al poder calorífico inferior del hidrógeno, en GJ/kg H_2. Cuando el combustible se utiliza en más de una operación térmica, $Q_{\mathrm{th,H_2}}$ corresponde a la suma de las demandas de dichas etapas.

Una vez determinado el consumo anual, el costo de adquisición del hidrógeno se obtiene a partir de su precio unitario, como se indica en la Ecuación 4.15:

$$C_{\mathrm{H_2}} = m_{\mathrm{H_2}} \cdot P_{\mathrm{H_2}} \tag{4.15}$$

donde $C_{\mathrm{H_2}}$ corresponde al costo anual de compra, en USD/año, y $P_{\mathrm{H_2}}$, al precio de suministro, en USD/kg H_2. Este precio constituye una variable relevante para la evaluación económica debido a la amplitud de los valores reportados y a la ausencia de precios industriales consolidados para el suministro continuo de hidrógeno verde a gran escala en Chile [76].

Las emisiones directas asociadas a la combustión de un combustible se estiman a partir de la energía térmica suministrada y de su factor de emisión energético. Esta relación se presenta en la Ecuación 4.16:

$$E_{\mathrm{comb},j} = Q_{\mathrm{th},j} \cdot FE_j \tag{4.16}$$

donde $E_{\mathrm{comb},j}$ corresponde a las emisiones directas generadas por el combustible j; $Q_{\mathrm{th},j}$, a la energía térmica suministrada, en GJ/año; y FE_j, a su factor de emisión energético. Si el factor se

expresa en kg CO_2/GJ, las emisiones resultantes se obtienen en kg CO_2/año y, posteriormente, pueden convertirse a t CO_2/año.

La reducción total de emisiones de cada escenario se determina comparando sus emisiones con las del caso base, de acuerdo con la Ecuación 4.17:

$$ER_s = E_{\text{total,base}} - E_{\text{total},s} \tag{4.17}$$

donde ER_s corresponde a la reducción anual de emisiones del escenario s, en t CO_2e/año; $E_{\text{total,base}}$, a las emisiones totales del escenario convencional; y $E_{\text{total},s}$, a las emisiones totales del escenario evaluado. Esta comparación incorpora las categorías de emisiones definidas dentro de los límites del sistema y evita atribuir la reducción únicamente a la sustitución del combustible.

Los valores de demanda térmica, precio del H_2, factores de emisión y demás supuestos utilizados en estas relaciones se definen en el capítulo de Metodología. El dimensionamiento del almacenamiento y la estimación del CAPEX incremental asociado al sistema de H_2 se desarrollan en el Anexo D.

4.5 Mercados de carbono

Los mercados de carbono pueden entenderse como arreglos institucionales orientados a reconocer económicamente la reducción, remoción o evitación de emisiones. Su importancia para la industria radica en que permite acercar el valor privado de la inversión al valor social de la mitigación. En sectores con altos costos de reconversión, como el cemento, esta señal puede modificar la frontera de factibilidad económica de tecnologías que, de otra manera, permanecerían fuera del rango de inversión racional.

4.5.1 Concepto de ITMO y cooperación internacional bajo el artículo 6.2

Los ITMOs son resultados de mitigación transferidos internacionalmente entre Partes en el marco del artículo 6.2 del Acuerdo de París. Conceptualmente, representan una unidad de reducción o remoción que, bajo autorización estatal y reglas de contabilidad robusta, puede ser utilizada por otra Parte para fines vinculados al cumplimiento de su NDC o a otros fines internacionales permitidos [9, 10].

La noción clave es que la cooperación bajo el artículo 6.2 no equivale simplemente a vender créditos; supone articular una relación entre la reducción real de emisiones, la autorización soberana,

el registro, la trazabilidad y la contabilidad climática internacional.

Las ITMOs deben cumplir requisitos estrictos de integridad ambiental y contabilidad robusta: ser medibles, reportables, verificables y adicionales, es decir, lograr reducciones que no se alcanzarían en un escenario de políticas nacionales preexistentes. Además, está prevista la aplicación obligatoria del ajuste correspondiente, un mecanismo contable que evita la doble contabilización de emisiones de una misma reducción entre el país emisor, que incrementa su inventario o ajusta su NDC, y el país receptor, que descuenta el volumen transferido para acreditar el cumplimiento de su propia meta [10, 11].

La generación y transferencia de ITMOs se articulan en un ciclo concatenado que comienza con la formulación y diseño de una actividad de mitigación, entendida como toda intervención capaz de producir reducciones o remociones netas de GEI respecto de un escenario de referencia y cuya ejecución es adicional a las políticas vigentes del país anfitrión [11]. Este tipo de proyectos debe estar alineado con la NDC y recibir la autorización previa de la autoridad competente; en Chile (MMA).

Una vez aprobada la actividad, esta se implementa y posteriormente se somete a un sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) que exige mediciones periódicas, elaboración de informes estandarizados y validación por una Entidad Operacional Designada independiente. Las metodologías aceptadas son las establecidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [1], las definidas para el mecanismo del Artículo 6.4 o las acordadas bilateralmente entre las Partes [10]. Tras la verificación, las reducciones se inscriben en la *Centralized Accounting and Reporting Platform* (CARP) de la CMNUCC o en registros nacionales interoperables, donde cada unidad recibe un identificador único, lo que garantiza trazabilidad pública [10].

Una vez completados el registro y la verificación, el Estado anfitrión puede autorizar la transferencia internacional y aplicar el ajuste correspondiente: añade las toneladas transferidas a su balance de emisiones y el país comprador las deduce, preservando la integridad ambiental del sistema [9]. Este diseño contable, reforzado por los requisitos de transparencia de los informes bienales y por revisiones técnicas de expertos, constituye la columna vertebral que permite la circulación fiable de ITMOs en los mercados de carbono.



Figura 4.9: Esquema Mercado de Carbono [11].

Asimismo, los resultados de mitigación deben ser adicionales. Conforme al marco regulatorio chileno, una actividad cumple este criterio cuando, considerando las políticas y la legislación nacional vigentes, no se habría implementado sin los incentivos financieros provenientes de la transferencia de las reducciones generadas. Además, la mitigación debe exceder la exigida por la normativa o cumplir con los criterios nacionales de priorización aplicables. En consecuencia, la adicionalidad comprende una dimensión financiera, relacionada con la necesidad del incentivo económico, y una dimensión regulatoria, asociada a que la actividad no se limite al cumplimiento de obligaciones ya exigibles. Las barreras técnicas, operacionales o de mercado pueden aportar antecedentes para demostrar que la actividad no se implementaría en el escenario de referencia, pero no constituyen por sí solas una categoría independiente de adicionalidad [77].

La transferencia de ITMOs suele formalizarse mediante acuerdos bilaterales o multilaterales que especifican condiciones técnicas, legales y financieras. Dichos acuerdos determinan el volumen de ITMOs, los criterios de elegibilidad, los estándares de salvaguardas socioambientales y las obligaciones de divulgación pública. En el caso chileno, la autorización se canaliza a través del MMA, que evalúa la actividad conforme a criterios de adicionalidad, coherencia con la NDC, salvaguardias de derechos humanos y compatibilidad con la Estrategia Climática de Largo Plazo [11].

Los ITMOs pueden originarse en el sector público o privado siempre que exista autorización estatal; el sector privado, como promotor de proyectos, percibe ingresos por las reducciones generadas. Así, el mecanismo se convierte en una herramienta para movilizar financiamiento climático, catalizar tecnologías bajas en carbono y generar co-beneficios de desarrollo sostenible, especialmente en economías emergentes [78].

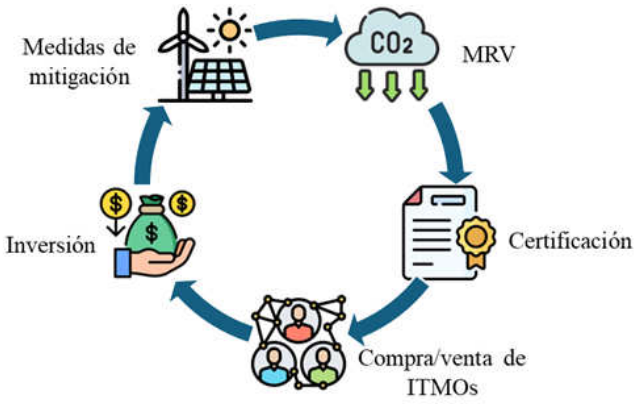


Figura 4.10: Esquema Mercado de Carbono [77].

4.5.2 Metodologías sectoriales de referencia para la industria cementera

Bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), mecanismo establecido por el Protocolo de Kioto para la ejecución de actividades de mitigación y la emisión de reducciones certificadas de emisiones, se desarrollaron metodologías aprobadas de línea base y monitoreo aplicables a actividades específicas. Estas metodologías no correspondían a simples recomendaciones, sino que establecían procedimientos y condiciones que debían cumplirse para cuantificar las reducciones generadas por una actividad registrada bajo dicho mecanismo [79]. Para la industria cementera, entre ellas se encuentran las metodologías consolidadas ACM0005 y ACM0003.

El Artículo 6.2 del Acuerdo de París no establece un sistema centralizado equivalente de metodologías aprobadas ni exige la aplicación de una metodología determinada. En cambio, las Partes participantes deben identificar las normas, procedimientos y metodologías que sustentan cada enfoque cooperativo [9, 10]. En este contexto, las metodologías desarrolladas bajo el MDL pueden ser adoptadas como base metodológica cuando sean reconocidas por el enfoque cooperativo correspondiente y resulten aplicables a la actividad evaluada. En la presente investigación, la ACM0005 y la ACM0003 se emplean únicamente como referencias técnicas para estructurar la cuantificación de las reducciones de emisiones y no como aplicaciones integrales destinadas a registrar formalmente los escenarios bajo el MDL o el Artículo 6.2.

La metodología ACM0005, denominada *Increasing the blend in cement production*, se aplica a actividades que aumentan la proporción de adiciones en cementos mezclados y reducen, en consecuencia, su contenido de clínker. La metodología considera las emisiones de proceso y combustión asociadas a la producción de clínker, las emisiones derivadas del consumo eléctrico y las fugas relacionadas con el transporte y el eventual desvío de adiciones desde otros usos [80]. Su

aplicación se encuentra restringida a plantas que producen el clínker incluido dentro del límite del proyecto, por lo que no considera estaciones dedicadas exclusivamente a la molienda de clínker adquirido externamente.

La metodología ACM0003, denominada *Partial substitution of fossil fuels in cement or quicklime manufacture*, aborda la sustitución parcial de combustibles fósiles en instalaciones existentes de producción de clínker o cal viva. Su estructura considera las emisiones de la línea base asociadas al combustible desplazado, las emisiones generadas por los combustibles utilizados en el proyecto, los consumos adicionales de electricidad o combustibles y las emisiones asociadas al transporte y otras posibles fugas [81]. Aunque la ACM0003 no fue desarrollada específicamente para el uso de H_2V ni para la sustitución total del combustible fósil, su estructura constituye el antecedente sectorial más próximo para organizar la cuantificación del escenario de reemplazo de petcoke analizado en esta investigación.

Ambas metodologías determinan las reducciones netas mediante la diferencia entre las emisiones de línea base, las emisiones del proyecto y las fugas. Esta relación general se presenta en la Ecuación 4.18:

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \tag{4.18}$$

donde ER_y corresponde a la reducción neta de emisiones durante el año y, en tCO_2e/año; BE_y, a las emisiones de línea base; PE_y, a las emisiones del proyecto; y LE_y, a las emisiones por fugas durante el mismo período.

4.5.3 Ajustes correspondientes, doble conteo e integridad ambiental

El ajuste correspondiente es el mecanismo contable destinado a evitar que una misma reducción de emisiones sea contabilizada simultáneamente por el país anfitrión y el país adquirente. La transferencia de un ITMO no modifica las emisiones físicas ni el inventario nacional de GEI del país donde se implementó la actividad. En cambio, modifica el balance contable utilizado para evaluar el cumplimiento de las NDC de las Partes participantes [9, 10].

En términos simplificados, cuando las NDC se expresan mediante una métrica de emisiones, el país transferidor suma los ITMOs transferidos a su balance de emisiones ajustado, mientras que el país adquirente resta los ITMOs utilizados para el cumplimiento de su meta.

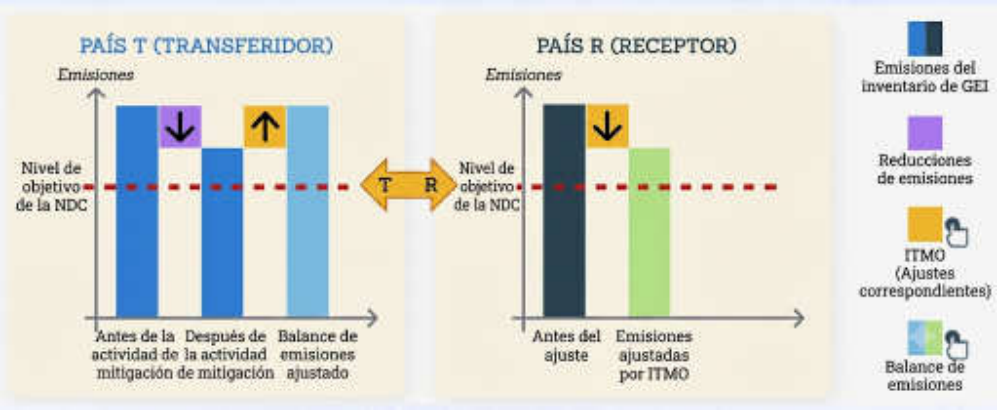


Figura 4.11: Ilustración del ajuste correspondiente realizado al país transferIdor y al país adquirente [11]

4.5.4 Transparencia, trazabilidad y autorización de transferencias

La cooperación bajo el artículo 6.2 descansa también en un principio de transparencia. Este principio se expresa en tres niveles: transparencia del proyecto o actividad de mitigación, transparencia del proceso de autorización estatal y transparencia del sistema de reporte y revisión técnica. La trazabilidad, por su parte, se refiere a la capacidad de seguir cada unidad transferida mediante registros y sistemas de información interoperables.

En términos conceptuales, la autorización cumple una función dual. Por un lado, habilita jurídicamente la transferencia internacional. Por otro lado, vincula el resultado de mitigación con la estrategia climática del Estado anfitrión, asegurando que la cooperación internacional no contradiga sus compromisos internos ni deteriore su trayectoria de descarbonización.

4.5.5 Decisión 2/CMA.3: guía sobre enfoques cooperativos

La Decisión 2/CMA.3, adoptada en Glasgow, operacionaliza el artículo 6.2 al definir los elementos básicos del sistema: qué se entiende por ITMO, qué responsabilidades deben cumplir las Partes participantes, cómo se aplican los ajustes correspondientes, qué información debe reportarse y cómo debe organizarse la infraestructura de seguimiento y revisión [9].

En particular, esta decisión establece que los ITMOs deben ser reales, verificados y adicionales, y que las Partes deben contar con arreglos para autorizar, rastrear y reportar su uso. Para una tesis aplicada al sector cementero, esta decisión es esencial porque fija el marco de elegibilidad conceptual para pensar la eventual transferencia de reducciones de emisiones derivadas de un proyecto industrial.

4.5.6 Decisión 6/CMA.4: materias operativas relativas al artículo 6.2

La Decisión 6/CMA.4, adoptada en Sharm el-Sheikh, profundiza la operacionalización del sistema al desarrollar orientaciones sobre registros, revisión técnica, formatos de reporte inicial, anexos para informes de transparencia y bases de datos del artículo 6 [10]. Esta decisión es particularmente relevante porque traslada la discusión desde el plano general de principios hacia el plano operativo de implementación.

Desde el punto de vista de esta tesis, la importancia de la decisión radica en que refuerza la idea de que la generación potencial de ITMOs no depende solo de un cálculo de emisiones evitadas, sino también de la existencia de capacidades institucionales y de procedimientos formales de autorización, seguimiento y reporte.

4.5.7 Requisitos de reporte, seguimiento y revisión técnica

El sistema del artículo 6.2 exige a las Partes reportes iniciales, información anual y regular, consistencia con los informes bienales de transparencia y revisión técnica por expertos. Estas exigencias tienen implicancias metodológicas directas para proyectos industriales, porque obligan a que la delimitación de línea base, la cuantificación de reducciones y la identificación del resultado transferible sean suficientemente robustas como para sostenerse en un proceso de revisión internacional.

En otras palabras, el valor económico potencial del ITMO depende inseparablemente de la calidad técnica del diseño de proyecto y de la capacidad institucional de sostener su trazabilidad.

Capítulo 5

Metodología

5.1 Enfoque y diseño de la investigación

La investigación se desarrolla como un estudio de caso aplicado, no experimental y comparativo para la industria cementera chilena. El diseño combina una revisión documental, utilizada para caracterizar el mercado y el marco regulatorio, con una evaluación cuantitativa basada en balances de masa y energía, cálculo de emisiones, estimación del potencial técnico de ITMOs y evaluación económica incremental mediante planillas de cálculo en Microsoft Excel.

El análisis considera cuatro escenarios construidos sobre una misma escala de producción: OPC con petcoke, utilizado como caso base; LC^3 con petcoke; OPC con H_2V; y LC^3 con H_2V. Para cada escenario se aplica una secuencia común que comprende la determinación de los requerimientos de materiales y energía, el cálculo de las emisiones anuales, la estimación de las reducciones respecto del caso base, la cuantificación del potencial de ITMOs y la evaluación de sus costos incrementales.

La evaluación se desarrolla a nivel de prefactibilidad comparativa y utiliza información bibliográfica, antecedentes públicos, factores de emisión y cálculos de ingeniería. La Planta Teno se utiliza únicamente como referencia para definir la escala productiva del análisis, sin representar su configuración, operación ni desempeño particular. Por tanto, los resultados corresponden a una instalación referencial y no a la ingeniería de una planta cementera específica.

El detalle de los balances técnicos del proceso convencional y de la producción de LC^3 se presenta en los Anexos A y B, respectivamente. El cálculo de las reducciones de emisiones y del potencial de ITMOs se desarrolla en el Anexo C; su calendarización referencial, en el Anexo C.6; y el detalle de la evaluación económica, en el Anexo D.

5.2 Metodología para el diagnóstico de mercado y regulación

El diagnóstico del mercado cementero chileno y de su marco regulatorio se desarrolló mediante una revisión documental de fuentes secundarias. Se consultaron normas técnicas, leyes, reglamentos, instrumentos de política pública, estadísticas sectoriales, memorias y publicaciones corporativas, informes gremiales y literatura especializada.

La información recopilada se clasificó en tres dimensiones:

a) **Estructura productiva y de mercado:** empresas y plantas participantes, modelos de producción, origen del clínker, tipos de cemento comercializados y participación de las importaciones.

b) **Condiciones tecnológicas:** experiencia en cementos adicionados, infraestructura disponible, requerimientos de materias primas y antecedentes de implementación de LC^3 e H_2V.

c) **Marco regulatorio e institucional:** normativa aplicable al cemento, regulación sobre instalaciones de hidrógeno, instrumentos nacionales de descarbonización y disposiciones relacionadas con el Artículo 6.2 del Acuerdo de París.

Para la revisión normativa se priorizaron documentos emitidos por los organismos competentes. La información sobre empresas y plantas se obtuvo principalmente de publicaciones corporativas, mientras que los informes gremiales y la literatura técnica se utilizaron para complementar y contrastar la caracterización sectorial.

Los antecedentes fueron sistematizados por actor, materia regulada y tecnología, y posteriormente comparados para construir las secciones de mercado, actores relevantes y regulación presentadas en el capítulo de Resultados.

5.3 Definición de límites del sistema

El límite técnico comprende las operaciones realizadas dentro de una planta cementera, desde la recepción y preparación de las materias primas hasta la producción de cemento terminado. Se incluyen la preparación de la harina cruda, la producción de clínker, la calcinación de arcilla, la incorporación de caliza y yeso, la molienda final, el consumo eléctrico y el suministro de energía térmica mediante petcoke o H_2V, según el escenario evaluado.

Se excluyen las emisiones asociadas a la extracción y procesamiento aguas arriba de las materias primas, la producción y transporte del petcoke y del H_2V, la fabricación de equipos, la construcción de infraestructura, las actividades administrativas, la distribución del cemento y las etapas de uso y fin de vida. Por tanto, la evaluación no corresponde a un análisis de ciclo de vida. El límite ambiental comprende las emisiones operacionales modificadas por las alternativas analizadas. Se cuantifican las emisiones de proceso asociadas a la descarbonatación de las materias primas, las emisiones directas de CO_2 generadas por la combustión y las emisiones indirectas asociadas al consumo de electricidad de la red.

En los escenarios con LC^3, las emisiones asociadas al transporte de las adiciones adicionales se calculan separadamente y se incorporan como fugas en la estimación de la mitigación neta y del potencial de ITMOs. Estas emisiones de transporte son adicionales al caso base, es decir, para el caso OPC-P no se consideran fugas por transporte de materia prima.

Las emisiones de proceso calculadas mediante estequiometría corresponden a CO_2, por lo que no se considera la producción de NO_x ni de otros GEI en el caso de las emisiones por reacción. Para las emisiones estimadas mediante factores de emisión se mantiene la unidad reportada por la fuente; en particular, el factor eléctrico se expresa en tCO_2e/MWh. Para consolidar los resultados, las emisiones totales, las reducciones netas y los ITMOs potenciales se expresan en tCO_2e.

El límite económico es incremental respecto del escenario OPC-P. Se incluyen los costos de petcoke, H_2V y electricidad; el CAPEX y el OPEX fijo de la unidad de calcinación de arcilla; la infraestructura de almacenamiento y acondicionamiento de H_2V; y los ingresos potenciales por ITMOs.

Se excluyen los costos comunes a todos los escenarios y aquellos para los cuales no se dispone de precios unitarios sustentados, particularmente las materias primas y su transporte general. En consecuencia, los resultados representan costos parciales incrementales y no el costo total de producción del cemento, la rentabilidad absoluta de la planta ni su bancabilidad.

5.4 Metodología de evaluación técnica

La evaluación técnica se realizó mediante balances de materia y energía en régimen estacionario, utilizando la escala productiva y el tiempo de operación definidos en la Sección 5.5.

Para cada escenario, el flujo másico horario de los componentes del cemento se calculó mediante:

$$\dot{m}_{i,s} = x_{i,s} \cdot \dot{m}_{\text{cemento}} \tag{5.1}$$

donde $\dot{m}_{i,s}$ corresponde al flujo másico del componente i en el escenario s, en t/h; $x_{i,s}$, a su fracción másica en el cemento, adimensional; y $\dot{m}_{\text{cemento}}$, al flujo másico común de cemento, en t/h. El índice i identifica los componentes de cada formulación y s, el escenario evaluado. Las composiciones utilizadas se presentan en la Tabla 5.2.

El acondicionamiento de la harina cruda y la conversión de sus componentes en flujos molares se realizaron mediante las ecuaciones presentadas en la Subsección 5.6.1. La formación de las fases del clínker se calculó a partir de las reacciones de descarbonatación y clinkerización definidas en el marco teórico, considerando conversión completa y el reactivo limitante de cada reacción. La aplicación del balance estequiométrico se presenta en el Anexo A.

La demanda térmica horaria de cada escenario se calculó mediante:

$$\dot{Q}_{\text{th},s} = \dot{Q}_{\text{clinker},s} + \dot{Q}_{\text{arcilla},s} \tag{5.2}$$

donde $\dot{Q}_{\text{th},s}$ corresponde a la demanda térmica total del escenario s, en GJ/h; $\dot{Q}_{\text{clinker},s}$, a la demanda térmica asociada a la producción de clínker, en GJ/h; y $\dot{Q}_{\text{arcilla},s}$, a la demanda térmica asociada a la producción de arcilla calcinada, en GJ/h. Para los escenarios OPC se consideró $\dot{Q}_{\text{arcilla},s} = 0$.

La demanda térmica del clínker se obtuvo mediante la suma del calor de precalentamiento de la harina seca y el requerimiento térmico neto de la etapa de horno, de acuerdo con las Ecuaciones 5.16, 5.17 y 5.18. Su aplicación numérica se presenta en el Anexo A.

Para los escenarios con LC^3, la demanda térmica de la calcinación de arcilla se calculó mediante:

$$\dot{Q}_{\text{arcilla},s} = \dot{m}_{\text{arcilla,calcinada},s} \cdot CE_{\text{th,arcilla}} \tag{5.3}$$

donde $\dot{m}_{\text{arcilla,calcinada},s}$ corresponde al flujo másico de arcilla calcinada requerido en el escenario s, en t/h; y $CE_{\text{th,arcilla}}$, al consumo térmico específico de su producción, en GJ/t de arcilla calcinada. El balance de la calcinación de arcilla se presenta en el Anexo B.

El flujo másico de petcoke o H_2V se obtuvo a partir de la demanda térmica total y del poder calorífico inferior del combustible, mediante la Ecuación 5.19. En los escenarios con H_2V se consideró la sustitución completa del petcoke sobre una base de equivalencia energética.

El consumo eléctrico anual se calculó mediante la Ecuación 5.20, utilizando un consumo específico común de 130 kWh/t de cemento [62]. Los flujos anuales de materiales y combustibles se obtuvieron a partir de los flujos horarios y del tiempo anual de operación definido en la Sección 5.5.

5.5 Base de cálculo

La escala del análisis se definió utilizando como referencia la capacidad de producción de cemento de la Planta Teno de Cbb, correspondiente a 1.700 kt/año. Esta referencia se utilizó únicamente para establecer la magnitud de los flujos modelados y no para representar la configuración operacional de la planta.

La producción efectiva de referencia se calculó mediante:

$$P_{\text{efectiva}} = P_{\text{instalada}} \cdot f_{\text{util}} \tag{5.4}$$

donde P_{efectiva} corresponde a la producción anual efectiva estimada, en kt/año; $P_{\text{instalada}}$, a la capacidad anual instalada de producción de cemento, en kt/año; y f_{util}, al factor de utilización de la capacidad instalada, adimensional.

Considerando un factor de utilización de 0,60 basado en la capacidad de producción promedio de plantas productoras en la industria nacional:

$$P_{\text{efectiva}} = 1.700 \text{ kt/año} \cdot 0{,}60 = 1.020 \text{ kt/año}. \tag{5.5}$$

La escala productiva utilizada en el modelo se fijó en 20% de la producción efectiva:

$$P_{\text{cemento}} = P_{\text{efectiva}} \cdot f_{\text{escala}} \tag{5.6}$$

donde P_{cemento} corresponde a la producción anual de cemento considerada en el modelo, en kt/año, y f_{escala}, a la fracción de la producción efectiva representada, adimensional. Esta fracción constituye un supuesto de modelación y no representa la participación real de un tipo de cemento en la producción de la planta.

Para $f_{\text{escala}} = 0{,}20$:

$$P_{\text{cemento}} = 1.020 \text{ kt/año} \cdot 0{,}20 = 204 \text{ kt/año}. \tag{5.7}$$

Los balances se desarrollaron sobre una base horaria, considerando operación continua durante 8.760 h/año. El flujo másico de cemento se calculó mediante:

$$\dot{m}_{\text{cemento}} = \frac{P_{\text{cemento}} \cdot 10^3 \text{ t/kt}}{H_{\text{op}}} \tag{5.8}$$

donde $\dot{m}_{\text{cemento}}$ corresponde al flujo másico de cemento utilizado en los balances, en t/h; P_{cemento}, a la producción anual modelada, en kt/año; 10^3 t/kt, al factor de conversión de kilotoneladas a toneladas; y H_{op}, al tiempo anual de operación, en h/año.

Sustituyendo los valores adoptados:

$$\dot{m}_{\text{cemento}} = \frac{204 \text{ kt/año} \cdot 10^3 \text{ t/kt}}{8.760 \text{ h/año}} = 23{,}29 \text{ t/h}. \tag{5.9}$$

La Tabla 5.1 resume los parámetros productivos utilizados en los cuatro escenarios.

Tabla 5.1: Parámetros productivos utilizados como base de cálculo.

Parámetro	**Valor**	**Unidad**
Capacidad instalada de la planta de referencia	1.700	kt/año
Factor de utilización	0,60	–
Producción efectiva estimada	1.020	kt/año
Fracción de escala del modelo	0,20	–
Producción anual modelada	204	kt/año
Tiempo anual de operación	8.760	h/año
Flujo másico de cemento	23,29	t/h

La producción anual y el tiempo de operación se mantuvieron constantes en los cuatro escenarios. Los flujos anuales utilizados en los resultados se obtuvieron multiplicando los flujos horarios por $H_{\text{op}} = 8.760$ h/año.

5.6 Construcción de escenarios de análisis

Los escenarios se construyeron combinando dos formulaciones de cemento con dos fuentes de energía térmica. La producción anual, el flujo horario y el tiempo de operación se mantuvieron constantes de acuerdo con la base de cálculo definida en la Sección 5.5.

La Tabla 5.2 presenta la composición del cemento y la fuente de energía térmica adoptadas en cada escenario.

Tabla 5.2: Definición de los escenarios de análisis.

Parámetro	**OPC-P**	**LC³-P**	**OPC-H_2V**	**LC³-H_2V**
Formulación de cemento	OPC	LC³-50	OPC	LC³-50
Clínker (% en masa)	95	50	95	50
Arcilla calcinada (% en masa)	0	30	0	30
Caliza adicionada (% en masa)	0	15	0	15
Yeso (% en masa)	5	5	5	5
Factor clínker	0,95	0,50	0,95	0,50
Fuente de energía térmica	Petcoke	Petcoke	H_2V	H_2V
Sustitución de petcoke (%)	0	0	100	100

La formulación LC³-50 corresponde a la composición definida en la Tabla 4.5, con una relación másica 2:1 entre arcilla calcinada y caliza. Los flujos de clínker, arcilla calcinada, caliza y yeso se calcularon mediante la Ecuación 5.1.

La alimentación de arcilla cruda se determinó a partir de la cantidad de arcilla calcinada requerida y del rendimiento másico de la etapa de calcinación, cuyo desarrollo se presenta en el Anexo B.

En los escenarios con H_2V se mantuvo la demanda térmica de la formulación correspondiente y se consideró la sustitución completa del petcoke. El consumo de cada combustible se calculó por equivalencia energética mediante la Ecuación 5.19.

El H_2V se consideró como un insumo adquirido a un proveedor externo. Por tanto, su producción no forma parte de los balances técnicos ni de los límites ambientales y económicos definidos para la planta.

5.6.1 Composición de la materia prima para la producción de clínker

La harina cruda utilizada para producir clínker se representó mediante una composición simplificada de carbonato de calcio, dióxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro y humedad. La composición se construyó a partir de valores representativos reportados para harinas crudas cementeras y de los supuestos adoptados en la modelación. Por tanto, no corresponde a un análisis químico específico de la Planta Teno. Los valores utilizados se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Composición de la harina cruda adoptada para la producción de clínker [60].

Componente	**Fracción másica (adimensional)**	**Contenido (% en masa)**
Carbonato de calcio ($CaCO_3$)	0,75	75,0
Dióxido de silicio (SiO_2)	0,13	13,0
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	0,04	4,0
Óxido de hierro (III) (Fe_2O_3)	0,03	3,0
Agua libre (H_2O)	0,05	5,0
Total	**1,00**	**100,0**

A partir de las fracciones másicas indicadas en la Tabla 5.3, el flujo másico de cada componente presente en la alimentación húmeda se calculó mediante:

$$\dot{m}_{i,\text{húmeda}} = x_{i,\text{húmeda}} \cdot \dot{m}_{\text{harina,húmeda}} \tag{5.10}$$

donde $\dot{m}_{i,\text{húmeda}}$ corresponde al flujo másico del componente i en la harina húmeda, en t/h; $x_{i,\text{húmeda}}$, a su fracción másica en la alimentación húmeda, expresada en t del componente i por t de harina húmeda y, por tanto, adimensional; y $\dot{m}_{\text{harina,húmeda}}$, al flujo másico total de harina cruda antes del acondicionamiento, en t/h. El índice i identifica los componentes $CaCO_3$, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 y H_2O.

El acondicionamiento de la harina cruda se representó mediante dos remociones independientes: una pérdida sólida equivalente al 5% de la alimentación húmeda y la eliminación completa de la humedad libre, correspondiente también al 5% de dicha alimentación. La pérdida sólida se calculó mediante:

$$\dot{m}_{\text{pérdida,sólida}} = (1 - \eta_{\text{acond}}) \cdot \dot{m}_{\text{harina,húmeda}} \tag{5.11}$$

donde $\dot{m}_{\text{pérdida,sólida}}$ corresponde al flujo másico de sólidos retirado durante el acondicionamiento,

en t/h; y η_{acond}, a la fracción de la alimentación húmeda retenida después de dicha pérdida sólida, adimensional. En la modelación se adoptó $\eta_{\text{acond}} = 0{,}95$.

Por su parte, el flujo másico de agua eliminado se determinó mediante:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,elim}} = x_{\text{H}_2\text{O,húmeda}} \cdot \dot{m}_{\text{harina,húmeda}} \tag{5.12}$$

donde $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,elim}}$ corresponde al flujo másico de agua eliminado, en t/h; y $x_{\text{H}_2\text{O,húmeda}}$, a la fracción másica de humedad libre en la alimentación, adimensional. Para el caso modelado se adoptó $x_{\text{H}_2\text{O,húmeda}} = 0{,}05$.

A partir del balance de masa de la etapa de acondicionamiento, el flujo de harina seca enviado al sistema de precalentamiento y clinkerización se calculó mediante:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{harina,seca}} &= \dot{m}_{\text{harina,húmeda}} - \dot{m}_{\text{pérdida,sólida}} - \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,elim}} \\ &= (\eta_{\text{acond}} - x_{\text{H}_2\text{O,húmeda}}) \cdot \dot{m}_{\text{harina,húmeda}} \end{aligned} \tag{5.13}$$

donde $\dot{m}_{\text{harina,seca}}$ corresponde al flujo másico de harina seca enviado al sistema térmico, en t/h. Las demás variables conservan las definiciones y unidades indicadas previamente. Con los valores adoptados, el flujo de harina seca equivale al 90% del flujo de alimentación húmeda.

En la modelación, la pérdida sólida asociada al acondicionamiento se asignó al flujo de $CaCO_3$, mientras que los flujos de SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3 se mantuvieron sin cambios durante esta etapa. El balance detallado de la alimentación húmeda, la humedad retirada, la pérdida sólida y la harina seca resultante se presenta en el Anexo A.

Una vez determinados los flujos másicos de los componentes secos, estos se convirtieron en flujos molares para desarrollar los balances estequiométricos de calcinación y formación de las fases del clínker. La conversión se realizó mediante:

$$\dot{n}_{i,\text{seca}} = \frac{\dot{m}_{i,\text{seca}}}{M_i} \tag{5.14}$$

donde $\dot{n}_{i,\text{seca}}$ corresponde al flujo molar del componente seco i, en t-mol/h; $\dot{m}_{i,\text{seca}}$, a su flujo másico después del acondicionamiento, en t/h; y M_i, a su masa molar, en t/t-mol.

Los flujos molares se distribuyeron mediante una secuencia de cálculo estequiométrico. Primero se consideró la descomposición completa del $CaCO_3$, de acuerdo con la Ecuación 4.1. Posteriormente, los reactivos disponibles se asignaron a la formación de aluminoferrito tetracálcico mediante la

Ecuación 4.5, aluminato tricálcico mediante la Ecuación 4.4 y silicato bicálcico mediante la Ecuación 4.2. Finalmente, el CaO remanente se utilizó para convertir parte del silicato bicálcico en silicato tricálcico, conforme con la Ecuación 4.3. Para cada reacción, la cantidad formada se determinó a partir de los flujos molares disponibles y del reactivo limitante.

Esta secuencia corresponde a un procedimiento de distribución estequiométrica de los reactivos y no a una representación cinética del orden temporal de las reacciones dentro del horno. El desarrollo completo del balance, incluidas las masas molares, los reactivos limitantes y los flujos resultantes de las fases del clínker, se presenta en el Anexo A.

5.6.2 Perfil térmico simplificado del proceso de clinkerización

Para estimar los requerimientos energéticos asociados a la producción de clínker, se definió un perfil térmico simplificado para la etapa de precalentamiento de la harina cruda y la posterior clinkerización en el horno. El modelo considera tres etapas de precalentamiento, en las cuales la materia prima incrementa su temperatura desde condiciones ambientales hasta 900°C. Posteriormente, en el horno rotatorio, el material alcanza una temperatura máxima de 1.500°C, utilizada como aproximación conservadora de la zona de clinkerización. Las temperaturas adoptadas se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Perfil térmico simplificado adoptado para el precalentamiento y la clinkerización.

Etapa	**Temperatura inicial (°C)**	**Temperatura final (°C)**	**ΔT (°C)**
Precalentamiento 1	25	500	475
Precalentamiento 2	500	800	300
Precalentamiento 3	800	900	100
Clinkerización	900	1.500	600

Las temperaturas corresponden a las fronteras empleadas en el balance de energía y no representan la distribución térmica real dentro de un horno industrial. La harina se consideró seca al ingresar a la primera etapa de precalentamiento, por lo que el cálculo no incorporó el calor sensible ni el calor de vaporización del agua retirada durante su acondicionamiento.

El calor específico medio de la harina seca se calculó a partir de la fracción másica y del calor específico de cada componente:

$$C_{p,\text{mezcla}} = \sum_i x_{i,\text{seca}} \cdot C_{p,i} \tag{5.15}$$

donde $C_{p,\text{mezcla}}$ corresponde al calor específico medio de la harina seca, en kJ/(t · °C); $x_{i,\text{seca}}$, a la fracción másica del componente seco i, expresada en t del componente i por t de harina seca y, por tanto, adimensional; y $C_{p,i}$, al calor específico del componente i, en kJ/(t · °C). El índice i identifica los componentes $CaCO_3$, SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3.

El flujo de calor requerido para el precalentamiento de la harina seca se calculó mediante:

$$\dot{Q}_{\text{pre},s} = 10^{-6}\ \text{GJ/kJ} \cdot \sum_k \left[\dot{m}_{\text{harina,seca},s} \cdot C_{p,\text{mezcla}} \cdot (T_{\text{f},k} - T_{\text{i},k})\right] \tag{5.16}$$

donde $\dot{Q}_{\text{pre},s}$ corresponde al flujo de calor requerido para el precalentamiento en el escenario s, en GJ/h; $\dot{m}_{\text{harina,seca},s}$, al flujo másico de harina seca, en t/h; $C_{p,\text{mezcla}}$, al calor específico medio de la harina seca, en kJ/(t · °C); $T_{\text{i},k}$ y $T_{\text{f},k}$, a las temperaturas inicial y final de la etapa k, respectivamente, en °C; k, a cada etapa de precalentamiento; y 10^{-6} GJ/kJ, al factor de conversión de kilojulios a gigajulios.

El requerimiento térmico de la etapa de horno se calculó como la suma del calor neto de las reacciones modeladas y del calor sensible requerido para elevar la temperatura de las fases del clínker desde 900 °C hasta 1.500 °C:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{horno},s} = &\sum_r \left(\dot{\xi}_{r,s} \cdot \Delta H_r\right) \\ &+ 10^{-6}\,\text{GJ/kJ} \cdot \sum_j \left[\dot{m}_{j,s} \cdot C_{p,j} \cdot (T_{\text{clinker}} - T_{\text{entrada}})\right]\end{aligned} \tag{5.17}$$

donde $\dot{Q}_{\text{horno},s}$ corresponde al flujo de calor neto requerido en la etapa de horno para el escenario s, en GJ/h; $\dot{\xi}_{r,s}$, al avance molar de la reacción r, en t-mol/h; ΔH_r, a la entalpía de la reacción r, en GJ/t-mol; $\dot{m}_{j,s}$, al flujo másico de la fase de clínker j, en t/h; $C_{p,j}$, al calor específico de la fase j, en kJ/(t · °C); T_{clinker}, a la temperatura final del clínker, en °C; y T_{entrada}, a la temperatura de entrada a la etapa de clinkerización, en °C. El índice r identifica las reacciones modeladas, mientras que el índice j identifica las fases C_3S, C_2S, C_3A y C_4AF.

En el modelo se utilizaron $T_{\text{entrada}} = 900\,°\text{C}$ y $T_{\text{clinker}} = 1.500\,°\text{C}$. Las entalpías se incorporaron conservando su signo termodinámico, de modo que las reacciones endotérmicas aumentan la demanda térmica y las exotérmicas la reducen. El cálculo de los avances de reacción y de sus

aportes térmicos se presenta en el Anexo A.

El requerimiento térmico neto para la producción de clínker se obtuvo mediante:

$$\dot{Q}_{\text{clínker},s} = \dot{Q}_{\text{pre},s} + \dot{Q}_{\text{horno},s} \tag{5.18}$$

donde $\dot{Q}_{\text{clínker},s}$ corresponde al flujo de calor neto requerido para producir clínker en el escenario s, en GJ/h; $\dot{Q}_{\text{pre},s}$, al flujo de calor requerido para el precalentamiento, en GJ/h; y $\dot{Q}_{\text{horno},s}$, al flujo de calor neto requerido en la etapa de horno, en GJ/h.

El balance considera el calentamiento sensible de la harina seca y de las fases del clínker, junto con las entalpías de las reacciones modeladas. No se incorporaron pérdidas térmicas por radiación o convección, calor sensible de los gases de salida, eficiencia de combustión ni recuperación de calor en el enfriador. Los calores específicos, las entalpías, los avances de reacción y la desagregación del requerimiento térmico se presentan en el Anexo A.

5.6.3 Propiedades energéticas y consumo de combustibles

Los escenarios consideraron petcoke o H_2V como fuente única de energía térmica, de acuerdo con las configuraciones definidas en la Tabla 5.2. Los poderes caloríficos inferiores utilizados en la modelación se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Poderes caloríficos inferiores utilizados en la modelación [82, 83].

Combustible	**PCI utilizado (GJ/t)**
Petcoke	32,485
H_2V	120

Nota: Los valores se expresan sobre la base del poder calorífico inferior. Para el petcoke se utilizó la equivalencia 1 kcal = 4,184 kJ.

El flujo másico horario del combustible requerido en cada escenario se calculó dividiendo la demanda térmica total por el poder calorífico inferior correspondiente:

$$\dot{m}_{\text{comb},s} = \frac{\dot{Q}_{\text{th},s}}{PCI_{\text{comb}}} \tag{5.19}$$

donde $\dot{m}_{\text{comb},s}$ corresponde al flujo másico de combustible requerido en el escenario s, en t/h; $\dot{Q}_{\text{th},s}$, a la demanda térmica total del escenario, en GJ/h; y PCI_{comb}, al poder calorífico inferior del combustible utilizado, en GJ/t. El índice s identifica el escenario evaluado y el subíndice comb identifica el petcoke o el H_2V.

En los escenarios LC^3, la demanda térmica total corresponde a la suma del requerimiento asociado al clínker remanente y a la producción de arcilla calcinada, según la Ecuación 5.2.

En los escenarios con H_2V se mantuvo la demanda térmica de la formulación correspondiente y se consideró la sustitución completa del petcoke sobre una base de equivalencia energética. No se aplicaron factores diferenciados de eficiencia de combustión, transferencia de calor, estabilidad de llama ni desempeño de los quemadores.

Los consumos anuales se obtuvieron a partir de los flujos horarios y del tiempo de operación definido en la Sección 5.5. El cálculo del consumo asociado a la producción de clínker se desarrolla en el Anexo A, mientras que el requerimiento térmico de la producción de arcilla calcinada se presenta en el Anexo B.

5.6.4 Consumo eléctrico

El consumo eléctrico se estimó mediante un valor específico de 130 kWh/t de cemento, correspondiente al proceso por vía seca presentado en la Tabla 4.4.

El consumo eléctrico anual de cada escenario se calculó mediante:

$$E_{\text{el},s} = P_{\text{cemento}} \cdot \frac{10^3\,\text{t}}{1\,\text{kt}} \cdot CE_{\text{el}} \cdot \frac{1\,\text{MWh}}{10^3\,\text{kWh}} \tag{5.20}$$

donde $E_{\text{el},s}$ corresponde al consumo eléctrico anual del escenario s, en MWh/año; P_{cemento}, a la producción anual de cemento definida en la Sección 5.5, en kt/año; CE_{el}, al consumo eléctrico específico del proceso, en kWh/t de cemento; y s, al escenario evaluado. Los términos 10^3 t/kt y 10^{-3} MWh/kWh corresponden a los factores de conversión de unidades.

El valor de $CE_{\text{el}} = 130\,\text{kWh/t}$ se aplicó de forma uniforme a los cuatro escenarios. Esta igualdad corresponde a un supuesto de modelación y no implica que las cargas eléctricas reales de las cuatro configuraciones sean idénticas.

5.7 Metodología de cuantificación de emisiones

Las emisiones se cuantificaron a partir de los balances de materia y energía obtenidos para cada escenario. Se consideraron las emisiones de proceso asociadas a la producción de clínker, las emisiones directas por combustión y las emisiones indirectas derivadas del consumo de electricidad.

La estructura de línea base, emisiones de proyecto y fugas se definió tomando como referencia la metodología ACM0005 para los escenarios con reducción del factor clínker y ACM0003 para los escenarios con sustitución de petcoke por H_2V [80, 81]. Estas metodologías se utilizaron como referencias para organizar la cuantificación y no como aplicaciones completas de sus procedimientos.

La Tabla 5.6 presenta los factores de emisión utilizados.

Tabla 5.6: Factores de emisión utilizados en la cuantificación [82, 83, 84].

Fuente	**Factor de emisión**	**Unidad**
Combustión de petcoke	94,6	$kgCO_2/GJ$
Combustión de H_2V	0	$kgCO_2/GJ$
Electricidad de la red chilena	0,2384	tCO_2e/MWh
Transporte de carga	0,000129	$tCO_2/(t{\cdot}km)$

Nota: El factor nulo asignado al H_2V corresponde exclusivamente a las emisiones directas de CO_2 durante su combustión y no incluye las emisiones asociadas a su producción, acondicionamiento o transporte.

5.7.1 Emisiones operacionales por escenario

Las emisiones operacionales anuales de cada escenario se calcularon como la suma de las emisiones de proceso, combustión y consumo eléctrico:

$$E_{\mathrm{op},s,y} = E_{\mathrm{proc},s,y} + E_{\mathrm{comb},s,y} + E_{\mathrm{elec},s,y} \tag{5.21}$$

donde $E_{\mathrm{op},s,y}$ corresponde a las emisiones operacionales totales del escenario s durante el año y, en tCO_2e/año; $E_{\mathrm{proc},s,y}$, a las emisiones de proceso, en tCO_2/año; $E_{\mathrm{comb},s,y}$, a las emisiones directas por combustión, en tCO_2/año; y $E_{\mathrm{elec},s,y}$, a las emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico, en tCO_2e/año. El índice s identifica el escenario evaluado y el índice y, el año de operación.

Debido a que no se cuantificaron otros gases de efecto invernadero, las emisiones directas de CO_2 se incorporaron al total con igual valor numérico en CO_2 equivalente.

Emisiones de proceso

Las emisiones de proceso se obtuvieron mediante el balance estequiométrico de la descarbonatación del $CaCO_3$, suponiendo su conversión completa. El flujo molar horario calculado en la evaluación técnica se anualizó mediante:

$$E_{\text{proc},s,y} = \dot{n}_{\text{CaCO}_3,s} \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot H_{\text{op}} \tag{5.22}$$

donde $E_{\text{proc},s,y}$ corresponde a las emisiones de proceso del escenario s durante el año y, en tCO_2/año; $\dot{n}_{\text{CaCO}_3,s}$, al flujo molar de $CaCO_3$ descompuesto, en t-mol/h; M_{CO_2}, a la masa molar del CO_2, en tCO_2/t-mol; y H_{op}, al tiempo anual de operación definido en la Sección 5.5, en h/año.

La producción de arcilla calcinada se consideró sin emisiones de proceso de CO_2, debido a que las reacciones incluidas en el modelo corresponden a la deshidroxilación de los minerales arcillosos y no incluyen la descomposición de carbonatos. El balance estequiométrico de la producción de clínker se presenta en el Anexo A, mientras que las reacciones consideradas para la arcilla se desarrollan en el Anexo B.

Emisiones por combustión

Las emisiones directas por combustión se calcularon a partir del flujo horario de combustible, su poder calorífico inferior y su factor de emisión energético:

$$\begin{aligned} E_{\text{comb},s,y} = \dot{m}_{\text{comb},s} \cdot H_{\text{op}} \cdot PCI_{\text{comb},s} \cdot FE_{\text{comb},s} \\ \cdot \frac{1\,\text{tCO}_2}{10^3\,\text{kgCO}_2} \end{aligned} \tag{5.23}$$

donde $E_{\text{comb},s,y}$ corresponde a las emisiones directas por combustión del escenario s durante el año y, en tCO_2/año; $\dot{m}_{\text{comb},s}$, al flujo másico de combustible, en t/h; H_{op}, al tiempo anual de operación, en h/año; $PCI_{\text{comb},s}$, al poder calorífico inferior del combustible, en GJ/t; y $FE_{\text{comb},s}$, al factor de emisión energético del combustible, en kgCO_2/GJ. El último término corresponde a la conversión de kilogramos a toneladas de CO_2.

Para los escenarios OPC-P y LC^3-P se utilizó el factor de emisión del petcoke presentado en la Tabla 5.6. En los escenarios con H_2V se consideraron emisiones directas de combustión iguales a cero.

Emisiones asociadas al consumo eléctrico

Las emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico se calcularon mediante:

$$E_{\text{elec},s,y} = E_{\text{el},s,y} \cdot FE_{\text{red}} \tag{5.24}$$

donde $E_{\text{elec},s,y}$ corresponde a las emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico del escenario s durante el año y, en tCO_2e/año; $E_{\text{el},s,y}$, al consumo eléctrico anual, en MWh/año; y FE_{red}, al factor de emisión de la red eléctrica chilena, en tCO_2e/MWh.

El mismo consumo eléctrico y factor de emisión se aplicaron a los cuatro escenarios. Por tanto, las emisiones eléctricas se incorporaron a sus emisiones operacionales, pero no generaron diferencias entre ellos.

5.7.2 Línea base y escenarios de proyecto

La línea base corresponde al escenario OPC-P. Sus emisiones anuales se definieron a partir de las emisiones operacionales calculadas mediante la Ecuación 5.21:

$$BE_y = E_{\text{op,base},y} \tag{5.25}$$

donde BE_y corresponde a las emisiones de línea base durante el año y, en tCO_2e/año; y $E_{\text{op,base},y}$, a las emisiones operacionales del escenario OPC-P, en tCO_2e/año.

Las emisiones de cada escenario de proyecto se definieron mediante:

$$PE_{s,y} = E_{\text{op},s,y} \tag{5.26}$$

donde $PE_{s,y}$ corresponde a las emisiones operacionales del escenario de proyecto s durante el año y, en tCO_2e/año; y $E_{\text{op},s,y}$, a las emisiones operacionales calculadas para dicho escenario, en tCO_2e/año. Los escenarios de proyecto corresponden a LC^3-P, OPC-H_2V y LC^3-H_2V.

Las emisiones de proyecto no incluyen las fugas por transporte, las cuales se cuantificaron separadamente en la Subsección 5.7.3 y se descontaron al calcular la reducción neta.

5.7.3 Fugas por transporte de adiciones

Para los escenarios con LC^3, se cuantificaron las emisiones asociadas al transporte adicional de los componentes no clínker respecto de la formulación OPC. El cálculo se estructuró a partir de la herramienta metodológica *Project and leakage emissions from transportation of freight*, utilizada como referencia auxiliar de ACM0005 [80, 85].

La masa anual de adiciones adicionales se calculó mediante:

$$M_{\mathrm{ADD},s,y} = \max\left[0, (x_{\mathrm{add},s} - x_{\mathrm{add,base}}) \cdot P_{\mathrm{cemento}} \cdot 10^3\,\mathrm{t/kt}\right] \tag{5.27}$$

donde $M_{\mathrm{ADD},s,y}$ corresponde a la masa anual de adiciones adicionales del escenario s durante el año y, en t/año; $x_{\mathrm{add},s}$, a la fracción másica de componentes distintos del clínker en el escenario evaluado, adimensional; $x_{\mathrm{add,base}}$, a la fracción equivalente en el escenario OPC-P, adimensional; y P_{cemento}, a la producción anual de cemento definida en la Sección 5.5, en kt/año. El término 10^3 t/kt corresponde al factor de conversión de kilotoneladas a toneladas.

La formulación OPC-P contiene una fracción no clínker de 0,05, correspondiente al yeso. Este valor se utilizó únicamente como referencia para determinar la cantidad incremental de adiciones transportadas y no implica la asignación de fugas al escenario base. Para los escenarios con LC^3, la fracción no clínker corresponde a 0,50. Al descontar el yeso común a ambas formulaciones, se obtiene una fracción incremental de 0,45, compuesta por 0,30 de arcilla calcinada y 0,15 de caliza.

Las fugas anuales se calcularon mediante:

$$LE_{s,y} = M_{\mathrm{ADD},s,y} \cdot D_{\mathrm{add}} \cdot FE_{\mathrm{transporte}} \tag{5.28}$$

donde $LE_{s,y}$ corresponde a las emisiones por fugas del escenario s durante el año y, en tCO_2e/año; D_{add}, a la distancia total recorrida de ida y vuelta, en km; y $FE_{\mathrm{transporte}}$, al factor de emisión del transporte de carga, en $tCO_2/(t{\cdot}km)$.

Se consideró una distancia simple de 50 km, equivalente a un recorrido total de $D_{\mathrm{add}} = 100\,\mathrm{km}$, y un factor de emisión de $FE_{\mathrm{transporte}} = 0{,}000129\,tCO_2/(t \cdot km)$. Las fugas se aplicaron a los escenarios LC^3-P y LC^3-H_2V. Para OPC-H_2V se consideró $LE_{s,y} = 0$, dado que mantiene la formulación del escenario base.

La masa calculada mediante la Ecuación 5.27 se utilizó como una aproximación de la carga incremental transportada. En consecuencia, el cálculo no distingue entre la masa de arcilla cruda alimentada al calcinador y la masa de arcilla calcinada incorporada al cemento. La aplicación numérica se presenta en el Anexo C.

5.7.4 Reducción de emisiones

La reducción bruta anual se calculó mediante la diferencia entre las emisiones de línea base y las emisiones del escenario de proyecto:

$$ER_{\text{bruta},s,y} = BE_y - PE_{s,y} \tag{5.29}$$

donde $ER_{\text{bruta},s,y}$ corresponde a la reducción bruta anual del escenario s, en tCO_2e/año.

La reducción neta se obtuvo descontando las fugas aplicables:

$$ER_{\text{neta},s,y} = \max\left(0, ER_{\text{bruta},s,y} - LE_{s,y}\right) \tag{5.30}$$

donde $ER_{\text{neta},s,y}$ corresponde a la reducción neta anual del escenario s, en tCO_2e/año. Esta magnitud constituye la base para la estimación del potencial de ITMOs desarrollada en la sección siguiente.

La aplicación numérica de las emisiones de línea base, emisiones de proyecto, fugas y reducciones netas se presenta en el Anexo C.

5.8 Metodología para la estimación de ITMOs

La reducción neta calculada mediante la Ecuación 5.30 no constituye por sí misma un ITMO generado o transferido. Para estimar el potencial técnico de mitigación transferible, las reducciones netas se expresaron en tCO_2e y se multiplicaron por una fracción transferible durante el período de acreditación 2029–2038:

$$\text{ITMO}^{\text{pot}}_{s,y} = \begin{cases} \alpha_y \cdot ER_{\text{neta},s,y}, & 2029 \leq y \leq 2038, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \tag{5.31}$$

donde $\text{ITMO}^{\text{pot}}_{s,y}$ corresponde al volumen potencial de mitigación transferible del escenario s durante el año y, en tCO_2e/año; α_y, a la fracción de la reducción neta asumida como potencialmente autorizable y transferible durante el año y, adimensional; y $ER_{\text{neta},s,y}$, a la reducción neta de emisiones del escenario s durante el año y, en tCO_2e/año. El índice s identifica el escenario evaluado y el índice y, el año de operación.

En el caso base se adoptó $\alpha_y = 1$, por lo que el volumen potencial presenta el mismo valor numérico que la reducción neta durante el período de acreditación.

El volumen potencial acumulado durante los diez años de acreditación se calculó mediante:

$$\mathrm{ITMO}^{\mathrm{pot}}_{\mathrm{acum},s} = \sum_{y=2029}^{2038} \mathrm{ITMO}^{\mathrm{pot}}_{s,y} \tag{5.32}$$

donde $\mathrm{ITMO}^{\mathrm{pot}}_{\mathrm{acum},s}$ corresponde al volumen potencial acumulado de mitigación transferible del escenario s, en $\mathrm{tCO_2e}$.

La estimación se aplicó a los escenarios $\mathrm{LC^3}$-P, OPC-$\mathrm{H_2V}$ y $\mathrm{LC^3}$-$\mathrm{H_2V}$. El desarrollo de las emisiones de línea base, las emisiones de proyecto, las fugas, las reducciones netas y su acumulación durante el período de acreditación se presenta en el Anexo C.

Los volúmenes obtenidos representan un potencial técnico y no una cantidad de ITMOs efectivamente emitida o transferida. Su transferencia bajo el Artículo 6.2 requeriría autorización, monitoreo, reporte, verificación, primera transferencia, aplicación de los ajustes correspondientes, y un periodo crediticio vigente entre Chile y el pais receptor[86, 87].

5.9 Metodología de prefactibilidad económica

La evaluación económica se desarrolló de manera incremental para los escenarios $\mathrm{LC^3}$-P, OPC-$\mathrm{H_2V}$ y $\mathrm{LC^3}$-$\mathrm{H_2V}$ respecto del escenario base OPC-P. Se consideraron los costos operacionales variables, las inversiones y los costos fijos asociados a la infraestructura adicional, junto con los ingresos potenciales por ITMOs. Los costos comunes se excluyeron de la comparación incremental, mientras que los costos diferenciales de materias primas y transporte no fueron valorizados. Por tanto, el análisis representa el costo incremental de las medidas evaluadas y no el costo total de producción ni la rentabilidad absoluta de la planta.

El $\mathrm{H_2V}$ se consideró como un insumo adquirido a un proveedor externo. En consecuencia, la inversión de los escenarios que incorporan este combustible comprende únicamente su almacenamiento y acondicionamiento dentro de la planta, sin incluir electrolizadores, generación renovable, tratamiento de agua ni otros equipos vinculados con su producción.

La Tabla 5.7 presenta los supuestos utilizados en el caso central y los intervalos evaluados en el análisis de sensibilidad.

Tabla 5.7: Supuestos principales de la evaluación de prefactibilidad económica

Parámetro	**Caso central**	**Sensibilidad**	**Unidad**
Precio del petcoke (p_{pet})	60	–	USD/t
Precio de suministro de H_2V (p_{H2})	4,5	1,5–6,0	USD/kg H_2
Precio de electricidad (p_{el})	60	–	USD/MWh
CAPEX de referencia adoptado para el calcinador (FCI_{ref})	12	6–18	MMUSD
Capacidad de producción del calcinador de referencia (Q_{ref})	350.000	–	t/año de producto calcinado
Capacidad requerida de arcilla calcinada ($Q_{\text{LC3},s}$)	61.200	–	t/año de producto calcinado
Exponente de escalamiento del calcinador (n_{LC3})	0,40	–	–
Autonomía del almacenamiento de H_2V (τ_{alm})	24	–	h
Fracción útil del almacenamiento de H_2V (f_{util})	80	–	% de la capacidad nominal
Costo unitario de los tanques de H_2V (c_{tanq})	300	100–700	USD/kg H_2 de capacidad nominal
Multiplicador de equipo comprado a inversión fija instalada (F_{FCI})	4,36	–	–
Mantenimiento y reparaciones (f_{mant})	7	5-9	% del FCI/año
Suministros de operación (f_{sum})	15	–	% del mantenimiento
Seguros e impuestos (f_{seg})	2	–	% del FCI/año
Gastos generales (f_{gg})	60	–	% del mantenimiento
Tasa de descuento anual (i)	9	–	% anual
Vida económica (N)	10	–	años
Precio del ITMO (p_{ITMO})	37,18	0–139	USD/tCO_2e

Fuente: Supuestos definidos con base en [28, 41, 88, 89, 90, 91, 92].

El precio central del H_2V y su intervalo de sensibilidad se seleccionaron dentro del rango reportado para el suministro de hidrógeno de bajas emisiones [75]. Para la unidad de calcinación se utilizó como referencia un calcinador *retrofit* con un CAPEX de 12 MMUSD y una capacidad de producción de 350.000 t/año, reportados para el contexto cubano [28]. En esta evaluación, el monto se adoptó como una aproximación de la inversión fija instalada y la capacidad se asume como producción anual de arcilla calcinada. Debido al carácter contextual de estos valores, el CAPEX de referencia se evaluó entre 6 y 18 MMUSD en el análisis de sensibilidad. El exponente

de escalamiento y los factores auxiliares de estimación de costos se obtuvieron de criterios de diseño económico de plantas [88].

Los costos operacionales variables se calcularon a partir de los consumos anuales obtenidos en la evaluación técnica:

$$OPEX_{\mathrm{var},s} = 10^{-6}\,\mathrm{MMUSD/USD} \cdot \Big(M_{\mathrm{pet},s} \cdot p_{\mathrm{pet}} + M_{\mathrm{H2},s} \cdot p_{\mathrm{H2}} + E_{\mathrm{el},s} \cdot p_{\mathrm{el}} \Big) \tag{5.33}$$

donde $OPEX_{\mathrm{var},s}$ corresponde al costo operacional variable del escenario s, en MMUSD/año; $M_{\mathrm{pet},s}$, al consumo anual de petcoke, en t/año; p_{pet}, al precio del petcoke, en USD/t; $M_{\mathrm{H2},s}$, al consumo anual de H_2V, en kg H_2/año; p_{H2}, a su precio de suministro, en USD/kg H_2; $E_{\mathrm{el},s}$, al consumo eléctrico anual, en MWh/año; y p_{el}, al precio de la electricidad, en USD/MWh. El índice s identifica el escenario evaluado.

La inversión incremental de los escenarios con LC^3 se asoció a la unidad de calcinación de arcilla. El CAPEX reportado para el calcinador *retrofit* de referencia se adoptó como una aproximación de la inversión fija instalada y se ajustó a la capacidad requerida mediante la relación costo–capacidad [28, 88]:

$$FCI_{\mathrm{LC3},s} = FCI_{\mathrm{ref}} \left(\frac{Q_{\mathrm{LC3},s}}{Q_{\mathrm{ref}}} \right)^{n_{\mathrm{LC3}}} \tag{5.34}$$

donde $FCI_{\mathrm{LC3},s}$ corresponde a la inversión fija instalada estimada de la unidad de calcinación del escenario s, en MMUSD; FCI_{ref}, al CAPEX de referencia adoptado como aproximación de la inversión fija instalada, en MMUSD; $Q_{\mathrm{LC3},s}$, a la capacidad anual requerida de arcilla calcinada, en t/año de producto calcinado; Q_{ref}, a la capacidad anual de producción del calcinador de referencia, interpretada como producto calcinado, en t/año; y n_{LC3}, al exponente de escalamiento, adimensional.

Para los escenarios con H_2V, la capacidad nominal de almacenamiento se determinó a partir del consumo horario, la autonomía y la fracción útil del sistema:

$$M_{\mathrm{alm},s} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{H2},s} \cdot \tau_{\mathrm{alm}}}{f_{\mathrm{util}}} \tag{5.35}$$

donde $M_{\mathrm{alm},s}$ corresponde a la capacidad nominal de almacenamiento del escenario s, en kg H_2; $\dot{m}_{\mathrm{H2},s}$, al consumo horario de H_2V, en kg H_2/h; τ_{alm}, a la autonomía de almacenamiento, en h; y f_{util}, a la fracción útil de la capacidad nominal, adimensional.

Para los escenarios con H_2V se consideró un sistema de almacenamiento estacionario de hidrógeno gaseoso comprimido. Los recipientes metálicos Tipo I pueden construirse con grandes capacidades y se utilizan principalmente en aplicaciones estacionarias, incluido el almacenamiento industrial de hidrógeno. Asimismo, corresponden a la configuración más simple y económica de fabricar entre los tipos de tanques analizados [93].

El costo de compra de los recipientes se estimó mediante un valor central de 300 USD/kg H_2 de capacidad nominal. Debido a que la fuente consultada no entrega un costo unitario específico para recipientes Tipo I a la escala evaluada, este valor se adoptó como supuesto de prefactibilidad y se analizó mediante un intervalo de 100–700 USD/kg H_2.

El costo de los recipientes se expandió a inversión fija instalada mediante el factor $F_{\mathrm{FCI}} = 4{,}36$. Este multiplicador incorpora los costos directos e indirectos asociados al montaje, las tuberías industriales, la instrumentación, los sistemas eléctricos, las obras civiles, los servicios auxiliares, la ingeniería, la construcción, el contratista y la contingencia. La composición del factor se presenta en el Anexo D.

La inversión fija instalada asociada al almacenamiento y acondicionamiento de H_2V se calculó mediante:

$$FCI_{\mathrm{H2},s} = M_{\mathrm{alm},s} \cdot c_{\mathrm{tanq}} \cdot F_{\mathrm{FCI}} \cdot 10^{-6}\,\mathrm{MMUSD/USD} \tag{5.36}$$

donde $FCI_{\mathrm{H2},s}$ corresponde a la inversión fija instalada del sistema de almacenamiento y acondicionamiento del escenario s, en MMUSD; c_{tanq}, al costo unitario de compra de los recipientes, en USD/kg H_2 de capacidad nominal; y F_{FCI}, al multiplicador de equipo comprado a inversión fija instalada, adimensional.

La inversión fija instalada incremental total de cada escenario se calculó mediante:

$$FCI_s = FCI_{\mathrm{LC3},s} + FCI_{\mathrm{H2},s} \tag{5.37}$$

donde FCI_s corresponde a la inversión fija instalada incremental total del escenario s, en MMUSD; $FCI_{\mathrm{LC3},s}$, a la inversión asociada a la unidad de calcinación de arcilla, en MMUSD; y $FCI_{\mathrm{H2},s}$, a la inversión asociada al almacenamiento y acondicionamiento de H_2V, en MMUSD. Para los escenarios que no incorporan una de estas tecnologías, el término correspondiente se consideró igual a cero.

El OPEX fijo anual asociado a la infraestructura incremental se estimó mediante:

$$OPEX_{\text{fijo},s} = FCI_s \cdot [f_{\text{mant}} \cdot (1 + f_{\text{sum}} + f_{\text{gg}}) + f_{\text{seg}}] \tag{5.38}$$

donde $OPEX_{\text{fijo},s}$ corresponde al costo operacional fijo anual del escenario s, en MMUSD/año; f_{mant}, a la fracción anual de mantenimiento y reparaciones respecto del FCI, en año^{-1}; f_{sum}, a la fracción de suministros respecto del costo de mantenimiento, adimensional; f_{gg}, a la fracción de gastos generales respecto del costo de mantenimiento, adimensional; y f_{seg}, a la fracción anual de seguros e impuestos respecto del FCI, en año^{-1}. Los valores utilizados se presentan en la Tabla 5.7 y su desglose se desarrolla en el Anexo D.

La inversión fija instalada se transformó en un costo anual equivalente mediante el factor de recuperación de capital:

$$FRC = \frac{i \cdot (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \tag{5.39}$$

donde FRC corresponde al factor de recuperación de capital, adimensional; i, a la tasa de descuento anual, adimensional; y N, a la vida económica considerada, en años. Para una tasa de descuento de 0,09 y una vida económica de 10 años, se obtuvo $FRC = 0{,}15582$.

El costo anual equivalente de cada escenario se calculó mediante:

$$C_{\text{anual},s} = OPEX_{\text{var},s} + OPEX_{\text{fijo},s} + FCI_s \cdot FRC \tag{5.40}$$

donde $C_{\text{anual},s}$ corresponde al costo anual equivalente parcial del escenario s, en MMUSD/año. Este indicador incluye únicamente los componentes económicos que varían entre escenarios y no representa el costo total de producción del cemento. Las demás variables conservan las definiciones y unidades indicadas previamente.

Los ingresos climáticos potenciales se calcularon a partir del volumen anual de ITMOs y de su precio unitario:

$$I_{\text{ITMO},s,y} = \text{ITMO}^{\text{pot}}_{s,y} \cdot p_{\text{ITMO}} \cdot 10^{-6}\,\text{MMUSD/USD} \tag{5.41}$$

donde $I_{\text{ITMO},s,y}$ corresponde al ingreso potencial del escenario s durante el año y, en MMUSD/año; $\text{ITMO}^{\text{pot}}_{s,y}$, al volumen potencial de reducciones transferibles, expresado en tCO_2e/año; y p_{ITMO}, al precio unitario considerado, en USD/tCO_2e. Se asumió la equivalencia de un ITMO por cada tCO_2e de reducción neta potencialmente transferible.

El precio central de 37,18 USD/tCO_2e se obtuvo mediante la conversión del costo promedio internacional de 30 CHF/tCO_2e reportado por la Fundación KliK para el período 2025–2030. Este valor se utilizó como proxy de valorización de las reducciones potencialmente transferibles y no representa un precio contractual MOPA ni un ingreso garantizado para el proyecto [90, 91].

Para el cálculo del valor actual neto, el FCI se incorporó como un desembolso inicial y no como un costo anualizado dentro de los flujos de caja, evitando su doble contabilización. El flujo incremental anual se calculó mediante:

$$\begin{aligned} FC_{s,t} = {} & OPEX_{\text{var,base},t} + OPEX_{\text{fijo,base},t} \\ & - OPEX_{\text{var},s,t} - OPEX_{\text{fijo},s,t} + I_{\text{ITMO},s,t} \end{aligned} \tag{5.42}$$

donde $FC_{s,t}$ corresponde al flujo incremental del escenario s durante el período t, en MMUSD/año; los términos con índice base corresponden al escenario OPC-P; e $I_{\text{ITMO},s,t}$, al ingreso climático asociado al año calendario representado por el período t. Para el caso sin valorización climática se consideró $I_{\text{ITMO},s,t} = 0$.

El valor actual neto incremental se calculó mediante:

$$VAN_s = -FCI_s + \sum_{t=1}^{N} \frac{FC_{s,t}}{(1+i)^t} \tag{5.43}$$

donde VAN_s corresponde al valor actual neto incremental del escenario s, en MMUSD; y t, al año de operación considerado. La fecha $t = 0$ se situó al cierre del período de implementación, inmediatamente antes del inicio de la operación y acreditación en 2029. Se consideraron diez flujos anuales correspondientes al período 2029–2038, sin valor residual ni capital de trabajo incremental. Para efectos de la evaluación económica, los ingresos potenciales asociados a los ITMOs se imputaron al mismo año en que se generan las reducciones correspondientes. Esta imputación constituye una convención simplificada de valorización y no representa la fecha efectiva de transferencia ni de pago.

Debido a que los consumos, precios y reducciones anuales se mantuvieron constantes durante el horizonte evaluado, el período simple de recuperación se calculó mediante:

$$PB_s = \frac{FCI_s}{FC_s} \tag{5.44}$$

donde PB_s corresponde al período simple de recuperación del escenario s, en años; y FC_s, al flujo incremental anual constante del caso central con valorización de ITMOs, en MMUSD/año.

Cuando este flujo resultó igual o menor que cero, se consideró que la inversión no se recupera dentro del horizonte evaluado.

A partir de los costos e ingresos calculados se determinaron el costo anual específico, el costo incremental respecto de OPC-P, el costo de abatimiento, el precio de equilibrio del ITMO, el período simple de recuperación y el valor actual neto incremental.

El análisis de sensibilidad se estructuró mediante variaciones univariadas, manteniendo constantes los demás supuestos técnicos y económicos, y mediante una evaluación conjunta de los precios del H_2V y del ITMO. Se seleccionaron las variables que concentran las principales incertidumbres económicas de los escenarios evaluados. El precio de suministro del H_2V se modificó entre 1,5 y 6,0 USD/kg H_2, intervalo que comprende condiciones favorables y desfavorables respecto del valor central de 4,5 USD/kg H_2 y que permite evaluar la exposición de los escenarios con hidrógeno al costo recurrente del combustible [75]. El costo unitario de los recipientes de almacenamiento se evaluó entre 100 y 700 USD/kg H_2 de capacidad nominal, debido a la ausencia de una referencia específica para sistemas Tipo I de la escala considerada y a la incertidumbre asociada a su configuración industrial [89, 93]. El CAPEX de referencia del calcinador se modificó entre 6 y 18 MMUSD, equivalente a una variación de $\pm 50\%$ respecto del valor central de 12 MMUSD, debido al carácter contextual del proyecto retrofit utilizado como referencia [28]. Asimismo, la tasa de mantenimiento y reparaciones se evaluó entre 5% y 9% del FCI anual, alrededor del supuesto central de 7%, para representar la incertidumbre propia de una estimación preliminar de costos operacionales [88]. Finalmente, el precio del ITMO se analizó entre 0 y 139 USD/tCO_2e, intervalo que incorpora la ausencia de valorización, el valor central de 37,18 USD/tCO_2e y referencias internacionales superiores utilizadas como marcadores de sensibilidad, sin interpretarlas como una proyección del precio futuro de transferencia [90, 92].

Las variaciones del precio del H_2V y del ITMO se utilizaron para evaluar su efecto sobre el VAN incremental y determinar las combinaciones que producen un VAN igual a cero. Las sensibilidades del costo de almacenamiento y del CAPEX del calcinador permitieron examinar sus efectos sobre la inversión fija instalada y el VAN de los escenarios correspondientes, mientras que la variación de la tasa de mantenimiento se empleó para evaluar su incidencia sobre el OPEX fijo. Los rangos representan escenarios determinísticos de prefactibilidad y no distribuciones probabilísticas. Las matrices y sustituciones numéricas se presentan en el Anexo D.

Capítulo 6

Resultados y Análisis

6.1 Estructura de Mercado

El mercado cementero chileno se caracteriza históricamente por un alto grado de concentración. El núcleo productivo está conformado por tres conglomerados que dominan más del ochenta por ciento de la capacidad instalada y los despachos a nivel nacional: Cementos Bío Bío S.A. (Cbb), Cemento Polpaico S.A. y Melón S.A. Estas compañías operan con esquemas de integración vertical que incluyen la explotación de canteras, plantas de producción y redes de distribución, complementando su oferta con negocios de hormigón premezclado, cal industrial y áridos [54].

Aunque los tres son actores dominantes, sus modelos productivos presentan diferencias estratégicas. Cbb y Polpaico operan múltiples plantas integradas, controlando la cadena de valor desde la extracción hasta la producción de clínker. Melón S.A., si bien cuenta con una planta integrada en La Calera, complementa su producción con un volumen significativo de clínker importado, lo que le otorga flexibilidad logística y optimización de costos [25, 26, 94].

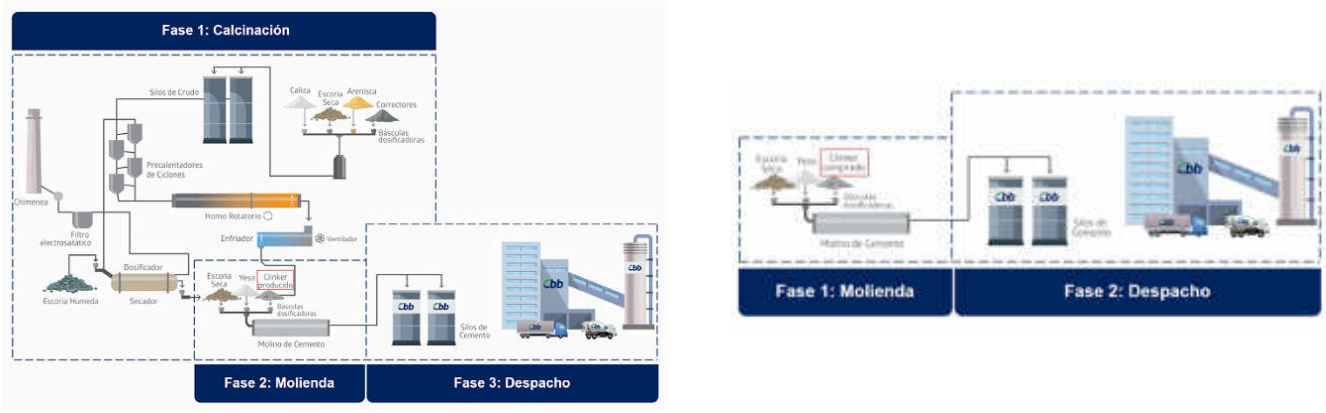
En la periferia de este núcleo se ha consolidado un grupo de actores de menor escala, cuyo modelo de negocio se basa exclusivamente en la importación de clínker o cemento terminado para abastecer sus propias plantas de molienda y operaciones de hormigón. Entre ellos destacan Cementos La Unión Chile y Empresas Transex. Esta configuración se vio alterada en 2020 con la fusión de Cementos BSA con Cemento Polpaico, un movimiento que fortaleció la cobertura logística de esta última y consolidó aún más el mercado. La viabilidad de este modelo de importación se explica por la particular geografía lineal de Chile y su extensa red portuaria, que facilitan la entrada de suministros a costos competitivos, un fenómeno acentuado por la sobreoferta de clínker en mercados asiáticos y los bajos costos de los fletes de retorno [54].

6.1.1 Modelo Productivo y Tipología de Cementos

El modelo productivo de la industria chilena se ha adaptado a un entorno de altos costos para la producción local de clínker, ya sea por la lejanía de los yacimientos de caliza de alta calidad o por la necesidad de procesar materias primas de menor pureza. Esto ha generado una bifurcación estructural [54]:

- Plantas Integradas: Son aquellas que abarcan la totalidad del proceso productivo, desde la extracción de la materia prima hasta el despacho del cemento. El proceso comienza con la extracción de caliza, que luego es sometida a un proceso de calcinación en hornos rotatorios a altas temperaturas para producir clínker, el componente clave del cemento. En Chile, esta capacidad de producción de clínker se concentra en cuatro instalaciones estratégicas: las plantas de Cbb en Antofogasta y Teno (Curicó), la planta Cerro Blanco de Polpaico en Tiltil, y la planta de Melón en La Calera.

- Estaciones de Molienda: Estas instalaciones operan un modelo de negocio más flexible, centrado en las fases finales del proceso. Importan el clínker, que llega como un producto intermedio, y lo muelen junto a otros materiales (como yeso, puzolana o escoria) para producir el cemento final. Suelen ubicarse en zonas costeras estratégicas, como los puertos de San Antonio, Talcahuano, Ventanas, Mejillones y Coronel, para optimizar la logística de importación y reducir los costos de transporte.



(a) (b)

Figura 6.1: (a) Modelo de planta integrado; (b) modelo de planta de molienda [54].

6.1.2 Tipologías y Características de los Cementos en Chile

La clasificación y las características de los cementos comercializados en Chile están rigurosamente definidas por la Norma Chilena NCh 148, que establece las especificaciones técnicas de cada tipo de

cemento en función de la naturaleza y proporción de sus componentes, en particular de las adiciones que se mezclan con el clínker. Dicha normativa ha permitido a la industria chilena desarrollar una estrategia productiva centrada en la sustitución parcial del clínker con el doble objetivo de optimizar costos y mitigar el impacto medioambiental [53].

A continuación, se detallan los principales tipos de cemento producidos en el país, cuyas propiedades y aplicaciones responden a esta lógica estratégica [53]:

- Cemento puzolánico (PPC): es el producto más común en el mercado nacional, ya que constituye aproximadamente el 80% del cemento que se fabrica en Chile. Su formulación incorpora puzolana natural, un material inorgánico de origen volcánico que reacciona químicamente con los subproductos de la hidratación del clínker para formar compuestos estables y resistentes. Este proceso confiere al hormigón propiedades de alta durabilidad, como mayor impermeabilidad y elevada resistencia a la agresión de agentes químicos, como los sulfatos y los cloruros. Estas características son especialmente relevantes en un país con una extensa costa y proyectos mineros expuestos a ambientes agresivos, y resultan cruciales para la resiliencia de las estructuras en una zona sísmicamente activa como Chile. La gran abundancia de puzolana natural en el territorio nacional ha sido una ventaja estratégica que ha permitido a la industria alcanzar uno de los factores de clínker más bajos del mundo y posicionarse como referente global en la producción de cementos de bajas emisiones.

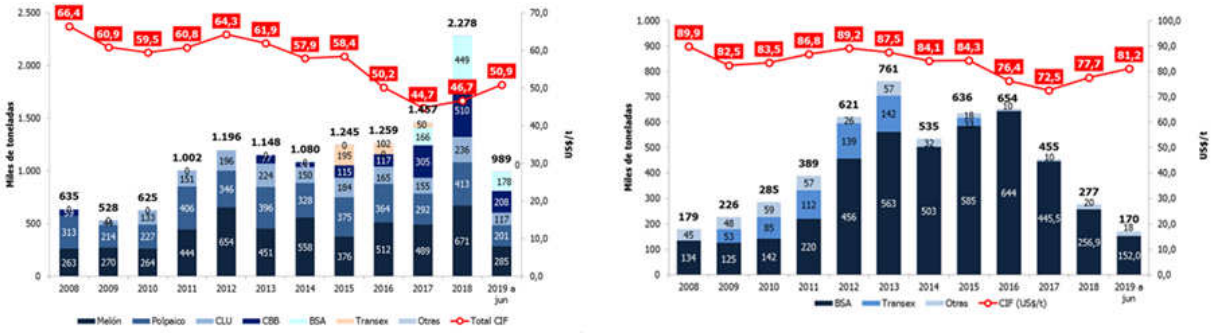
- Cemento Siderúrgico: Su producción utiliza como adición principal la escoria granulada de alto horno, un subproducto de la industria siderúrgica que, de otro modo, sería un residuo industrial. La escoria posee propiedades hidráulicas latentes, lo que significa que, al molerse finamente, contribuye activamente a la resistencia y durabilidad del cemento. Gracias a estas propiedades, el cemento siderúrgico es reconocido por su alta resistencia a los sulfatos, su bajo calor de hidratación y su excelente durabilidad en ambientes marinos. Al aprovechar un residuo industrial, la producción de este cemento reduce la explotación de recursos naturales y disminuye significativamente la huella de carbono asociada.

- Cemento Portland (OPC): también conocido como cemento Portland ordinario, es el cemento tradicional y sirve como base para las demás variedades. Su composición es mayoritariamente clínker (cerca del 95%) y un pequeño porcentaje de yeso, que actúa como regulador del fraguado. Su principal atributo es el rápido desarrollo de resistencias iniciales, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en las que la velocidad de construcción es crítica o para la fabricación de elementos prefabricados. Sin embargo, debido a su alta intensidad en clínker, es el cemento con el mayor coste energético y la huella de carbono más elevada. En consecuencia, a pesar de sus ventajas para aplicaciones específicas, su producción en Chile es minoritaria

(alrededor del 20% del total) y se destina a usos muy concretos en los que sus propiedades son imprescindibles.

En términos de capacidad productiva, la industria chilena cuenta con una capacidad instalada de cemento de 10,4 millones de toneladas anuales [8]. No obstante, la utilización efectiva de esta capacidad ha oscilado entre el 50% y el 60% en los últimos años, reflejando una sobrecapacidad estructural influida por la moderación de la demanda interna y la presión competitiva de las importaciones [8].

El análisis consolidado de producción y comercio exterior confirma la dependencia del mercado del clínker importado. Como se observa en la 6.2, las importaciones de clínker han representado consistentemente una fracción significativa del abastecimiento total, alcanzando un máximo de 2,278 millones de toneladas en 2018.



(a) (b)

Figura 6.2: (a) Importaciones de clínker en Chile 2008-2019; (b) Importaciones de cemento en Chile 2008-2019 [54].

El desempeño reciente del sector ha estado marcado por un contexto macroeconómico desafiante. Durante 2023, la industria experimentó una nueva contracción en el volumen de ventas, afectada por una fuerte crisis en el sector de la construcción, el elevado costo del financiamiento y la incertidumbre económica general. Esta volatilidad en la demanda interna, impulsada por la estacionalidad de la obra pública y la inversión privada, define el pulso del mercado y acentúa la intensa competencia entre los actores establecidos.

6.2 Análisis de los Actores Clave en la Industria del Cemento en Chile

La industria del cemento en Chile opera dentro de un ecosistema complejo y multifacético, donde actores del sector privado, público y académico interactúan para dar forma a la dinámica del

mercado, el marco regulatorio y la trayectoria de innovación. Comprender las atribuciones y labores de cada una de estas entidades es fundamental para analizar no solo la competitividad del sector, sino también su capacidad para responder a los desafíos estratégicos del siglo XXI, principalmente el compromiso de descarbonización adquirido por Chile en el marco del Acuerdo de París.

6.2.1 Sector Privado

El sector privado constituye el núcleo operativo de la industria. Sus empresas son las responsables de la producción y comercialización, mientras que sus asociaciones gremiales articulan la visión estratégica del sector, actúan como contraparte ante el Estado y lideran la implementación de las metas de sostenibilidad.

Principales Productores

El mercado del cemento en Chile, aunque concentrado, presenta una diversidad de modelos operativos que definen la estrategia y la base de costos de cada competidor. Históricamente dominado por tres empresas verticalmente integradas, el sector ha visto cómo la importación de clínker ha redefinido las reglas del juego. A continuación, se detalla la estructura productiva y la estrategia de suministro de los actores principales:

a) Cementos Bío Bío (Cbb): La resiliencia financiera de Cbb se sustenta en un modelo operativo híbrido y flexible. La columna vertebral de su producción propia de clínker son sus plantas integradas en Antofagasta (Inacesa) y Teno (Curicó). Estas instalaciones le otorgan un control fundamental sobre su materia prima clave. Sin embargo, Cbb complementa esta capacidad con plantas de molienda en Arica y Talcahuano. Aquí radica el punto clave de su estrategia: estas plantas de molienda no se nutren exclusivamente del clínker de sus plantas hermanas. Cbb utiliza una estrategia de abastecimiento dual, recurriendo a la importación de clínker cuando las condiciones del mercado global son favorables. El ejemplo más claro fue la decisión de detener la producción de clínker en su planta de Talcahuano en 2017 debido a los bajos costos de importación, para luego reactivarla cuando los precios internacionales subieron, demostrando una gran agilidad logística y financiera.

b) Melón S.A.: Melón también opera bajo un modelo mixto que combina una fuerte capacidad de producción propia con una red de molienda distribuida. El corazón productivo de la compañía es su planta integrada en La Calera, una de las más antiguas y significativas del país, donde produce su propio clínker. Para abastecer al resto del país, cuenta con estaciones de molienda en Ventanas, Puerto Montt y una más reciente en Punta Arenas. Para alimentar estas plantas, Melón emplea un esquema de suministro combinado: además de transportar

clínker desde La Calera, la compañía importa clínker activamente a través de su terminal en la zona de Ventanas (Quintero-Puchuncaví), lo que le permite optimizar su logística y asegurar el abastecimiento a sus operaciones más alejadas.

c) Polpaico Soluciones: Polpaico basa su operación en un modelo de integración vertical selectiva. Su núcleo productivo es la planta integrada de Cerro Blanco en Tiltil, que cuenta con yacimientos de caliza y hornos propios para la producción de clínker. Para asegurar su cobertura nacional, la compañía opera también plantas de molienda en Mejillones (norte) y Coronel (sur). Al igual que sus competidores, Polpaico complementa su producción propia con importaciones, apalancándose en su terminal de clínker en San Antonio para recibir materia prima del exterior y distribuirla a sus centros de molienda según la conveniencia económica y logística. La fusión con Cementos BSA, una empresa construida sobre la importación, fortaleció aún más esta capacidad.

d) Nuevos Competidores (Importadores y Molinos): Actores como Cementos La Unión y Empresas Transex operan con un modelo de negocio disruptivo y desintegrado verticalmente. A diferencia de los actores tradicionales, estas empresas no producen su propio clínker en Chile. Su estrategia se basa exclusivamente en la importación de clínker desde mercados asiáticos para procesarlo en sus plantas de molienda locales, o en la importación directa de cemento terminado. Este enfoque, que evita la masiva inversión en hornos y canteras, les permite competir agresivamente en precio y ha sido un factor clave en la reconfiguración de la industria.

Entidades Gremiales

a) **Cámara Chilena de la Construcción (CChC):** Es la asociación gremial más influyente del país, representando a toda la cadena de valor de la construcción. Su función en el mercado es fomentar la inversión en infraestructura y edificación, impulsando la demanda de cemento. Promueve activamente la estandarización de buenas prácticas a través de iniciativas como los Acuerdos de Producción Limpia (APL). Respecto al Acuerdo de París, actúa como un implementador indirecto, ya que sus programas de sostenibilidad y eficiencia en la construcción contribuyen a reducir las emisiones del sector y apoyar las metas climáticas nacionales [95].

b) **Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT):** Es una entidad vinculada a la Cámara Chilena de la Construcción que promueve innovación, transferencia tecnológica, documentación técnica y mejores prácticas en el sector construcción. En la cadena del cemento, su rol es clave para difundir soluciones constructivas de menor huella, generar capacidades técnicas y apoyar la adopción de herramientas de medición de carbono en edificaciones e infraestructura.

Tabla 6.1: Plantas cementeras en Chile, capacidad instalada, modelo productivo y fuente de abastecimiento de clínker.

Nombre de la planta	**Empresa**	**Capacidad instalada (Mt/año)**	**Tipo de planta**	**Fuente del clínker**
Planta Antofagasta (Inacesa)	Cbb	0,5	Integrada	Producción propia
Planta Teno/Curicó	Cbb	1,7	Integrada	Producción propia
Planta Arica	Cbb	0,2	Molienda	Abastecimiento mixto[1]
Planta Talcahuano	Cbb	0,8	Molienda	Abastecimiento mixto[1]
Planta La Calera	Melón S.A.	1,5	Integrada	Producción propia
Planta Ventanas	Melón S.A.	0,6	Molienda	Abastecimiento mixto[1]
Planta Puerto Montt	Melón S.A.	0,6	Molienda	Abastecimiento mixto[1]
Planta Punta Arenas	Melón S.A.	0,25	Molienda	Abastecimiento mixto[1]
Planta Cerro Blanco	Polpaico S.A.	1,3	Integrada	Producción propia
Planta Mejillones	Polpaico S.A.	0,7	Molienda	Abastecimiento mixto[1]
Planta Coronel	Polpaico S.A.	0,4	Molienda	Abastecimiento mixto[1]
Planta Quilicura (BSA)[2]	Polpaico S.A.	1,2	Molienda	Abastecimiento mixto[1]
Planta San Pedro	Cementos La Unión	0,3	Molienda	Exclusivamente importado
Planta RM	Empresas Transex	0,5	Molienda	Exclusivamente importado

Nota[1]: El abastecimiento mixto corresponde a clínker de origen propio e importado.
Nota[2]: BSA corresponde a la antigua planta de BSA Cementos. Las capacidades instaladas se expresan en millones de toneladas de cemento por año.

En el marco del Acuerdo de París, funciona como articulador entre productores de materiales, constructoras, mandantes y academia, facilitando que la demanda del sector construcción incorpore criterios de carbono incorporado [96, 97].

Institutos Técnico-sectoriales

a) **Instituto del Cemento y Hormigón de Chile (ICH):** Como principal entidad gremial y técnica, el ICH agrupa a los productores de cemento y hormigón del país. Su labor principal en el mercado es promover el desarrollo tecnológico y la correcta aplicación de los materiales, elaborando guías y manuales que son un referente para toda la industria. En el contexto del Acuerdo de París, el ICH actúa como la contraparte técnica del sector privado, liderando y coordinando la "Hoja de Ruta Chile Cemento y Concreto Net Zero 2050", la estrategia sectorial para alcanzar la carbono neutralidad y cumplir con las metas nacionales [98].

b) **Instituto Nacional de Normalización (INN):** Es el organismo técnico chileno encargado de la infraestructura de calidad, incluyendo la elaboración y actualización de Normas Chilenas,

la acreditación y la metrología. En la industria del cemento cumple un rol habilitante, ya que las normas técnicas definen requisitos de calidad, desempeño, ensayos y clasificación de cementos y hormigones, permitiendo que los productos sean comparables, certificables y aceptados por el mercado. En el contexto del Acuerdo de París, el INN es relevante porque la descarbonización del cemento requiere actualizar estándares que permitan incorporar cementos con menor factor clínker, adiciones minerales, nuevos materiales cementicios suplementarios y metodologías de medición de huella de carbono sin comprometer seguridad estructural ni durabilidad [99].

Actores de Apoyo a la Cadena y Consumidores Privados

a) **Constructoras, inmobiliarias y mandantes privados:** Son consumidores directos de cemento y hormigón, por lo que influyen en la demanda efectiva de materiales bajos en carbono. Su rol no es solo comprar, sino también especificar requisitos técnicos, ambientales y de desempeño en proyectos. Si incorporan criterios de huella de carbono, análisis de ciclo de vida o certificaciones ambientales, pueden acelerar la adopción de cementos con menor factor clínker y hormigones optimizados. En el contexto de ITMOs, son relevantes porque pueden generar demanda por reducciones verificables o participar en programas agregados de mitigación en la cadena de valor.

b) **Minería, energía e infraestructura como consumidores estratégicos:** Estos sectores demandan grandes volúmenes de cemento y hormigón para obras industriales, fundaciones, caminos, túneles, plantas, puertos y proyectos energéticos. Su capacidad de compra les permite influir en las especificaciones de materiales y crear mercados tempranos para cemento bajo en carbono. En particular, la minería puede ser un comprador estratégico si busca reducir emisiones de alcance 3 asociadas a materiales de construcción. Para proyectos financiados con ITMOs, estos sectores también pueden aportar escala, trazabilidad y demanda suficiente para justificar programas de mitigación de gran tamaño.

6.2.2 Sector Público

El sector público define las reglas del juego para la industria. Actúa como regulador, fiscalizador y, a menudo, como el principal cliente, estableciendo desde los estándares técnicos de los productos hasta las metas de reducción de emisiones que la industria debe cumplir.

Ministerios

a) **Ministerio del Medio Ambiente (MMA):** Es la autoridad rectora en materia ambiental y climática. Sus atribuciones incluyen el diseño de políticas y normas para la protección

ambiental. En el mercado del cemento, regula las emisiones atmosféricas de las plantas, gestiona la Ley REP para envases y aplica los impuestos verdes al CO2. Es el supervisor y rector de la política climática de Chile, liderando la implementación de la Ley Marco de Cambio Climático y diseñando el futuro mercado de carbono bajo el Artículo 6 del Acuerdo de París [77, 100].

b) **Ministerio de Obras Públicas (MOP):** Como principal organismo estatal encargado de la infraestructura pública, el MOP es uno de los mayores clientes de la industria. Su labor en el mercado es definir las especificaciones técnicas obligatorias para el uso de hormigón en sus proyectos a través del Manual de Carreteras, estableciendo un estándar de calidad para grandes obras. Respecto al Acuerdo de París, actúa como un implementador clave, con la capacidad de exigir el uso de materiales de baja huella de carbono en sus licitaciones, impulsando así la descarbonización del sector [101, 102].

c) **Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU):** Es la cartera de Estado responsable de la política habitacional y la planificación urbana. En el mercado del cemento, es un motor de demanda constante a través de los proyectos de vivienda, regulando los estándares de construcción mediante la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). En el marco climático, es un implementador fundamental en el sector de edificaciones, promoviendo la eficiencia energética en viviendas para contribuir a las metas de reducción de emisiones del país [103, 104].

d) **Ministerio de Minería:** Este organismo define la política minera nacional y otorga las concesiones para la extracción de materias primas. Su rol en el mercado del cemento es regular el acceso a los recursos minerales no metálicos (caliza, arcilla) que son fundamentales para la producción de clínker. En el contexto del Acuerdo de París, actúa como implementador sectorial, asegurando que la política de extracción de recursos se alinee con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia del país [105, 106].

e) **Ministerio de Energía:** Es el organismo encargado de elaborar y coordinar planes, políticas y normas para el desarrollo del sector energético. Su rol en la industria cementera es indirecto pero estratégico, ya que la producción de cemento depende de electricidad, combustibles térmicos, seguridad energética y acceso a energías renovables. En la agenda de descarbonización, el Ministerio de Energía es clave para habilitar electrificación de procesos, contratos de energía renovable, uso de hidrógeno verde, combustibles alternativos y eficiencia energética industrial. En el marco de ITMOs, puede aportar criterios técnicos para proyectos cuya reducción de emisiones dependa de sustitución energética, combustibles bajos en carbono o integración con energías renovables [107].

f) **Corporación de Fomento de la Producción (CORFO):** Es la agencia pública de fomento productivo, innovación y competitividad. En la industria cementera puede apoyar proyectos piloto, escalamiento tecnológico, innovación en materiales, economía circular, combustibles alternativos y desarrollo de capacidades. En el contexto del Acuerdo de París, CORFO puede actuar como habilitador financiero y tecnológico, especialmente en etapas tempranas donde las soluciones bajas en carbono aún requieren inversión, validación técnica y reducción de riesgo. Para proyectos con potencial de ITMOs, su rol puede ser complementar financiamiento climático internacional con instrumentos nacionales de innovación y desarrollo productivo [108].

g) **Banco Central de Chile:** No regula directamente la industria cementera ni los mercados de carbono, pero es un actor relevante del entorno macrofinanciero. Su función principal es velar por la estabilidad de la moneda y contribuir a la estabilidad y eficacia del sistema financiero. En el contexto de la transición climática, su importancia radica en monitorear riesgos macroeconómicos y financieros asociados a cambios en precios de energía, inversión verde, inflación de materiales y transición productiva. Para un proyecto financiado vía ITMOs, su rol es indirecto: contribuye al marco de estabilidad que permite atraer inversión climática y financiamiento de largo plazo [109].

Organismos reguladores y fiscalizadores

a) **Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN):** Es el brazo técnico y fiscalizador del Ministerio de Minería. Su labor principal en la industria es supervisar directamente las canteras de las empresas cementeras, fiscalizando el cumplimiento del Reglamento de Seguridad Minera y aprobando los planes de explotación y cierre. Como supervisor técnico, su rol en el marco climático es garantizar que la extracción de recursos se realice de manera segura y sostenible, contribuyendo a los objetivos ambientales del país [110, 111].

b) **Superintendencia del Medio Ambiente (SMA):** Es el principal ente fiscalizador ambiental del Estado. Su atribución es supervisar el cumplimiento de las normativas ambientales y las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA). Su labor en la industria es la fiscalización activa de las operaciones en plantas y canteras. En el contexto del Acuerdo de París, actúa como el principal organismo supervisor, asegurando que la industria opere dentro de los límites de emisión y cumpla con las regulaciones necesarias para alcanzar las metas climáticas de Chile [112, 113].

c) **Servicio de Evaluación Ambiental (SEA):** Es el organismo encargado de administrar el

Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Su rol en la industria cementera es evaluar ambientalmente proyectos nuevos o modificaciones relevantes de plantas, canteras, sistemas energéticos, instalaciones de coprocesamiento, almacenamiento de combustibles, valorización de residuos u otras actividades que deban ingresar al SEIA. En el marco del Acuerdo de París, el SEA es un habilitador regulatorio porque incorpora progresivamente criterios de cambio climático, participación ciudadana y evaluación de impactos ambientales. Para proyectos financiables mediante ITMOs, su importancia radica en asegurar que la actividad de mitigación cuente con permisos ambientales sólidos y coherencia con la normativa nacional [114].

d) **Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC):** Es el organismo encargado de fiscalizar el cumplimiento de la normativa de seguridad aplicable a las instalaciones eléctricas, de combustibles y de hidrógeno. En virtud del Decreto Supremo N.º 13/2022, supervisa el cumplimiento de los requisitos de seguridad asociados al diseño, construcción, operación, mantenimiento, modificación e inspección de instalaciones destinadas a la producción, acondicionamiento, almacenamiento, transferencia y consumo de hidrógeno. Asimismo, recibe la comunicación de inicio de obras y la inscripción de las instalaciones antes de su entrada en operación, sin que esta última constituya por sí misma una aprobación del proyecto. Cuando una iniciativa no se encuentra cubierta por el reglamento o emplea tecnologías diferentes de las contempladas en este, la SEC evalúa su solicitud como proyecto especial y puede autorizarla mediante una resolución fundada, previa acreditación de condiciones de seguridad equivalentes. En la industria cementera, estas atribuciones resultan relevantes para los sistemas de almacenamiento, acondicionamiento, transferencia y consumo de H_2V, así como para eventuales adaptaciones tecnológicas de quemadores y equipos térmicos. La SEC no participa directamente en la cuantificación ni en la autorización de ITMOs; su función consiste en fiscalizar la seguridad y el cumplimiento regulatorio de la infraestructura que sustenta la actividad de mitigación [50, 115].

e) **Comisión Nacional de Energía (CNE):** Es el organismo técnico que monitorea y proyecta el funcionamiento del sector energético, asesora al Gobierno y propone normas legales y reglamentarias en materias energéticas. Para la industria cementera, su rol es indirecto pero relevante porque las condiciones regulatorias, tarifarias y de planificación energética afectan los costos de electricidad, la posibilidad de firmar contratos renovables, la expansión de transmisión y la competitividad de alternativas bajas en carbono. En el marco del Acuerdo de París, la CNE contribuye al diseño de un sistema energético compatible con la descarbonización industrial. Para proyectos financiados vía ITMOs, su relevancia aumenta cuando la reducción proviene de electrificación, energías renovables o sustitución de combustibles [116].

6.2.3 Sector Académico

La academia es un socio estratégico que proporciona validación independiente, impulsa la investigación de nuevas tecnologías y forma el capital humano necesario para la evolución de la industria.

Centros de Investigación y Desarrollo

a) **Universidad de Chile – Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM):** El Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales es la entidad de certificación de calidad más prestigiosa del país. Su labor principal en el mercado es certificar que los cementos cumplen con la Norma Chilena NCh 148, un requisito indispensable para su comercialización. Respecto al Acuerdo de París, actúa como un validador de la innovación, ya que su certificación es crucial para que los nuevos productos bajos en carbono obtengan la confianza del mercado y puedan ser implementados a gran escala [53, 117, 118].

b) **Pontificia Universidad Católica de Chile – Centro de Innovación del Hormigón:** Este centro de investigación aplicada se enfoca en desarrollar nuevas tecnologías para la industria. Su principal labor es colaborar con las empresas en proyectos de I+D. En el marco de la descarbonización, es un socio clave en la creación de soluciones, ya que su investigación es fundamental para desarrollar las tecnologías que permitirán a la industria cumplir los objetivos de la Hoja de Ruta Net Zero [119, 120].

Universidades e Institutos Técnicos

a) **Universidades con capacidades en ingeniería, materiales, minería, energía y cambio climático:** Las universidades cumplen un rol transversal en la transición de la industria cementera, ya que generan investigación aplicada, validan nuevas mezclas, evalúan desempeño estructural, modelan emisiones y forman profesionales especializados.

b) **Institutos profesionales y centros de formación técnica:** Estos actores son relevantes porque forman técnicos, operadores y especialistas que implementan las soluciones en terreno. La descarbonización del cemento no depende solo de investigación avanzada, sino también de capacidades operacionales en mantenimiento, control de calidad, eficiencia energética, manejo de combustibles alternativos, seguridad industrial y gestión ambiental. En proyectos con potencial de ITMOs, los institutos técnicos pueden apoyar la capacitación requerida para asegurar operación, monitoreo y continuidad de las reducciones de emisiones.

6.2.4 Actores Internacionales

Los actores internacionales cumplen un rol fundamental cuando se busca financiar la descarbonización de la industria cementera mediante ITMOs, ya que el mecanismo requiere cooperación entre países, autorización de resultados de mitigación, reglas de contabilidad robustas, verificación independiente y compradores internacionales dispuestos a adquirir reducciones de emisiones.

a) **Federación Interamericana del Cemento (FICEM):** Además de su rol gremial regional, FICEM debe considerarse como un actor internacional de articulación sectorial. Su importancia radica en conectar a la industria chilena con hojas de ruta, estándares, experiencias y tecnologías aplicadas en otros países de América Latina y el Caribe. En el marco del Acuerdo de París, puede facilitar la armonización de estrategias de descarbonización, promover cooperación técnica y apoyar la identificación de medidas sectoriales con potencial de escalamiento regional [121].

b) **Contrapartes internacionales del Artículo 6.2:** Corresponde al país que compra o reconoce los resultados de mitigación transferidos desde Chile para cumplir su NDC u otros propósitos internacionales de mitigación. Este actor es esencial porque sin una contraparte internacional no existe transferencia bajo Artículo 6.2. En el caso chileno, el país adquirente debe firmar un acuerdo de implementación con Chile, aceptar reglas de contabilidad, aplicar ajustes correspondientes y reconocer los resultados transferidos [86].

c) **Agencia de Cooperación Alemana (GIZ):** Es un actor de cooperación técnica que ha apoyado a Chile en mercados de carbono, instrumentos de precio al carbono, MRV y desarrollo de capacidades públicas y privadas. En la industria cementera, su rol potencial es apoyar estudios técnicos, fortalecimiento institucional, capacitación y análisis de barreras para proyectos de mitigación. En el marco de ITMOs, GIZ puede ser un facilitador técnico, no necesariamente un comprador, ayudando a que los proyectos cumplan requisitos de integridad ambiental y gobernanza [122].

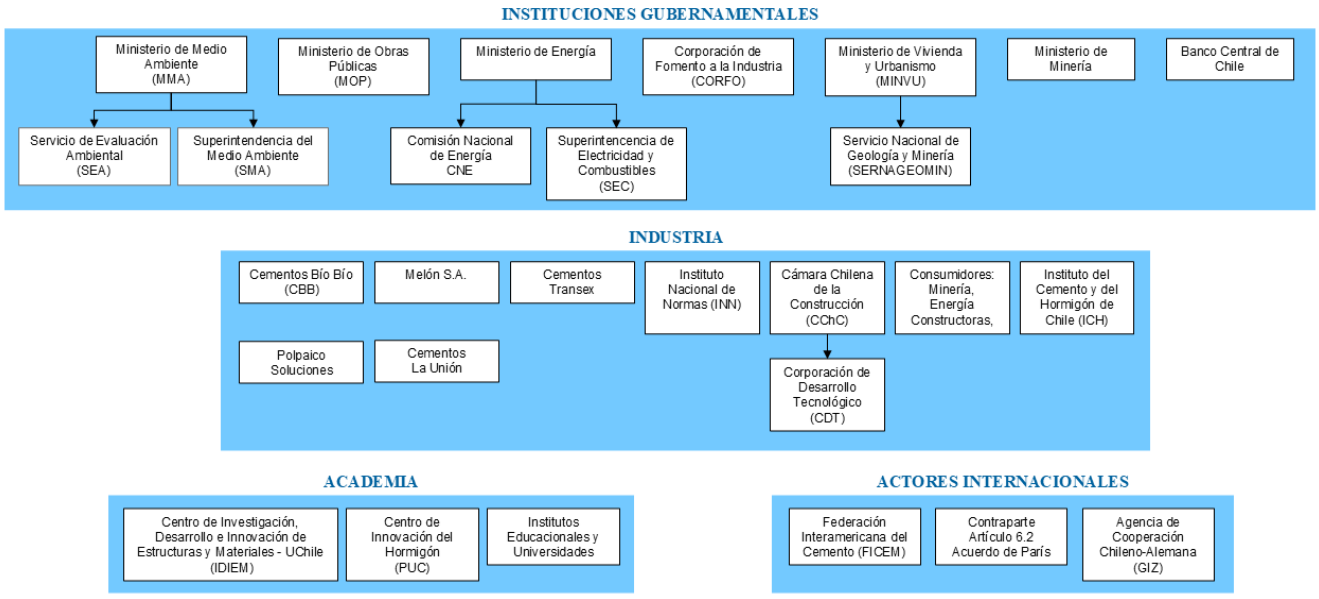


Figura 6.3: Mapa de actores relevante para la inserción de nuevas tecnologías en la industria cementera.

6.3 Principales Desafíos Estratégicos del Mercado

La industria cementera chilena opera en un entorno de alta complejidad, definido por la interacción de presiones competitivas estructurales y un imperativo de transformación productiva para alinearse con los objetivos de sostenibilidad. En este contexto, la estrategia futura del sector no se concibe como una serie de acciones aisladas, sino como una respuesta sistémica y coordinada, formalizada en la "Hoja de Ruta Cemento y Hormigón Net Zero 2050". Este documento constituye el eje articulador de la visión de la industria y define las palancas tecnológicas y operativas para su descarbonización [8].

Una característica intrínseca del mercado chileno es su exposición a la importación de clínker y cemento. Esta dinámica, lejos de ser coyuntural, responde a dos factores estructurales:

- Asimetrías Logísticas: La logística de retorno de las exportaciones mineras desde Asia genera una oferta de fletes marítimos a costos marginales, lo que facilita la importación de clínker a precios artificialmente competitivos.
- Costos de Producción Nacional: La producción local de clínker enfrenta costos comparativamente superiores, derivados de la calidad variable de los yacimientos de caliza y de los costos logísticos asociados al transporte de materias primas.

Esta presión competitiva constante limita la viabilidad económica de inversiones de capital intensivo en nuevas líneas de producción de clínker y obliga a los productores nacionales a centrar su estrategia en la eficiencia, la innovación y la diferenciación para competir con actores que operan con estructuras de costos optimizadas por la importación.

6.4 Marco regulatorio chileno relevante para cementos y H_2V

6.4.1 Factibilidad normativa del LC^3 para el mercado chileno

La NCh148:2021 clasifica los cementos fabricados con clínker Portland según su composición y su resistencia. La norma simplifica la clasificación composicional en seis clases, incorpora los cementos con cenizas volantes y reconoce los cementos compuestos, conformados mediante la combinación de dos o tres adiciones [53].

La Tabla 6.2 presenta las clases establecidas por la norma vigente según su composición.

De manera independiente de su composición, la NCh148:2021 clasifica los cementos en tres grados de resistencia: cemento corriente, cemento de alta resistencia y cemento de alta resistencia inicial. Por tanto, la denominación completa de un producto debe identificar tanto su clase composicional como el grado de resistencia que alcanza [53].

La revisión del marco regulatorio muestra que el LC^3 presenta una vía plausible de incorporación al mercado chileno bajo la categoría de cemento compuesto. La NCh 148:2021 reconoce esta clase de cemento y permite combinar dos o más adiciones minerales, lo que resulta coherente con la naturaleza ternaria del LC^3, cuya formulación convencional incluye clínker, arcilla calcinada, caliza y yeso [53, 123].

No obstante, la clasificación como cemento compuesto no implica una autorización automática para comercializar cualquier formulación. La NCh 161:2021 establece los requisitos aplicables a puzolanas, escoria básica y cenizas volantes, mientras que la NCh 160:2021 regula el agregado tipo A y establece un procedimiento para incorporar adiciones diferentes de las ya normalizadas [56, 57]. En consecuencia, la arcilla calcinada podría incorporarse como puzolana si demuestra el cumplimiento de la NCh 161:2021. En cambio, la caliza utilizada como fíler no aparece entre las adiciones normalizadas señaladas para los cementos compuestos, por lo que su incorporación requeriría ser validada mediante el procedimiento aplicable a nuevas adiciones.

Tabla 6.2: Clasificación de los cementos según su composición, de acuerdo con NCh148:2021 [53].

Clase	**Componente característico**	**Criterio general de composición**
Cemento Portland	Clínker Portland	Cemento constituido principalmente por clínker Portland y sulfato de calcio, junto con los componentes minoritarios permitidos por la norma. No contiene una adición principal que determine su clasificación en alguna de las clases siguientes.
Cemento siderúrgico	Escoria básica granulada de alto horno	Cemento que incorpora escoria básica granulada de alto horno como adición principal, en una proporción de hasta 75% en masa del producto terminado.
Cemento con Agregado Tipo A	Agregado Tipo A	Cemento que incorpora Agregado Tipo A como adición principal, en una proporción de hasta 75% en masa del producto terminado. El material utilizado debe cumplir los requisitos establecidos en NCh160:2021.
Cemento puzolánico	Puzolana	Cemento que incorpora puzolana como adición principal, en una proporción de hasta 75% en masa del producto terminado. La puzolana debe cumplir los requisitos establecidos en NCh161:2021.
Cemento con cenizas volantes	Cenizas volantes	Cemento que incorpora cenizas volantes como adición principal, en una proporción de hasta 75% en masa del producto terminado. Las cenizas deben cumplir los requisitos establecidos en NCh161:2021.
Cemento compuesto	Combinación de dos o tres adiciones	Cemento que combina dos o tres de las adiciones admitidas por la normativa. La composición debe cumplir los límites aplicables a cada componente y los requisitos químicos, físicos y mecánicos establecidos para el producto terminado.

Esta condición constituye la principal brecha regulatoria para una formulación LC^3-50, compuesta típicamente por 50% de clínker, 30% de arcilla calcinada, 15% de caliza y 5% de yeso. La normativa permite incorporar inicialmente hasta 10% de una adición potencial, valor inferior al 15% de caliza utilizado en esta formulación. Por lo tanto, su comercialización requeriría reconocer normativamente la caliza como adición admisible en esa proporción o desarrollar una especificación particular que respalde su utilización.

Además de la admisibilidad de sus componentes, el cemento debe cumplir los requisitos físicos y mecánicos establecidos por la normativa. La NCh 152:2019 determina los tiempos de fraguado, la NCh 157:2019 evalúa la expansión en autoclave y la NCh 158:2019 establece el procedimiento

para determinar la resistencia a compresión del mortero normalizado [124, 125, 126]. La Tabla 6.3 compara estos criterios con resultados obtenidos para formulaciones LC^3-50 [127].

Tabla 6.3: Cumplimiento preliminar de formulaciones LC^3-50 frente a los requisitos chilenos de fraguado y resistencia.

Parámetro	**Exigencia normativa**	**LC^3-50**	**Evaluación**
Fraguado inicial	$\geq$ 60 min para grado corriente y $\geq$ 45 min para alta resistencia	101 min [128]	Cumple
Fraguado final	$\leq$ 12 h para grado corriente y $\leq$ 10 h para alta resistencia	165 min [128]	Cumple
Resistencia a compresión a 7 días	$\geq$ 18 MPa para grado corriente y $\geq$ 25 MPa para alta resistencia	27 MPa [68]	Cumple
Resistencia a compresión a 28 días	$\geq$ 25 MPa para grado corriente y $\geq$ 35 MPa para alta resistencia	43,7–45 MPa [68, 128]	Cumple

En consecuencia, el LC^3 puede considerarse técnica y normativamente plausible para su incorporación al mercado chileno como cemento compuesto. La evidencia disponible respalda preliminarmente su cumplimiento en fraguado y resistencia; no obstante, su comercialización efectiva permanecería condicionada a ensayos nacionales de conformidad y, principalmente, al reconocimiento regulatorio de las adiciones empleadas en su formulación.

6.4.2 Análisis de la normativa de seguridad aplicable al H_2V

El Decreto Supremo N°13/2022 regula el diseño, construcción, operación, mantenimiento, almacenamiento y consumo de hidrógeno gaseoso en Chile. Por tanto, los escenarios analizados se encuentran dentro de un marco regulatorio vigente, aun cuando el H_2V sea adquirido externamente y utilizado exclusivamente como combustible industrial [50].

El dimensionamiento realizado determina capacidades nominales de almacenamiento aproximadas de 18,1 t de H_2 para OPC-H_2V y 13,1 t para LC^3-H_2V. Ambos valores superan el umbral de 5.000 kg establecido por el reglamento, por lo que la instalación requeriría un Sistema de Gestión de Seguridad y Riesgos, un Manual de Seguridad y un Plan de Emergencia y Accidentes [50].

Este resultado muestra que el almacenamiento constituye una restricción relevante para la

implementación de H_2V en la planta. Su magnitud obliga a incorporar distancias de seguridad, sistemas de detección y aislamiento, procedimientos de operación, capacitación, inspecciones y gestión de emergencias desde las primeras etapas de ingeniería. Estas exigencias pueden modificar la distribución de los equipos, aumentar los plazos de desarrollo y generar costos adicionales que no fueron cuantificados separadamente en la evaluación económica.

La instalación también debe ser ejecutada por instaladores autorizados y declarada ante la SEC antes de su entrada en operación. El procedimiento de proyecto especial solo sería necesario si los quemadores, sistemas de almacenamiento u otros componentes utilizan tecnologías no contempladas por el reglamento [51].

En consecuencia, la normativa no impide el uso de H_2V en la industria cementera, pero el volumen de almacenamiento requerido aumenta la complejidad técnica y regulatoria de los escenarios OPC-H_2V y LC^3-H_2V. Por ello, su implementación requeriría ingeniería de detalle, evaluación formal de riesgos y coordinación temprana con la SEC.

6.5 Marco climático chileno e implicancias para la adicionalidad de los escenarios evaluados

La Ley N° 21.455 establece las bases institucionales e instrumentales de la política climática chilena y fija como objetivo alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero a más tardar en 2050. Entre sus instrumentos se encuentran la Estrategia Climática de Largo Plazo, los presupuestos nacionales y sectoriales de emisiones y los planes sectoriales de mitigación. En este marco se inserta la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile, cuya actualización de 2025 comprende el período 2025–2035. En materia de mitigación, esta mantiene el presupuesto máximo de 1.100 $MtCO_2e$ para 2020–2030 e incorpora un presupuesto máximo de 480 $MtCO_2e$ para 2031–2035, junto con un nivel de emisiones no superior a 90 $MtCO_2e$ en 2035 [129, 130].

La NDC establece metas agregadas para la economía nacional y no impone directamente un factor clínker obligatorio a cada planta cementera. Los valores específicos aplicables al sector aparecen en los escenarios oficiales utilizados para sustentar la cuantificación de la NDC. Para la producción de cemento, estos escenarios modelan una reducción del factor clínker desde 66% en 2025 hasta 60% en 2030 y 55% en 2035, manteniéndose este último valor hasta 2050. La medida considera el reemplazo de clínker por materias primas que no requieren calcinación, sin prescribir una tecnología o formulación de cemento determinada. Asimismo, el documento establece

únicamente hitos para los años señalados y no define una trayectoria anual entre ellos [131].

Respecto del hidrógeno, los escenarios que sustentan la NDC incorporan su utilización como combustible dual en equipos estacionarios de diferentes actividades industriales, entre ellas la producción de cemento. La modelación supone una participación del hidrógeno en los usos térmicos industriales de 0% en 2025, 2% en 2030 y 3% en 2035[131].

La incorporación de una medida en los escenarios de la NDC no determina por sí sola que una actividad sea o no adicional. En Chile, este análisis se encuentra regulado por el Decreto Supremo N° 32 de 2024 del Ministerio del Medio Ambiente. Conforme a este reglamento, una actividad es adicional cuando, considerando las políticas y la legislación nacional, no se habría implementado sin los incentivos financieros asociados a la transacción de sus resultados de mitigación. Además, la reducción debe exceder aquella exigida por la normativa vigente o cumplir alguno de los criterios de priorización establecidos para las actividades desarrolladas bajo el Artículo 6 del Acuerdo de París [132].

El reglamento distingue tres criterios de priorización: actividades que no se encuentran incluidas en las medidas destinadas al cumplimiento de la NDC; actividades que adelantan la implementación de una medida ya considerada; y actividades incluidas en la planificación climática que presentan barreras económicas de entrada y cuya transferencia internacional no pone en riesgo el cumplimiento de los compromisos nacionales. En este último caso, puede ser necesario distribuir los resultados de mitigación entre la fracción que permanecerá en Chile para contribuir a su NDC y aquella susceptible de transferencia internacional [132].

La Resolución Exenta N° 01185/2026, que establece la lista vigente de tipologías priorizadas y contraindicadas, clasifica como priorizada bajo el primer criterio la habilitación de la industria nacional del hidrógeno mediante proyectos con uso final en territorio chileno. La tipología menciona expresamente la sustitución de la energía proporcionada por combustibles fósiles en hornos de clínker mediante hidrógeno renovable. En consecuencia, el escenario de sustitución total por H_2V evaluado en esta investigación queda comprendido, en principio, dentro de una tipología priorizada para el Artículo 6. No obstante, esta clasificación no sustituye la demostración de adicionalidad financiera, la aplicación de una metodología validada ni la autorización de la actividad y de sus resultados de mitigación [133].

La reducción del factor clínker y la implementación de LC^3, en cambio, no aparecen expresamente en la lista vigente de tipologías priorizadas o contraindicadas. Debido a que la disminución del

factor clínker forma parte de los escenarios que sustentan la NDC, una actividad basada en LC^3-50 debería justificar si adelanta la trayectoria nacional o si enfrenta barreras económicas que impiden su implementación sin los ingresos asociados a los ITMOs[132, 133].

La formulación LC^3-50 evaluada en esta investigación contiene 50% de clínker. Este valor se encuentra 10 puntos porcentuales por debajo del factor sectorial modelado para 2030 y 5 puntos porcentuales por debajo del valor previsto desde 2035. La comparación indica que la formulación representa un nivel de sustitución superior al incorporado en la trayectoria nacional; sin embargo, no demuestra automáticamente su adicionalidad, debido a que el factor utilizado en la NDC corresponde a una modelación sectorial agregada, mientras que el 50% corresponde a la composición de un cemento específico. Por ello, una eventual actividad bajo el Artículo 6 debería establecer una línea base conservadora que considere la mezcla real de productos de la planta, la evolución prevista del factor clínker y las políticas nacionales aplicables. En consecuencia, la totalidad de la reducción calculada respecto de un OPC con 95% de clínker no puede interpretarse automáticamente como un volumen transferible de ITMOs.

Para el H_2V, la sustitución total de petcoke considerada en los escenarios OPC-H_2V y LC^3-H_2V supera ampliamente la penetración sectorial de 2% modelada para 2030 y de 3% para 2035. Esta diferencia, junto con su clasificación como tipología priorizada y las barreras económicas asociadas a su implementación, proporciona antecedentes favorables para sustentar su adicionalidad. Aun así, debe demostrarse que el proyecto no se ejecutaría sin los ingresos del mecanismo y que las reducciones se cuantifican mediante una metodología aceptada. En el escenario combinado, la elegibilidad debería analizarse separando las reducciones atribuibles a la disminución del factor clínker de aquellas derivadas de la sustitución del combustible, debido a que ambos componentes presentan condiciones regulatorias diferentes.

Finalmente, el período de acreditación 2029–2038 adoptado en esta investigación debe interpretarse como un horizonte técnico y económico. El Decreto Supremo N° 32 permite para las actividades de reducción de emisiones un período crediticio máximo de cinco años, renovable por una vez. Por tanto, los diez años evaluados suponen una primera acreditación y una renovación posterior. Además, los años 2029–2035 se encuentran comprendidos dentro del horizonte de la NDC 2025, mientras que los años 2036–2038 estarán sujetos a la siguiente actualización de la NDC y a una eventual revisión de la línea base, la adicionalidad y las condiciones de autorización.

6.6 Resultados de prefactibilidad técnica

Los balances técnicos se calcularon para una producción común de 204 kt/año de cemento en los escenarios OPC + petcoke, LC^3 + petcoke, OPC + H_2V y LC^3 + H_2V. Los resultados comprenden los flujos finales de materiales, la demanda térmica, el consumo de combustibles y el consumo eléctrico. El desarrollo de los balances se presenta en los Anexos A y B.

6.6.1 Balance final de materiales

La sustitución de petcoke por H_2V no modifica la composición del cemento. Por esta razón, los requerimientos de materiales se presentan para las formulaciones OPC y LC^3, independientemente del combustible utilizado.

La Tabla 6.4 presenta las entradas anuales de materias primas y los principales productos intermedios para una producción común de 204 kt/año de cemento.

Tabla 6.4: Balance anual de materiales para las formulaciones OPC y LC^3.

Flujo de material	**Unidad**	**OPC**	**LC^3**
Entradas de materias primas			
Harina cruda para producción de clínker	kt/año	327,17	172,19
Arcilla cruda alimentada al calcinador	kt/año	0,00	66,22
Caliza adicionada al cemento	kt/año	0,00	30,60
Yeso	kt/año	10,20	10,20
Total de materias primas	**kt/año**	**337,37**	**279,21**
Producción y composición del cemento			
Clínker producido	kt/año	193,80	102,00
Arcilla calcinada producida	kt/año	0,00	61,20
Cemento producido	kt/año	204,00	204,00
Factor clínker	t clínker/t cemento	0,95	0,50

Para una misma producción de cemento, la formulación LC^3 reduce la alimentación de harina cruda destinada al horno desde 327,17 hasta 172,19 kt/año. Esta disminución de 154,97 kt/año se compensa parcialmente con la incorporación de 66,22 kt/año de arcilla cruda y 30,60 kt/año de caliza.

Como resultado, el requerimiento total de materias primas disminuye en 58,16 kt/año, equivalente a 17,2% respecto de OPC. La producción de clínker se reduce en 91,80 kt/año, correspondiente a una disminución de 47,4%.

6.6.2 Demanda energética y consumo de combustibles

La demanda térmica anual de la formulación OPC alcanza 634,35 TJ/año. En LC^3, la producción del clínker remanente requiere 333,87 TJ/año y la calcinación de arcilla 115,23 TJ/año, dando como resultado una demanda térmica total de 449,09 TJ/año.

La Figura 6.4 presenta el consumo energético anual de los cuatro escenarios, distinguiendo el aporte térmico del petcoke o del H_2V y el consumo de electricidad.

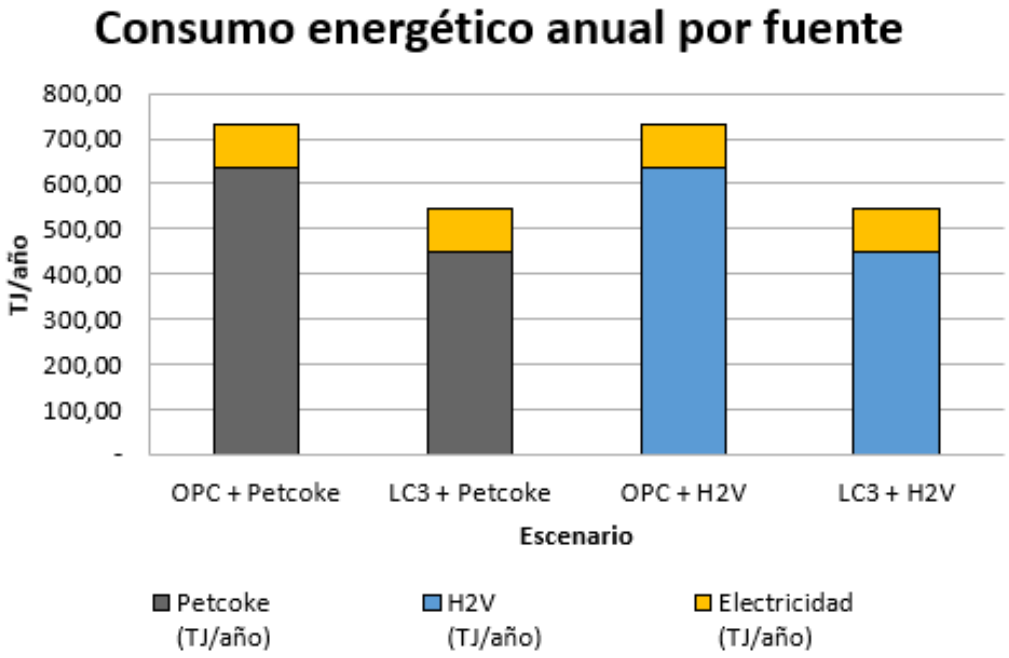


Figura 6.4: Consumo energético anual por fuente en los escenarios evaluados.

Como se observa en la Figura 6.4, los escenarios OPC mantienen una demanda térmica de 634,35 TJ/año, independientemente de si esta es suministrada mediante petcoke o H_2V. Los escenarios LC^3 reducen esta demanda a 449,09 TJ/año. La disminución corresponde a 185,25 TJ/año, equivalente a 29,2%.

Para suministrar esta demanda, el escenario OPC + petcoke requiere 19,53 kt/año de combustible, mientras que LC^3 + petcoke requiere 13,82 kt/año. La aplicación de LC^3 reduce, por tanto, el consumo anual de petcoke en 5,70 kt.

En los escenarios con sustitución completa del combustible fósil, OPC + H_2V requiere 5,29 kt/año de hidrógeno y LC^3 + H_2V requiere 3,74 kt/año. La combinación con LC^3 reduce el suministro

anual de H_2V en 1,54 kt, equivalente a 29,2%.

El consumo eléctrico se mantiene en 26.520 MWh/año para los cuatro escenarios, equivalente a 95,47 TJ/año. Este resultado responde al consumo específico común de 130 kWh/t de cemento adoptado en la modelación.

6.6.3 Análisis y discusión técnica

Los resultados muestran que LC^3 presenta una mayor viabilidad técnica de corto plazo que la sustitución total de petcoke por H_2V. Para una producción de 204 kt/año de cemento, la reducción del factor clínker desde 0,95 hasta 0,50 disminuye la producción de clínker en 91,80 kt/año, equivalentes a 252 t/día, y reduce el requerimiento neto de materias primas en 58,16 kt/año. Esta modificación no elimina el procesamiento de materiales, sino que reemplaza parte de la clinkerización por la producción de 61,20 kt/año de arcilla calcinada. En consecuencia, disminuye la carga de las operaciones de mayor temperatura, pero incorpora requerimientos de preparación, calcinación, almacenamiento y control de calidad de la arcilla.

La demanda térmica se reduce desde 634,35 hasta 449,09 TJ/año, lo que representa un ahorro de 185,25 TJ/año, equivalente a 51,46 GWhth/año o a una carga térmica continua de 5,87 MWth. La disminución calculada de 29,2% se encuentra dentro del intervalo de 28–33% reportado para formulaciones LC^3-50, lo que respalda el orden de magnitud del balance energético [68]. Esta reducción se explica por la sustitución parcial del clínker, producido aproximadamente a 1.450 °C, por arcilla activada entre 700 y 850 °C [4, 134]. No obstante, el desempeño de una planta específica dependerá de la humedad y mineralogía de la arcilla, las pérdidas térmicas y la tecnología de calcinación utilizada.

El contenido de caolinita adoptado, de 42,01%, es cercano al valor de referencia de aproximadamente 40% señalado para LC^3-50 [134, 135]. A partir de esta composición, se requieren 66,22 kt/año de arcilla cruda para producir 61,20 kt/año de arcilla calcinada, con un rendimiento másico de 92,42%. Estos resultados son técnicamente plausibles, pero no permiten extrapolar directamente el desempeño de experiencias internacionales a Chile. La implementación nacional requiere identificar y caracterizar yacimientos próximos a las plantas cementeras, comprobar la continuidad y calidad del recurso y validar experimentalmente el cemento producido [4, 27]. Asimismo, aunque la reducción de 17,2% de las materias primas y el menor consumo térmico podrían disminuir los costos de producción [4, 28], este efecto no fue cuantificado debido a que la evaluación económica no incorporó costos de materias primas ni de transporte.

En OPC-H_2V se requieren 5,29 kt/año de hidrógeno, equivalentes a 14,5 t/día y 27,3 kg H_2/t de clínker. Este consumo específico es 19,8% inferior a los 34,02 kg H_2/t de clínker obtenidos por Williams et al. [71] para una configuración con sustitución total, oxicombustión y recirculación de gases. Aunque ambos resultados presentan el mismo orden de magnitud, la diferencia no demuestra una mayor eficiencia del escenario evaluado, sino que refleja el carácter simplificado del balance empleado, basado en la demanda térmica y el poder calorífico inferior. Cabe destacar que, a diferencia de la modelación de Williams et al. [71], el modelo térmico no incluye recuperación de calor, o recirculación del calor producido por la combustión para su uso en etapas de precalcinación o calcinación de clinker o arcilla.

La equivalencia energética tampoco demuestra la viabilidad de operar continuamente un horno cementero con 100% de H_2V. Las experiencias industriales disponibles corresponden principalmente a pruebas de cocombustión, mientras que la sustitución total permanece sustentada en simulaciones [46, 71]. Persisten incertidumbres sobre la estabilidad de la llama, la transferencia de calor, la formación de NO_x, la adaptación de los quemadores, la seguridad operacional y la calidad del clínker [5, 75]. En consecuencia, OPC-H_2V representa un límite técnico de sustitución y no una configuración industrial validada.

El escenario combinado reduce el consumo de H_2V desde 5,29 hasta 3,74 kt/año, una disminución de 29,2% equivalente a 4,23 t/día. Sin embargo, todavía requeriría un suministro continuo de aproximadamente 10,25 t/día de hidrógeno, además de infraestructura de almacenamiento, acondicionamiento y distribución. En síntesis, LC^3 presenta resultados consistentes con la literatura y una mayor madurez técnica, mientras que la sustitución total por H_2V conserva brechas relevantes de validación. Los resultados respaldan una implementación secuencial: validar inicialmente LC^3 con materias primas nacionales y evaluar posteriormente la incorporación progresiva de H_2V sobre una demanda térmica reducida.

6.7 Resultados ambientales y potencial de generación de ITMOs

Los resultados ambientales se calcularon para una producción común de 204 kt/año de cemento. Para cada escenario se cuantificaron las emisiones de proceso, combustión y consumo eléctrico. A partir de su diferencia respecto de OPC-P, se estimó posteriormente la mitigación neta y el potencial de ITMOs durante el período 2029–2038.

6.7.1 Emisiones de GEI por escenario

La Tabla 6.5 presenta las emisiones anuales, la intensidad de carbono y la reducción técnica respecto del escenario base.

Tabla 6.5: Emisiones anuales e intensidad de carbono de los escenarios evaluados.

Escenario	Proceso	Combustión	Electricidad	Total	Intensidad	Reducción bruta respecto de OPC
	$ktCO_2$/año	$ktCO_2$/año	$ktCO_2e$/año	$ktCO_2e$/año	tCO_2e/t	%
OPC-P	100,70	60,01	6,32	167,03	0,819	–
LC^3-P	53,00	42,48	6,32	101,81	0,499	39,0
OPC-H_2V	100,70	0,00	6,32	107,02	0,525	35,9
LC^3-H_2V	53,00	0,00	6,32	59,32	0,291	64,5

El escenario OPC-P genera 167,03 $ktCO_2e$/año, con una intensidad de 0,819 tCO_2e/t de cemento. LC^3-P reduce las emisiones a 101,81 $ktCO_2e$/año, mientras que OPC-H_2V alcanza 107,02 $ktCO_2e$/año. El escenario combinado presenta el menor resultado, con 59,32 $ktCO_2e$/año.

La Figura 6.5 muestra la contribución de cada fuente al total anual.

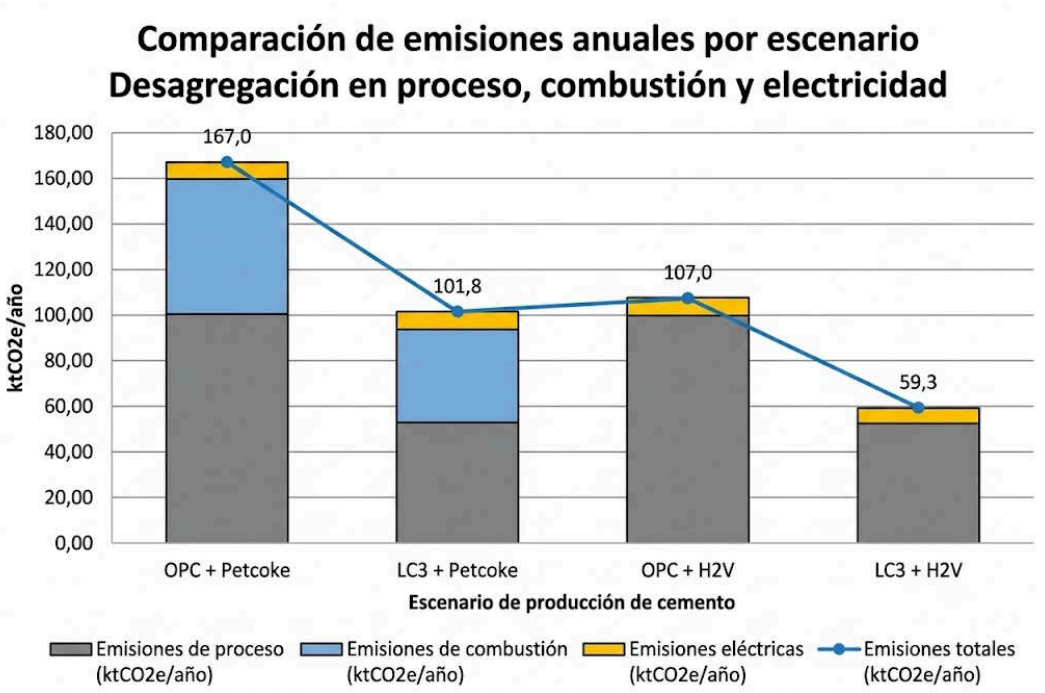


Figura 6.5: Emisiones anuales de GEI por componente y escenario.

La Figura 6.5 permite observar que LC^3 reduce simultáneamente las emisiones de proceso y combustión debido al menor requerimiento de clínker. El H_2V elimina las emisiones directas de

combustión, pero mantiene las emisiones de proceso. La electricidad permanece constante en los cuatro escenarios.

6.7.2 Potencial de generación de ITMOs

La mitigación potencial se calculó a partir de la reducción técnica anual, descontando las fugas por transporte aplicables a los escenarios con LC^3. Para una distancia de 50 km entre el origen de las adiciones y la planta, equivalente a 100 km de recorrido total, las fugas alcanzan 1,18 $ktCO_2e$/año.

La Tabla 6.6 presenta la reducción bruta, las fugas y el volumen potencial de ITMOs, bajo el supuesto de una equivalencia de un ITMO por cada tonelada de CO_2e reducida.

Tabla 6.6: Mitigación neta y potencial de ITMOs de los escenarios evaluados.

Escenario	**Reducción bruta $ktCO_2e$/año**	**Fugas $ktCO_2e$/año**	**ITMOs potenciales ITMO/año**	**ITMOs 2029–2038 miles de ITMO**	**Reducción específica tCO_2e/t cemento**
LC^3-P	65,23	1,18	64.041	640,41	0,314
OPC-H_2V	60,01	0,00	60.009	600,09	0,294
LC^3-H_2V	107,71	1,18	106.526	1.065,26	0,522

LC^3-P genera un potencial estimado de 64.041 ITMO/año, ligeramente superior a los 60.009 ITMO/año de OPC-H_2V. El escenario combinado alcanza 106.526 ITMO/año y supera un millón de ITMOs potenciales durante los diez años de acreditación.

Los años 2027 y 2028 corresponden a implementación y no generan ITMOs. Los valores acumulados de la Tabla 6.6 consideran únicamente el período 2029–2038.

6.7.3 Análisis y discusión ambiental

El escenario LC^3-H_2V presenta el mejor desempeño ambiental, con emisiones operacionales de 59,32 $ktCO_2e$/año y una intensidad de 0,291 tCO_2e/t de cemento. Esto representa una reducción bruta de 64,5% respecto de OPC-P, equivalente a evitar 0,528 tCO_2e por cada tonelada de cemento producida. Después de descontar las fugas por transporte, la mitigación neta disminuye a 106,53 $ktCO_2e$/año, correspondiente a una reducción de 63,8% y a un potencial de 106.526 ITMO/año. Esta intensidad es aproximadamente 50% inferior al promedio histórico de 0,581 tCO_2/t de cemento reportado para Chile [8].

Entre las alternativas individuales, LC^3-P alcanza una mitigación neta de 64,04 $ktCO_2e$/año, ligeramente superior a las 60,01 $ktCO_2e$/año de OPC-H_2V. La intensidad operacional obtenida para

LC^3-P, de 0,499 tCO_2e/t de cemento, también resulta coherente con el intervalo de 0,509–0,526 tCO_2/t reportado para cementos LC^3-50 elaborados con residuos caoliníticos en Brasil [68]. La proximidad entre ambos resultados respalda el orden de magnitud de la estimación, aunque las diferencias dependen de la composición del cemento, la tecnología de calcinación, la matriz energética y las condiciones de transporte.

La ventaja de LC^3-P se explica porque la reducción del factor clínker disminuye simultáneamente las emisiones de proceso y de combustión. En cambio, OPC-H_2V elimina únicamente las 60,01 $ktCO_2$/año asociadas a la combustión de petcoke, pero mantiene 100,70 $ktCO_2$/año provenientes de la producción de clínker. Por ello, la sustitución del combustible no permite abatir por sí sola las emisiones de proceso, que constituyen el principal límite ambiental de este escenario.

Para una distancia de abastecimiento de 50 km por trayecto, las fugas por transporte ascienden a 1,18 $ktCO_2e$/año. Esta magnitud reduce en 1,8% la mitigación bruta de LC^3-P y en 1,1% la del escenario combinado, sin modificar su posición relativa. El resultado coincide con estudios realizados en Brasil y Cuba, donde el transporte disminuye parcialmente el beneficio ambiental de LC^3, pero no contrarresta la reducción obtenida mediante la sustitución de clínker [28, 68]. No obstante, confirma que la cercanía y disponibilidad de arcillas aptas condicionan la mitigación neta y el potencial de ITMOs.

Las reducciones de los escenarios con H_2V representan un límite superior dentro de la frontera evaluada, ya que consideran emisiones directas de combustión iguales a cero y excluyen la producción, el acondicionamiento y el transporte del hidrógeno. En consecuencia, una evaluación de ciclo de vida entregaría reducciones inferiores si el suministro no presenta una intensidad de carbono suficientemente baja. La ventaja ambiental atribuida al H_2V depende, por tanto, no solo de su utilización en el horno, sino también del origen de la electricidad y de la cadena logística empleada [5, 75].

En síntesis, LC^3-P presenta la reducción ambiental más sólida entre las alternativas individuales y resultados consistentes con la literatura, mientras que LC^3-H_2V maximiza la mitigación al actuar sobre las emisiones de proceso y de combustión. Sin embargo, sus 106.526 ITMO/año representan un potencial técnico, no una transferencia garantizada. Su reconocimiento efectivo dependerá de la autorización de las Partes, la adicionalidad, el monitoreo, la verificación, el descuento de fugas y la aplicación de los ajustes correspondientes [77, 86, 87].

6.8 Resultados de prefactibilidad económica

La evaluación económica compara los escenarios de descarbonización respecto de OPC-P. Los resultados incorporan los costos de combustible y electricidad, la inversión incremental, el OPEX fijo de la nueva infraestructura y los ingresos potenciales por ITMOs. Por tanto, corresponden a una evaluación incremental y parcial, no al costo total de producción del cemento.

6.8.1 Resultados económicos bajo supuestos base

La Figura 6.6 presenta la composición del costo anual equivalente de los cuatro escenarios, desagregado en costo de combustible, costo de electricidad, CAPEX anualizado y OPEX fijo de la infraestructura incremental.

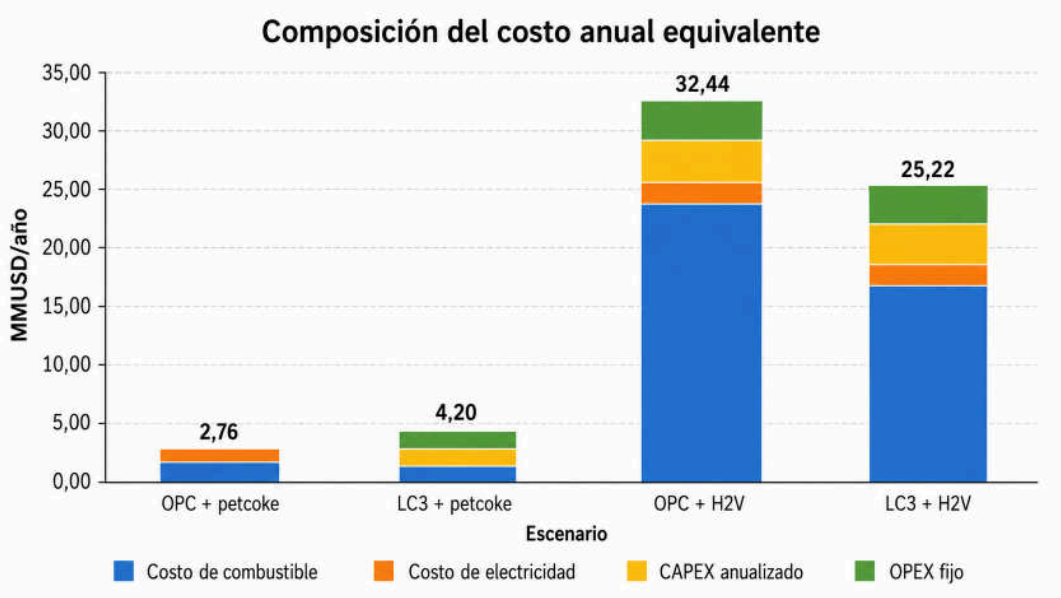


Figura 6.6: Composición del costo anual equivalente de los escenarios evaluados.

OPC-P presenta un costo anual equivalente parcial de 2,76 MMUSD/año. Este aumenta a 4,20 MMUSD/año en LC^3-P, a 32,44 MMUSD/año en OPC-H_2V y a 25,22 MMUSD/año en LC^3-H_2V. En términos específicos, estos resultados corresponden a 13,54; 20,60; 159,03 y 123,61 USD/t de cemento, respectivamente.

En LC^3-P, la disminución del consumo de petcoke reduce el costo anual de combustible desde 1,17 hasta 0,83 MMUSD/año. Sin embargo, el CAPEX anualizado y el OPEX fijo de la unidad de calcinación, equivalentes a 0,93 y 0,85 MMUSD/año, respectivamente, elevan el costo anual

respecto del escenario base.

En los escenarios con H_2V, el costo de compra del combustible constituye el componente dominante, con 23,79 MMUSD/año en OPC-H_2V y 16,84 MMUSD/año en LC^3-H_2V. La menor demanda térmica del escenario combinado reduce tanto el consumo de hidrógeno como la capacidad de almacenamiento requerida. El costo de electricidad se mantiene en 1,59 MMUSD/año en los cuatro escenarios, de acuerdo con el supuesto de consumo eléctrico uniforme utilizado en la evaluación.

La Tabla 6.7 resume los indicadores económicos y financieros obtenidos bajo los supuestos del caso central.

Tabla 6.7: Indicadores económicos y financieros bajo los supuestos base.

Indicador	**OPC-P**	**LC^3-P**	**OPC-H_2V**	**LC^3-H_2V**
FCI incremental (MMUSD)	0,00	5,97	23,68	22,74
Costo anual equivalente (MMUSD/año)	2,76	4,20	32,44	25,22
Costo incremental respecto de OPC-P (MMUSD/año)	–	1,44	29,68	22,45
Costo de abatimiento y precio de equilibrio del ITMO (USD/tCO_2e)	–	22,48	494,60	210,77
Ingreso potencial por ITMOs (MMUSD/año)	0,00	2,38	2,23	3,96
VAN incremental con ITMOs (MMUSD)	0,00	6,04	−176,16	−118,68
Período simple de recuperación (años)	–	3,19	No recupera	No recupera

Sin ingresos por ITMOs, los tres escenarios de descarbonización presentan VAN incrementales negativos: −9,24 MMUSD para LC^3-P, −190,48 MMUSD para OPC-H_2V y −144,09 MMUSD para LC^3-H_2V.

Al valorizar las reducciones netas al precio central de 37,18 USD/tCO_2e, LC^3-P genera un ingreso potencial de 2,38 MMUSD/año y alcanza un VAN incremental de 6,04 MMUSD, con un período simple de recuperación de 3,19 años. En OPC-H_2V y LC^3-H_2V, los ingresos potenciales ascienden a 2,23 y 3,96 MMUSD/año, respectivamente, pero sus VAN permanecen negativos, con valores de −176,16 y −118,68 MMUSD.

La incorporación de LC^3 en el escenario combinado reduce el consumo de H_2V, la capacidad de almacenamiento requerida y el FCI respecto de OPC-H_2V. Sin embargo, la valorización climática

considerada no compensa el costo de suministro del hidrógeno bajo los supuestos del caso central.

6.8.2 Sensibilidades económicaS

La sensibilidad económica se evaluó primero modificando por separado los precios del ITMO y del H_2V. Luego, ambas variables se analizaron de forma conjunta para identificar las combinaciones que permiten alcanzar un VAN incremental igual a cero. En cada caso, los demás supuestos técnicos y económicos se mantuvieron constantes.

La Figura 6.7 muestra el efecto del precio del ITMO sobre el VAN incremental. El análisis considera un intervalo entre 0 y 139 USD/tCO_2e y mantiene el precio del H_2V en 4,50 USD/kg H_2.

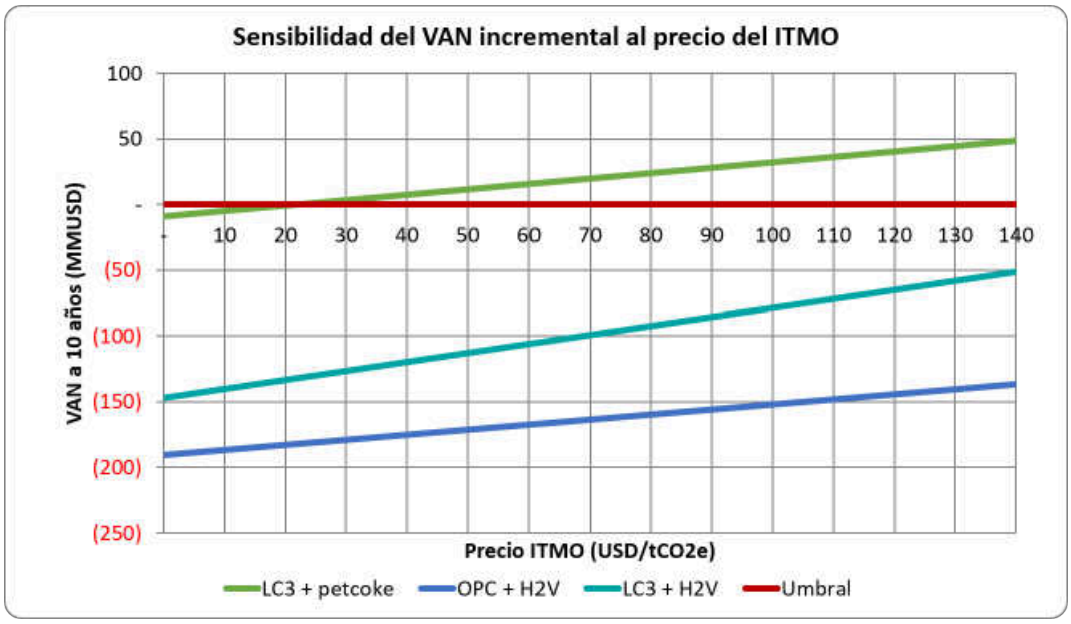


Figura 6.7: Sensibilidad del VAN incremental al precio del ITMO.

El VAN aumenta de forma lineal con el precio del ITMO. Por cada incremento de 1 USD/tCO_2e, el VAN aumenta en 0,411 MMUSD para LC^3-P, 0,385 MMUSD para OPC-H_2V y 0,684 MMUSD para LC^3-H_2V. Las diferencias entre las pendientes corresponden a la cantidad anual de ITMOs generada por cada escenario.

LC^3-P alcanza un VAN igual a cero con un precio del ITMO de 22,48 USD/tCO_2e. En cambio, OPC-H_2V y LC^3-H_2V requieren precios de 494,60 y 210,77 USD/tCO_2e, respectivamente. Por esta razón, al mantener el precio central del hidrógeno, solo LC^3-P alcanza un VAN positivo dentro del intervalo evaluado. Con un precio del ITMO de 139 USD/tCO_2e, los VAN son 47,89, $-136,95$ y

−49,07 MMUSD, respectivamente.

La Figura 6.8 muestra el efecto del precio de suministro del H_2V sobre los escenarios que utilizan este combustible. El precio se evaluó entre 1,5 y 6,0 USD/kg H_2, manteniendo el precio del ITMO en 37,18 USD/tCO_2e.

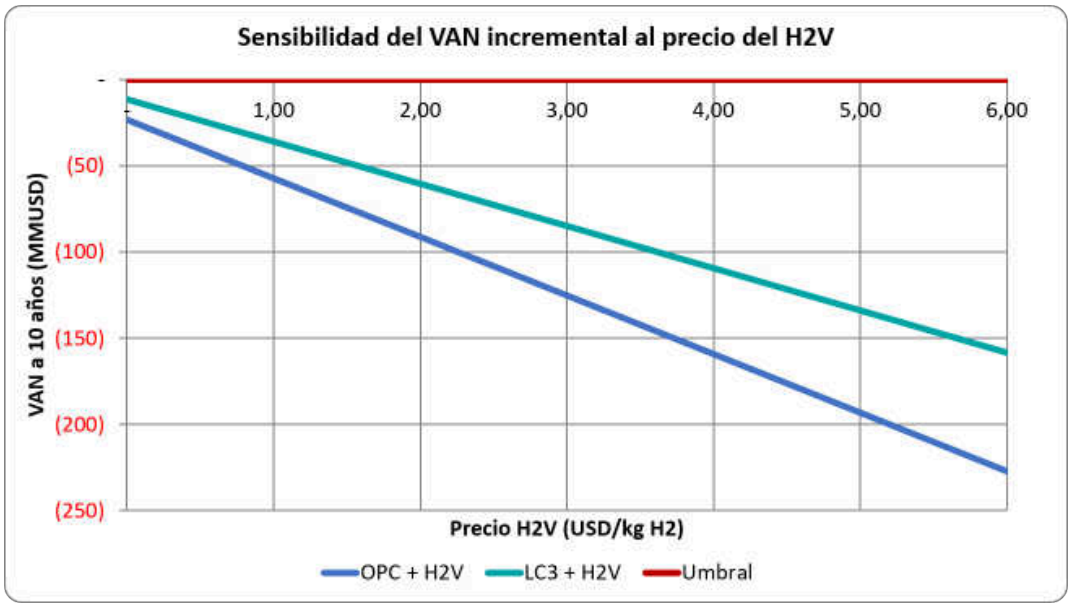


Figura 6.8: Sensibilidad del VAN incremental al precio de compra del H_2V.

Las pendientes negativas muestran el efecto del costo recurrente del combustible. Por cada aumento de 1 USD/kg H_2, el VAN disminuye en 33,93 MMUSD para OPC-H_2V y en 24,02 MMUSD para LC^3-H_2V. La menor pendiente del escenario combinado se debe a su menor consumo anual de hidrógeno.

Aun con el precio inferior de 1,5 USD/kg H_2, los VAN permanecen negativos: −74,38 MMUSD para OPC-H_2V y −46,62 MMUSD para LC^3-H_2V. Por tanto, la reducción aislada del precio del hidrógeno no permite alcanzar el equilibrio cuando el ITMO se mantiene en su valor central.

Las dos figuras anteriores evalúan el efecto de modificar una variable a la vez. Para analizar de manera simultánea la incidencia del precio del H_2V y del ITMO en los escenarios que incorporan hidrógeno verde, se determinaron las combinaciones de ambas variables que generan un VAN incremental igual a cero. Estas relaciones se presentan en la Figura 6.9.

Cada punto situado sobre una frontera representa una combinación de precios con VAN = 0. Las combinaciones ubicadas por encima generan un VAN positivo, mientras que aquellas situadas

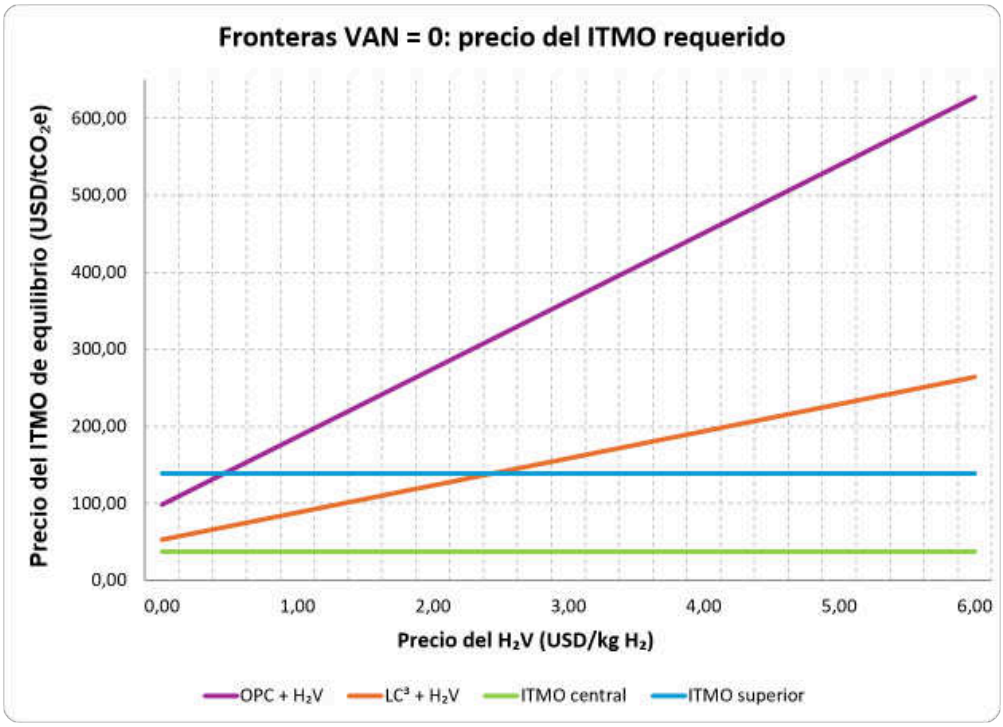


Figura 6.9: Fronteras de equilibrio del VAN incremental en función de los precios del H_2V y del ITMO.

por debajo producen un VAN negativo.

La pendiente indica cuánto debe aumentar el precio del ITMO para compensar un incremento de 1 USD/kg H_2 en el precio del hidrógeno. Este aumento es de 88,09 USD/tCO_2e para OPC-H_2V y de 35,13 USD/tCO_2e para LC^3-H_2V. Por tanto, el escenario combinado presenta una menor exposición al precio del combustible.

Con un precio del H_2V de 1,5 USD/kg H_2, los precios del ITMO requeridos para alcanzar el equilibrio son 230,33 USD/tCO_2e para OPC-H_2V y 105,38 USD/tCO_2e para LC^3-H_2V. Si el ITMO alcanza 139 USD/tCO_2e, los precios máximos del hidrógeno compatibles con VAN = 0 son 0,46 y 2,46 USD/kg H_2, respectivamente.

6.8.3 Análisis y discusión económica

La evaluación muestra que LC^3-P presenta la mayor conveniencia económica incremental respecto de OPC-P. Además de obtener un resultado positivo en el caso central, mantiene una mejor posición ante las variaciones analizadas. En contraste, los escenarios con H_2V no alcanzan el equilibrio cuando los precios del hidrógeno y de los ITMOs se modifican por separado.

La conveniencia de LC^3-P depende, sin embargo, de los ingresos asociados a los ITMOs. Estos representan un ingreso potencial bruto calculado a partir de un precio de referencia y no de un contrato de transferencia asegurado. El modelo tampoco descuenta los costos de autorización, monitoreo, reporte, verificación, transacción y comercialización.

La estimación de costos también es parcial, debido a que no incorpora los costos diferenciales de materias primas, transporte y dotación de personal. La menor producción de clínker podría generar ahorros, pero estos podrían verse compensados por los costos de suministro, procesamiento y transporte de la arcilla y la caliza. La confirmación del resultado requiere incorporar estas partidas en una evaluación posterior.

En los escenarios con H_2V, la principal brecha económica proviene del costo recurrente de compra del combustible. Las variaciones del costo de almacenamiento mejoran el resultado, pero tienen una incidencia menor y no permiten cerrar esta brecha. Esto indica que una reducción del CAPEX asociado a los tanques sería insuficiente mientras el precio de suministro del hidrógeno permanezca elevado.

La incorporación previa de LC^3 reduce la demanda térmica, el consumo de H_2V y la exposición económica a su precio. Por esta razón, el escenario combinado presenta una mejor posición que OPC-H_2V. La sensibilidad conjunta muestra que puede alcanzar un VAN positivo cuando coinciden un precio bajo del hidrógeno y una valorización elevada de los ITMOs. No obstante, al depender simultáneamente de ambas condiciones, este resultado no representa una conveniencia robusta bajo los supuestos actuales.

En consecuencia, los resultados respaldan priorizar el desarrollo de LC^3 mediante la caracterización de las arcillas, ensayos piloto, estudios de prefactibilidad y la evaluación de un posible acuerdo de transferencia de ITMOs. La sustitución con H_2V puede considerarse como una alternativa complementaria de más largo plazo, condicionada a menores precios de suministro y a su validación técnica mediante pruebas de cocombustión. Esta conclusión se refiere a la conveniencia económica incremental respecto de OPC-P y no demuestra la rentabilidad absoluta ni la bancabilidad de los proyectos.

El detalle de los cálculos y sensibilidades se presenta en el Anexo D.

6.8.4 Matriz de apoyo a la decisión tecnológica

Las matrices presentadas en esta subsección integran los principales resultados técnicos, ambientales y económicos de los escenarios evaluados. Su propósito es facilitar la comparación entre alternativas y explicitar las condiciones que determinan su implementación.

La Figura 6.10 reúne los indicadores cuantitativos finales bajo los supuestos base.

Matriz de decisión — resultados cuantitativos

MÉTRICA	OPC-P	LC³-P	OPC-H_2V	LC³-H_2V
Mecanismo	Caso base	Reducción del factor clínker	Sustitución del combustible	Reducción de clínker + sustitución del combustible
DESEMPEÑO AMBIENTAL				
Emisiones totales | $ktCO_2e$/año	167,03	101,81	107,02	59,32
Intensidad | tCO_2e/t cemento	0,819	0,499	0,525	0,291
Mitigación neta e ITMOs | $ktCO_2e$/año	—	64,04	60,01	106,53
Reducción vs. OPC-P | %	—	38,3	35,9	63,8
DESEMPEÑO ECONÓMICO				
FCI incremental | MMUSD	—	5,97	23,68	22,74
Costo anual equivalente | MMUSD/año	2,76	4,20	32,44	25,22
Costo de abatimiento / ITMO equilibrio | USD/tCO_2e	—	22,48	494,60	210,77
Ingreso ITMOs a precio base | MMUSD/año	0,00	2,38	2,23	3,96
Costo neto anual | MMUSD/año	2,76	1,82	30,21	21,25
VAN incremental con ITMOs | MMUSD	0,00	6,04	−176,16	−118,68
Payback simple	—	3,19 años	No recupera	No recupera
LECTURA PARA LA DECISIÓN	**REFERENCIA** — Sin abatimiento	**PRIORIZAR** — Validación local e ingeniería	**INVESTIGAR** — Combustión y costo de suministro	**DESARROLLAR POR ETAPAS** — Máxima mitigación; alta exigencia

Resultados bajo los supuestos base del estudio. La señal de decisión no sustituye la evaluación específica de planta.

Figura 6.10: Matriz de resultados cuantitativos.

Los indicadores anteriores muestran el resultado de cada alternativa, pero no representan por sí solos su grado de preparación para una implementación industrial. La Figura 6.11 complementa la comparación mediante las principales condiciones técnicas, económicas y regulatorias de los tres escenarios de descarbonización. El caso OPC-P se excluye de esta segunda matriz por corresponder únicamente a la referencia del análisis.

La lectura de la matriz depende del criterio priorizado. Una decisión orientada a maximizar la reducción de emisiones puede conducir a una toma de decisión distinta de aquella centrada en minimizar la inversión, reducir la incertidumbre técnica o alcanzar conveniencia económica incremental. La matriz permite estructurar esta discusión en torno a cinco elementos: objetivo de descarbonización, plazo de implementación, disponibilidad de materias primas y energía, capacidad de asumir riesgo tecnológico y grado de certeza de los ingresos por ITMOs.

Matriz de decisión — condiciones de implementación

CRITERIO		LC³-P Mayor preparación relativa	OPC-H_2V Demostración requerida	LC³-H_2V Desarrollo integrado
MADUREZ	Evidencia	Antecedentes piloto, industriales y comerciales; falta validación local.	Cocombustión y simulación; sin operación comercial continua al 100%.	Sin demostración industrial integrada.
	Horizonte	Corto–mediano plazo	Mediano–largo plazo	Largo plazo
IMPLEMENTACIÓN TÉCNICA	Modificación principal	Calcinación de arcilla; manejo, molienda y mezcla.	Almacenamiento, acondicionamiento, redes, seguridad y quemadores.	Equipos de ambas alternativas; menor suministro de H_2V.
	Condición crítica	Mineralogía, caolinita, reactividad y desempeño.	Llama, transferencia de calor, NO_x y calidad del clínker.	Cumplimiento simultáneo e integración operacional.
DEPENDENCIAS Y EXPOSICIÓN	Logística	Arcilla apta: disponibilidad, volumen y distancia.	H_2V continuo: presión, almacenamiento y seguridad.	Acceso simultáneo a arcilla apta y H_2V estable.
	Exposición económica	CAPEX del calcinador; arcilla, transporte e ITMOs.	Precio de compra del H_2V domina el costo anual.	Precio del H_2V + producción y suministro de arcilla calcinada.
HABILITACIÓN	Regulación	Adiciones y requisitos del cemento compuesto.	DS N.° 13/2022; SEC; evaluación de riesgos.	Normativa de cementos + seguridad de hidrógeno.
	Información prioritaria	Yacimientos; calcinación; desempeño; logística y costos.	Combustión; quemadores; NO_x; seguridad y contratos.	Ambas validaciones + integración operacional.
PRÓXIMA DECISIÓN		**VALIDAR AHORA** Arcilla y producto local → ingeniería y preinversión	**DEMOSTRAR** Combustión industrial → asegurar suministro y precio	**SECUENCIAR** Validar ambas rutas → diseñar su integración

La preparación indicada es relativa a los escenarios evaluados y no corresponde a una clasificación TRL.

Figura 6.11: Matriz de condiciones de implementación e incertidumbres de los escenarios de descarbonización.

En síntesis, bajo los supuestos evaluados, se selecciona el escenario LC^3-P como la alternativa prioritaria para avanzar hacia una evaluación específica de planta. Si bien el escenario LC^3-H_2V alcanza la mayor reducción de emisiones, con un 63,8% respecto de OPC-P, su implementación presenta mayores exigencias técnicas, económicas y operacionales, un horizonte de desarrollo más prolongado y un VAN incremental negativo. En cambio, LC^3-P combina una reducción de emisiones de 38,3%, una inversión incremental comparativamente menor de 5,97 MMUSD, el único VAN incremental positivo entre los escenarios de descarbonización, equivalente a 6,04 MMUSD, y un período simple de recuperación de 3,19 años. Asimismo, presenta una mayor preparación tecnológica relativa y un horizonte de implementación de corto a mediano plazo. Por estas razones, LC^3-P ofrece el mejor equilibrio entre desempeño ambiental, factibilidad técnica, conveniencia económica y riesgo de implementación, aunque su desarrollo deberá estar precedido por la validación de las arcillas y del producto a escala local, así como por la confirmación de los ingresos asociados a una eventual transferencia de ITMOs.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

A partir del estudio realizado, se concluye que LC^3 y el H_2V pueden contribuir a la descarbonización de la industria cementera chilena, aunque presentan prioridades de implementación diferentes. La literatura revisada evidencia una mayor madurez técnica e industrial de LC^3, mientras que la evaluación desarrollada mostró conveniencia económica incremental en el caso central. En cambio, el H_2V presentó un potencial adicional de abatimiento, pero la sustitución total y continua del combustible convencional aún requiere validación industrial y no resultó económicamente conveniente bajo las condiciones modeladas. Por ello, se identificó como ruta prioritaria la reducción inicial del factor clínker mediante LC^3, complementada posteriormente con medidas para las emisiones térmicas residuales.

Sobre la base del análisis de mercado y regulación, se concluye que las condiciones de implementación difieren entre ambas alternativas. Para LC^3, el reconocimiento de los cementos compuestos en la NCh 148:2021 proporciona una vía normativa potencial, condicionada a confirmar la disponibilidad y aptitud de las arcillas nacionales, la aceptación de la formulación evaluada y el cumplimiento de los requisitos químicos, físicos y mecánicos aplicables al producto terminado [53, 123]. Para el H_2V, el DS N.º 13/2022 establece un marco general de seguridad para las instalaciones asociadas a su utilización como recurso energético; sin embargo, este marco no constituye una ruta industrial validada para la sustitución total y continua del combustible convencional en hornos cementeros. Su eventual implementación requiere validaciones técnicas, operacionales, regulatorias y ambientales específicas para cada proyecto, particularmente respecto de los quemadores, la estabilidad de la combustión, el control de NO_x, la certificación de los equipos y los permisos aplicables [5, 50].

La evaluación técnica mostró que LC^3-P alcanzó una mitigación neta de 38,3% respecto de OPC-P. El escenario combinado elevó esta reducción a 63,8% y disminuyó en 29,2% la demanda de H_2V respecto de OPC-H_2V, evidenciando que ambas medidas son complementarias. No obstante,

mientras LC^3 podría avanzar hacia su validación con materias primas y plantas nacionales, el H_2V requeriría una demostración industrial de sustitución total y continua que permita evaluar la estabilidad térmica, las emisiones de NO_x, la seguridad operacional y la calidad del clínker [4, 5, 27, 28, 136].

En la evaluación económica, LC^3-P fue la única alternativa que alcanzó conveniencia incremental en el caso central, con un VAN incremental de 6,04 MMUSD, un período simple de recuperación de 3,19 años y un precio de equilibrio del ITMO de 22,48 USD/tCO_2e. En contraste, OPC-H_2V y LC^3-H_2V registraron VAN incrementales de $-176,16$ y $-118,68$ MMUSD, respectivamente. Por tanto, bajo los supuestos del estudio, no se identificó conveniencia económica para una sustitución total por H_2V; su viabilidad futura dependería de menores costos de suministro, porcentajes de sustitución más acotados y mecanismos adicionales de apoyo.

Finalmente, se concluye que los ITMOs podrían complementar la viabilidad de alternativas técnicamente maduras y cercanas al equilibrio, pero no compensar por sí solos una estructura de costos desfavorable. En LC^3-P, su valorización resultó determinante para alcanzar un VAN incremental positivo, mientras que en los escenarios con H_2V no fue suficiente para compensar el costo recurrente del combustible. Los ITMOs estimados representan un potencial técnico y no ingresos asegurados, ya que su transferencia dependería de la autorización de Chile, la adicionalidad, el acuerdo con una Parte adquirente, el MRV, la verificación y los ajustes correspondientes [77, 86].

Se recomienda priorizar LC^3 mediante una prefactibilidad aplicada a una planta cementera existente. Esta evaluación podría caracterizar los yacimientos nacionales de arcilla —contenido de caolinita, reactividad, reservas y condiciones logísticas—, comparar la instalación de un calcinador dedicado con la adaptación de infraestructura disponible y validar el desempeño del cemento producido con materias primas locales. Asimismo, convendría incorporar las condiciones reales de operación, la composición efectiva de los combustibles y la cartera completa de cementos de la planta, dado que esta investigación evaluó el reemplazo de OPC y no de los cementos adicionados comercializados en Chile [4, 27, 28].

En materia regulatoria, se recomienda esclarecer si la formulación de LC^3 evaluada puede certificarse bajo la NCh 148:2021 o si resultaría pertinente desarrollar una especificación complementaria basada en desempeño. Para el H_2V, el DS N.º 13 proporciona un marco general aplicable a su combustión en procesos industriales; sin embargo, sería necesario precisar su aplicación a la modificación de quemadores y hornos cementeros, la cocombustión, la certificación de equipos, los permisos y el control de NO_x. Estas materias podrían abordarse mediante consultas tempranas con el INN, el ICH, la SEC y las autoridades ambientales, junto con una matriz de requisitos y

evaluaciones formales de riesgo [50, 53, 123].

Se propone avanzar desde una demostración industrial de LC^3 hacia una estrategia integrada que combine reducción del factor clínker, eficiencia energética, coprocesamiento, electricidad renovable y captura de CO_2. El H_2V podría evaluarse como una alternativa complementaria mediante pruebas graduales de cocombustión que consideren estabilidad térmica, emisiones de NO_x, seguridad, consumo y calidad del clínker, utilizando posteriormente precios contractuales y perfiles reales de suministro. Asimismo, un eventual proyecto bajo el Artículo 6.2 podría estructurarse desde su diseño considerando una línea base representativa de la producción real, adicionalidad, MRV, fugas, costos de transacción y una fracción transferible conservadora. Esta secuencia permitiría validar primero la alternativa más madura y comparar las opciones destinadas a las emisiones residuales según su costo y capacidad efectiva de abatimiento, sin restringir la estrategia de mediano plazo exclusivamente al H_2V [5, 8, 80, 136].

Referencias

[1] IPCC. Sexto informe de evaluación: Cambio climático 2021 - la base científica física, 2021.

[2] CMNUCC. Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf, 1992.

[3] United Nations Environment Programme. Greening Cement Production has a Big Role to Play in Reducing Greenhouse Gas Emissions. *Thematic Focus: Resource Efficiency, Harmful Substances and Hazardous Waste, and Climate Change Greening Cement Production has a Big Role to Play in Reducing Greenhouse Gas Emissions*, 11 2010. URL https://wedocs.unep.org/items/1f871690-ae4f-4c32-861b-3dee63e94b69.

[4] LC3 Project and Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC). LC3 - A sustainable alternative for the cement industry. Technical report, LC3 Project / SDC, 2023. URL https://lc3.ch/wp-content/uploads/2023/02/LC3-A-sustainable-alternative-FINAL-EN-WEB2-2023.pdf.

[5] Jahir Ahamad Jibran and Mahat Chiranjeevi. Application of green hydrogen for decarbonization of cement manufacturing process: A technical review. *Journal of Physics: Conference Series*, 2629:012027, 11 2023. ISSN 1742-6596. doi: 10.1088/1742-6596/2629/1/012027. URL http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2629/1/012027.

[6] Ali Naqi and Jeong Gook Jang. Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 537*, 11(2):537, 1 2019. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/SU11020537. URL https://www.mdpi.com/2071-1050/11/2/537/htmhttps://www.mdpi.com/2071-1050/11/2/537.

[7] S. Sanjuán, M. y Chinchón. *INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN Y NORMALIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND*. PUBLICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 01 2014. ISBN 978-84-9717-305-6.

[8] Laurent Grimmeissen, Andrés Jensen, and Stefan Wehner. Hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la Industria Chilena del Cemento. Technical report, ICH (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile), Santiago de Chile, 7 2020. URL https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/09/TNA-Cemento_2020-07-20_Informe-FINAL.pdf.

[9] CMNUCC. Pacto climático de glasgow: Decisión 1/cma.3. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3_auv_2_cover%20decision.pdf, 2021.

[10] CMNUCC. Guía sobre los enfoques cooperativos previstos en el artículo 6.2 del acuerdo de parís (decisión 2/cma.3, adenda). https://unfccc.int/documents/624141, 2022.

[11] MMA. Instrumentos de mercado de carbono nacional e internacional, 2023.

[12] P. Friedlingstein, M. O'Sullivan, M. W. Jones, R. M. Andrew, J. Hauck, P. Landschützer, C. Le Quéré, H. Li, I. T. Luijkx, A. Olsen, G. P. Peters, W. Peters, J. Pongratz, C. Schwingshackl, S. Sitch, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. R. Alin, A. Arneth, V. Arora, N. R. Bates, M. Becker, N. Bellouin, C. F. Berghoff, H. C. Bittig, L. Bopp, P. Cadule, K. Campbell, M. A. Chamberlain, N. Chandra, F. Chevallier, L. P. Chini, T. Colligan, J. Decayeux, L. M. Djeutchouang, X. Dou, C. Duran Rojas, K. Enyo, W. Evans, A. R. Fay, R. A. Feely, D. J. Ford, A. Foster, T. Gasser, M. Gehlen, T. Gkritzalis, G. Grassi, L. Gregor, N. Gruber, Ö. Gürses, I. Harris, M. Hefner, J. Heinke, G. C. Hurtt, Y. Iida, T. Ilyina, A. R. Jacobson, A. K. Jain, T. Jarníková, A. Jersild, F. Jiang, Z. Jin, E. Kato, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, J. Knauer, J. I. Korsbakken, X. Lan, S. K. Lauvset, N. Lefèvre, Z. Liu, J. Liu, L. Ma, S. Maksyutov, G. Marland, N. Mayot, P. C. McGuire, N. Metzl, N. M. Monacci, E. J. Morgan, S.-I. Nakaoka, C. Neill, Y. Niwa, T. Nützel, L. Olivier, T. Ono, P. I. Palmer, D. Pierrot, Z. Qin, L. Resplandy, A. Roobaert, T. M. Rosan, C. Rödenbeck, J. Schwinger, T. L. Smallman, S. M. Smith, R. Sospedra-Alfonso, T. Steinhoff, Q. Sun, A. J. Sutton, R. Séférian, S. Takao, H. Tatebe, H. Tian, B. Tilbrook, O. Torres, E. Tourigny, H. Tsujino, F. Tubiello, G. van der Werf, R. Wanninkhof, X. Wang, D. Yang, X. Yang, Z. Yu, W. Yuan, X. Yue, S. Zaehle, N. Zeng, and J. Zeng. Global carbon budget 2024. *Earth System Science Data*, 17:965–1039, 2025. doi: 10.5194/essd-17-965-2025.

[13] NASA Goddard Institute for Space Studies. GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP v4), 2026. URL https://data.giss.nasa.gov/gistemp/.

[14] PNUD. Informe sobre el desarrollo humano 2007-2008: La lucha contra el cambio climático. Technical report, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2007.

[15] CMNUCC. Acuerdo de parís, 2015.

[16] Anjaneya Dixit, Hongjian Du, Juntao Dang, and Sze Dai Pang. Quaternary blended limestone-calcined clay cement concrete incorporating fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 123:104174, 10 2021. ISSN 0958-9465. doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104174. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946521002420.

[17] Natalija Jovasevic. Global Cement Industry Outlook: Trends and Forecasts — worldcementassociation.org. https://www.worldcementassociation.org/blog/news/global-cement-industry-outlook-trends-and-forecasts, 2024.

[18] FICEM. Informe Estadístico 2021. Technical report, FICEM, 2021. URL https://ficem.org/uso-estadisticas/.

[19] Yudiesky Cancio Díaz, Sofia Sánchez Berriel, Urs Heierli, Aurélie R. Favier, Inocencio R. Sánchez Machado, Karen L. Scrivener, José Fernando Martirena Hernández, and Guillaume Habert. Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. *Development Engineering*, 2:82–91, 1 2017. ISSN 2352-7285. doi: 10.1016/J.DEVENG.2017.06.001. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352728516300240.

[20] International Energy Agency. Cement. IEA industry analysis, 2024. URL https://www.iea.org/energy-system/industry/cement.

[21] Patricio Del Basto. Industria Cementera: Ficha Técnica. Technical report, Humphreys, 11 2025.

[22] Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Construcción Civil. Análisis ambiental de los efectos del uso del cemento. https://www.uc.cl/publicaciones/analisis-cemento, 2021.

[23] Kevin Basoa, Richard Martínez, Paula Carrasco, Rubén Guzmán, Ignacio Soto, María Dolores González, Ignacio Beltrán, Francisco Salazar, Carol Ricciardi, Paulo Cornejo, Yasna Rojas Ponce, Rodrigo Sagardía Parga, Carlos Bahamóndez V., Marjorie Martin, Abraham Albornoz, Natalia Becar, Georgina Trujillo, Francoise Pincheira, Elke Huss, Macarena Avilés, José Miguel Valdés, Bruno Campos, Cesar Contreras, Guadalupe Martínez, and Héctor Ocampo. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero Serie 1990-2022. Technical report, Ministerio del Medio Ambiente, Santiago de Chile, 2024. URL https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/32819.

[24] David B. Layzell Daya R. Nhuchhen, Song P. Sit. Alternative fuels co-fired with natural gas in the pre-calciner of a cement plant: Energy and material flows. *Fuel*, 2021.

[25] Polpaico Soluciones. Memoria anual integrada 2023. Technical report, Polpaico Soluciones, 2023.

[26] Cementos Cementos Bío Bío S.A.(Cbb). Memoria anual integrada 2024. Technical report, Cementos Cementos Bío Bío S.A., 2024.

[27] Meenakshi Sharma, Shashank Bishnoi, Fernando Martirena, and Karen Scrivener. Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149:106564, 2021. doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106564.

[28] S. Sánchez Berriel, A. Favier, E. Rosa Domínguez, I. R. Sánchez Machado, U. Heierli, K. Scrivener, F. Martirena Hernández, and G. Habert. Assessing the environmental and economic potential of limestone calcined clay cement in cuba. *Journal of Cleaner Production*, 124:361–369, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.125.

[29] Bhavani Sirangi and M.L.V. Prasad. A low carbon cement (lc3) as a sustainable material in high strength concrete: green concrete. *Materiales de Construcción*, 2023. doi: 10.3989/mc.2023.355123.

[30] K. Scrivener, F. Martirena, S. Bishnoi, and S. Maity. Lc3 cement: from the lab to the industry. *Cement and Concrete Research*, 132:106–119, 2020. doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106119.

[31] Shashank Bishnoi, Soumen Maity, Amit Mallik, Shiju Joseph, and Sreejith Krishnan. Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: The indian experience. *The Indian Concrete Journal*, 88(6):22–28, 2014.

[32] R. Byron Bird, Warren E. Stewart, and Edwin N. Lightfoot. *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, 2nd edition, 2002. ISBN 9780470115398.

[33] International Energy Agency. The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. Technical report, IEA, 2021. URL `https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen`.

[34] International Energy Agency. The future of hydrogen. Technical report, International Energy Agency, Paris, 2019. URL `https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen`.

[35] Ibrahim Dincer and Canan Acar. Water electrolysis technologies and their integration with renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:2430–2445, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.093.

[36] International Renewable Energy Agency. Green hydrogen: A guide to policy making. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020. URL https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen.

[37] International Renewable Energy Agency. Global hydrogen trade to meet the 1.5°c climate goal: Part ii – technology review of hydrogen carriers. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022. URL https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Global-hydrogen-trade-Part-II.

[38] Hydrogen Council. Hydrogen decarbonization pathways: A life-cycle assessment. Technical report, Hydrogen Council, 2021. URL https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-decarbonization-pathways/.

[39] Fan Zhang, Peng Zhao, Meng Niu, and Jimi Maddy. The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33):14535–14552, 2016. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.293.

[40] International Renewable Energy Agency and Methanol Institute. Innovation outlook: Renewable methanol. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021. URL https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol.

[41] International Energy Agency. Global hydrogen review 2024. Technical report, International Energy Agency, Paris, 2024. URL https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024.

[42] International Energy Agency. Ammonia technology roadmap. Technical report, International Energy Agency, Paris, 2021. URL https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap.

[43] International Renewable Energy Agency. Green hydrogen for industry: A guide to policy making. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022. URL https://www.irena.org/publications/2022/Mar/Green-Hydrogen-for-Industry.

[44] H2 Chile. Cadena de valor del hidrogeno – H2Chile — h2chile.cl. https://h2chile.cl/cadena-de-valor-del-hidrogeno/, 2026.

[45] CEMEX. Cemex successfully deploys hydrogen-based ground-breaking technology, 2021. URL https://www.cemex.com/w/cemex-successfully-deploys-hydrogen-based-ground-breaking-technology.

[46] Heidelberg Materials. Heidelbergcement produces cement with climate-neutral fuel mix using hydrogen technology, October 2021. URL https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-01-10-2021.

[47] Heidelberg Materials UK. Academic study confirms success of ribblesdale world-first hydrogen fuel trial, nov 2024. URL https://www.heidelbergmaterials.co.uk/en/news-and-events/world-first-hydrogen-fuel-trial-study-confirms-success.

[48] Asociación Chilena de Hidrógeno (H2 Chile). Mapa de proyectos h2v. https://h2chile.cl/mapa-de-proyectos/, 2020.

[49] Servicio de Evaluación Ambiental. Proyectos de Hidrógeno Verde en el SEIA — sea.gob.cl. https://www.sea.gob.cl/documentacion/reportes/proyectos-de-hidrogeno-verde-en-el-seia, 2026.

[50] Ministerio de Energía de Chile. Decreto supremo n°13/2022: Aprueba reglamento de seguridad de instalaciones de hidrógeno. Reglamento, 2022. URL https://energia.gob.cl/reglamentos/ndeg-decreto-13-aprueba-reglamento-de-seguridad-de-instalaciones-de-hidrogeno-reglamento-hidrogeno.

[51] Superintendencia de Electricidad y Combustibles. Hidrógeno: procedimientos de declaración y proyectos especiales. Sitio oficial SEC, 2026. URL https://www.sec.cl/hidrogeno/.

[52] Fraunhofer Chile Research & Universidad Federal de Santa Caterina (UFSC). Analysis of the Green Hydrogen and Energy Storage Market: Identification of Productive Sectors in Chile and Brazil for the Implementation of Modular Green Hydrogen Production Plants. Technical report, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2026.

[53] Instituto Nacional de Normalización. Nch148:2021, cemento – terminología, clasificación y requisitos generales. Catálogo de normas del INN, 2021. URL https://www.inn.cl/nch14820 21.

[54] Angeles Briones, Padró Profesor Guía, and Ismael Oliva Becerra. "Industria del cemento en Chile : Cbb y su mirada al futuro". Technical report, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2020. URL https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184340.

[55] Ana M Castañón, Santiago García Granda, Ana M Guerrero, and Fernando Gómez-Fernández. Estudio de las fases mineralógicas del clínker en una cementera española, utilizando el método de rietveld. *Dyna*, 79(173):41–47, 2012.

[56] Instituto Nacional de Normalización. *NCh161:2021: Cemento – Puzolanas, escoria básica y cenizas volantes para uso en cementos – Especificaciones*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile, 2021. URL https://ecommerce.inn.cl/nch161202163161.

[57] Instituto Nacional de Normalización. *NCh160:2021: Cemento – Agregado Tipo A para uso en cementos – Especificaciones*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile, 2021. URL https://ecommerce.inn.cl/nch160202163160.

[58] C. Jaimes and L. Montaño. Análisis ambiental de los efectos del uso del cemento basado en estudios a nivel mundial. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 2021.

[59] H. Acevedo R. and R. Guerra T. Factibilidad técnica y económica de la explotación de un yacimiento de caliza en la región metropolitana. Technical report, Universidad de Chile, 2020.

[60] Xiaoyu Ma, Xiaohong Wang, Bing Huang, Yongqi Cai, and Rongfeng Zhang. Quantitative determination of oxides in cement raw meal based on near-infrared spectroscopy and hybrid feature selection strategy. *Infrared Physics & Technology*, 141:105443, Sept 2024. ISSN 1350-4495. doi: 10.1016/j.infrared.2024.105443. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105443.

[61] José Luis Castillo Tirado, Manuel Alejandro Ospina Alarcón, and Paula Andrea Ortiz Valencia. Horno cementero rotatorio: una revisión al control mediante sistemas expertos. *TecnoLógicas*, 25(55):e2391, November 2022. ISSN 0123-7799. doi: 10.22430/22565337.2391. URL http://dx.doi.org/10.22430/22565337.2391.

[62] M. B. Ali, R. Saidur, and M. S. Hossain. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5):2252–2261, 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.02.014.

[63] M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, and K. Scrivener. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12):1579–1589, 2012. doi: 10.1016/j.cemconres.2012.09.006.

[64] Karen Scrivener, François Avet, Hamed Maraghechi, Franco Zunino, Julien Ston, Wilasinee Hanpongpun, and Aurélie Favier. Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (lc3). *Green Materials*, 7(1):3–14, 2019. doi: 10.1680/jgrma.18.00029.

[65] François Avet and Karen Scrivener. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of limestone calcined clay cement (lc3). *Cement and Concrete Research*, 107:124–135, 2018. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.02.016.

[66] Kiran Ram, Matea Flegar, Marijana Serdar, and Karen Scrivener. Influence of low- to medium-kaolinite clay on the durability of limestone calcined clay cement (lc3) concrete. *Materials*, 16(1):374, 2023. doi: 10.3390/ma16010374. URL https://www.mdpi.com/1996-1944/16/1/374.

[67] Elmer T. Carlson and Horace A. Berman. Some observations on the calcium aluminate carbonate hydrates. *Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and Chemistry*, 64A(4):333–341, 1960. doi: 10.6028/jres.064A.032.

[68] Euler Santos Arruda Junior, Nállyton Tiago de Sales Braga, and Márcio Santos Barata. Life cycle assessment to produce lc3 cements with kaolinitic waste from the amazon region, brazil. *Case Studies in Construction Materials*, 18:e01729, 2023. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01729.

[69] Limestone Calcined Clay Cement Project. Financial attractiveness of lc3. Technical report, LC3 Project, 2019. URL https://lc3.ch/wp-content/uploads/2020/10/2019-LC3FinancialAttractiveness-WEB.pdf.

[70] Firman Bagja Juangsa, Axl Sabilirasyad Cezeliano, Prihadi Setyo Darmanto, and Muhammad Aziz. Thermodynamic analysis of hydrogen utilization as alternative fuel in cement production. *South African Journal of Chemical Engineering*, 42:23–31, 2022. doi: 10.1016/j.sajce.2022.07.003.

[71] Franco Williams, Aidong Yang, and Daya Ram Nhuchhen. Decarbonisation pathways of the cement production process via hydrogen and oxy-combustion. *Energy Conversion and Management*, 300:117931, 2024. doi: 10.1016/j.enconman.2023.117931.

[72] Carl Rivkin, Robert Burgess, and William Buttner. Hydrogen technologies safety guide. Technical Report NREL/TP-5400-60948, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2015. URL https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/60948.pdf.

[73] Apilados. Densidad gravimétrica y volumétrica de combustibles. https://apilados.com/wp-content/uploads/2017/10/densidad_gravimetrica_volumetrica.png, 2017.

[74] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 ipcc guidelines for national greenhouse gas inventories. volume 2: Energy. chapter 2: Stationary combustion. Technical report, Institute for Global Environmental Strategies, 2006. URL https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html.

[75] Daya R. Nhuchhen, Song P. Sit, and David B. Layzell. Decarbonization of cement production in a hydrogen economy. *Applied Energy*, 317:119180, 2022. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119180.

[76] Hidrógeno Verde. Precio del hidrógeno, 2026. URL https://www.hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/.

[77] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Reglamento del Artículo 6 del Acuerdo de París, 2024. URL https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/10/Reglamento-Articulo-6.pdf.

[78] R. Spalding-Fecher, L. Schneider, and J. Füssler. Integridad ambiental de los mecanismos internacionales de mercado de carbono bajo el acuerdo de parís, 2021.

[79] CMNUCC. Cdm methodology booklet: Clean development mechanism methodologies. Technical report, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), December 2023. URL https://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/index.html.

[80] UNFCCC. ACM0005: Increasing the blend in cement production, version 7.1.0. https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/1AG8O523O2UQD01BAID55YT2LZZ6R0, 2012.

[81] UNFCCC Clean Development Mechanism Executive Board. ACM0003: Partial substitution of fossil fuels in cement or quicklime manufacture, version 9.0. Technical report, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2020. URL https://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/4SMN50U1TEO97PDB6WQJCAXRHKFVGZ.

[82] Ministerio del Medio Ambiente. *Guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales*. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile, 2019. ISBN 978-956-7204-86-1. URL https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/Guia-metodologica-para-la-estimacion-de-emisiones-provinientes-de-fuentes-puntuales.pdf.

[83] U.S. Department of Energy. Hydrogen properties. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-properties, 2024.

[84] UNFCCC. Methodological tool Project and leakage emissions from transportation of freight. *Clean Development Mechanism*, 2012. URL https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-12-v1.1.0.pdf/history_view.

[85] UNFCCC. Methodological tool: Project and leakage emissions from transportation of freight, version 1.1.0. https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-12-v1.1.0.pdf, 2012.

[86] United Nations Framework Convention on Climate Change. Article 6.2, s.f. URL https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/article-6/article-62.

[87] United Nations Framework Convention on Climate Change. Article 6.2 reference manual. Technical report, UNFCCC, 2024. URL https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Article_6.2_Reference_Manual.pdf.

[88] Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus, and Ronald E. West. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, New York, 5 edition, 2003.

[89] U.S. Department of Energy. Physical hydrogen storage, 2026. URL https://www.energy.gov/cmei/fuels/physical-hydrogen-storage.

[90] Foundation for Climate Protection and Carbon Offset KliK. Average costs of international mitigation activities for 2025–2030, 2026. URL https://www.klik.ch/en/home/.

[91] Swiss National Bank. Current interest and exchange rates: Usd/chf exchange rate on 20 july 2026, 2026. URL https://www.snb.ch/en/the-snb/mandates-goals/statistics/statistics-pub/current_interest_exchange_rates.

[92] World Bank. Carbon pricing dashboard: Cooperative approaches. World Bank Carbon Pricing Dashboard, 2026. URL https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/credits/cooperative-approaches.

[93] Qian Cheng, Ruiqiang Zhang, Zhusheng Shi, and Jianguo Lin. Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 7:269–284, 2024. doi: 10.1016/j.ijlmm.2023.08.002.

[94] Melón S.A. Reporte Integrado 2025, 2026. URL https://www.melon.cl/wp-content/uploads/2026/04/260331_Melon_V4CMF.pdf.

[95] Cámara Chilena de la Construcción. Cámara Chilena de la Construcción, s.f. URL https://cchc.cl/.

[96] Corporación de Desarrollo Tecnológico. Sobre CDT, s.f. URL https://cdt.devsmartbricks.cl/sobre-cdt/.

[97] Corporación de Desarrollo Tecnológico. Presentan herramienta para medir la huella de carbono en la construcción, 2026. URL https://www.cdt.cl/.

[98] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, s.f. URL https://ich.cl/.

[99] Instituto Nacional de Normalización. Quiénes somos, s.f. URL https://www.inn.cl/quienes-somos.

[100] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Acuerdo de Implementación del Acuerdo de París entre el Consejo Federal Suizo y el Gobierno de la República de Chile, s.f. URL https://cima.mma.gob.cl/acuerdo/acuerdo-de-implementacion-del-acuerdo-de-paris-entre-el-consejo-federal-suizo-y-el-gobierno-de-la-republica-de-chile/.

[101] Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile. Ministerio de Obras Públicas, s.f. URL https://www.ide.cl/index.php/component/content/article/ministerio-de-obras-publicas?Itemid=101&catid=34.

[102] Ministerio de Obras Públicas de Chile. Manual de Carreteras, s.f. URL https://mc.mop.gob.cl/.

[103] Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, s.f. URL https://www.minvu.gob.cl/.

[104] Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. D.S. Nº 47, 1992: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, 1992. URL https://www.minvu.gob.cl/elementos-tecnicos/decretos/d-s-n47-1992-ordenanza-general-de-urbanismo-y-construccione/.

[105] Ministerio de Minería de Chile. Política Nacional Minera 2050, s.f. URL https://politicanacionalminera.minmineria.gob.cl/.

[106] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Ley Nº 18.097: Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras, s.f. URL https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=29522.

[107] Ministerio de Energía de Chile. Potestades, competencias, responsabilidades, funciones, atribuciones y/o tareas, s.f. URL https://www.minenergia.cl/transparencia/potestades.html.

[108] Corporación de Fomento de la Producción. Líneas de apoyo CORFO, s.f. URL https://www.corfo.cl/sites/Satellite?c=C_LineaDeApoyo&cid=1456407876758&d=Touch&pagename=CorfoPortalPublico%2FC_LineaDeApoyo%2FcorfoLineaDeApoyoInteriorWebLayout.

[109] Banco Central de Chile. Funciones del Banco Central de Chile, s.f. URL https://www.bcentral.cl/el-banco/gobierno-corporativo/funciones-del-banco.

[110] ChileAtiende. Servicio Nacional de Geología y Minería, s.f. URL https://www.chileatiende.gob.cl/instituciones/servicio-nacional-de-geologia-y-mineria.

[111] Servicio Nacional de Geología y Minería. Rol Nacional de Concesiones Mineras, s.f. URL https://www.sernageomin.cl/rolnacional/.

[112] Superintendencia del Medio Ambiente. Qué es la SMA, s.f.. URL https://portal.sma.gob.cl/index.php/que-es-la-sma/.

[113] Superintendencia del Medio Ambiente. Impuestos verdes, s.f.. URL https://portal.sma.gob.cl/index.php/portal-regulados/instructivos-y-guias/impuestos-verdes/.

[114] Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Misión y objetivos estrategicos institucionales. https://www.sea.gob.cl/mision, 2026.

[115] Superintendencia de Electricidad y Combustibles. Superintendencia de Electricidad y Combustibles, s.f. URL https://www.sec.cl/?view_full_site=true.

[116] Comisión Nacional de Energía. Quiénes somos, s.f. URL https://www.cne.cl/quienes-somos/.

[117] IDIEM – Universidad de Chile. Acreditaciones de nuestros laboratorios e instalaciones, s.f.. URL https://www.idiem.cl/acreditaciones.

[118] IDIEM – Universidad de Chile. Laboratorios y ensayos de control de calidad, s.f.. URL https://www.idiem.cl/servicios/ensayos-de-laboratorio.

[119] Pontificia Universidad Católica de Chile. Formalizan creación del Centro de Innovación del Hormigón en la UC, s.f. URL https://www.uc.cl/noticias/formalizan-creacion-del-centro-de-innovacion-del-hormigon-en-la-uc/.

[120] Centro UC Innovación del Hormigón. Quiénes somos, s.f. URL https://centrohormigon.uc.cl/cih-uc/quienes-somos.

[121] Federación Interamericana del Cemento. Acerca de nosotros, s.f. URL https://ficem.org/acerca-de-nosotros/.

[122] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. Global Carbon Market: Chile Factsheet, s.f. URL https://www.giz.de/en/downloads/GCM_Factsheet_Chile_Final.pdf.

[123] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Actualización de las normas de requisitos de cemento (nch 148), agregado tipo a (nch 160) y puzolana (nch 161), 2026. URL https://hormigonaldia.ich.cl/recomendaciones-tecnicas/actualizacion-de-las-normas-de-requisitos-de-cemento-nch-148-agregado-tipo-a-nch-160-y-puzolana-nch-161/.

[124] Instituto Nacional de Normalización. NCh152:2019 Cemento – Método de determinación de los tiempos de fraguado, 2019. URL https://ecommerce.inn.cl/nch152201963154.

[125] Instituto Nacional de Normalización. NCh157:2019 Cemento – Ensayo de expansión en autoclave, 2019. URL https://ecommerce.inn.cl/nch157201963157.

[126] Instituto Nacional de Normalización. NCh158:2019 Cemento – Ensayo de compresión, 2019. URL https://ecommerce.inn.cl/nch158201963158.

[127] Instituto Nacional de Normalización. prNCh148 Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales, 2017. URL https://www.consultapublica.cl/PdfDoc/prNCh00148-2017-043.pdf.

[128] Nithya Nair, K. Mohammed Haneefa, Manu Santhanam, and Ravindra Gettu. A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems. *Construction and Building Materials*, 254:119326, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119326.

[129] República de Chile. Ley n°21.455, ley marco de cambio climático. Diario Oficial / texto legal, 2022. URL https://gefgobernanza.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/07/Ley-Marco-de-Cambio-Clima%CC%81tico.pdf.

[130] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Contribución determinada a nivel nacional (ndc) de chile: Actualización 2025. Technical report, Gobierno de Chile, 2025. URL https://unfccc.int/node/649954.

[131] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Resumen de escenarios de mitigación para la actualización de la ndc 2025. Technical report, Sistema Nacional de Prospectiva, 2025. URL https://expedientes.mma.gob.cl/storage/2025/07/06/expedientes/pdf/doc_8_20250706041307.pdf.

[132] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Decreto supremo n.º 32 de 2024: Reglamento relativo a los certificados de reducción o absorción de emisiones en el marco del artículo 6 del acuerdo de parís, 2024. URL https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/10/Reglamento-Articulo-6.pdf.

[133] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Resolución exenta n.º 01185/2026: Lista de tipologías de actividades de mitigación priorizadas y contraindicadas para la transferencia internacional de resultados de mitigación, 2026. URL https://cambioclimatico.mma.gob.cl/recursos/download/285.

[134] Karen L. Scrivener, Fernando Martirena, Shashank Bishnoi, and Soumen Maity. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114:49–56, 2018. doi: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017.

[135] Hamed Maraghechi, Francois Avet, Hong Wong, Hadi Kamyab, and Karen L. Scrivener. Performance of limestone calcined clay cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport. *Materials and Structures*, 51(5):125, 2018. doi: 10.1617/s11527-018-1255-3.

[136] Hanson UK and MPA. Fuel switching demonstration at ribblesdale cement works. Technical report, Mineral Products Association, 2021. URL `https://mineralproducts.org/MPA/media/root/Publications/2021/MPA-Hanson-Net-Zero-Cement-Fuel-Switching.pdf`.

Apéndice A

Memoria de cálculo del proceso de clinkerización

Este apéndice documenta la aplicación numérica de los balances de masa y energía utilizados para representar la producción de clínker en los escenarios OPC-P y OPC-H_2V. Las ecuaciones generales, las reacciones y los límites del sistema se definieron en el Capítulo 5. En consecuencia, el desarrollo siguiente se concentra en las entradas utilizadas, los flujos intermedios, la distribución calculada de las fases del clínker y las comprobaciones de cierre. La modelación corresponde a un balance estequiométrico en estado estacionario, con conversión completa de las reacciones consideradas, y no representa la cinética ni el perfil espacial de un horno industrial.

Las expresiones metodológicas no se vuelven a definir en este apéndice. Las operaciones desplegadas corresponden únicamente a sustituciones numéricas o a relaciones auxiliares empleadas para comprobar los balances; por esta razón se presentan sin numeración.

A.1 Alcance y base de cálculo

La unidad funcional del estudio corresponde a una producción constante de 204 kt de cemento por año. Para los escenarios OPC se adoptó una formulación con 95% de clínker y 5% de yeso. La operación continua durante 8.760 h/año determina los flujos horarios indicados en la Tabla A.1.

Tabla A.1: Base de cálculo de los escenarios OPC.

Parámetro	**Valor**	**Unidad**
Producción anual de cemento	204,00	kt/año
Tiempo anual de operación	8.760	h/año
Flujo horario de cemento	23,29	t/h
Fracción másica de clínker	0,95	–
Fracción másica de yeso	0,05	–
Producción anual de clínker	193,80	kt/año
Flujo horario de clínker	22,12	t/h

La producción horaria de clínker se obtiene mediante la aplicación directa de la composición másica del cemento:

$$\dot{m}_{\text{clinker}} = 0{,}95 \left(\frac{204.000}{8.760} \right) = 22{,}12 \text{ t/h}.$$

Este flujo se mantuvo en los dos escenarios OPC. La diferencia entre ellos se limitó al combustible utilizado para satisfacer la misma demanda térmica.

A.2 Representación general del proceso modelado

La modelación se organizó en dos bloques. La Figura A.1 presenta el acondicionamiento de la harina cruda, incluida la alimentación húmeda, la pérdida sólida y la eliminación de humedad. La figura se conserva como esquema de trazabilidad de la planilla; los valores definitivos del balance se presentan posteriormente en la Tabla A.2.

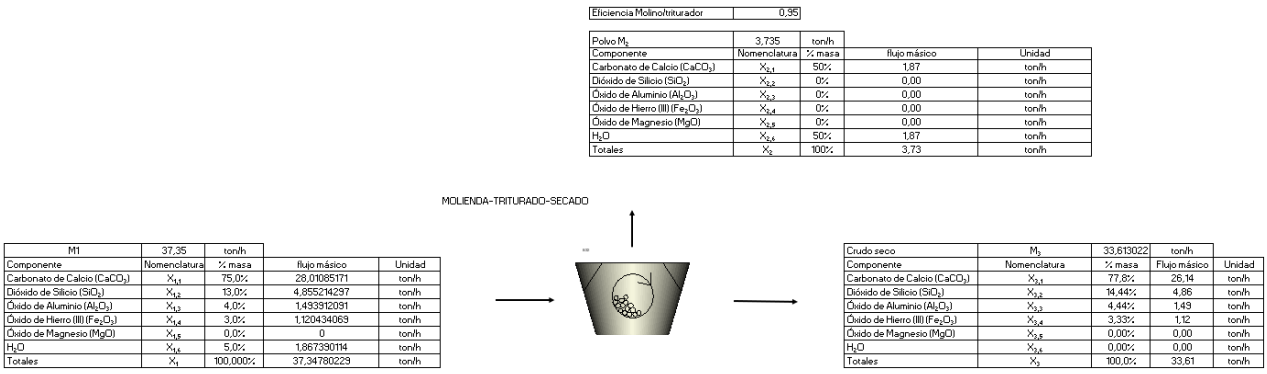


Figura A.1: Estructura de cálculo utilizada para el acondicionamiento de la harina cruda destinada a la producción de clínker.

La Figura A.2 muestra el segundo bloque, en el cual los flujos acondicionados se convierten a base molar y se distribuyen entre las reacciones de descarbonatación y formación de las fases del clínker. Su función es representar la secuencia de cálculo y no la disposición física ni la cinética de un horno industrial.

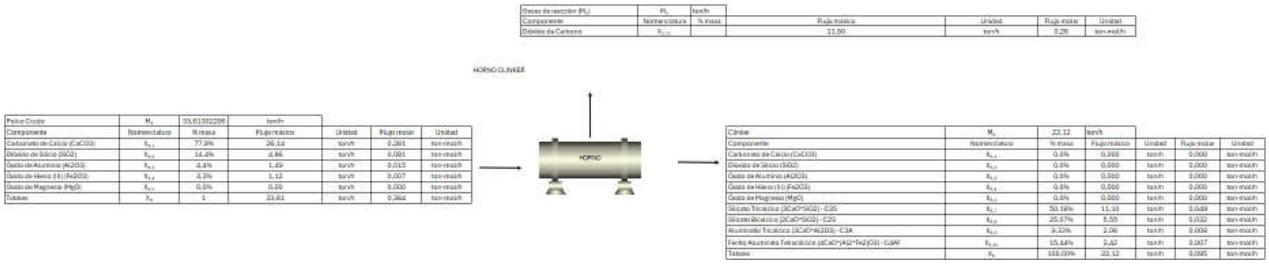


Figura A.2: Estructura de cálculo de los balances de descarbonatación y formación de las fases del clínker.

A.3 Acondicionamiento de la harina cruda

La harina cruda húmeda se representó mediante 75% de $CaCO_3$, 13% de SiO_2, 4% de Al_2O_3, 3% de Fe_2O_3 y 5% de agua libre. El acondicionamiento consideró una retención sólida de 95% y la eliminación completa de la humedad libre. Para conservar la correspondencia con la planilla técnica, la pérdida sólida se asignó al flujo de $CaCO_3$. La aplicación de las Ecuaciones 5.13 y 5.14 produjo el balance presentado en la Tabla A.2.

Tabla A.2: Balance de masa del acondicionamiento de la harina cruda.

Corriente	**Flujo horario (t/h)**	**Flujo anual (kt/año)**
Harina cruda húmeda alimentada	37,35	327,17
Humedad libre retirada	1,87	16,36
Pérdida sólida del acondicionamiento	1,87	16,36
Harina seca enviada al horno	33,61	294,45
Clínker producido	22,12	193,80
CO_2 de proceso generado	11,50	100,70

La composición másica de la harina seca enviada al horno resultó igual a 77,78% de $CaCO_3$, 14,44% de SiO_2, 4,44% de Al_2O_3 y 3,33% de Fe_2O_3. La diferencia entre la composición húmeda original y esta composición se explica por la eliminación del agua y por la asignación de la pérdida sólida al carbonato de calcio.

Las relaciones harina cruda/clínker sobre base húmeda y seca se comprobaron mediante:

$$RMCR_{\text{húmeda}} = \frac{37{,}35}{22{,}12} = 1{,}69 \ \frac{\text{t harina húmeda}}{\text{t clínker,}}$$
$$RMCR_{\text{seca}} = \frac{33{,}61}{22{,}12} = 1{,}52 \ \frac{\text{t harina seca}}{\text{t clínker.}}$$

A.4 Balance estequiométrico y formación de las fases del clínker

Los flujos másicos acondicionados se convirtieron en flujos molares y se asignaron secuencialmente a las reacciones de descarbonatación y formación de las fases C_4AF, C_3A, C_2S y C_3S. El avance de cada reacción se determinó a partir del reactivo limitante. La Tabla A.3 presenta los avances y la contribución térmica correspondiente.

Tabla A.3: Balance estequiométrico y térmico de las reacciones de clinkerización.

Reacción o fase formada	**Avance (t-mol/h)**	ΔH **(GJ/t-mol)**	$\dot{Q}_{\text{rxn}}$ **(GJ/h)**
Descarbonatación de $CaCO_3$	0,26121	179,17	46,80
Formación de C_4AF	0,00702	$-40,42$	$-0,28$
Formación de C_3A	0,00764	19,46	0,15
Formación de C_2S	0,08081	$-127,46$	$-10,30$
Conversión de C_2S en C_3S	0,04861	11,92	0,58
Total	–	–	**36,95**

Los signos positivos representan demanda de calor y los negativos liberación de energía.

La distribución másica calculada de las fases del clínker se presenta en la Tabla A.4. El cierre corresponde a la asignación estequiométrica de los reactivos disponibles y no a una caracterización mineralógica experimental.

Tabla A.4: Distribución calculada de las fases del clínker.

Fase	**Flujo másico (t/h)**	**Participación (% masa)**	**Producción anual (kt/año)**
Alita, C_3S	11,10	50,16	97,21
Belita, C_2S	5,55	25,07	48,58
Aluminato tricálcico, C_3A	2,06	9,33	18,07
Aluminoferrito tetracálcico, C_4AF	3,42	15,44	29,93
Total	**22,12**	**100,00**	**193,80**

A.5 Balance térmico del precalentamiento y la clinkerización

El calor sensible se calculó por intervalos de temperatura mediante la Ecuación 5.16. Para la harina multicomponente se obtuvo un calor específico medio de 804,78 kJ/(t·°C). Los valores de calor específico utilizados en la planilla se resumen en la Tabla A.5.

Tabla A.5: Calores específicos utilizados en la modelación térmica del clínker.

Compuesto o fase	C_p **(kJ/(t·°C))**
Carbonato de calcio, $CaCO_3$	820
Óxido de calcio, CaO	750
Dióxido de silicio, SiO_2	740
Óxido de aluminio, Al_2O_3	880
Óxido de hierro (III), Fe_2O_3	630
Óxido de magnesio, MgO	950
Alita, C_3S	840
Belita, C_2S	920
Aluminato tricálcico, C_3A	1.050
Aluminoferrito tetracálcico, C_4AF	900

El precalentamiento de la harina seca requirió 23,67 GJ/h. El calor neto de las reacciones alcanzó 36,95 GJ/h y el calentamiento sensible de las fases del clínker desde 900 hasta 1.500 °C requirió 11,80 GJ/h. La suma de los tres componentes se presenta en la Tabla A.6.

Tabla A.6: Desagregación del requerimiento térmico de la producción de clínker.

Componente	**Requerimiento (GJ/h)**	**Participación (%)**
Precalentamiento de la harina seca	23,67	32,69
Calor neto de reacción	36,95	51,02
Calentamiento sensible del clínker	11,80	16,29
Total	**72,41**	**100,00**

El consumo térmico específico resultante fue:

$$CE_{\text{th,clinker}} = \frac{72{,}41}{22{,}12} = 3{,}27 \text{ GJ/t clínker.}$$

La anualización del valor calculado entrega 634,35 TJ/año. La pequeña diferencia entre la sustitución mostrada y el valor anual con mayor precisión se debe al redondeo de los flujos horarios presentados en las tablas.

A.6 Consumo equivalente de combustible

El consumo de combustible se obtuvo mediante la Ecuación 5.19, aplicando poderes caloríficos inferiores de 32,484576 GJ/t para el petcoke y 120 GJ/t para el H_2V. Las sustituciones sobre la base anual fueron:

$$M_{\text{petcoke,OPC}} = \frac{634.346{,}91 \text{ GJ/año}}{32{,}484576 \text{ GJ/t}} = 19.527{,}6 \text{ t/año} = 19{,}5276 \text{ kt/año},$$
$$M_{\text{H}_2\text{V,OPC}} = \frac{634.346{,}91 \text{ GJ/año}}{120 \text{ GJ/t}} = 5.286{,}2 \text{ t/año} = 5{,}2862 \text{ kt/año}.$$

La equivalencia energética supone que la totalidad de la demanda térmica se satisface con un único combustible en cada escenario. No se modelaron mezclas, cocombustión, diferencias de transferencia de calor ni modificaciones en la eficiencia del horno.

A.7 Anualización y comprobación del balance

La Tabla A.7 consolida las magnitudes utilizadas posteriormente en los cálculos de emisiones y en la evaluación económica.

Tabla A.7: Comprobación anual del modelo de clinkerización.

Magnitud	**Valor**	**Unidad**
Producción de cemento OPC	204,000	kt/año
Producción de clínker	193,800	kt/año
Harina cruda húmeda	327,17	kt/año
Harina seca enviada al horno	294,45	kt/año
CO_2 estequiométrico de proceso	100,701	$ktCO_2$/año
Demanda térmica del clínker	634,347	TJ/año
Consumo equivalente de petcoke	19,528	kt/año
Consumo equivalente de H_2V	5,286	kt/año

Apéndice B

Memoria de cálculo de la calcinación de arcilla y de los escenarios LC^3

Este apéndice documenta el balance de masa de la arcilla, su transformación durante la deshidroxilación y la integración de su demanda térmica con el clínker remanente de los escenarios LC^3-P y LC^3-H_2V. La base energética se aplica a la masa de arcilla calcinada producida e incorporada al cemento. Esta convención mantiene la coherencia con la metodología de evaluación técnica y evita aplicar el consumo específico a la alimentación de arcilla cruda.

Las ecuaciones generales de demanda térmica y equivalencia energética se mantienen en el Capítulo 5. En este apéndice solo se muestran su aplicación numérica, el balance mineral simplificado y los controles de cierre.

La formulación LC^3-50 contiene 50% de clínker, 30% de arcilla calcinada, 15% de caliza y 5% de yeso. Para una producción anual de 204 kt de cemento, los requerimientos indicados en la Tabla B.1 se mantienen iguales en los dos escenarios LC^3.

Tabla B.1: Componentes del cemento en los escenarios LC^3.

Componente	**Fracción másica (–)**	**Flujo horario (t/h)**	**Flujo anual (kt/año)**
Clínker	0,50	11,64	102,00
Arcilla calcinada	0,30	6,99	61,20
Caliza adicionada	0,15	3,49	30,60
Yeso	0,05	1,16	10,20
Total	**1,00**	**23,29**	**204,00**

La relación másica entre arcilla calcinada y caliza es 2:1. La producción de clínker se reduce desde 193,80 hasta 102,00 kt/año respecto de OPC, mientras que la arcilla calcinada requerida constituye la base de capacidad de la unidad de calcinación.

B.1 Composición de la arcilla cruda y reacciones consideradas

La alimentación se representó mediante caolinita, goethita, moscovita e inertes. Las tres fases minerales se sometieron a conversión completa y los inertes atravesaron el sistema sin transformación química. La caolinita se transformó en metacaolinita según la reacción definida en la Ecuación 4.6. Para la goethita y la moscovita se utilizaron las siguientes representaciones simplificadas:

$$_2\mathrm{FeO(OH)} \longrightarrow \mathrm{Fe_2O_3} + \mathrm{H_2O},$$
$$\mathrm{KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2} \longrightarrow \mathrm{KAl_2(AlSi_3O_{10})O} + \mathrm{H_2O}.$$

La Tabla B.2 presenta los flujos efectivos utilizados para satisfacer la demanda de 61,20 kt/año de producto calcinado.

Tabla B.2: Composición efectiva de la alimentación de arcilla cruda.

Componente	**Flujo másico (t/h)**	**Participación (% masa)**	**Flujo anual (kt/año)**
Caolinita, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$	3,1754	42,01	27,817
Goethita, FeO(OH)	1,0100	13,36	8,848
Moscovita, $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	0,6003	7,94	5,259
Inertes	2,7732	36,69	24,293
Total	**7,5590**	**100,00**	**66,217**

B.2 Balance de masa y rendimiento de calcinación

La aplicación de la estequiometría produce 6,9863 t/h de sólidos y 0,5727 t/h de vapor de agua. La composición de la corriente sólida se presenta en la Tabla B.3.

Tabla B.3: Composición calculada de la arcilla calcinada.

Componente	**Flujo másico (t/h)**	**Participación (% masa)**	**Flujo anual (kt/año)**
Metacaolinita, $Al_2Si_2O_7$	2,7322	39,11	23,934
Óxido de hierro (III), Fe_2O_3	0,9077	12,99	7,952
Moscovita deshidroxilada	0,5732	8,20	5,021
Inertes	2,7732	39,70	24,293
Total	**6,9863**	**100,00**	**61,200**

La pérdida de masa corresponde al agua estructural liberada por las fases reactivas. El flujo gaseoso anual alcanza 5,017 kt/año. El rendimiento másico del calcinador se obtuvo mediante:

$$\eta_{\text{cal,arcilla}} = \frac{6{,}9863}{7{,}5590} = 0{,}9242,$$
$$\frac{m_{\text{arcilla cruda}}}{m_{\text{arcilla calcinada}}} = \frac{1}{0{,}9242} = 1{,}082.$$

Por tanto, la producción de una tonelada de arcilla calcinada requiere aproximadamente 1,082 t de arcilla cruda bajo la composición modelada.

La Figura B.1 conserva la representación original de la planilla y permite seguir las corrientes másicas y molares utilizadas en el balance. Los resultados que gobiernan los cálculos posteriores corresponden a los valores tabulados en este apéndice.

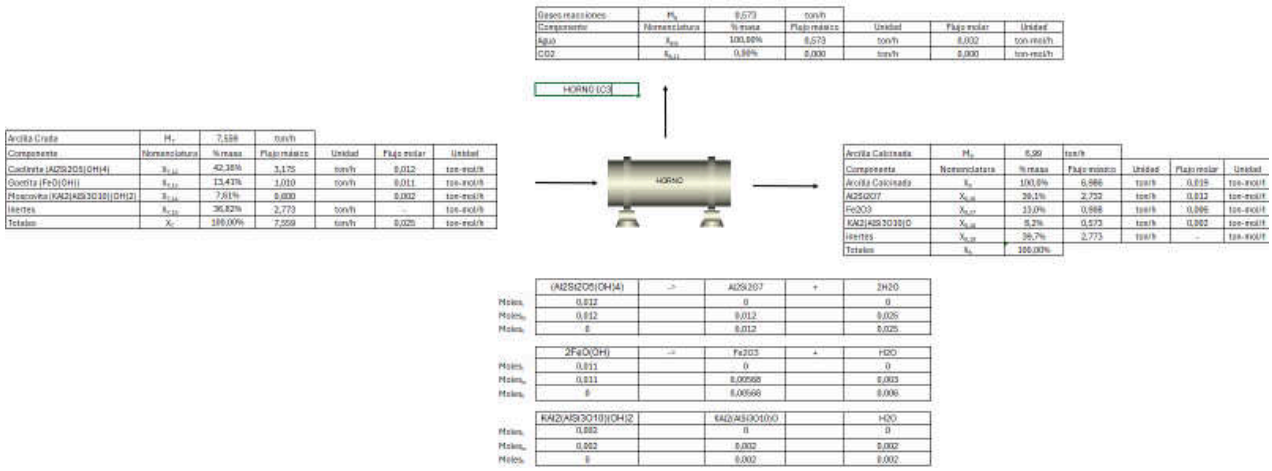


Figura B.1: Estructura de cálculo de las reacciones y los flujos másicos y molares considerados en la calcinación de arcilla.

B.3 Demanda térmica de la producción de arcilla calcinada

El consumo térmico específico adoptado fue de 1,8828 GJ por tonelada de arcilla calcinada. Su aplicación corresponde a la corriente sólida producida:

$$\begin{aligned} Q_{\text{arcilla}} &= 61.200 \text{ t/año} \times 1{,}8828 \text{ GJ/t} \\ &= 115.227{,}36 \text{ GJ/año} = 115{,}227 \text{ TJ/año}. \end{aligned}$$

Sobre la base horaria:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{arcilla}} &= 6{,}9863 \text{ t/h} \times 1{,}8828 \text{ GJ/t} \\ &= 13{,}15 \text{ GJ/h}. \end{aligned}$$

La masa de 66.217 t/año de arcilla cruda se utiliza exclusivamente en el balance de alimentación y en la estimación de requerimientos de materia prima. Aplicar el consumo térmico específico a esa corriente sobrestimaría la demanda de energía y el consumo de H_2V del escenario combinado.

B.4 Integración con la demanda térmica del clínker

La producción de 102 kt/año de clínker requiere 333,867 TJ/año. La suma de este valor y de la demanda de la arcilla calcinada determina la energía térmica total de los escenarios LC^3, como se muestra en la Tabla B.4.

Tabla B.4: Balance térmico de los escenarios LC^3.

Componente	**Demanda horaria (GJ/h)**	**Demanda anual (TJ/año)**
Clinkerización	38,11	333,867
Calcinación de arcilla	13,15	115,227
Total	**51,27**	**449,094**

La demanda térmica total disminuye 29,20% respecto de los 634,347 TJ/año de los escenarios OPC. Esta reducción combina la menor producción de clínker con la energía adicional requerida para producir la arcilla calcinada.

B.5 Consumo equivalente de petcoke y H_2V

La demanda térmica total se convirtió en consumo de combustible utilizando los mismos poderes caloríficos inferiores aplicados en el Apéndice A:

$$M_{\text{petcoke,LC}^3} = \frac{449.094{,}155 \text{ GJ/año}}{32{,}484576 \text{ GJ/t}} = 13.824{,}8 \text{ t/año} = 13{,}8248 \text{ kt/año},$$
$$M_{\text{H}_2\text{V,LC}^3} = \frac{449.094{,}155 \text{ GJ/año}}{120 \text{ GJ/t}} = 3.742{,}45 \text{ t/año} = 3{,}74245 \text{ kt/año}.$$

La reducción del consumo de H_2V frente al escenario OPC-H_2V es:

$$R_{\text{H}_2\text{V}} = 1 - \frac{3{,}742451}{5{,}286224}$$
$$= 0{,}2920 = 29{,}20\%.$$

B.6 Anualización y comprobación del balance

La Tabla B.5 resume las magnitudes que alimentan los cálculos ambientales y económicos posteriores.

Tabla B.5: Comprobación anual de los escenarios LC^3.

Magnitud	**Valor**	**Unidad**
Producción de cemento LC^3	204,000	kt/año
Producción de clínker	102,000	kt/año
Alimentación de arcilla cruda	66,217	kt/año
Producción de arcilla calcinada	61,200	kt/año
Caliza adicionada	30,600	kt/año
Yeso	10,200	kt/año
Demanda térmica del clínker	333,867	TJ/año
Demanda térmica de la arcilla	115,227	TJ/año
Demanda térmica total	449,094	TJ/año
Consumo equivalente de petcoke	13,825	kt/año
Consumo equivalente de H_2V	3,742	kt/año

La suma de los componentes del cemento coincide con 204 kt/año y la masa de los productos sólidos de la calcinación coincide con 61,20 kt/año. La reducción de la demanda térmica y de

ambos combustibles es 29,20% respecto de las formulaciones OPC equivalentes.

Apéndice C

Cálculo de emisiones, reducciones e ITMOs

Este apéndice presenta la aplicación numérica del método de cuantificación de emisiones y del potencial técnico de Resultados de Mitigación Transferidos Internacionalmente (ITMOs). La línea base corresponde a OPC-P y los escenarios de proyecto son LC^3-P, OPC-H_2V y LC^3-H_2V. Las ecuaciones generales se desarrollaron en las Secciones 5.7 y 5.8; aquí se muestran las emisiones utilizadas, las fugas, las reducciones netas y su calendarización.

C.1 Emisiones operacionales por escenario

La Tabla C.1 consolida las emisiones anuales utilizadas en el cálculo. Las emisiones de proceso y combustión provienen de los balances técnicos; las emisiones eléctricas se calcularon con el factor de la red indicado previamente.

Tabla C.1: Emisiones operacionales anuales de los escenarios evaluados.

Escenario	**Proceso**	**Combustión**	**Electricidad**	**Total**	**Intensidad**
		(tCO_2e/año)			**(tCO_2e/t cemento)**
OPC-P	100.701,367	60.009,218	6.322,368	167.032,952	0,818789
LC^3-P	53.000,719	42.484,307	6.322,368	101.807,394	0,499056
OPC-H_2V	100.701,367	0,000	6.322,368	107.023,735	0,524626
LC^3-H_2V	53.000,719	0,000	6.322,368	59.323,087	0,290799

Las emisiones de proceso disminuyen en los escenarios LC^3 debido a la reducción del factor clínker. Las emisiones de combustión se reducen con la menor demanda térmica de LC^3-P y se

consideran iguales a cero en los escenarios con H_2V. La electricidad no modifica las reducciones absolutas entre escenarios porque su consumo es común a todos ellos.

C.2 Línea base y emisiones de proyecto

Aplicando las Ecuaciones 5.25 y 5.26, la línea base anual se mantuvo constante durante el período analizado:

$$BE_y = 167.032{,}952 \text{ tCO}_2\text{e/año.}$$

Las emisiones de proyecto corresponden a los totales de la Tabla C.1. Por ejemplo, para LC^3-P:

$$\begin{aligned} PE_{\text{LC}^3\text{-P},y} &= 53.000{,}719 + 42.484{,}307 + 6.322{,}368 \\ &= 101.807{,}394 \text{ tCO}_2\text{e/año.} \end{aligned}$$

El mismo procedimiento entrega 107.023,735 tCO_2e/año para OPC-H_2V y 59.323,087 tCO_2e/año para LC^3-H_2V.

C.3 Fugas por transporte de adiciones

La formulación OPC contiene 5% de adiciones, mientras que LC^3 contiene 50%. Aplicando la Ecuación 5.27, la masa adicional transportada en los escenarios LC^3 es:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ADD}} &= (0{,}50 - 0{,}05) \times 204.000 \\ &= 91.800 \text{ t/año.} \end{aligned}$$

Con una distancia simple de 50 km, el recorrido total considerado fue de 100 km. La aplicación de la Ecuación 5.28 y del factor de emisión de 0,000129 tCO_2/(t·km) produjo:

$$LE_{\text{LC}^3} = 91.800 \times 100 \times 0{,}000129 \tag{C.1}$$

$$= 1.184{,}220 \text{ tCO}_2\text{e/año.} \tag{C.2}$$

Esta fuga se aplicó a LC^3-P y LC^3-H_2V. Para OPC-H_2V se adoptó una fuga igual a cero porque su formulación no incorpora adiciones adicionales respecto de la línea base.

C.4 Reducciones brutas y netas

Aplicando las Ecuaciones 5.29 y 5.30, las sustituciones numéricas son:

$$ER_{\text{neta,LC}^3-\text{P}} = 167.032{,}952 - 101.807{,}394 - 1.184{,}220 \tag{C.3}$$
$$= 64.041{,}338 \text{ tCO}_2\text{e/año}, \tag{C.4}$$
$$ER_{\text{neta,OPC}-\text{H}_2\text{V}} = 167.032{,}952 - 107.023{,}735 \tag{C.5}$$
$$= 60.009{,}218 \text{ tCO}_2\text{e/año}, \tag{C.6}$$
$$ER_{\text{neta,LC}^3-\text{H}_2\text{V}} = 167.032{,}952 - 59.323{,}087 - 1.184{,}220 \tag{C.7}$$
$$= 106.525{,}645 \text{ tCO}_2\text{e/año}. \tag{C.8}$$

La Tabla C.2 presenta el cierre de las reducciones y su proporción respecto de la línea base.

Tabla C.2: Reducciones brutas, fugas y reducciones netas anuales.

Escenario	**Reducción bruta**	**Fugas (tCO$_2$e/año)**	**Reducción neta**	**Reducción neta (%)**
LC^3-P	65.225,558	1.184,220	64.041,338	38,34
OPC-H_2V	60.009,218	0,000	60.009,218	35,93
LC^3-H_2V	107.709,865	1.184,220	106.525,645	63,78

C.5 Potencial anual, específico y acumulado de ITMOs

Para el caso central se adoptó una fracción transferible $\alpha_y = 1$ durante los años 2029–2038. Al aplicar las Ecuaciones 5.31 y 5.32, el potencial anual de ITMOs coincide numéricamente con la reducción neta y el acumulado corresponde a diez años de acreditación. La reducción específica se calculó sobre la producción común de 204.000 t de cemento por año.

Tabla C.3: Potencial anual, específico y acumulado de ITMOs.

Escenario	**Potencial anual (ITMO/año)**	**Reducción específica (tCO_2e/t cemento)**	**Potencial 2029–2038 (ITMO)**
LC^3-P	64.041,338	0,313928	640.413,381
OPC-H_2V	60.009,218	0,294163	600.092,177
LC^3-H_2V	106.525,645	0,522185	1.065.256,451

Estos valores representan el potencial técnico máximo bajo la fracción transferible adoptada. No incorporan descuentos por incertidumbre, contribución a la NDC chilena, reservas del país anfitrión, costos de transacción ni una eventual distribución de las reducciones entre las Partes.

C.6 Calendarización referencial por vintage y año de entrega

Los años 2027 y 2028 se asignaron a la implementación y no generan ITMOs, mientras que el período de acreditación comprende los años 2029–2038. Las cantidades presentadas corresponden al potencial de ITMOs generado en cada año de acreditación o vintage. Para cada vintage se adoptó como referencia una fecha de entrega al 30 de septiembre del año siguiente; sin embargo, este desfase representa únicamente una calendarización operativa de la transferencia. En la evaluación económica, los ingresos potenciales se imputaron al año de generación de las reducciones, sin incorporar el desfase hasta su entrega. Esta convención no representa un contrato de compraventa, una obligación de entrega ni la fecha efectiva de pago.

Tabla C.4: Calendarización referencial del potencial de ITMOs por vintage y fecha de entrega.

Año del vintage	**Estado**	**Fecha referencial de entrega**	**LC^3-P (ITMO)**	**OPC-H_2V (ITMO)**	**LC^3-H_2V (ITMO)**
2027	Implementación	–	0,000	0,000	0,000
2028	Implementación	–	0,000	0,000	0,000
2029	Acreditación	30.09.2030	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2030	Acreditación	30.09.2031	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2031	Acreditación	30.09.2032	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2032	Acreditación	30.09.2033	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2033	Acreditación	30.09.2034	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2034	Acreditación	30.09.2035	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2035	Acreditación	30.09.2036	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2036	Acreditación	30.09.2037	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2037	Acreditación	30.09.2038	64.041,338	60.009,218	106.525,645
2038	Acreditación	30.09.2039	64.041,338	60.009,218	106.525,645
Total del período de acreditación			**640.413,381**	**600.092,177**	**1.065.256,451**

Apéndice D

Memoria de cálculo de la prefactibilidad económica

Este apéndice desarrolla la aplicación numérica de la evaluación económica incremental respecto de OPC-P. Se incluyen el OPEX variable, la inversión fija instalada (FCI) y el OPEX fijo de la infraestructura adicional, la recuperación anual del capital y los ingresos potenciales por ITMOs. El H_2V se considera un insumo comprado; por tanto, no se incluyen electrolizadores, generación renovable, tratamiento de agua ni infraestructura de producción fuera de la planta cementera.

Las ecuaciones económicas generales permanecen en la Sección 5.9. Este apéndice conserva únicamente las sustituciones numéricas, los desgloses auxiliares, las tablas de cierre y la relación adicional utilizada para la frontera simultánea de precios.

D.1 Supuestos económicos y componentes incluidos

Los supuestos centrales y los intervalos utilizados en las sensibilidades se presentan en la Tabla D.1. Sus fundamentos y fuentes se desarrollan en la metodología económica del Capítulo 5.

Tabla D.1: Supuestos centrales de la evaluación económica incremental.

Parámetro	**Caso central**	**Sensibilidad**	**Unidad**
Precio del petcoke	60	–	USD/t
Precio de suministro de H_2V	4,5	1,5–6,0	USD/kg H_2
Precio de electricidad	60	–	USD/MWh
CAPEX de referencia adoptado para el calcinador	12	6–18	MMUSD
Capacidad de producción del calcinador de referencia	350.000	–	t/año de producto calcina
Capacidad requerida de arcilla calcinada	61.200	–	t/año
Exponente costo-capacidad	0,40	–	–
Autonomía del almacenamiento de H_2V	24	–	h
Fracción útil del almacenamiento	0,80	–	–
Densidad del H_2 comprimido	23,3	–	kg/m^3
Costo unitario de los recipientes	300	100–700	USD/kg H_2
Multiplicador de equipo comprado a FCI	4,36	–	veces
Mantenimiento y reparaciones	7	5–9	% FCI/año
Suministros de operación	15	–	% mantenimiento
Seguros e impuestos	2	–	% FCI/año
Gastos generales	60	–	% mantenimiento
Tasa de descuento	9	–	% anual
Vida económica	10	–	años
Precio del ITMO	37,1793	0–139	USD/tCO_2e

D.2 Costos operacionales variables

Aplicando la expresión de OPEX variable definida en la Sección 5.9 a los consumos anuales y precios unitarios, para los dos escenarios con H_2V se obtiene:

$$\begin{aligned} C_{\mathrm{H_2V,OPC-H_2V}} &= 5.286.224{,}252 \times 4{,}5 \times 10^{-6} \\ &= 23{,}788 \text{ MMUSD/año,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\mathrm{H_2V,LC^3-H_2V}} &= 3.742.451{,}291 \times 4{,}5 \times 10^{-6} \\ &= 16{,}841 \text{ MMUSD/año.} \end{aligned}$$

El costo eléctrico común es:

$$C_{\text{electricidad}} = 26.520 \times 60 \times 10^{-6}$$
$$= 1{,}5912 \text{ MMUSD/año.}$$

La Tabla D.2 consolida el resultado de los cuatro escenarios.

Tabla D.2: OPEX variable de los escenarios evaluados.

Escenario	**Petcoke**	**H_2V**	**Electricidad**	**Total**
		(MMUSD/año)		
OPC-P	1,172	0,000	1,591	2,763
LC^3-P	0,829	0,000	1,591	2,421
OPC-H_2V	0,000	23,788	1,591	25,379
LC^3-H_2V	0,000	16,841	1,591	18,432

D.3 CAPEX incremental de la unidad de calcinación de arcilla

Como referencia se utilizaron un CAPEX de 12 MMUSD y una capacidad de producción de 350.000 t/año, reportados para un calcinador *retrofit* en el contexto cubano [28]. De acuerdo con la convención establecida en la Sección 5.9, el monto se adoptó como una aproximación de la inversión fija instalada y la capacidad se interpretó como producción anual de arcilla calcinada. Aplicando la Ecuación 5.34 con un exponente de 0,40:

$$FCI_{\text{LC3}} = 12 \left(\frac{61.200}{350.000} \right)^{0{,}40} = 5,974 \text{ MMUSD.}$$

El resultado constituye una estimación preliminar de la inversión fija instalada.La Tabla D.3 presenta una distribución indicativa del monto según las participaciones normalizadas del método factorial; esta distribución no corresponde a un desglose proporcionado por la fuente cubana [88].

Tabla D.3: Desglose indicativo del FCI de la unidad de calcinación de arcilla.

Componente	**Participación (%)**	**Costo (MMUSD)**
Equipo comprado	22,94	1,370
Instalación de equipos	8,26	0,493
Instrumentación y control	6,42	0,384
Tuberías instaladas	7,34	0,438
Instalaciones eléctricas	4,59	0,274
Edificaciones y servicios	4,59	0,274
Mejoras de terreno	1,83	0,110
Servicios auxiliares	13,76	0,822
Terreno	0,92	0,055
Ingeniería y supervisión	9,17	0,548
Gastos de construcción	11,01	0,658
Honorarios del contratista	1,83	0,110
Contingencia	7,34	0,438
Total	**100,00**	**5,974**

D.4 Dimensionamiento del almacenamiento y CAPEX de H_2V

Aplicando la Ecuación 5.35 con 24 h de autonomía y una fracción útil de 80%, la entrada técnica corregida de LC^3-H_2V produce:

$$\dot{m}_{H_2V} = \frac{3.742.451{,}291}{8.760} = 427{,}220 \text{ kg/h},$$
$$M_{\text{útil}} = 427{,}220 \times 24 = 10.253{,}291 \text{ kg},$$
$$M_{\text{nominal}} = \frac{10.253{,}291}{0{,}80} = 12.816{,}614 \text{ kg},$$
$$V_{H_2} = \frac{12.816{,}614}{23{,}3} = 550{,}069 \text{ m}^3.$$

La Tabla D.4 presenta los resultados para ambos escenarios con H_2V.

Tabla D.4: Dimensionamiento del almacenamiento de H_2V.

Escenario	**Consumo (kg/h)**	**Capacidad útil (t H_2)**	**Capacidad nominal (t H_2)**	**Volumen (m^3)**
OPC-H_2V	603,450	14,483	18,104	776,975
LC^3-H_2V	427,220	10,253	12,817	550,069

El costo de los recipientes se trató como costo de equipo comprado. Su expansión a FCI utilizó el multiplicador 4,36 derivado de los porcentajes normalizados del método factorial [88]:

$$\begin{aligned} FCI_{\mathrm{H_2V,OPC}} &= 18.103{,}508 \times 300 \times 4{,}36 \times 10^{-6} \\ &= 23{,}679 \text{ MMUSD}, \\ FCI_{\mathrm{H_2V,LC^3}} &= 12.816{,}614 \times 300 \times 4{,}36 \times 10^{-6} \\ &= 16{,}764 \text{ MMUSD}. \end{aligned}$$

El FCI incremental total del escenario combinado es:

$$\begin{aligned} FCI_{\mathrm{LC^3-H_2V}} &= 5{,}974 + 16{,}764 \\ &= 22{,}738 \text{ MMUSD}. \end{aligned}$$

La Tabla D.5 presenta el desglose del FCI asociado exclusivamente al almacenamiento y acondicionamiento de H_2V. El FCI del calcinador se mantiene como un componente separado del escenario combinado.

Tabla D.5: Desglose del FCI de los sistemas de almacenamiento y acondicionamiento de H_2V.

Componente	**Participación (%)**	**OPC-H_2V (MMUSD)**	**LC^3-H_2V (MMUSD)**
Equipo comprado	22,94	5,431	3,845
Instalación de equipos	8,26	1,955	1,384
Instrumentación y control	6,42	1,521	1,077
Tuberías instaladas	7,34	1,738	1,230
Instalaciones eléctricas	4,59	1,086	0,769
Edificaciones y servicios	4,59	1,086	0,769
Mejoras de terreno	1,83	0,434	0,308
Servicios auxiliares	13,76	3,259	2,307
Terreno	0,92	0,217	0,154
Ingeniería y supervisión	9,17	2,172	1,538
Gastos de construcción	11,01	2,607	1,846
Honorarios del contratista	1,83	0,434	0,308
Contingencia	7,34	1,738	1,230
Total	**100,00**	**23,679**	**16,764**

D.5 OPEX fijo y costo anual equivalente

Al aplicar la relación de OPEX fijo definida en la Sección 5.9, los supuestos del caso central equivalen a una tasa agregada de 14,25% del FCI por año:

$$\begin{aligned} f_{\text{OPEX fijo}} &= 0{,}07\,(1 + 0{,}15 + 0{,}60) + 0{,}02 \\ &= 0{,}1425. \end{aligned}$$

Tabla D.6: Desagregación del OPEX fijo de la infraestructura incremental.

Escenario	**Mantenimiento**	**Suministros**	**Seguros e impuestos (MMUSD/año)**	**Gastos generales**	**Total**
LC^3-P	0,418	0,063	0,119	0,251	0,851
OPC-H_2V	1,658	0,249	0,474	0,995	3,374
LC^3-H_2V	1,592	0,239	0,455	0,955	3,240

Para una tasa de descuento de 9% y una vida económica de diez años, el factor de recuperación de capital definido en la Sección 5.9 es 0,155820. Aplicando la Ecuación 5.40, la Tabla D.7 combina el OPEX variable, el OPEX fijo y el CAPEX anualizado.

Tabla D.7: Construcción del costo anual equivalente parcial.

Escenario	OPEX variable	OPEX fijo	CAPEX anualizado	Costo anual	Costo específico
	(MMUSD/año)				(USD/t cemento)
OPC-P	2,763	0,000	0,000	2,763	13,54
LC^3-P	2,421	0,851	0,931	4,203	20,60
OPC-H_2V	25,379	3,374	3,690	32,443	159,04
LC^3-H_2V	18,432	3,240	3,543	25,215	123,61

El costo anual equivalente incluye la recuperación anual del capital y se utiliza para calcular el costo incremental, el costo de abatimiento y el precio de equilibrio. Para el VAN y el período de recuperación, el FCI se considera como desembolso inicial y se excluye del flujo operacional para evitar su doble contabilización.

D.6 Ingresos potenciales por ITMOs y flujos incrementales

Aplicando la Ecuación 5.41 con un precio de 37,179328 USD/tCO_2e y una fracción transferible igual a uno, para LC^3-P se obtiene:

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{ITMO,LC^3-P}} &= 64.041{,}338 \times 37{,}179328 \times 10^{-6} \\ &= 2{,}381 \text{ MMUSD/año.} \end{aligned}$$

La Tabla D.8 presenta los ingresos, el costo anual neto y el flujo incremental utilizado en el VAN. El costo operacional de caja corresponde al OPEX variable más el OPEX fijo; no incluye el CAPEX anualizado.

Tabla D.8: Ingresos potenciales por ITMOs y flujos incrementales del caso central.

Escenario	Ingreso por ITMOs	Costo anual neto	Costo operacional de caja	Flujo incremental
		(MMUSD/año)		
OPC-P	0,000	2,763	2,763	0,000
LC^3-P	2,381	1,822	3,272	1,872
OPC-H_2V	2,231	30,212	28,754	$-23,760$
LC^3-H_2V	3,961	21,255	21,672	$-14,949$

Por ejemplo, el flujo incremental del escenario combinado se obtiene mediante:

$$\begin{aligned} FC_{\mathrm{LC^3-H_2V}} &= 2{,}762858 - 21{,}672394 + 3{,}960552 \\ &= -14{,}948984 \text{ MMUSD/año.} \end{aligned}$$

Los ingresos estimados no descuentan costos de monitoreo, reporte y verificación, estructuración, autorización, transacción ni una eventual distribución de ingresos entre participantes.

D.7 VAN incremental y período simple de recuperación

La fecha $t = 0$ se situó al cierre de la implementación, inmediatamente antes del inicio de la operación y acreditación en 2029. Se consideraron diez flujos anuales constantes para 2029–2038, sin valor residual ni capital de trabajo incremental. El factor presente de la anualidad es:

$$\begin{aligned} FPA &= \frac{1-(1+0{,}09)^{-10}}{0{,}09} \\ &= 6{,}417658. \end{aligned}$$

Para LC^3-H_2V, el VAN incremental del caso central se calcula como:

$$\begin{aligned} VAN_{\mathrm{LC^3-H_2V}} &= -22{,}737985 + (-14{,}948984) \times 6{,}417658 \\ &= -118{,}675 \text{ MMUSD}. \end{aligned}$$

La Tabla D.9 consolida los indicadores financieros. El período simple de recuperación se informa únicamente cuando el flujo incremental anual es positivo.

Tabla D.9: VAN incremental y período simple de recuperación.

Escenario	**FCI**	**VAN sin ITMOs (MMUSD)**	**VAN con ITMOs**	**Recuperación simple (años)**
LC^3-P	5,974	$-9,241$	6,039	3,19
OPC-H_2V	23,679	$-190,479$	$-176,160$	–
LC^3-H_2V	22,738	$-144,093$	$-118,675$	–

D.8 Costo de abatimiento y precios de equilibrio

Aplicando los indicadores definidos en la Sección 5.9 al costo anual equivalente y a la reducción neta de cada escenario, se obtuvieron los valores de la Tabla D.10. Bajo los flujos constantes modelados, el costo de abatimiento coincide numéricamente con el precio del ITMO que hace el VAN incremental igual a cero.

Tabla D.10: Costo incremental, costo de abatimiento y precio de equilibrio del ITMO.

Escenario	**Costo incremental (MMUSD/año)**	**Reducción neta (tCO_2e/año)**	**Costo de abatimiento y precio de equilibrio (USD/tCO_2e)**
LC^3-P	1,440	64.041,338	22,48
OPC-H_2V	29,680	60.009,218	494,60
LC^3-H_2V	22,453	106.525,645	210,77

El precio central de 37,18 USD/tCO_2e supera el equilibrio de LC^3-P, pero es inferior a los umbrales de los dos escenarios con H_2V.

D.9 Análisis de sensibilidad y fronteras de VAN igual a cero

Las sensibilidades modifican una variable a la vez, salvo la frontera entre el precio del H_2V y el precio del ITMO. La demanda física, las emisiones y los ITMOs se mantienen constantes en todas las variaciones económicas.

D.9.1 Precio del ITMO

La Tabla D.11 muestra el VAN incremental para los puntos de referencia del rango 0–139 USD/tCO_2e.

Tabla D.11: Sensibilidad del VAN incremental al precio del ITMO.

Precio ITMO (USD/tCO_2e)	**LC^3-P (MMUSD)**	**OPC-H_2V (MMUSD)**	**LC^3-H_2V (MMUSD)**
0,00	$-9,24$	$-190,48$	$-144,09$
5,00	$-7,19$	$-188,55$	$-140,67$
37,18	6,04	$-176,16$	$-118,68$
55,00	13,36	$-169,30$	$-106,49$
77,00	22,41	$-160,82$	$-91,45$
101,00	32,27	$-151,58$	$-75,04$
139,00	47,89	$-136,95$	$-49,07$

Solo LC^3-P cruza el umbral de VAN igual a cero dentro del rango evaluado. Los escenarios con H_2V permanecen negativos incluso al precio superior de 139 USD/tCO_2e.

D.9.2 Precio de suministro del H_2V

La Tabla D.12 mantiene el precio del ITMO en 37,1793 USD/tCO_2e y modifica el precio del H_2V entre 1,5 y 6,0 USD/kg.

Tabla D.12: Sensibilidad económica al precio de suministro del H_2V.

Precio H_2V (USD/kg H_2)	**Costo anual OPC-H_2V (MMUSD/año)**	**Costo anual LC³-H_2V (MMUSD/año)**	**VAN OPC-H_2V (MMUSD)**	**VAN LC³-H_2V (MMUSD)**
1,5	16,58	13,99	−74,38	−46,62
2,0	19,23	15,86	−91,35	−58,63
3,0	24,51	19,60	−125,27	−82,65
4,5	32,44	25,22	−176,16	−118,68
6,0	40,37	30,83	−227,05	−154,70

La reducción aislada del precio del H_2V mejora el resultado, pero no genera un VAN incremental positivo al precio central del ITMO dentro del intervalo evaluado.

D.9.3 Costo unitario del almacenamiento de H_2V

La Tabla D.13 modifica el costo de los recipientes y mantiene constantes el precio del combustible y el precio del ITMO.

Tabla D.13: Sensibilidad al costo unitario del almacenamiento de H_2V.

Costo recipientes (USD/kg H_2)	**FCI OPC-H_2V (MMUSD)**	**FCI total LC³-H_2V (MMUSD)**	**VAN OPC-H_2V (MMUSD)**	**VAN LC³-H_2V (MMUSD)**
100	7,89	11,56	−145,94	−97,28
200	15,79	17,15	−161,05	−107,98
300	23,68	22,74	−176,16	−118,68
500	39,47	33,91	−206,38	−140,07
700	55,25	45,09	−236,61	−161,47

La disminución del costo de almacenamiento no compensa el costo recurrente de compra del H_2V en ninguno de los dos escenarios.

D.9.4 CAPEX de referencia del calcinador

Debido al carácter contextual del CAPEX reportado para el calcinador *retrofit* y a la ausencia de un desglose detallado de sus componentes, la Tabla D.14 evalúa un intervalo de referencia entre 6 y 18 MMUSD para una capacidad de 350.000 t/año [28]. El exponente de escalamiento se mantiene en 0,40.

Tabla D.14: Sensibilidad al CAPEX de referencia del calcinador.

CAPEX de referencia (MMUSD)	**FCI escalado LC³ (MMUSD)**	**VAN LC³-P (MMUSD)**	**FCI total LC³-H_2V (MMUSD)**	**VAN LC³-H_2V (MMUSD)**
6	2,99	11,76	19,75	−112,96
9	4,48	8,90	21,24	−115,82
12	5,97	6,04	22,74	−118,68
15	7,47	3,18	24,23	−121,53
18	8,96	0,32	25,72	−124,39

LC³-P mantiene un VAN incremental positivo en todo el rango, aunque se aproxima al equilibrio en el extremo superior. El escenario combinado permanece negativo porque su resultado está dominado por el costo de suministro del H_2V.

D.9.5 Mantenimiento y reparaciones

La Tabla D.15 presenta el OPEX fijo resultante para tasas de mantenimiento entre 5% y 9% del FCI por año.

Tabla D.15: Sensibilidad del OPEX fijo a la tasa de mantenimiento.

Mantenimiento (% FCI/año)	**LC³-P (MMUSD/año)**	**OPC-H_2V (MMUSD/año)**	**LC³-H_2V (MMUSD/año)**
5	0,642	2,546	2,444
6	0,747	2,960	2,842
7	0,851	3,374	3,240
8	0,956	3,789	3,638
9	1,060	4,203	4,036

D.9.6 Frontera simultánea entre el precio del H_2V y del ITMO

La relación entre el precio del H_2V y el precio del ITMO que produce un VAN incremental igual a cero es lineal, porque ambos precios modifican flujos anuales constantes mientras la demanda física, el FCI, los ITMOs y el factor presente permanecen fijos:

$$P^{*}_{\mathrm{ITMO},s} = a_s + b_s P_{\mathrm{H_2V}}. \tag{D.1}$$

Los coeficientes obtenidos son:

$$P^{*}_{\mathrm{ITMO,OPC-H_2V}} = 98{,}19 + 88{,}09 P_{\mathrm{H_2V}},$$
$$P^{*}_{\mathrm{ITMO,LC^3-H_2V}} = 52{,}68 + 35{,}13 P_{\mathrm{H_2V}}.$$

Tabla D.16: Combinaciones de precios que producen un VAN incremental igual a cero.

Precio H_2V (USD/kg H_2)	**ITMO requerido OPC-H_2V (USD/tCO_2e)**	**ITMO requerido LC^3-H_2V (USD/tCO_2e)**
0,0	98,19	52,68
1,5	230,33	105,38
3,0	362,46	158,07
4,5	494,60	210,77
6,0	626,73	263,47