

Estratégias de sustentabilidade para maior competitividade da indústria cimenteira do México

P. Angulo^{1*}, C. Ochoa¹

* Autor de Contato: tapy_angulo@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.637>

Recebido: 06/09/2022 | Correções recebidas: 11/04/2023 | Aceito: 14/04/2023 | Publicado: 01/05/2023

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é identificar e discutir as estratégias sustentáveis mais ecoeficientes para aproveitar ou reduzir as emissões de poeiras de NO_x, SO_x e SiO₂ na fabricação de cimento, com o objetivo de melhorar a competitividade da indústria cimenteira no México. Seguiu-se um desenho de pesquisa qualitativa, observacional e dedutiva. Os resultados mostraram que os biorreatores de resíduos de SO_x têm maior ecoeficiência; seguido por cúpulas para capturar e aproveitar SiO₂ e filtros de mangas. Estas estratégias são eficazes para contaminantes específicos derivados da produção de cimento. Este estudo investiga um tema raramente abordado no México, a sustentabilidade do cimento. Ao aplicar estas estratégias, o sector do cimento mexicano aumentaria a sua competitividade empresarial.

Palavras-chave: competitividade empresarial; indicadores de competitividade; sustentabilidade; indústria de cimento.

Citar como: Angulo, P., Ochoa, C. (2023), “Estratégias de sustentabilidade para maior competitividade da indústria cimenteira do México”, Revista ALCONPAT, 13 (2), pp. 254 – 270, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.637>

¹ Fundación Universitaria Iberoamericana, Ciudad de México, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a autora Patricia Angulo contribuiu com a ideia original, coleta de dados e redação do artigo. O autor Carlos Ochoa contribuiu com a abordagem metodológica, a discussão dos resultados e a revisão do documento.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2023.

Sustainability strategies for greater competitiveness in the cement industry of Mexico

ABSTRACT

The objective of this research is to identify and discuss the most eco-efficient sustainable strategies to take advantage of or reduce emissions of NO_x, SO_x and SiO₂ dust in cement manufacturing, with the aim of improving competitiveness in the Mexican cement industry. The research design was qualitative, observational and deductive. The results showed that SO_x waste bioreactors have greater eco-efficiency, followed by domes to capture and use SiO₂ and baghouses. These strategies are effective for specific pollutants derived from cement production. This study explores a topic that has been scarcely addressed in Mexico, cement sustainability. By applying these strategies, the Mexican cement sector would boost its business competitiveness.

Keywords: business competitiveness; competitiveness indicators; sustainability; cement industry.

Estrategias de sostenibilidad para la mayor competitividad en la industria cementera de México

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es identificar y discutir las estrategias sostenibles más ecoeficientes para aprovechar o reducir emisiones de NO_x, SO_x y polvos de SiO₂ en la fabricación de cemento, con el objetivo de mejorar la competitividad en la industria cementera de México. El diseño de investigación fue cualitativo, observacional y deductivo. Los resultados mostraron que los biorreactores de residuos de SO_x tienen mayor ecoeficiencia; seguido de los domos para capturar y aprovechar el SiO₂ y los filtros de mangas. Estas estrategias son efectivas para contaminantes específicos derivados de la producción de cemento. Este estudio indaga en un tema escasamente abordado en México, la sostenibilidad del cemento. Al aplicar estas estrategias, el sector cementero mexicano impulsaría su competitividad empresarial.

Palabras clave: competitividad empresarial; indicadores de competitividad; sostenibilidad; industria cementera.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Uma competitividade alinhada com regimes de sustentabilidade ambiental garante sucesso produtivo a toda organização empresarial, uma economia estável, a sobrevivência empresarial e permite que ela adote as transformações que as mudanças do mundo globalizado exigem. A inovação científica e o desenvolvimento tecnológico fornecem as ferramentas e os meios necessários para o desenho de melhores estratégias produtivas e ecoeficientes, bem como para tomadas de decisão mais objetivas (Jaramillo, 2017).

Este estudo tem como foco a indústria cimenteira, setor que libera grande quantidade de gases de efeito estufa e outros compostos poluentes no meio ambiente. Esta situação representa um importante desafio que deve ser resolvido para garantir a saúde das gerações futuras (León- Vélez e Guillén-Mena, 2020; Rodgers, 2018; Kumar, 2018). Nesse contexto, desenvolver a competitividade empresarial da indústria cimenteira mexicana implica analisar a viabilidade e aplicabilidade de estratégias sustentáveis e ecoeficientes no processo produtivo do cimento. O estudo dessas estratégias pode reforçar o controle de qualidade na fabricação desse material e proporcionar um melhor entendimento e domínio de questões como meio ambiente, aspectos legais, ética, gestão de custos e segurança no setor da construção. Além disso, os resultados observados em cimenteiras internacionais e algumas locais podem contribuir para melhorar o uso e a preservação dos recursos disponíveis para a indústria cimenteira mexicana.

1.1 Competitividade empresarial a partir de uma abordagem sustentável

A competitividade empresarial busca alcançar maior estabilidade, maior competitividade no mercado e produtividade baseada em processos sustentáveis, garantindo assim a vida de uma empresa no longo prazo. A adoção de estratégias produtivas mais ecoeficientes vai ao encontro das prerrogativas da Agenda 2030 para atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2016 (Rivera-Hernández et al., 2018; ONU, 2018). A sustentabilidade refere-se ao uso adequado, desenvolvimento e recuperação de todos os recursos tangíveis e intangíveis, materiais e naturais que uma empresa ou organização industrial possui, permitindo assim sua estabilidade e produtividade a longo prazo (Roy, 2021). Neste ponto é importante não confundir os conceitos de sustentabilidade e sustentabilidade. A primeira trata do cuidado e uso dos recursos naturais, enquanto a segunda se refere ao desenvolvimento relacionado ao cuidado com o meio ambiente (Rivera-Hernández et al., Ruggerio, 2021).

Os ODS diretamente relacionados a um setor industrial sustentável são produção e consumo responsáveis, ação climática, preservação da vida nos ecossistemas subaquáticos e terrestres, água limpa e saneamento, bem como acesso à energia limpa. Esses ODS estão ligados ao desenvolvimento humano comunitário nos níveis local, regional e global. Além disso, convergem com a sustentabilidade ambiental de forma que promovem o desenvolvimento e a saúde comunitários ideais (ONU, 2018; Balanzátegui et al., 2019; o cimento Sustentabilidade Iniciativa ou CSI, 2019).

As evidências mostram que uma corporação industrial pode melhorar seu desenvolvimento, reputação social, imagem empresarial e gerar retornos econômicos de longo prazo quando opera em termos reais de sustentabilidade, Responsabilidade Social Corporativa (CSR) e Responsabilidade Ambiental Corporativa (RMAC); especialmente se suas ações excederem os interesses e obrigações legais (González e Cuesta, 2018). O processo geral que conduz ao desenvolvimento de uma maior competitividade empresarial em termos sustentáveis implica:

- identificar objetivos e metas adequados às características de cada organização;
- definir planos de ação estratégicos;
- gerar um sistema de indicadores que mostram as informações derivadas da atividade

empresarial

- aplicar avaliações comportamentais.

Cabe ressaltar que o desenho das estratégias e ações é diferente em cada empresa, pois depende dos resultados de um diagnóstico prévio que mostra suas deficiências, potencialidades, recursos etc. (Vega, 2017). Nessa sintonia de ideias, o reaproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima nos processos produtivos ou a inovação produtiva a partir de outras estratégias ecoeficientes são ações que fortalecem o RMAC de qualquer indústria. A experiência mostra que a sua implementação reduz os custos de produção e a emissão de gases e outros compostos poluentes (Bravo e Arroyo, 2018; Pérez et.al., 2016; Lin et al., 2017).

1.2 Indicadores de competitividade aplicáveis na indústria cimenteira

Tanto o desempenho produtivo quanto o econômico são indicadores básicos de competitividade na indústria cimenteira. Perez e outros (2013) propuseram outros indicadores potenciais que podem ser abordados desde o nível organizacional e que promovem ainda mais a competitividade empresarial neste setor, como:

- Participação no mercado mundial e boa posição internacional. Gera maior crescimento e integração do próprio mercado.
- Desenvolvimento de CSR e RMAC. Maximizar funções e melhorar a imagem corporativa.
- Competitividade de preços. Impulsiona preços atrativos para o mercado.
- Competitividade tecnológica. Aumente a produtividade oferecendo produtos diferenciados.
- Competição autêntica ou genuína. Aumenta a qualidade e a eficiência da produção aproveitando as economias de escala e a diferenciação do produto.
- Concorrência espúria. Gera um sistema de industrialização protegida, reduz a concorrência local excessiva e leva à estabilidade financeira. Além disso, permite que as empresas tenham subsídios governamentais que têm origem na desvalorização da moeda e na depressão dos salários.

Autores como López (2018) e o grupo Siemens Cities of the Future (2018) apontam que a inovação tecnológica também contribui para melhorar a eficiência produtiva e o processamento massivo de dados. Essas inovações incluem o uso de drones, sistemas informatizados e automatizados com funções em tempo real, adoção da Internet das Coisas e manutenção 4.0 e uso de materiais avançados. Da mesma forma, tecnologias com abordagem ecológica industrial minimizam a emissão de gases residuais e levam a um menor consumo de energia renovável. Por sua vez, o CSI, que reúne empresas de todo o mundo, estabelece práticas e indicadores de desempenho para o desenvolvimento sustentável em áreas como segurança, proteção do clima, emissões atmosféricas, uso de combustíveis e matérias-primas, comunicações e impactos locais na terra e comunidades. (ITSC, 2012).

Em resumo, a implementação de estratégias sustentáveis e ecoeficientes na produção de cimento é uma necessidade para a indústria mundial, pois contribuem para reduzir seus efeitos nocivos ao meio ambiente e aumentam a competitividade das empresas. Por estas razões, esta pesquisa busca identificar as estratégias sustentáveis mais ecoeficientes para aproveitar ou reduzir a emissão de poeira de NO_x, SO_x e SiO₂ na fabricação de cimento, a fim de melhorar a competitividade da indústria cimenteira mexicana.

2. ABORDAGEM DO PROBLEMA

A aplicação de estratégias tecnológicas voltadas para o cuidado e preservação do meio ambiente é atualmente uma prerrogativa quase obrigatória em todo o setor produtivo empresarial, pois beneficia sobremaneira sua competitividade tecnológica e inovadora, além de sua aplicação estar alinhada com os ODS da ONU (2018).

A competitividade empresarial da indústria cimenteira se reflete não apenas em seu desempenho econômico e nível de competitividade no mercado, mas também em seus resultados na emissão de resíduos poluentes. Nesse sentido, as tecnologias adotadas para reduzir a emissão de gases de óxido de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e poeira de SiO_2 podem contribuir para melhorar a competitividade de seus negócios, especialmente porque é o setor industrial que polui e mais prejudica o meio ambiente.

O cimento tipo Portland, mais conhecido como "cimento cinza", é composto principalmente por um pó fino ou *clínquer* contendo compostos como silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que, quando misturados com água, pegam e endurecem à temperatura ambiente ou debaixo d'água. Os diferentes tipos de cimento variam em sua formulação dependendo do uso que será dado a eles e da resistência que se deseja obter (Sanjuán e Chinchón, 2014).

A produção industrial de cimento inclui as fases de cozedura e arrefecimento que se destacam pelas suas implicações ecológicas adversas durante a queima de combustíveis de origem natural como o carvão, coque de petróleo, óleo combustível pesado, entre outros. A transformação química que origina o *clínquer* chama-se descarbonatação e consiste na decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) a 900°C . Essa reação produz óxido de cálcio (CO) e libera quantidades significativas de dióxido de carbono (CO_2). Além disso, o CO reage com pós de SiO_2 , com alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3) e com óxido de ferro (Fe_2O_3) em altas temperaturas, formando compostos que agredem o meio ambiente como silicatos de cálcio, aluminatos e ferritas; todos os elementos formadores de *clínquer* (Sanjuán e Chinchón, 2014; Ashby, 2024).

O resfriamento do *clínquer* também tem consequências ambientais adversas (León-Velez e Guillén-Mena, 2020; Sanjuán e Chinchón, 2014), pois nesta fase são utilizados ventiladores elétricos que geram resíduos secundários de ar-energia, que são liberados a uma temperatura de 800°C . Durante o resfriamento também são emitidos gases poluentes para a atmosfera, principalmente CO, monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de enxofre (SO_2). Esses gases são liberados principalmente quando não há um mecanismo adequado para seu tratamento.

Segundo dados recentes, a indústria cimenteira consome aproximadamente 40% da energia primária do planeta. Esta percentagem deve-se à elevada utilização de petróleo, gás natural, carvão, biomassa, vento e radiação solar. Essa indústria também consome 60% da matéria-prima extraída da litosfera terrestre (silicatos, crosta e manto) e produz de 5% a 8% das emissões globais de CO_2 (León-Velez e Guillén - Mena, 2020; Rodgers, 2018).

Um estudo realizado pela Agência de Avaliação Ambiental da Holanda durante os anos de 2010 a 2017, tratou da relação entre a quantidade de cimento produzido e o total de emissões de CO_2 . seus resultados. Eles mostraram que a China é o maior produtor de cimento e, conseqüentemente, de emissões de CO_2 no mundo; atrás estão Índia, União Europeia, Estados Unidos, Vietnã, Turquia, Egito e outros países produtores (Rodgers, 2018).

Por outro lado, e de acordo com vários estudos realizados em 2020 pela Global Cement and Concrete Association (GCCA), o cimento é o material mais consumido no mundo e, conseqüentemente, o seu processo produtivo é o que gera maior emissões de CO_2 (cerca de 150 toneladas por segundo); Da mesma forma, esses estudos mostraram que um total de 14.000 milhões de m^3 de concreto é usado por ano (França 24, 2021).

Como se vê, os danos ambientais gerados pela produção massiva de cimento representam um obstáculo ao fortalecimento da competitividade empresarial desse setor, especialmente porque seus efeitos ambientais violam os ODS (ONU, 2018). Portanto, não é possível considerá-lo como um setor sustentável em termos reais.

Para além do compromisso de redução dos estragos das alterações climáticas que os líderes da indústria cimenteira têm assumido, é necessário que cada empresa aplique estratégias ecoeficientes que conduzam à transformação dos seus processos produtivos e demonstrem a redução das suas emissões poluentes, por meio de avaliações fundamentadas em evidências científicas (Rodgers,

2018).

A aplicação de modelos sistemáticos para avaliar as emissões de poluentes antes, durante e depois da aplicação de estratégias sustentáveis representa um referencial objetivo que vai além de um discurso comprometido. Na opinião de alguns especialistas, essa rota se destaca como a principal ferramenta para uma estimativa real dos possíveis cenários. Isso contribui para a tomada de decisão com base nos resultados fornecidos pelas evidências científicas, o que leva ao desenho de alternativas viáveis de solução e é orientado para melhores ações futuras (Gessa, 2016).

2.1 Contexto do problema no México

No México, a indústria cimenteira é forte, altamente produtiva e lucrativa, já que contribui com 1% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Segundo dados de 2018 do International Trade Center, essa indústria ocupou o primeiro lugar como comercializadora de cimento na América Latina; em 19º lugar como exportador mundial de cimento e em 22º lugar como importador deste produto. No entanto, dados mais recentes de 2020 revelaram que a indústria cimenteira mexicana ocupa atualmente o segundo lugar na América Latina devido à concorrência da indústria cimenteira chinesa (Clavijo e Guevara, 2020; Aguilar, 2019; Martínez e Alexandre, 2020).

Segundo a Câmara Nacional do Cimento (2020), a indústria cimenteira mexicana é composta pelas empresas Grupo Cemex, Grupos de Cemento Chihuahua (GCC), CYCNA, Cemento y Concreto Moctezuma, Holcim Cementera Cementos fortaleza e Cementos Cruz Azul. Essas empresas compõem a Câmara Nacional do Cimento (CANACEM). Segundo esta organização, o setor cimenteiro produz um total de 40 milhões de toneladas de cimento por ano e gera mais de 170.000 empregos diretos e indiretos no país. Algumas dessas empresas adotaram as seguintes estratégias para reduzir suas emissões poluentes:

- Grupo Cemex. Implementação de um modelo de sustentabilidade em suas operações que inclui infraestrutura energeticamente sustentável (Grupo Cemex, 2021).
- GCC. Promoção da responsabilidade ambiental e proteção do clima para a sustentabilidade econômica (GCC, 2023).
- Cimento e Concreto Moctezuma. Desenvolvimento de tecnologia e modernização de fábricas de cimento para reduzir impactos ambientais (Cemento y Concreto Moctezuma, s.f.).
- Blue Cross Cimentos. Algumas de suas usinas possuem sistemas de tratamento de água e sistemas de captação de águas pluviais para serem utilizadas. Eles também usam fontes alternativas de energia, especificamente biomassa obtida do nopal (Cooperativa la Cruz Azul, 2016).

Em 2020, a CANACEM informou que, para melhorar a RSE, este setor busca uma melhor gestão do coprocessamento ou incineração de resíduos sólidos urbanos de vários estados da República Mexicana, como Colima, Baja California Sur, Cidade do México, Michoacán, Nayarit, Quintana Roo e Sinaloa. Para tal, esta organização intervém através da instalação de centros de transferência, recepção, separação, trituração, compactação, compostagem e biodigestão de resíduos; também os submete a tratamento adequado e inclusão na produção industrial de cimento (Cámara Nacional del Cemento, 2020).

Mesmo com a implementação dessas medidas, não é possível afirmar que o setor cimenteiro mexicano é uma indústria sustentável, pois apresenta deficiências claras para demonstrar cientificamente a ecoeficiência de seus processos produtivos. Por exemplo, entre as empresas mexicanas, apenas a CEMEX relatou uma redução de 30% em sua pegada de carbono em seus processos produtivos, também afirmou ter reduzido o consumo de água em 10,2% nos últimos 10 anos (García-Muñoz e Pérez-Sánchez, 2020). Nesse sentido, cabe ressaltar que esses dados carecem de informações claras sobre o modelo de avaliação que os sustenta.

Embora empresas como CEMEX e Cementos Cruz Azul tenham implementado inúmeras ações

estratégicas que mostram sua intenção de se alinhar aos objetivos da agenda 2030 da ONU (García-Muñoz e Pérez-Sánchez, 2020), não há dados que comprovem plenamente seus resultados. Como pode ser visto, a indústria cimenteira mexicana precisa mostrar de forma mais sistemática a ecoeficiência na implementação de suas estratégias sustentáveis (León- Velez e Guillén-Mena, 2020).

Nesse contexto, evidências científicas internacionais e nacionais mostram que a aplicação de análises ecoeficientes permite quantificar o impacto ambiental da produção de cimento, principalmente quando se busca aproveitar a substituição de matérias-primas para economizar recursos naturais não renováveis, como combustível e água; ou, se se deseja a utilização de resíduos do processo produtivo para reduzir a emissão de gases poluentes (Pérez et.al., 2013; Sanjuán e Chinchón, 2014; Ruiz et.al., 2017).

Como mencionado anteriormente, durante o processo de produção de cimento, não apenas o CO₂ é lançado na atmosfera, mas também os gases NO_x, SO_x e poeira de SiO₂, entre outros poluentes (Kumar, 2018; SEMARNAT, sd; Cooperativa la Cruz Blue, s.f.). Os gases NO_x e SO_x reduzem a qualidade do ar e contribuem para o efeito estufa. Por outro lado, as poeiras de SiO₂ representam um risco significativo para a saúde pulmonar dos trabalhadores dentro de uma fábrica de produção de cimento.

No México não existem estudos que demonstrem cientificamente a ecoeficiência de estratégias sustentáveis aplicadas às emissões residuais de gases SO_x e NO_x e pó SiO₂ do processo de produção de cimento. Embora algumas empresas como CEMEX e Cementos Cruz Azul afirmem aplicar estratégias que parecem estar alinhadas com os ODS da Agenda 2030 da ONU. Com a presente investigação pretende-se conhecer estas estratégias que, além disso, permitem melhorar a competitividade empresarial do setor cimenteiro.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Foi utilizado um projeto de pesquisa qualitativo-observacional-dedutivo (Hernández et.al., 2014), juntamente com a aplicação de estratégias de pesquisa como busca e seleção de informações, análise documental e interpretação de dados.

A busca bibliográfica foi realizada por meio de plataformas de pesquisa científica *online* como Redalyc, Dialnet, Google Acadêmico e Scielo, utilizando palavras-chave como “gases and cement production”, “greenhouse gases”, “sustainable cement production”, “utilização de resíduos industriais”, entre outros. Cerca de 35 documentos foram selecionados a partir de artigos de revistas indexadas e acadêmicas escritas principalmente em espanhol e inglês.

A análise documental consistiu na identificação de conceitos-chave e ideias inovadoras sobre métodos e análise dos processos de interesse. A visualização de soluções viáveis para o problema levantado foi baseada na descoberta de novos dados para o contexto mexicano. Entre as principais ferramentas de análise documental utilizadas estão:

- classificação da literatura que compõe o estado da arte do problema abordado,
- preparação de tabelas de informações,
- construção de esquemas, diagramas ou mapas conceituais,
- preparação de fichas de estudo, entre outros (Hernández et.al., 2014).

A interpretação dos dados dos estudos de design qualitativo consistiu em um "isolamento de porções de discursos" (Schettini e Cortazzo, 2015), ou seja, em uma seleção particular de informações que os pesquisadores fizeram ao inferir alguns aspectos de suas pesquisas. Durante esse procedimento, não apenas a hipótese e os objetivos influenciam, mas também o mundo sociocultural, a intuição e a experiência de vida do intérprete.

4. RESULTADOS, DISCUSSÃO E PROPOSTA

4.1 Resultados

Com base na revisão bibliográfica do presente estudo, identificou-se que durante o processamento de base do cimento ocorre uma infinidade de reações químicas, como as do tipo exotérmica, assim chamadas por liberarem energia na forma de calor, luz ou som durante a formação do cimento *clínquer*. Essas reações são uma fonte de compostos residuais como nitrogênio molecular (N_2), radical amina (NH_2) e água (H_2O). A maior quantidade de emissões poluentes de SO_2 é gerada não apenas durante esta fase do processo, mas também durante a moagem, resfriamento e embalagem do produto acabado. O nível máximo permitido na emissão desse tipo de resíduo é em torno de 400 mg/m^3 , medido anualmente com o método "infravermelho não disperso NMX-AA-55-1979", conforme estipulado pela Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Naturais no México (SEMARNAT, s.f).

O SiO_2 faz parte da matéria-prima utilizada na produção de cimento, embora também possa ser descartado como resíduo durante esse processo e até mesmo na fase de armazenamento do cimento. O pó gerado na produção do *clínquer* é uma mistura de micropartículas de sílica + oxigênio + carbono + alumínio + cálcio. Observou-se que essa mistura afeta a saúde dos trabalhadores dentro de uma fábrica de cimento, pois inalá-la pode causar irritação nas vias respiratórias e na pele. Também pode causar sérios danos aos olhos. Esses efeitos estão relacionados ao desenvolvimento de doenças crônicas, como silicose, tuberculose, câncer de pulmão ou doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) (Kumar, 2018; Cobo e Estébanez, 2021).

Para minimizar os resíduos de NO_x , SO_x e SiO_2 durante o processamento industrial do cimento, é necessário considerar as propriedades químicas da matéria-prima utilizada, a aplicação de estratégias ecoeficientes como a substituição de combustíveis fósseis, o projeto de sistemas de captação de resíduos, o uso de nanotecnologia (Poudyal e Kushal, 2021) e outras estratégias que resultam nesse objetivo, tanto a curto, médio e longo prazo. A Tabela 1 analisa várias estratégias que foram aplicadas no México e em outros países para reduzir a emissão desses resíduos.

Tabela 1. Estratégias internacionais e nacionais para a redução de NO_x , SO_x e SiO_2 pó, derivados do processo de produção de cimento

Autor, país e ano	Objetivo	Estratégia para aproveitar ou reduzir a emissão de NO_x , SO_x e SiO_2	Ecoeficiência mostrada	Conclusões
Comissão Europeia, Europa, 2010	Mantenha as emissões de resíduos de SO_x baixas durante a fase de produção de <i>clínquer</i> .	Melhores Técnicas Disponíveis (MTD): 1.- Permite reduzir os gases de combustão durante o pré-aquecimento e pré-calcinação do forno, adicionando material absorvente ou depurador úmido. 2.- Otimiza os processos de	Valor médio diário de emissão obtido do SO_2 : < 50 mg/Nm^3 , quando o teor de enxofre na matéria for <0,10% mg/Nm^3 $250\text{-}400 \text{ mg/Nm}^3$, se o teor de enxofre for >0,25% mg/Nm^3	As margens de emissão dependem do teor de enxofre na matéria-prima utilizada, portanto, a estratégia baseia-se na seleção da matéria-prima com as menores concentrações

Autor, país e ano	Objetivo	Estratégia para aproveitar ou reduzir a emissão de NO _x , SO _x e SiO ₂	Ecoeficiência mostrada	Conclusões
		moagem de matérias-primas para processos a seco.		desse químico.
CEMEX, México, 2012 e 2016. CSI, 2014.	Substituir os combustíveis fósseis e o gás por resíduos sólidos urbanos ou orgânicos, durante a cozedura para formação de <i>clínquer</i> .	Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos: pneus usados, resíduos de solventes, óleos usados, entre outros. Aproveitamento de resíduos orgânicos: casca de arroz, café, sedimentos de efluentes, entre outros.	A CEMEX reduziu sua pegada de carbono em 22,7% em 2012 e, em 2016, informou que obteve 26,6% de sua energia de seus fornos de biomassa e resíduos. Não foram encontrados dados sobre a ecoeficiência dessas estratégias. Também não apresentam resultados para resíduos de NO _x , SO _x e SiO ₂ .	A publicação de dados sobre a ecoeficiência dessas estratégias pode ajudar a apoiar a redução da pegada de carbono.
Rocha et al., Bolívia e Brasil, 2022.		Utilização de energia e matérias-primas alternativas com menor impacto ecológico.	85% do Clínquer era feito com combustíveis convencionais em 1990. Em 2014, esse percentual caiu para 23%.	
Sagástegui, Peru, 2012.	Captura a mistura de pós fugitivos em uma fábrica de produção de cimento.	Instalação de cúpulas coletoras de pó fugitivo. Estas cúpulas dispõem de um sistema de filtragem do ar desde o exterior que ajuda a minimizar a emissão de pó fugitivo. São instalados em depósitos temporários ou no	<ul style="list-style-type: none"> • Beneficia diretamente a saúde dos trabalhadores. • Sua manutenção não tem custos excessivos. 	As micropartículas de SiO ₂ não têm efeito ambiental significativo, mas podem prejudicar a saúde de quem inala seu pó. Por esse motivo, também é recomendável que os

Autor, país e ano	Objetivo	Estratégia para aproveitar ou reduzir a emissão de NO _x , SO _x e SiO ₂	Ecoeficiência mostrada	Conclusões
		campo de clínquer.		trabalhadores usem equipamentos de proteção especiais com máscara facial.
Sanjuán e Chinchón, Espanha, 2014	Reduzir partículas de poeira e gases poluentes emitidos por fontes localizadas.	Uso de precipitador eletrostático ou filtros de bolsa absorvedores de SO ₂ . São aplicados em estufas pelo método seco.	mg/Nm ³ são geralmente produzidas.	Tanto o precipitador quanto os filtros de mangas atuam nos pontos de carga, descarga e transporte. Eles demonstraram reduzir os gases NO _x e SO _x .
Feijoo et al., Cuba, 2016. CEI, 2012.	Faça um balanço das principais reações químicas que o enxofre sofre durante o processamento do cimento.	Sistema de monitoramento químico estequiométrico. É baseado no cálculo da massa molar do enxofre e suas reações químicas.	Ele detecta valores de referência padrão de SO ₃ e Na ₂ O, necessários para que o processamento do cimento ocorra de forma otimizada.	Este sistema permite saber quando estratégias devem ser aplicadas para evitar anéis de enxofre no forno.
Veana et al., México, 2019.	Produzir bioenergia na forma de biogás metano puro.	Biorreator que processa resíduos agroindustriais. Produz uma interação bioquímica de compostos orgânicos com teores de biometano + dióxido de carbono + vapor d'água + hidrogênio + sulfeto de hidrogênio.	Baseia-se em reações bioquímicas de bactérias quimiolitotróficas, cujo processamento garante menor emissão de gases e resíduos poluentes.	Este biorreator destaca-se pela sua dupla funcionalidade no processo de produção de cimento. Por um lado, permite processar os resíduos gerados pelo SO _x e, por outro, produz biogás metano que pode ser

Autor, país e ano	Objetivo	Estratégia para aproveitar ou reduzir a emissão de NO _x , SO _x e SiO ₂	Ecoeficiência mostrada	Conclusões
				utilizado em substituição aos combustíveis fósseis.
Badillo et al., México, 2020.	Termovalorização na separação de resíduos para produção de fontes alternativas de combustível para o setor cimenteiro.	Termovalorização de resíduos e sua utilização. Resíduos como têxteis são processados como combustível na produção de <i>clínquer</i> .	Não apresenta especificidade para resíduos como NO _x , SO _x e SiO ₂ em pó.	Poderia favorecer uma mudança de atitude da população, pois promove a separação do lixo. Requer uma colaboração conjunta entre a população e o setor cimenteiro.
Poudyal e Kushal, Estados Unidos, 2021.	Abordagem integrada para a produção sustentável de cimento.	Captura de CO ₂ para produzir CaCO ₃ que pode ser usado como insumo.	Integração de três estratégias: captura de emissões, substituição de materiais e combustíveis e uso de nanotecnologia.	A adoção dessas estratégias pode trazer benefícios para o meio ambiente e para a sociedade.

Fonte: Elaboração própria baseada em dados coletados da Comissão Europeia (2010), CEMEX (2012), CEMEX (2016), CSI (2014), Rocha et.al. (2022), Sagástegui (2012), Sanjuán e Chinchón (2014), Feijó et al. (2016), CSI (2012), Veana et al. (2019), Badillo et al. (2020) e Poudyal e Kushal (2021).

4.2 Discussão

Ao comparar essas estratégias com outros estudos ou revisões documentais, algumas semelhanças foram encontradas. Em relação à substituição de combustíveis fósseis, a cimenteira CEMEX afirmou que 26% de seus fornos operavam com biomassa ou resíduo em 2016 (CEMEX, 2016), número que vai ao encontro do relatado por Teja et.al. (2022) que foi de 20% a 30%. De referir que é possível substituir de 3% a 80% do *clínquer* com cinza de biomassa.

Em contrapartida, Huh et.al. (2018) relataram que o maior problema para a substituição de combustíveis fósseis por biomassa é que esta continua sendo mais cara. Em seu estudo, eles compararam os lucros marginais de empresas coreanas que usam diferentes tipos de combustíveis em seus processos e descobriram que o carvão ainda é melhor do que outras fontes alternativas de energia, pelo menos em termos de custo, dificultando o uso por muitas empresas.

Guo e outros _ (2023) também realizou uma revisão documental para identificar estratégias para

reduzir o impacto ecológico da produção de cimento. Em seus resultados mostraram que alguns estão focados em melhorar a eficiência dos processos e reduzir o consumo de energia e são realizados principalmente em países asiáticos como China e Índia. Essas estratégias coincidem com a mencionada substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos (Badillo et.al., 2020, CEMEX, 2016) e com aquelas que contribuem para manter níveis adequados de emissões poluentes, como o sistema de monitoramento químico ou filtros de ar (Figura 1 e Figura 2).

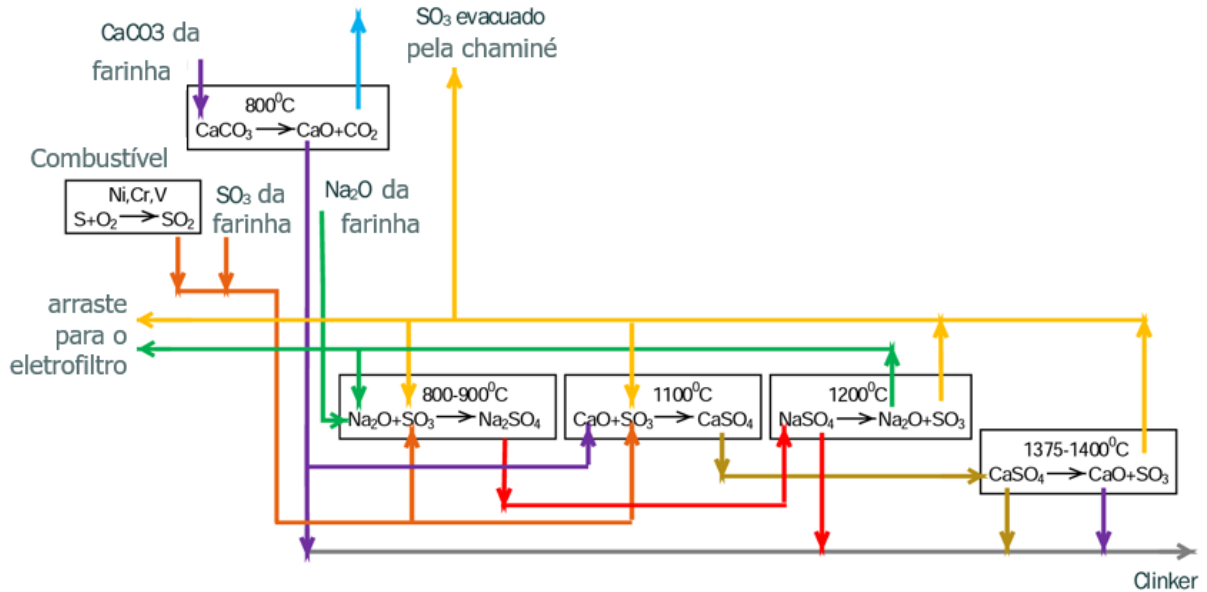


Figura 1. Sistema de monitoramento químico estequiométrico. Fonte: Feijó et.al. (2016).

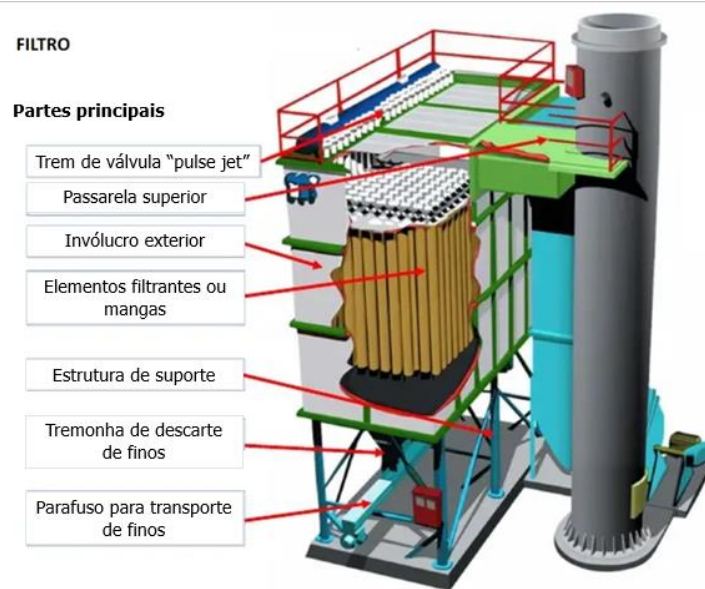


Figura 2. Filtro de mangas utilizado na indústria cimenteira. Fonte: Camargo (s. f.).

Outro tipo de estratégias relatadas por Guo et al. (2023) estão relacionados ao desenvolvimento de tecnologias para capturar, usar e armazenar emissões de carbono, cuja implementação ocorre principalmente em países europeus. Este estudo encontrou estratégias desse tipo adotadas no México e em outros países de língua espanhola, como cúpulas para capturar SiO₂ (Sagástegui, 2012) ou a transformação de resíduos de SO_x em biorreatores por meio de processos de oxidação de enxofre (Figura 3).

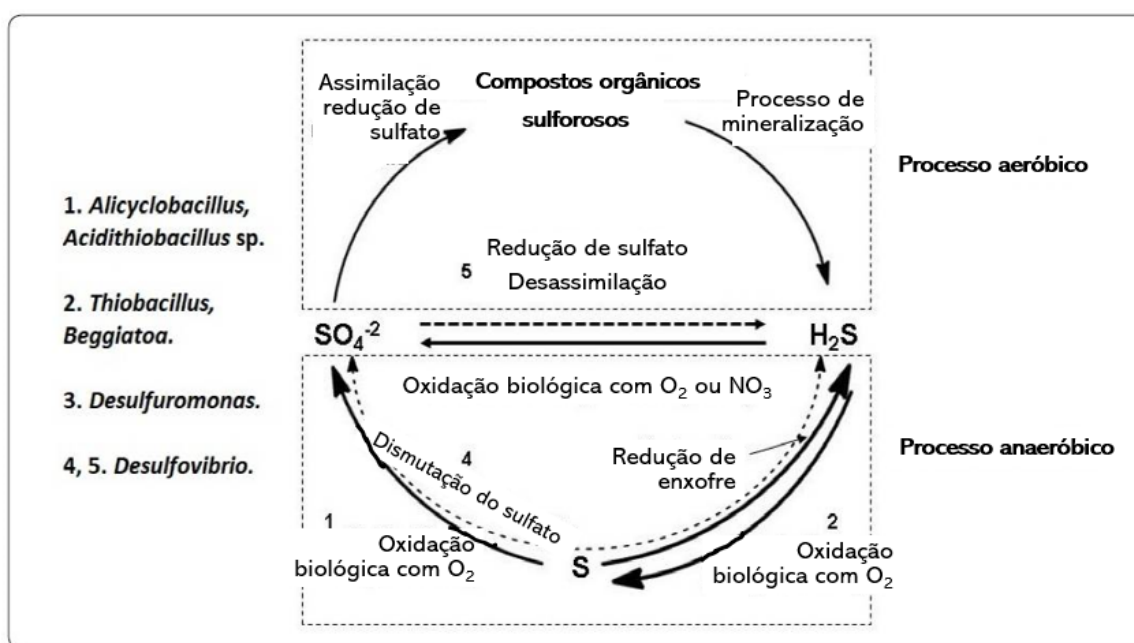


Figura 3. Exemplo do ciclo gerado em um biorreator. Fonte: Veana et.al. (2020).

4.3 Proposta

Para visualizar a prioridade e importância das estratégias sustentáveis analisadas, na Figura 4 elas são ordenadas de acordo com sua viabilidade de aplicação no setor industrial de cimento no México. As opções localizadas no topo da pirâmide apresentaram maior ecoeficiência e benefícios, de acordo com as evidências científicas que as sustentam.

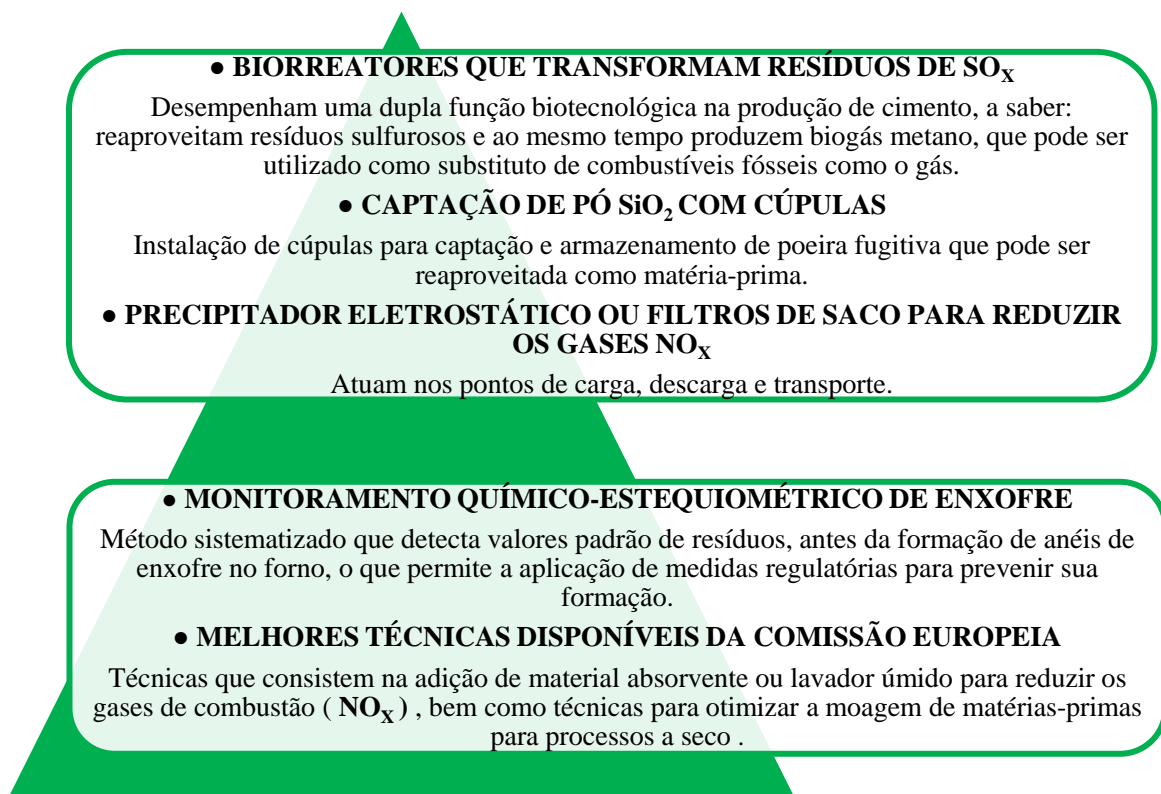


Figura 4. Diagrama hierárquico de estratégias ecoeficientes que comprovadamente minimizam a emissão de resíduos NO_x, SO_x e pó de SiO₂ durante a produção de cimento.

5. CONCLUSÕES

Os biorreatores SO_x apresentam maior ecoeficiência porque reaproveitam resíduos de enxofre e produzem biogás metano que serve como combustível, os domos captam o pó de SiO_2 que pode ser reaproveitado como matéria-prima e os filtros de mangas comprovadamente reduzem a emissão de resíduos de gases NO_x . A adoção dessas estratégias permitiria ao setor cimenteiro mexicano comprovar com evidências científicas a ecoeficiência de seus processos produtivos. Até a redação deste artigo, apenas a CEMEX e a Cementos Cruz Azul adotaram estratégias como a substituição de fontes de energia fóssil por biomassa ou resíduos, mas não se referem à aplicação de outras estratégias de mitigação de emissão de poluentes consideradas nesta proposta.

Da mesma forma, as cimenteiras mexicanas obteriam valor agregado em seus processos de produção e cimento acabado quando seguissem processos ecoeficientes. Tudo isso contribuiria para fortalecer a competitividade de seus negócios, cujos benefícios vão além da simples obtenção das certificações ambientais exigidas por lei.

Também é preciso redobrar esforços para analisar com mais profundidade se as estratégias que as cimenteiras vêm adotando no México são realmente sustentáveis e alinhadas com os ODS da ONU. Mais uma vez, a CEMEX e a Cementos Cruz Azul são as únicas cimenteiras que parecem estar alinhadas com esses objetivos por meio de suas estratégias de substituição de combustíveis fósseis. As demais cimenteiras mexicanas expressam seu compromisso com o desenvolvimento sustentável, mas não apresentam estratégias ou indicadores para reduzir seu impacto ambiental.

Por fim, sugere-se a implementação de melhores métodos para avaliar os resultados antes, durante e após a aplicação de estratégias sustentáveis neste setor, pois isso proporcionaria maior certeza sobre sua ecoeficiência. Reitera-se que o grande desafio a ser enfrentado por este setor é que os métodos sustentáveis que aplica comprovem, com base em evidências científicas, sua ecoeficiência.

6. REFERÊNCIAS

- Aguilar, J. D. (2019), *Cemento, el oro gris mexicano*. Consultado el 23 de marzo de 2023. <https://www.milenio.com/especiales/cemento-el-oro-gris-mexicano>
- Ashby, M. F. (2024), “*Materials and Sustainable Development*”. Elsevier, España, pp. 377–390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98361-7.00016-6>
- Badillo, M. M., Martínez, L. A., Flores, J. R., y Flores, J. I. (2020), “*La termovaloración de combustibles alternativos y materias primas (AFR) en hornos para la producción de cemento Portland: una opción sostenible*”. *Academia Journals*, Hidalgo, México.
- Balanzátegui, R. I., Coba, L. M. y Vega, J. G. (2019), *Desarrollo sostenible de proyectos productivos sobre la base de la ley de Economía Popular Solidaria*. *Revista Espacios*. 40(22): 4-21.
- Bravo, D. N. y Arroyo, F. R. (2018), *Innovación sustentable: un camino al desarrollo productivo del Ecuador*. *Innova Research Journal*. 3(5): 29-44. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n5.2018.512>
- Cámara Nacional del Cemento (2020), *Co-procesamiento en la industria del cemento: Alternativa de manejo de residuos ambientalmente segura*. Consultado el 24 de marzo de 2023. https://comisiones.senado.gob.mx/ambiente/reu/docs/presentacion4_e121020.pdf
- Camargo, G. (s. f.), *Filtro de Mangas Partes y Funcionamiento*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://es.scribd.com/document/439978098/Filtro-de-Mangas-Partes-y-Funcionamiento#>
- Cemento y Concreto Moctezuma (s. f.), *Compromiso por contribuir al desarrollo social*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.cmoctezuma.com.mx/desarrollo-sostenible>

- CEMEX (2016), “*La contribución de CEMEX hacia un futuro bajo en carbono. Postura de CEMEX respecto al cambio climático*”. CEMEX, México.
- CEMEX. (2012), “*Construyendo las ciudades del futuro. Informe de desarrollo sustentable*”. CEMEX, México.
- Ciudades del Futuro (2018), *Cemento 4.0: la disrupción tecnológica llega a la industria cementera*. Siemens. Consultado el 20 de marzo de 2023. <https://ciudadesdelfuturo.es/cemento-4-0-la-disrupcion-tecnologica-llega-la-industria-cementera.php>
- Clavijo, P. A. y Guevara, M. M. (2019), “*Análisis Sostenible de la Cementera Holcim con Repercusiones de Mercadeo y Finanzas*”, Trabajo de Grado, Universidad del Rosario, Bogotá.
- Cobo, M. E. y Estébanez, S. (2021), “*Guía para el control de la exposición a polvo de sílice*”. Asepeyo prevención, Madrid, España.
- Comisión Europea (2017), “*Prevención y control integrados de la contaminación. Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio*”. Observatorio de la economía circular en la industria cementera, Sevilla, España.
- Cooperativa la Cruz Azul (2016), *La Cruz Azul y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.aciamericas.coop/IMG/pdf/apolinarortiz.pdf>
- Cooperativa La Cruz Azul (s. f.), *Medición isocinética a fuentes fijas y perimetral de partículas*. Consultado el 18 de marzo de 2023. <https://acortar.link/MpNMyg>
- Feijoó, J. A., Fabelo, J. A. y Rodríguez, I. L. (2017), *Evaluación del ciclo del azufre en el horno de la fábrica de cemento de Cienfuegos*. Revista Centro Azúcar. 44(2): 1-9.
- France 24 (2021), *El hormigón, tercer emisor mundial de gases de efecto invernadero*. Consultado el 21 de marzo de 2023. <https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20211019-el-hormig%C3%B3n-tercer-emisor-mundial-de-gases-de-efecto-invernadero>
- García-Muñoz, A. C. y Pérez-Sánchez, B. (2020), *La responsabilidad social en CEMEX*. Investigación Valdizana. 14(4): 175–87. <https://doi.org/10.33554/riv.14.4.728>
- Gessa, P. A. y Sancha, D. M. P. (2016), *Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación*. Innovar. 26(60): 51–66. <https://doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532>
- González, M. J. y Cuesta, V. P. (2018), *De responsabilidad social a sostenibilidad corporativa: una revisión actualizada*. Revista Internacional de Investigación en Comunicación. 17(7): 46-71. <https://doi.org/10.7263/adresic-017-04>
- Grupo Cemex (2021), *Sostenibilidad*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.cemexmexico.com/sostenibilidad>
- Grupos de Cemento Chihuahua (2023), *Sustentabilidad*. Consultado el 05 de abril de 2023. <https://www.gcc.com/es/sustentabilidad/#:~:text=La%20estrategia%20de%20sustentabilidad%20de,para%20esta%20y%20pr%C3%B3ximas%20generaciones>.
- Guo, Y., Luo, L., Liu, T., Hao, L., Li, Y., Liu, P. y Zhu, T. (2024), *A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry*. Journal of Environmental Sciences. 136: 682–697. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. P. (2014), “*Metodología de la investigación*”. Mc Graw Hill Education, Distrito Federal, México.
- Huh, S.Y., Lee, H., Shin, J., Lee, D. y Jang, J. (2018), *Inter-fuel substitution path analysis of the korea cement industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 82: 4091–4099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.065>
- Jaramillo, R. A. (2017), *Una Mirada a la competitividad*. Dictamen libre. 20:87-98.
- Kumar, C. A. (2018), “*Cement production technology. Principles and Practice*”. CRC Press, Florida, Estados Unidos.

- León-Velez, A. y Guillén-Mena, V. (2020), *Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*. Ambiente Construido. 20(3): 611-25. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>
- Lin, K.-L., Lo, K.-W., Hung, M.-J., Cheng, T.-W., y Chang, Y.-M. (2017), *Recycling of spent catalyst and waste sludge from industry to substitute raw materials in the preparation of Portland cement clinker*. Sustainable Environment Research, 27(5). <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.05.001>
- López, N. V. (2018), *El papel de la innovación tecnológica industrial y la sustentabilidad. Un acercamiento a la industria cementera*. Tekhné Revista de la Facultad de Ingeniería. 21(2): 83-95.
- Martínez, L. M. y Alexandre, P. M. (2020), *Industria cementera en México: Sin señales de recuperación a pesar de tocar fondo el año pasado*. Consultado el 24 de febrero de 2022. <https://www.spglobal.com/assets/documents/ratings/es/2020-01-22-industria-cementera-mexico.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018), *“La Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe”*. ONU-CEPAL, Santiago de Chile, Chile.
- Pérez, E. M. J., Espinoza, C. C. y Peralta, M. B. (2016), *La responsabilidad social empresarial y su enfoque ambiental: una visión sostenible a futuro*. Revista Universidad y Sociedad. 8(3): 169-78.
- Pérez, S. B., Guzmán, S. A., Mayo, C. A. y Heredia, R. H. (2013), *Evolución histórica de cementos mexicanos: un grupo económico de capital nacional*. Hitos de Ciencias Económico Administrativas. 19(55): 115-30. <https://doi.org/10.19136/hitos.a0n55.113>
- Poudyal, L. y Adhikari, K. (2021), *Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production*. Resources, Environment and Sustainability. 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>
- Rivera-Hernández, J. E., Alcántara-Salinas, G., Blanco-Orozco, N., et.al. (2017), *¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto*. Revista Posgrado y Sociedad. 15(1): 57-67. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1825>
- Rocha, J. H. A., Toledo Filho, R. D. y Cayo-Chileno, N. G. (2022), *Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: A short review*. Materials Today: Proceedings. 57, 436–439. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.565>
- Rodgers, L. (2018), *La enorme Fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías*. Consultado el 17 de marzo de 2023. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- Roy, M. (2021), *“Sustainable Development Strategies”*. Elsevier, España, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818920-7.00005-0>
- Ruiz, Y., Domínguez, E. R., Sánchez, S., Castillo, L., Martirena, J. F. y Suppen, N. (2017), *Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clínker*. Revista Centro Azúcar. 44: 77–88.
- Ruggerio, C. A. (2021), *Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions*. Science of The Total Environment, 786. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Sagástegui, D. A. (2012), *“Propuesta para reducir las emisiones de polvo fugitivo en el proceso productivo de una empresa cementera”*, Tesis de ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Santiago de Surco, Perú.
- Sanjuán, M. A. y Chinchón, S. (2014), *“Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland”*. Universidad de Alicante, España.
- Schenttini, P. y Cortazzo, I. (2015), *“Análisis de datos cualitativos en la investigación social. Procedimientos y herramientas para la interpretación de información cualitativa”*. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina.

- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s. f.), “*Guía para la elaboración de la cédula de operación anual. Industria del cemento, cal y yeso*”. SEMARNAT, México.
- Teja, R., Hiremath, R.B, Rajesh, P., Kumar, B., y Renukappa, S. (2022), *Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112503>
- The Cement Sustainability Initiative (2012), “*The Cement Sustainability Initiative*”. World Business Council for Sustainable Development, Washington, DC, Estados Unidos.
- The Cement Sustainability Initiative (2014), “*Cement Industry Energy and CO2 Performance Getting the Numbers Right (GNR)*”. World Business Council for Sustainable Development.
- The Cement Sustainability Initiative (2019), “*Indian Cement Sector SDG Roadmap*”. World Business Council for Sustainable Development, Ginebra, Suiza.
- Veana, F., González-Purata, P. Y., Wong-Paz, J. E., Aguilar-Zárate, P., Muñoz-Márquez, D. B. (2019), *Tendencias de la bioenergía: del metagenoma de hábitats ricos en azufre a la purificación del biogás*. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. 22: 1-11. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.190>
- Vega, L. A. (2017), *Sustentabilidad y competitividad en empresas hortícolas de México*. Sapientiae. 2(2): 110-26.