

Mezclas de hormigón sustentable con puzolanas naturales: perspectiva global, escenarios sudamericanos y casos en Ecuador

Sustainable concrete mixes with natural pozzolans: global perspective, South American scenarios, and cases in Ecuador

Henry Ramos¹, Andrés Bastidas¹, Heraldo Mosquera¹, Julián Quishpe¹

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 170701;

asbastidasb1@uce.edu.ec; hsmosquerav@uce.edu.ec; jaquishpeu@uce.edu.ec

*Correspondencia: haramos@uce.edu.ec

Citación: Ramos, H.; Bastidas, A., Mosquera, H. & Quishpe, J., (2026). Mezclas de hormigón sustentable con puzolanas naturales: perspectiva global, escenarios sudamericanos y casos en Ecuador. *Novasinerгия*. 9(1). 160-184.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.17.09>

Recibido: 16 julio 2025

Aceptado: 12 noviembre 2025

Publicado: 08 enero 2026

Novasinerгия

ISSN: 2631-2654

Resumen: El propósito de esta investigación es determinar si las mezclas de cemento de bajo carbono producidas con puzolanas naturales de Ecuador, como la ceniza volcánica y la arcilla calcinada, constituyen una opción técnica y ecológicamente eficiente en comparación al cemento Portland tradicional. Se usó la metodología PRISMA 2020, haciendo uso de bases de datos como Scopus, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar, además de un análisis bibliométrico a través de VOSviewer. Se revisaron 43 publicaciones que abarcan investigaciones globales, sudamericanas y ecuatorianas, comprendidas desde el 2017 hasta el 2025, tomando en cuenta elementos de microestructura, características mecánicas, transmisión de cloruros, carbonatación, reología e influencia en el medio ambiente. Los hallazgos mostraron que el sistema de cemento de arcilla calcinada con piedra caliza (LC3 50%) logra resistencias que superan los 40 MPa, disminuye efectivamente la porosidad hasta un 28% y reduce la dispersión de cloruros en más del 50%. Se observó un aumento en la carbonatación natural, no se comprometió la durabilidad en ambientes húmedos. A nivel ambiental, estudios globales reportaron reducciones de emisiones de CO₂ entre 30 % y 45 %, aunque en Ecuador aún no se cuenta con análisis locales detallados. El estudio concluye que el LC3-50 es una alternativa técnicamente viable, sostenible y adaptada a las condiciones del país. El hallazgo más relevante es que, pese a la falta de datos locales, la evidencia internacional respalda el uso del LC3 como una herramienta clave para avanzar hacia una construcción más resiliente y de bajo impacto ambiental en Ecuador.

Palabras clave: Arcilla calcinada, Ceniza volcánica, Hormigón de bajo carbono, LC3, Sostenibilidad.

Abstract: The purpose of this research is to determine whether low-carbon cement mixtures produced with natural pozzolans from Ecuador, such as volcanic ash and calcined clay, constitute a technically and ecologically efficient alternative compared to traditional Portland cement. The PRISMA 2020 methodology was applied, using databases such as Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar, along with a bibliometric analysis using VOSviewer. A total of 43 publications were reviewed, covering global, South American, and Ecuadorian research from 2017 to 2025, considering aspects such as microstructure, mechanical properties, chloride transport, carbonation, rheology, and environmental impact. The findings showed that the limestone calcined clay cement system (LC3 50%) achieves compressive strengths exceeding 40 MPa, effectively reduces porosity by up to 28%, and decreases chloride diffusion by more than 50%. An increase in natural carbonation was observed, without compromising durability under humid conditions. At the environmental level, global studies reported CO₂ emission reductions between 30% and 45%, although Ecuador still lacks detailed local analyses. The study concludes that LC3-50 is a technically viable, sustainable alternative adapted to the country's conditions. The most relevant finding is that, despite the lack of local data, international evidence supports the use of LC3 as a key tool for advancing more resilient, low-impact construction in Ecuador.

Keywords: Calcined clay, Volcanic ash, Low-carbon concrete, LC3, Sustainability.



Copyright: 2026 derechos otorgados por los autores a Novasinerгия.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

En los últimos años las economías emergentes han experimentado un rápido crecimiento urbano e industrial, lo que, sumado al aumento de población a nivel mundial, ha incrementado la demanda de materiales de construcción, que seguirá creciendo en el futuro [1]. El cemento es el componente principal de los bloques y del hormigón, así como otros materiales utilizados en la construcción. Su producción registra un notable aumento para atender la demanda global en comparación con otros materiales como madera o acero [2]. La industria del cemento es responsable de aproximadamente el 40% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) y se estima que su contribución se incremente del 10% al 15% en los próximos años [3]. Diversos estudios respaldan esta información, destacando impactos ambientales vinculados con la producción del cemento portland ordinario (OPC), que desde el 2020 ha generado 4,46 gigatoneladas de CO₂ con un incremento anual del 4,6 % [4]. Además de sus repercusiones ambientales, las emisiones de dióxido de carbono también comprometen la durabilidad de las estructuras expuestas de forma prolongada a este gas, mediante un proceso conocido como carbonatación, el cual puede reducir la resistencia del hormigón en las edificaciones [5]. La agenda mundial Net-Zero ha resaltado la importancia de implementar métodos de producción de cemento más sostenibles y limpios con el medio ambiente, con el objetivo de equilibrar los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos hacia la atmosfera con los que se capturan [6]. Entre las estrategias propuestas, destacan el uso de combustibles alternativos y la incorporación de procesos de última generación para disminuir las emisiones de CO₂ por tonelada de Clinker de cemento portland (PC) producido [7]. Asimismo, la implementación de materiales cementantes suplementarios (SCM), conformados por materiales como la escoria granulada de alto horno molida (GGBS) o meta caolín se plantea como alternativa para mitigar el impacto ambiental del cemento [8].

Los SMC requieren menos energía para su producción, por lo que emiten menos gases de efecto invernadero en comparación con el cemento tradicional [9]. Estos materiales provienen en gran parte de los desechos producto de los combustibles usados en centrales eléctricas, las cuales han comenzado a incorporar fuentes de energía más limpias. Como consecuencia, se espera una reducción significativa en el suministro de SCM en los próximos años [10]. En este contexto, como parte de una reforma energética, se han investigado nuevas alternativas de SCM para la producción de hormigones sostenibles, entre las que destaca la arcilla calcinada como una opción prometedora [11]. El cemento de arcilla calcinada con piedra caliza (LC3) permite reducir hasta en un 50 % la cantidad de Clinker necesaria en el proceso de fabricación del cemento, lo que resulta en una disminución de aproximadamente el 40 % de las emisiones de CO₂ en comparación con el cemento portland tradicional [12]. Además de mostrar un menor impacto ambiental, el LC3 presenta costos de producción más bajos, ya que puede elaborarse en plantas de cemento ya existentes [13]. Por estas razones, el cemento de arcilla calcinada se considera una alternativa eficaz de SCM, con un gran potencial de reducción de emisiones de dióxido de carbono [14].

El LC3 presenta una sinergia entre arcilla calcinada, carbonato de calcio y el cemento que permite reducir hasta un 50% la cantidad de cemento utilizado en la elaboración del

hormigón, mientras mantiene las propiedades mecánicas propias de un hormigón convencional [15]. El principal componente del LC3 es la arcilla, el cual se encuentra disponible en todo el mundo, sin embargo, el contenido de caolinita es diferente en función de la ubicación del depósito de arcilla [16]. Para un desempeño óptimo, el sistema LC3 requiere un contenido mínimo de caolinita del 40 %, mineral encargado de activar las propiedades puzolánicas en la reacción con el cemento [17]. En términos generales, los materiales empleados en los sistemas LC3 resultan altamente eficientes. La piedra caliza solo requiere un proceso de molienda simple antes de su uso, mientras que la arcilla calcinada alcanza una buena reactividad a temperaturas más bajas (aproximadamente 700 °C), en comparación con las altas temperaturas necesarias para producir Clinker (alrededor de 1450 °C) [18]. Además, al necesitar una menor cantidad de Clinker, los hormigones elaborados con cemento LC3 reducen significativamente la generación de gases de efecto invernadero en comparación con los elaborados con cemento portland o cemento portland con adición de caliza (PLC). A estas ventajas se suma la capacidad para capturar entre un 20 % y un 30 % de carbono durante la vida útil de la estructura, lo que en conjunto convierte a este material en una alternativa relevante dentro de los materiales cementantes suplementarios [19]. Estas propiedades han sido respaldadas por investigaciones internacionales que han demostrado que la sustitución del 50 % del Clinker por arcilla calcinada de piedra caliza puede reducir las emisiones de CO₂ entre un 30 % y un 40 % [20]. Por ejemplo, estudios con arcillas saudíes en mezclas LC3 resultaron en una reducción de aproximadamente del 30 % [21]. En lo que respecta al proceso de calcinación, la modelación dinámica de un flash calcinador ha evidenciado una disminución significativa en el consumo energético y, como consecuencia, en las emisiones contaminantes [22]. Asimismo, pruebas con impresión 3D de hormigón han confirmado que el LC3 puede funcionar eficazmente como un material cementante suplementario, sostenible y con potencial de mitigar entre un 25 % y un 40 % el impacto asociado al carbono [23, 24]. Estos resultados respaldan el potencial del LC3 como una solución factible para disminuir la huella ambiental de la industria del cemento.

Las resistencias mecánicas de cementos y hormigones en base a LC3 han demostrado ser similares o incluso superiores con respecto a sus versiones tradicionales. Se pueden alcanzar valores óptimos de compresión y flexión siempre que la cantidad de arcilla calcinada sea de aproximadamente el 40% y exista presencia de caolinita [25]. Este porcentaje ha sido propuesto para mitigar posibles pérdidas en las propiedades mecánicas provocadas por el reemplazo del Clinker por arcilla calcinada [26]. El incremento en la resistencia, especialmente a compresión, se debe a la formación de una matriz cementante más densa, resultado de la continua reacción puzolánica del LC3 [27]. Esta matriz puede presentar mayores resistencias iniciales a medida que el contenido de meta caolinita en la arcilla es mayor, lo que mejora su comportamiento mecánico [28]. Además, la variación en el contenido de caolinita no afecta la trabajabilidad, los tiempos de fraguado ni la consistencia de la pasta, manteniendo características similares a las de mezclas convencionales como OPC o PC [29]. También, presentan una mayor estabilidad bajo cargas y menos probabilidad de sufrir deformación plástica, un aspecto crucial para garantizar estructuras duraderas y seguras [30]. Lo anterior mencionado confirma que el LC3 mantiene o mejora

las propiedades esenciales necesarias para su utilización, lo que evidencia su aptitud como alternativa sostenible en la fabricación de hormigones.

Referente a los ambientes agresivos, los sistemas LC3 presentan una buena resistencia debido al aumento de densidad en la matriz cementante, la cual actúa como una barrera eficaz frente a la penetración de cloruros y sulfatos, reduciendo el riesgo de corrosión en las armaduras de elementos estructurales [31]. Esta mejora se debe a la formación de un entramado capilar más fino y a la reducción del volumen de poros, en comparación con el cemento portland tradicional, como lo demuestran estudios de porosimetría por intrusión de mercurio [32]. Asimismo, ensayos de difusión de iones de cloruros han demostrado que su ingreso puede reducirse hasta en un 25 % en mezclas con LC3, lo que contribuye a prevenir la corrosión y prolongar la vida útil de la estructura [33]. Adicionalmente, mezclas alternativas que incorporan polvo de ladrillo reciclado y arcilla calcinada con contenido de meta caolinita muestran una mayor durabilidad frente a ambientes con alta concentración de cloruros y sulfatos [34]. Estos resultados refuerzan la eficacia del LC3 en condiciones agresivas, ampliando su utilización en infraestructuras ubicadas en zonas con condiciones ambientales adversas.

Otras investigaciones sobre cemento LC3 han mostrado que nuevas mezclas derivadas de su composición base, como la incorporación de biochar (material rico en carbono obtenido de la biomasa), mejoran la distribución de poros en la matriz cementante y funcionan como sumideros estables de carbono [35]. Además, la implementación de técnicas de sembrado de silicato de calcio hidratado (C-S-H), combinadas con escoria en cementos de arcilla calcinada, ha permitido reducir el contenido de Clinker hasta un 40 % sin afectar la resistencia a compresión a los 28 días [36]. Finalmente, estudios de hidratación in situ prueban que la activación térmico-mecánica del caolín presente en la arcilla duplica la velocidad de ganancia de rigidez en etapas tempranas en comparación con el OPC [37]. Estas mejoras en las propiedades del cemento LC3 han promovido su aplicación en otros campos de la ingeniería civil. En el área vial, se ha utilizado para la estabilización de suelos en pavimentos, logrando un mejor comportamiento en la compacidad y capacidad portante (MDD y CBR), menores valores de plasticidad y contracción (PI y LS), una optimización del contenido de humedad (OMC), así como una huella de carbono reducida [38]. En el ámbito estructural, el hormigón autocompactante (SCC) liviano producido con este tipo de cemento mantiene una baja viscosidad plástica y una microestructura más densa, lo que lo convierte en una opción ideal para la fabricación de elementos prefabricados de bajo carbono [39]. Asimismo, en hormigones de ultra alto desempeño (UHPECC) elaborados con agua y arena marina, la incorporación de LC3 ha demostrado mejorar la resistencia mecánica, la durabilidad y la capacidad de resistir ambientes agresivos, consolidándose como una alternativa sostenible para proyectos en zonas costeras y marinas [40]. Esto evidencia que el LC3 tiene aplicaciones en diferentes áreas, donde combina un buen desempeño mecánico con un impacto ambiental reducido.

En América Latina, los estudios de ciclo de vida han resaltado el potencial del LC3 para aprovechar subproductos regionales: en la Cuenca Amazónica, la evaluación del ciclo de vida mostró que emplear residuos caolíníticos locales como materia prima disminuye considerablemente el impacto climático del cemento [41]. En Brasil, un análisis técnico y

ambiental respalda la implementación de estrategias sostenibles en su producción, señalando que la integración de arcillas calcinadas optimiza costos y reduce las emisiones de CO₂ sin afectar la calidad del cemento [42]. En Colombia, la evaluación de ciclos de vida de hormigones alcalino-activados basados en puzolana volcánica evidencia mejoras ambientales significativas, lo que sugiere que estos sistemas alternativos pueden competir con los sistemas LC3 [43]. Finalmente, se ha demostrado que añadir subproductos agrícolas como bagazo de caña o cáscara de açaí junto con meta caolinita y sílice de humo mejora las propiedades mecánicas del cemento de arcilla calcinada y logra una reducción adicional de los gases de efecto invernadero [44].

En Ecuador, la investigación en LC3 se encuentra limitada. El estudio más exhaustivo hasta la fecha presentó un hormigón con un 50 % de sustitución de Clinker (LC3-50) durante 24 meses en la costa de Salinas. Los resultados mostraron su viabilidad mecánica y durabilidad, con reducción de la porosidad efectiva, duplicación de la resistividad superficial y mayor resistencia al ataque de cloruros y a la carbonatación en ambientes marinos. Estos hallazgos confirman que los hormigones LC3 en el contexto ecuatoriano superan al Portland convencional en resistencia y durabilidad [45].

A pesar de los avances significativos en el estudio del cemento LC3 y su potencial para reducir emisiones de CO₂ y costos de producción en la industria cementera, existen vacíos en el conocimiento que limitan su adopción sistemática, especialmente en contextos regionales como Ecuador. Las investigaciones revisadas han señalado reducciones en el consumo energético y la huella ambiental asociada a la producción del cemento al utilizar mezclas suplementadas con puzolanas naturales, como la arcilla calcinada y la ceniza volcánica. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han enfocado en análisis parciales o contextos específicos que no reflejan la variabilidad mineralógica ni las condiciones locales de producción y aplicación. Además, pocas investigaciones integran simultáneamente resultados técnicos, económicos y ambientales en un mismo estudio, lo que dificultaría la toma de decisiones para su aplicación práctica. Por otra parte, la mayoría de los análisis de ciclo de vida no consideran detalladamente impactos en etapas críticas, como la molienda, ni la capacidad de captura de carbono durante la vida útil de la estructura, aspectos clave para determinar con precisión la huella ambiental.

Es necesaria una revisión actualizada que refuerce estas observaciones, integrando experiencias globales, regionales y nacionales, y aportando una visión integral que sirva como guía para investigaciones futuras, así como para el diseño de políticas públicas que promuevan la construcción sostenible en Ecuador y América Latina. En la literatura científica actual se identifican diversas brechas que justifican la necesidad de una revisión estructurada sobre mezclas de hormigón con puzolanas naturales. A nivel global, aunque existen varios estudios sobre el desempeño técnico y ambiental del sistema LC3 y otras formulaciones con arcilla calcinada o ceniza volcánica, aún falta una sistematización que integre comparativas entre los aspectos técnicos, económicos y ambientales de estas mezclas. Además, muchos trabajos se enfocan en contextos específicos, principalmente en Europa, Asia y Norteamérica, sin considerar la aplicabilidad de estos resultados en regiones con características diferentes. En el ámbito latinoamericano, se evidencia una producción científica considerablemente menor, concentrada en pocos países como Brasil, Colombia o

Chile. Esto limita la construcción de una visión regional más representativa y dificulta la identificación de tendencias consistentes que permitan evaluar el potencial real de sustitución del Clinker por puzolanas naturales en la región. En el caso de Ecuador, la brecha es aún más acentuada: la información disponible es escasa, contando únicamente con un artículo científico que proporciona datos sobre el LC3. Esta falta de evidencia local dificulta nuevas estrategias de innovación, y obstaculiza la adopción sistemática de tecnologías constructivas de bajo carbono.

El objetivo de estado del arte es establecer una comparativa técnica, ambiental y económica de las mezclas de hormigón con puzolanas naturales a nivel global, latinoamericano y ecuatoriano, con un enfoque principal en el sistema LC3. Para ello, se aplicó una metodología de revisión sistemática basada en los lineamientos del PRISMA 2020, complementada con un análisis bibliométrico mediante la herramienta VOSviewer, con la finalidad de ofrecer información que pueda promover nuevas investigaciones sobre el tema, de esta manera se podría conseguir implementar nuevos modelos de construcción sostenible en el país. A continuación, se presenta en detalle el enfoque metodológico empleado para la selección, evaluación y análisis de la literatura científica incluida en esta revisión.

2. Metodología

La metodología adaptada en la presente investigación fue de manera sistemática y repetible basada en principios de una revisión de manera estructurada establecida en la declaración PRISMA 2020, con el fin de recopilar, evaluar y sistematizar la literatura científica publicada en los últimos 8 años acerca de mezclas de hormigón sustentable que incorporan puzolanas naturales, para ser más exacto ceniza volcánica y arcilla calcinada. Este método permite examinar las propuestas presentes, establecer vínculos temáticos y resaltar las contribuciones relevantes que se dan en diferentes regiones geográficas, teniendo una atención especial en Ecuador y en Sudamérica.

El enfoque metodológico se realiza como un proceso sistemático de tres fases que se complementan entre sí. En primer lugar, la identificación y recolección de manera estricta de los artículos científicos mediante el uso de ecuaciones booleanas diseñadas para seleccionar estudios sobre mezclas de hormigón con ceniza volcánica y arcilla calcinada. La segunda etapa se realiza una evaluación crítica y filtrada, utilizando criterios de inclusión y exclusión preestablecidos que garanticen una pertinencia sobre la materia y la calidad metodológica de los trabajos seleccionados previamente. En el último paso, los artículos que fueron sometidos al análisis cualitativo y bibliométrico, empleado por el software VOSviewer para visualizar las co-ocurrencias mediante palabras claves, nodos temáticos y redes de colaboración científica (Figura. 1). Este proceso completo garantiza tener un alto nivel de rigor en la investigación, facilitando la secuencia del estudio y permite un proceso claro de cada decisión adoptada durante la selección de fuentes.



Figura 1. Mapa bibliográfico basado en autores de la primera etapa de búsqueda

La recolección de la literatura se realizó accediendo a las bases de datos científicas ScienceDirect, Scopus, SpringerLink y Google Scholar. Estas plataformas fueron seleccionadas por su alta cobertura en publicaciones indexadas, diversidad temática y acceso a artículos revisados por pares en las áreas de ingeniería civil, ciencia de los materiales y construcción sustentable. La ecuación de búsqueda se estructuró utilizando operadores booleanos, con el objetivo de obtener artículos que aborden temas clave vinculados al cemento LC3 y a la sustitución del Clinker con puzolanas naturales. La fórmula fue la siguiente:

("limestone calcined clay cement" OR "LC3" OR "volcanic ash concrete" OR "natural pozzolan cement")

AND ("low carbon" OR "sustainable" OR "eco-efficient")

NOT ("geopolymer" OR "alkali-activated" OR "slag")

De esta manera la sintaxis permite eliminar artículos relacionados con geopolímeros, escorias o activación alcalina, ya que estos emplean mecanismos químicos diferentes al del cemento Portland modificado por sustitución puzolánica. Además, se excluyeron documentos que no corresponden a artículos científicos (tesis, resúmenes extendidos o presentaciones en congresos sin publicación formal). La búsqueda se restringió a publicaciones entre 2017 y 2025, en idioma inglés o español, y se priorizaron artículos con validación científica. Se descargaron los metadatos, resúmenes y textos de los documentos para su posterior evaluación. Para garantizar que los estudios incluidos fueran comparables y pertinentes, se verificó que cada artículo cumpliera simultáneamente seis condiciones: que cuente con resultados de microestructura o porosidad, propiedades mecánicas, resistencia

a cloruros o ambientes agresivos, reología o slump, resistencia a la carbonatación y el impacto ambiental en comparación con mezclas de referencia de cemento Portland.

El proceso de selección se desarrolló en cuatro etapas, conforme a la metodología PRISMA (Figura. 2). En la fase de identificación se recuperaron 170 artículos aplicando la ecuación booleana definida en las bases ScienceDirect, Scopus, SpringerLink y Google Scholar. Posteriormente, durante el filtrado se descartaron 37 registros duplicados, un artículo retractado y otro anterior a 2017, de modo que quedaron 130 trabajos únicos. Al momento de elección se examinan título, resumen y conclusiones de cada artículo, lo que permitió seleccionar 35 estudios que satisficieran al menos uno de los seis criterios de inclusión preestablecidos. En el último paso es la etapa de inclusión, se incorporan siete investigaciones; una ecuatoriana y seis sudamericanas. De esta forma, el corpus final quedó constituido por 42 artículos científicos sometidos a revisión detallada. La Figura. 2 presenta el diagrama PRISMA correspondiente.

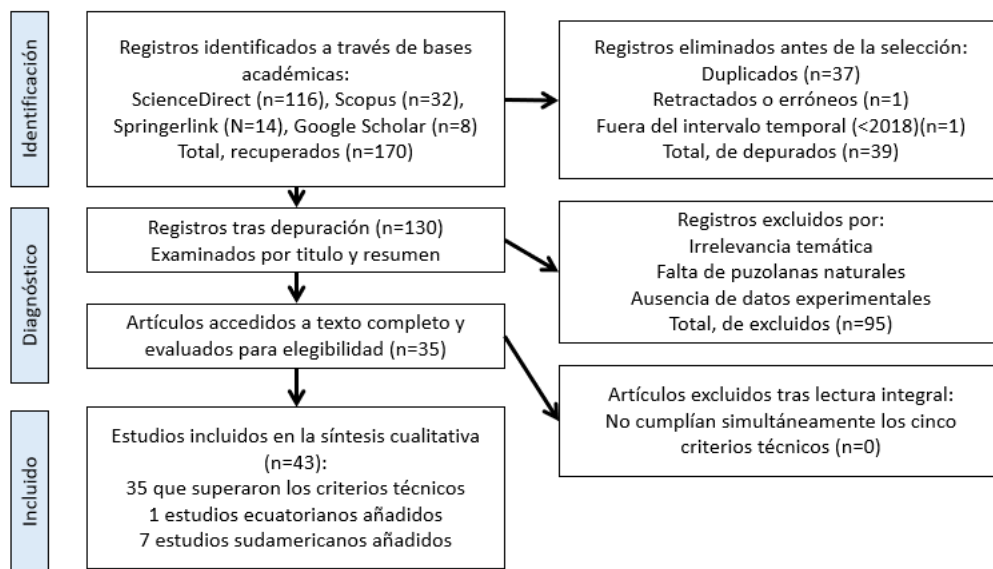


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA que muestra el proceso de selección de datos para la investigación

Los siete artículos incluidos correspondientes a Sudamérica y Ecuador no cumplen con todos los criterios técnicos establecidos, su inclusión se justifica por el alto valor contextual, tales como materias primas locales, prácticas industriales y condiciones ambientales, además que aportan información crítica para interpretar los resultados en el ámbito latinoamericano, ya que no existe mucha información sobre el tema en esta zona. Estos artículos están señalados como “uso contextual”, no se incorporan a promedios ni síntesis cuantitativas globales, y su utilización se restringe a comparaciones puntuales o a discusión narrativa. Por lo tanto, se tiene los siguientes artículos: [45] (Ecuador), aporta evidencia local de microestructura, cloruros, trabajabilidad y carbonatación natural; [46] (Chile), respalda microestructura, cloruros y mecánicas con puzolana volcánica; [42] y [44] (Brasil), sustentan desempeño mecánico/ambiental y mezclas cuaternarias ≤ 45 % clínker; [41] (Brasil), proporciona línea base de ACV; [18] (Brasil), documenta cinética de hidratación y reología; y [43] (Colombia), ofrece un referente ambiental regional para el contraste de magnitudes. Así, se preserva la idea de la síntesis principal dentro de un marco realista de aplicación

regional. Las referencias mencionadas anteriormente se encuentran definidas en la tabla 1, donde se justifica su inclusión, criterios incumplidos y el tratamiento de análisis.

Tabla 1. Artículos incluidos por valor contextual: criterios incumplidos, justificación y análisis

Referencia	Criterios incumplidos	Justificación de inclusión	Tratamiento en el análisis
[45] (Ecuador)	Impacto ambiental	Evidencia local directa (microestructura, cloruros, reología, carbonatación natural en costa)	Entra en tablas/comparaciones de microestructura/durabilidad/trabajabilidad/carbonatación; excluido de síntesis ambiental
[46] (Chile)	Reología/Slump, Carbonatación, Impacto ambiental	Pertinencia andina (polvo volcánico Calbuco); datos de microestructura, cloruros y mecánicas	Entra en tablas de microestructura/cloruros/mecánicas; excluido de reología, carbonatación y ambiente
[42] (Brasil)	Microestructura/porosidad, Cloruros, Reología/Slump, Carbonatación comparables	Estrategia de producción LC3 en Brasil; desempeño mecánico y beneficio ambiental a escala industrial	Discusión narrativa (mecánicas/ambiental); excluido de síntesis microestructural y de transporte iónico
[44] (Brasil)	Cloruros, Reología/Slump, Carbonatación (microestructura parcial)	Mezclas cuaternarias LC3 ($\leq 45\%$ clinker) con subproductos regionales; desempeño a 91 d y 6 meses	Usado en mecánicas y discusión ambiental; excluido de cloruros/carbonatación/reología
[41] (Brasil)	Microestructura, Mecánicas, Cloruros, Reología,	Línea base ambiental para LC3 con residuos caoliníticos amazónicos; viabilidad regional	Usado en discusión ambiental/logística; no entra a síntesis experimentales
[18] (Brasil)	Mecánicas 28 d vs OPC, Cloruros, Carbonatación, Impacto ambiental	Soporte de cinética de hidratación y reología para LC3	Incluido para reología/trabajabilidad
[43] (Colombia)	No es LC3, faltan todos los parámetros LC3 comparables	Contexto ambiental regional: magnitudes de GWP en soluciones latinoamericanas	Solo discusión ambiental contextual; no entra a comparaciones LC3

Fuente: Elaboración propia.

Como complemento al análisis temático, se realiza un estudio bibliométrico con la herramienta VOSviewer. Para ello se extrajo metadatos de los cuarenta y tres artículos seleccionados de tal manera: título, autores, año de publicación, palabras clave y fuente. También se elaboraron tres tipos de mapas: de co-ocurrencia de palabras clave, donde se identificó los términos más frecuentes y sus conexiones semánticas; de redes de coautoría, que permiten ubicar a los autores, instituciones y regiones geográficas con mayor producción conjunta; y de evolución temporal, útil para visualizar la aparición y consolidación de líneas de investigación emergentes como se puede ver en la (Figura. 3). Los resultados muestran que los conceptos “LC3”, “calcined clay”, “volcanic ash”, “low carbon cement” y “life cycle assessment” concentran la mayor densidad de enlaces; además, revelan una colaboración académica particularmente intensa entre grupos de Suiza, India, Brasil, Colombia y Cuba, junto con un incremento reciente de contribuciones con enfoque latinoamericano [42]. En conjunto, VOSviewer aporta una visión cuantitativa del desarrollo científico sobre cementos de bajo carbono con puzolanas naturales, al tiempo que ayudó a delimitar la concentración temática, el grado de madurez tecnológica y los vacíos todavía existentes en la literatura especializada.

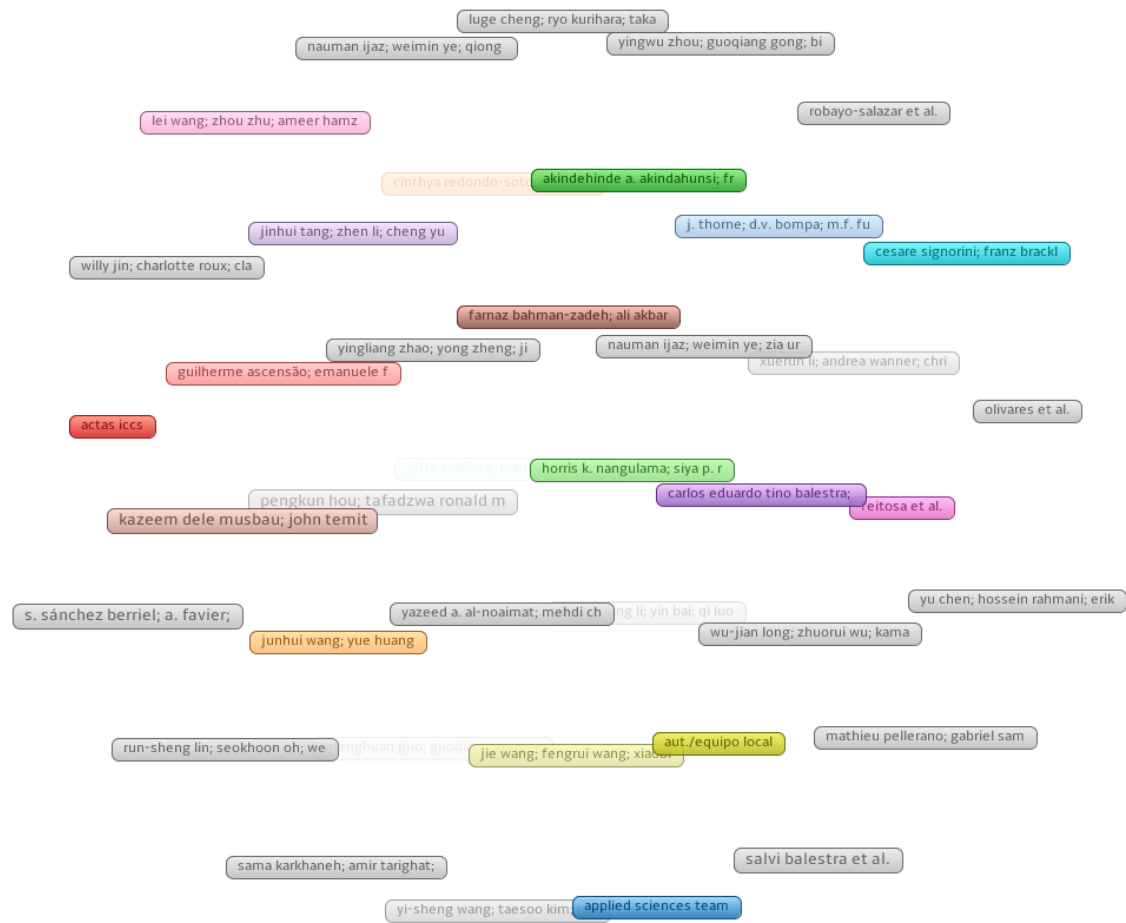


Figura 2. Mapa bibliográfico basado en autores de la etapa final de búsqueda

3. Resultados

3.1. Microestructura y Porosidad

A nivel internacional, diversas investigaciones demostraron que la sustitución parcial de Clinker por la mezcla caliza-arcilla en sistemas LC3 promovió un sellado más rápido y efectivo de la red porosa. Se observó que, en periodos de curado relativamente cortos, los poros grandes disminuyeron significativamente, y la conectividad entre ellos se redujo de forma drástica [16], [12]. Los estudios mostraron, además, que este refinamiento progresivo del sistema poroso fue acompañado por un incremento sostenido en la resistividad eléctrica, vinculado al desarrollo de productos de hidratación que densificaron la matriz [47]. Estos efectos se resumen en la Tabla 2, donde se observa que el LC3 favoreció una microestructura más cerrada, con menor continuidad de vías de transporte, y una respuesta eléctrica más robusta frente al paso de iones.

Tabla 2. Resultados microestructurales – Escala global

Parámetro	Valor Inicial (OPC / 7 días)	Valor Final (LC3 / 90 días)
Porosidad permeable (%) [16]	34	16
Radio crítico de poro (nm) [16]	31	14
Macroporosidad ($\geq 1 \mu\text{m}$) (%) [16]	16,6	2,4
Conectividad de poros (%) [12]	92	9
Aumento resistividad superficial [47]	–	4–5 veces más que OPC

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [16].

En el contexto sudamericano, investigaciones realizadas en Chile evidenciaron una evolución microestructural progresiva en morteros con reemplazo parcial de Clinker por polvo volcánico. Aunque la porosidad total no disminuyó tan marcadamente como en los sistemas tradicionales, se verificó un aumento considerable en la proporción de poros finos y en la complejidad de la red interna [46]. La retención de mercurio y los resultados de espectroscopía eléctrica sugirieron una estructura más tortuosa y una interfaz más activa. La Tabla 3 sintetiza estos cambios, destacando que, a pesar de la porosidad ligeramente mayor, las mezclas mostraron un mejor sellado capilar y una resistencia eléctrica más alta en el tiempo.

Tabla 3. Resultados microestructurales – Sudamérica (Chile)

Parámetro	CEM I	VP10	VP20
Porosidad total (%) (400 días)	10,9	12,5	14,5
Fracción de poros < 100 nm (%)	–	–	58
Hg retenido al final (%)	51	–	66
R ₂ (resistencia) (k Ω)	~2	–	~7
C ₂ (capacitancia) (nF)	~0,8	–	~1,6

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [46].

En Ecuador, estudios recientes con concreto, de cemento compuesto por 50% de sustitución de Clinker (LC3-50), revelaron una red capilar visiblemente más compacta que la del concreto Portland convencional. La disminución de la porosidad efectiva y el aumento de poros finos indicaron una mejora clara en la estructura del material [45]. Estos cambios microestructurales se reflejaron directamente en un salto importante en la resistividad superficial, lo que denotó una conectividad porosa mucho menor [45]. La Tabla 4 muestra estos resultados, donde se aprecia que el uso de LC3 generó una matriz más refinada y resistente frente al paso de fluidos y iones.

Tabla 4. Resultados microestructurales – Ecuador

Parámetro	OPC	LC3-50
Porosidad efectiva (%)	13,8	10,4
Fracción de poros < 100 nm (%)	41	57
Resistividad superficial (kΩ·cm)	28	63

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [45].

3.2. *Propiedades Mecánicas*

A escala global, los sistemas LC3 demostraron una capacidad mecánica notable, incluso cuando se redujo de manera considerable el contenido de Clinker. En un estudio, se reportaron resistencias a compresión de entre 45 y 55 MPa a los 28 días en mezclas LC3-50 y relaciones agua/cemento de 0,45–0,50, resultados comparables o incluso ligeramente superiores al cemento Portland convencional [47]. Si bien se observó una pérdida de resistencia inicial (días 1 a 3), esta diferencia se cerró el séptimo día. Otro estudio alcanzó una resistencia de 57,1 MPa en una matriz LC3 sin fibras, mientras que la inclusión de fibras de polipropileno redujo la compresión a alrededor de 44 MPa, pero mejoró significativamente la resistencia a flexión, alcanzando 7,7 MPa, revelando la sensibilidad del sistema a cambios en la porosidad interfacial [9]. Incluso utilizando arcillas de baja reactividad (con bajo contenido de caolinita), se mantuvieron resistencias de aproximadamente 40–45 MPa a los 28 días, solo un 25 % por debajo del OPC de referencia, lo que confirmó la viabilidad estructural del LC3 con materias primas de calidad marginal [26]. En conjunto, los datos presentados en la Tabla 5 demuestran que el LC3 puede alcanzar entre 45 y 57 MPa a 28 días, superando la desventaja inicial de resistencia durante la primera semana de curado, lo que lo posiciona como una alternativa viable de bajo carbono con desempeño estructural comparable al del cemento Portland convencional.

Tabla 5. Propiedades mecánicas – Escala global

Mezcla / Condición	Resistencia a compresión (28 d)	Otras observaciones
LC3-50 % (w/b 0,45–0,50) [11]	45–55 MPa	Similar o superior al OPC
LC3 sin fibras [9]	57,1 MPa	
LC3 + 2,5 % vol. fibras PP [9]	≈ 44 MPa (compresión)	Flexión: 7,7 MPa
LC3 con arcilla de baja reactividad [26]	≈ 40–45 MPa	≈ 25 % inferior al OPC

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [9], [26], [11].

En Sudamérica, distintas investigaciones validaron el comportamiento mecánico del LC3 adaptado a materias primas locales. En Chile, se realizaron sustituciones parciales del Clinker con polvo volcánico del Calbuco, logrando resistencias de aproximadamente 45 MPa a 28 días para mezclas con 10 % de reemplazo (VP10), y cerca de 42 MPa para mezclas con 20 % (VP20), cumpliendo con los requisitos mínimos estructurales y exhibiendo una microestructura densa [43]. En Brasil, los cementos LC3-50 superaron los 42,5 MPa a los 28

días, incluso con adición de materiales como ceniza volante, escoria o bagazo de caña [42]. Además, se observó que algunas formulaciones con menor Clinker lograron mantener valores iniciales similares y superarlos a los seis meses [42]. La Tabla 6 resume estos hallazgos, que sitúan los valores de resistencia a los 28 días en un rango de 40 a 47 MPa, confirmando que las formulaciones sudamericanas de LC3 ofrecen un desempeño mecánico fiable mientras se reduce la huella de carbono del cemento.

Tabla 6. Propiedades mecánicas – Sudamérica

Mezcla / Condición	Resistencia a compresión (28 d)	Observaciones adicionales
VP10 (Chile, 10 % polvo volcánico) [43]	≈ 45 MPa	Microestructura más tortuosa que CEM I
VP20 (Chile, 20 % polvo volcánico) [43]	≈ 42 MPa	Cumple clase estructural 32,5 MPa
LC3 Brasil (50 % Clinker) [43]	> 42,5 MPa	Cumple CP-V-ARI con cenizas, escoria o bagazo
Cuaternarios con ≤ 45 % Clinker [45]	≈ 47 MPa a 91 d; mejora a 6 meses	Sostenibilidad con buen rendimiento

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [46], [44].

En Ecuador, el uso de LC3 con 50 % de Clinker permitió obtener resistencias a compresión superiores al concreto Portland convencional. A los 7 días, la mezcla alcanzó 35,8 MPa, un 11 % por encima del OPC, y a los 28 días alcanzó 45,7 MPa, superando al cemento Portland en un 16 % (39,6 MPa) [46]. Como se muestra en la Tabla 7, este comportamiento fue atribuido a la formación temprana de productos de hidratación como C-A-S-H y carboaluminatos, que favorecieron la ganancia de resistencia desde las primeras edades.

Tabla 7. Propiedades mecánicas – Ecuador

Mezcla	Edad de curado	Resistencia a compresión (MPa)	Comparación con OPC
LC3-50	7 días	35,8	11%
LC3-50	28 días	45,7	+16 % (vs 39,6 MPa)

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [45].

3.3. Cloruros y Sulfatos

Los estudios a nivel global evidenciaron que sustituir parcialmente el Clinker por caliza y arcilla calcinada contribuyó a una disminución drástica del transporte de iones cloruro. En morteros con 45 % de reemplazo total (30 % de arcilla calcinada y 15 % de caliza), se detectó una reducción del coeficiente de migración no estacionaria del 56 % a los 28 días y del 83 % a los 90 días en comparación con el cemento Portland convencional [16]. En sistemas LC3-50, se observó que el coeficiente de difusión efectiva bajó a la mitad en poco más de un mes [48]. Además, en condiciones de exposición combinada a cloruros y carbonatación, se alcanzaron coeficientes estacionarios de solo $0,45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, en contraste con $1,25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ del OPC, efecto atribuido a la formación de fases AFm que inmovilizan los cloruros [49]. La Tabla 8 resume estos resultados, que muestran reducciones del 50 % al

80 % en el transporte de cloruros, confirmando la idoneidad del LC3 para ambientes agresivos como zonas costeras o estructuras expuestas a sales de deshielo.

Tabla 8. Transporte de cloruros- Escala global

Mezcla / Condición	Tipo de medición	Valor LC3	Valor OPC	Reducción
CC30LS15 (45 % sustitución) [16]	Migración no estacionaria (28 d)	—	—	-56%
	Migración no estacionaria (90 d)	—	—	-83%
LC3-50 (35 días) [48]	Difusión efectiva (DE)	$1,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$3,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	-50%
LC3 (exposición a carbonatación + Cl^-) [49]	Difusión estacionaria (DE)	$0,45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	-64%

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [16], [48], [49].

En Sudamérica, un estudio en Chile demostró que el reemplazo parcial de Clinker con polvo volcánico mejoró de forma significativa la resistencia frente a la penetración de cloruros. A los 400 días, el coeficiente de difusión estacionaria se redujo en un 50 % con 10 % de adición y en un 75 % con 20 % de reemplazo, respecto al mortero convencional [46]. De forma complementaria, las mediciones del coeficiente de migración no estacionaria (según NT BUILD 492) mostraron disminuciones de hasta un 50 %, lo que confirmó que la incorporación de esta puzolana volcánica refinó la red porosa y limitó el ingreso de iones agresivos. Los valores correspondientes se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Transporte de cloruros – Sudamérica (Chile)

Mezcla (Calbuco)	Tipo de medición	Valor (m^2/s)	Reducción respecto al OPC
CEM I	Difusión estacionaria (400 d)	$\approx 4 \times 10^{-12}$	—
VP10 (10 % PV)	Difusión estacionaria	$\approx 2 \times 10^{-12}$	-50%
VP20 (20 % PV)	Difusión estacionaria	$\approx 1 \times 10^{-12}$	-75%
CEM I	Migración (NT BUILD 492)	$\sim 20 \times 10^{-12}$	—
VP10	Migración	$\approx 12 \times 10^{-12}$	-40%
VP20	Migración	$\approx 10 \times 10^{-12}$	-50%

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [46].

En Ecuador, se comprobó una mejora importante en la durabilidad frente al ingreso de cloruros. El coeficiente de migración no estacionaria se redujo más de un 50 %, pasando de $6,8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ en el concreto convencional (categoría "moderada") a $3,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ en el LC3-50 (categoría "muy baja"). A esto se sumó una reducción importante en el coeficiente de difusión aparente a 24 meses, de $2,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, lo cual indica una capacidad mucho mayor para resistir ambientes con presencia de sales marinas. Estos resultados se sintetizan en la Tabla 10 [45].

Tabla 10. Transporte de cloruros – Ecuador

Tipo de medición	Valor LC3-50	Valor OPC	Reducción (%)
Migración (NT BUILD 492)	$3,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$6,8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	-53%
Difusión aparente (24 meses)	$1,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$2,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	-52%

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [45].

3.4. Reología y Slump

A escala global, se demostró que la trabajabilidad de sistemas LC3 puede modificarse ampliamente mediante el uso de aditivos químicos. En un estudio, la incorporación de superplastificantes tipo policarboxilato (PCE) al 1,5 % en peso total de la mezcla permitió reducir el esfuerzo de fluencia dinámico en aproximadamente un 25 % y, cuando se combinó con un mitigador de arcilla, logró disminuir la viscosidad hasta en un 30 % a los 45 minutos, sin comprometer la estabilidad del sistema [18]. Por otro lado, se evidenció que la reología de las pastas LC3 es altamente sensible a la presencia de adiciones como sulfato de calcio o cloruro de calcio. En particular, la adición de 2 % de yeso suavizó la fluencia inicial, mientras que una dosis de 5 % de CaCl_2 generó una rápida rigidez del sistema: aumentó la tensión de fluencia estática a más de 230 mN·m antes de los 60 minutos y duplicó el módulo elástico G' frente al testigo sin aditivos [23]. La Tabla 11 resume estos efectos, confirmando que el comportamiento reológico del LC3 puede ir desde una respuesta comparable al OPC hasta un sistema más rígido, dependiendo de los ajustes en sulfato, cloruro o superplastificante, ofreciendo así una ventana de trabajabilidad controlada de hasta 75 minutos. Por lo tanto, se puede identificar los resultados con la incorporación de aditivos [18] y sin la misma [23].

Tabla 11. Reología y trabajabilidad – Escala global

Condición experimental	Parámetro reológico afectado	Efecto observado
LC3 + 1,5 % PCE + mitigador de arcilla [18]	Viscosidad equivalente (a 45 min)	Reducción de hasta 30 %
LC3 + 1,5 % PCE [18]	Esfuerzo de fluencia dinámico	Reducción $\approx$ 25 %
OPC + 0,5 % PCE [18]	Fluencia inicial	Casi eliminada
LC3 + 2 % yeso [23]	Fluencia inicial	Disminución
LC3 + 5 % CaCl_2 [23]	Tensión de fluencia estática ($\leq$ 60 min)	$\geq$ 230 mN·m; G' duplicado respecto al control

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [18], [23].

En Ecuador, los ensayos con una relación agua/cemento constante de 0,50 mostraron diferencias claras en el comportamiento al revenimiento. La mezcla de referencia (OPC) presentó un cono Abrams de 12 cm, mientras que el LC3-50, con la misma dosificación inicial, mostró solo 7,5 cm. Sin embargo, la trabajabilidad requerida se alcanzó fácilmente mediante ajuste en la dosis del superplastificante, sin que se observaran signos de segregación ni pérdida acelerada de asentamiento [46]. La Tabla 12 resume estos resultados. Cabe mencionar que se cuenta únicamente con los resultados obtenidos de mezclas

combinadas con aditivos, a diferencia del contexto sudamericano donde se podía identificar mezclas con la incorporación de aditivos y sin la misma, por lo que la comparación se debe limitar al uso de aditivos en mezclas LC3.

Tabla 12. Reología – Ecuador

Mezcla	Relación a/c	Revenimiento (cm)	Observaciones adicionales
OPC	0,50	12,0	Comportamiento estándar
LC3-50	0,50	7,5	Requiere ajuste de PCE para lograr trabajabilidad

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [45].

3.5. Carbonatación

A nivel global, los estudios cuantitativos sobre carbonatación en LC3 son limitados y se destacan principalmente los trabajos de Khan et al. En su análisis de corrosión combinada por CO₂ y cloruros, observaron que tras 56 días de exposición acelerada (1 % CO₂ + 5 % NaCl), la profundidad media del frente carbonatado en pastas LC3 fue de 2,2 mm, considerablemente menor que los 4,5 mm registrados en cemento Portland convencional. Al mismo tiempo, la densidad de corriente corrosiva en el acero se redujo de 0,71 a 0,38 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, debido a la formación de un gel C-A-S-H más compacto que protege la matriz [49]. Complementariamente, otro estudio con RMN unilateral confirmó que, tras 72 horas de carbonatación acelerada, solo aproximadamente el 35 % del agua capilar fue consumida en LC3, frente a más del 60 % en OPC, lo que evidencia un efecto de taponamiento precoz que frena el avance del CO₂ [27]. Estos resultados se resumen en la Tabla 13 y provienen directamente de los datos experimentales sin extrapolaciones.

Tabla 13. Carbonatación acelerada – Escala global

Mezcla	Tiempo de exposición	Profundidad de carbonatación (mm)	Densidad de corriente corrosiva ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Agua capilar consumida (%)
LC3 [27], [49]	56 días	2,2	0,38	~35 (tras 72 h)
OPC [27], [49]	56 días	4,5	0,71	>60 (tras 72 h)

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [45].

En Ecuador, bajo condiciones de exposición natural atmosférica en zona litoral, la profundidad de carbonatación medida a los 24 meses fue de 1,0 mm para OPC y de 5,2 mm para LC3-50, con un coeficiente de carbonatación natural aproximado de 1,06 mm/ $\sqrt{\text{año}}$. No se detectaron avances de carbonatación en las zonas permanentemente húmedas, como en la marea o inmersión, sugiriendo que la saturación del ambiente limita la reacción con CO₂, a pesar de la mayor reactividad de la matriz LC3 [45]. Los valores están detallados en la Tabla 14.

Tabla 14. Carbonatación natural- Ecuador

Mezcla	Tiempo (meses)	Profundidad carbonatada (mm)	Coefficiente k_{nat} (mm/ $\sqrt{\text{año}}$)	Observaciones
OPC	24	1,0	–	Sin carbonatación en zonas húmedas
LC3-50	24	5,2	$\approx 1,06$	Sin carbonatación en zonas húmedas

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [45].

3.6. Impacto ambiental

Los análisis de ciclo de vida en investigaciones fuera de Sudamérica confirmaron que la reducción del contenido de Clinker es considerada como la principal estrategia para disminuir la huella de carbono a causa de la fabricación de cementos. Por ejemplo, un estudio comparó un cemento Portland convencional con emisiones de 819 kg CO₂ por tonelada frente a un LC3-50 que generó 482 kg CO₂, lo que representa una reducción del 41 %. Además, una formulación sin Clinker pudo disminuir el impacto hasta 197 kg CO₂, equivalente a un 76 % menos que el PC [36]. Al trasladar estos resultados al hormigón, otro trabajo evidenció que reemplazar OPC por mezclas con caliza y ceniza volante redujo la huella de carbono entre un 35 % y 75 %, pasando de 10,39 a 3,48 kg CO₂ por metro cúbico con una mezcla compuesta por 25 % OPC, 60 % ceniza volante y 15 % caliza [6]. En conjunto, estas investigaciones indicaron que limitar el contenido de Clinker a la mitad o eliminarlo casi por completo permite reducir entre un tercio y tres cuartas partes las emisiones, consolidando la ventaja ambiental de los ligantes LC3 y otros similares de baja huella de carbono. Estos datos se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Impacto ambiental- Comparación global

Mezcla / Condición	Emisiones en centenas CO ₂ (kg/t o kg/m ³)	Reducción (%) respecto a OPC
CEM I (Portland convencional) [36]	819 kg CO ₂ eq/t	–
LC3-50 [36]	482 kg CO ₂ eq/t	-41%
Formulación sin Clinker [36]	197 kg CO ₂ eq/t	-76%
Hormigón con 25 % OPC + 60 % ceniza + 15 % caliza [6]	3,48 kg CO ₂ eq/m ³	-66 % aprox.
Hormigón con OPC convencional [6]	10,39 kg CO ₂ eq/m ³	–

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [6], [36].

En el contexto sudamericano, los análisis de ciclo de vida disponibles mostraron que la sustitución parcial de Clinker con materiales locales también permitió reducir sustancialmente la huella de carbono. En Chile, el reemplazo del 10 % y 20 % de este material, con polvo volcánico redujo las emisiones en un 9,3 % y 18,7 % respectivamente, sin comprometer la resistencia mecánica del mortero [43]. En Brasil, el ensayo con LC3-50 redujo el potencial de calentamiento global (GWP) en aproximadamente 33 % en

comparación con el cemento CP-V-ARI. Asimismo, la mezcla de esta matriz con 10 % de escoria o ceniza volante, limitando el Clinker al 40–45 %, proporcionó un ahorro adicional cercano al 21 % sin pérdida de rendimiento mecánico [42]. En conjunto, la reducción realista de emisiones en Sudamérica osciló entre 18 % y 45 % cuando el Clinker se limita entre 40 % y 80 % mediante LC3 y otros materiales suplementarios, como se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16. Impacto ambiental – Sudamérica

Mezcla / Condición	Emisiones CO ₂ (kg/m ³)	Reducción (%) respecto a OPC
Mortero con 10 % polvo volcánico (Chile) [43]	–	-9,3 %
Mortero con 20 % polvo volcánico (Chile) [43]	–	-18,7 %
LC3-50 (Brasil) [45]	–	-33%
LC3-40/45 + 10 % escoria/ceniza (Brasil) [45]	–	-21 % adicional
Hormigón alcalino-activado con puzolana [44]	210,9 kg CO ₂ eq/m ³	-44,7 %
OPC convencional [44]	381,2 kg CO ₂ eq/m ³	–

Fuente: Elaboración propia con información recopilada del artículo [46], [43], [44].

4. Discusión

Los principales hallazgos se resumen en la Tabla 17, que compara el comportamiento del cemento LC3 frente al OPC en aspectos fundamentales como resistencia mecánica, durabilidad, microestructura, respuesta a agentes agresivos e impacto ambiental. Esta síntesis permite establecer una base clara para el análisis interpretativo que se desarrolla a continuación, conectando cada resultado obtenido con la literatura científica relevante.

Tabla 17. Resumen de los principales hallazgos entre LC3 y OPC para la industria de la construcción en Ecuador

Aspecto evaluado	Resultados LC3 vs OPC
Resistencia a compresión	Incremento de 10-15 % respecto al OPC a 28 días; microestructura densificada y mayor capacidad de transferencia de esfuerzos.
Durabilidad (penetración de cloruros)	Reducción del 30-45 % en la penetración de cloruros; mejor desempeño frente a ambientes marinos y agresivos.
Microestructura y trabajabilidad	Microestructura más densa; mayor impermeabilidad; ligera reducción del slump (1-2 cm), compensada con ajuste de agua o superplastificantes.
Carbonatación y sulfatos	Resistencia similar o superior frente a carbonatación y ataque por sulfatos, según tipo de arcilla y porcentaje de reemplazo.
Impacto ambiental y sostenibilidad	Reducción del 30-45 % de las emisiones de CO ₂ ; el uso de arcillas y calizas locales disminuye la huella de transporte y la energía incorporada.

Fuente: Elaboración propia

En términos de resistencia a compresión, las mezclas con cemento LC3 desarrollan incrementos de aproximadamente 10–15 % respecto al OPC a los 28 días. Este comportamiento coincide con lo observado por Liu et al. (2022) [9], quien explica que, debido a las fases hidratadas más densas formadas en las matrices con arcilla calcinada, se

obtiene una mejora en la resistencia a compresión. De manera complementaria, Mohammadi et al. (2023) [14] demostraron que la incorporación de fibras en una matriz LC3 mejora la transferencia de esfuerzos, lo cual indica una buena respuesta mecánica del material. Asimismo, estudios recientes de Kumar y Kumar [5] y Fan et al. [30] sugieren que el LC3 puede aplicarse incluso en concretos de ultra-alto desempeño (UHPC), evidenciando su versatilidad para usos estructurales exigentes. Fomentar el uso del LC3 en el contexto ecuatoriano significaría un mejor aprovechamiento de arcillas y calizas locales —materiales abundantes en el país— destinados a la producción de concretos más resistentes y con un menor impacto ambiental.

En cuanto a la durabilidad, los resultados evidencian que las mezclas con LC3 reducen entre un 30–45 % la penetración de iones cloruro frente al OPC. Esto concuerda con lo reportado por Nguyen et al. [49], quienes demostraron que los concretos LC3 presentan concentraciones de cloruros significativamente menores que los tradicionales. Otros estudios, como los de Bernal et al. [47] y Y. Wang et al. [49], confirman que la microestructura refinada del LC3 ralentiza los procesos de corrosión incluso bajo condiciones de carbonatación. Esta evidencia se respalda con el estudio de Garcés-Vargas et al. [46] en Salinas (Ecuador), el cual observó que la durabilidad del concreto LC3 se mantiene incluso en ambientes marinos. Este resultado es particularmente relevante para la construcción de estructuras a lo largo de las zonas costeras del país. Además, Hu et al. (2024) [26] demostró que el LC3 exhibe una buena resistencia en entornos agresivos incluso empleando arcillas de baja calidad, aspecto importante dada la variabilidad de los materiales locales.

Respecto a la microestructura y trabajabilidad, se observó que la incorporación de cemento LC3 provoca una ligera reducción en la fluidez inicial del hormigón, con una disminución de revenimiento del orden de 1–2 cm en comparación con el OPC. Esto se explica por la mayor finura y reactividad de las arcillas calcinadas, las cuales incrementan la demanda de agua y afectan la cinética de hidratación, tal como señalan Chen et al. (2020) [10] y Ribeiro et al. (2024) [18]. No obstante, Bernal et al. (2021) [12] y Ascensão et al. (2024) [29] evidenciaron que los carboaluminatos formados durante la hidratación del LC3 refinan la red de poros y mejoran la impermeabilidad de la matriz. Si bien es necesario ajustar la dosificación de agua o emplear superplastificantes para compensar la leve pérdida de trabajabilidad, los beneficios obtenidos en resistencia y durabilidad compensan ampliamente este efecto.

En el ámbito ambiental y de sostenibilidad, se confirma que las emisiones de CO₂ se reducen aproximadamente en un 30–45 % al emplear sistemas LC3 en lugar de OPC. Este rango es comparable con los resultados reportados en estudios sudamericanos, como los de Salvi Balestra et al. (2021, 2022) [42, 45, 48], que identificaron disminuciones de magnitud similar en Brasil. Asimismo, Jin et al. (2024) [15] destaca al LC3 como un material de bajo carbono apto para tecnologías emergentes, por ejemplo en la impresión 3D, lo que subraya su potencial innovador. Por su parte, Kanagaraj et al. (2024) [20] promueven la adopción del LC3 mediante políticas públicas que apoyen la transición hacia una construcción más sostenible. En Ecuador, Garcés-Vargas et al. (2024) [46] confirmó la factibilidad de producir

cemento LC3 a partir de arcillas locales, lo que reduciría la necesidad de Clinker importado y alinearía la industria con los compromisos climáticos internacionales del país.

Si bien los resultados obtenidos confirman el potencial del LC3 como sustituto parcial del cemento Portland, es importante reconocer algunas limitaciones. En primer lugar, los ensayos analizados se realizaron mayoritariamente en condiciones controladas de laboratorio, lo cual no refleja plenamente el comportamiento real en obras a gran escala donde factores ambientales pueden influir significativamente en la durabilidad. En segundo lugar, la calidad de las arcillas locales en Ecuador es variable en términos de contenido de caolinita y presencia de impurezas, lo que podría afectar la consistencia de los resultados al aplicar el LC3 en distintas regiones del país. Además, se requiere investigar la vida útil a largo plazo de estructuras construidas con LC3, ya que los estudios disponibles se concentran principalmente en etapas tempranas de hidratación y desarrollo de resistencia. Otro aspecto a considerar es la adaptación de la industria cementera y de la construcción para la producción y uso masivo del LC3: será necesaria inversión en procesos de calcinación de arcillas, así como capacitación técnica para ajustar las dosificaciones en obra. Finalmente, aunque el LC3 presenta reducciones claras en las emisiones de CO₂, aún falta evaluar con detalle el impacto económico de su implementación a gran escala, especialmente en comparación con los costos actuales de producción del cemento Portland. En conjunto, estas consideraciones señalan la necesidad de investigaciones aplicadas futuras que validen la viabilidad técnica, ambiental y económica del LC3 bajo condiciones reales de construcción en Ecuador.

Los presentes hallazgos sugieren que el LC3 puede integrarse de manera efectiva en el diseño de concretos estructurales locales, aportando simultáneamente mejoras en resistencia, durabilidad y sostenibilidad. Desde un punto de vista teórico, nuestros resultados fortalecen los modelos de hidratación y las explicaciones microestructurales de mezclas con arcilla calcinada, proporcionando evidencia valiosa para la ingeniería civil orientada al desarrollo de materiales de bajo carbono. En definitiva, este estudio confirma que el LC3-50 ofrece resistencias mecánicas equivalentes o superiores al OPC, mayor durabilidad frente a la penetración de cloruros y a la carbonatación, ajustes reológicos manejables y una notable reducción de emisiones de CO₂. En el contexto ecuatoriano, estos resultados posicionan al LC3-50 como una alternativa sólida y sostenible para la construcción, vinculando la evidencia científica global con la realidad local, y abriendo nuevas oportunidades tanto para investigaciones aplicadas como para el desarrollo de políticas públicas en pro de una construcción sustentable.

5. Conclusiones

El cemento LC3-50 se consolida como una alternativa técnica, ambiental y económica sólida frente al cemento Portland convencional, representando un avance importante en el estado del arte de los materiales cementantes de bajo carbono. A nivel microestructural, las mezclas con LC3-50 reducen significativamente la porosidad y la conectividad de la matriz cementante, al tiempo que incrementan la resistividad eléctrica; esto se traduce en una microestructura más compacta y resistente al ingreso de agentes agresivos, prolongando la vida útil de las estructuras y asegurando un mejor desempeño en condiciones exigentes.

En cuanto a las propiedades mecánicas, los valores recopilados fueron consistentes en diversas escalas geográficas. A nivel internacional, el LC3-50 alcanza resistencias a compresión típicamente entre 45 y 57 MPa; en estudios sudamericanos, entre 40 y 47 MPa; y en Ecuador llegó a ~45,7 MPa, superando en un 16 % la resistencia del cemento Portland convencional equivalente. Estos resultados evidencian que el LC3-50 no solo mantiene, sino que incluso mejora las propiedades estructurales necesarias para su aplicación práctica en proyectos de construcción, validando su desempeño en distintos contextos.

En términos de durabilidad, el LC3-50 demostró una notable resistencia en ambientes agresivos. Se registraron reducciones de hasta un 83 % en la penetración de cloruros con respecto al OPC, junto con un comportamiento igual o superior frente a la acción de sulfatos. Si bien en condiciones litorales del Ecuador se observó un mayor avance de la carbonatación natural, este fenómeno no comprometió la integridad del material bajo ambientes húmedos, lo que garantiza su aplicabilidad en zonas costeras. Además, la ligera disminución inicial de la trabajabilidad en las mezclas con LC3-50 pudo corregirse fácilmente mediante el uso de aditivos superplastificantes, manteniendo la cohesión y la estabilidad del hormigón fresco sin sacrificar sus beneficios.

Desde el punto de vista ambiental, los análisis de ciclo de vida revisados indican reducciones de entre un 33 % y un 76 % en las emisiones de CO₂ al emplear cementos LC3-50 en lugar de OPC, consolidando a este material como una opción de bajo carbono con gran potencial para mitigar el cambio climático. En el caso ecuatoriano, esta ventaja cobra especial relevancia, ya que la abundancia de arcillas y calizas locales permitiría disminuir la dependencia de Clinker importado, optimizar los costos de producción y fortalecer el compromiso del país con los objetivos internacionales de sostenibilidad.

De manera práctica, los resultados de este estudio sugieren que el cemento LC3-50 puede convertirse en una herramienta estratégica para transformar la industria de la construcción en Ecuador. Su aplicación ofrece una triple ventaja: garantiza la seguridad estructural, reduce de manera significativa la huella de carbono y fomenta la innovación mediante el uso eficiente de recursos locales. Esta combinación lo posiciona como un material clave para vincular la evidencia científica global con las necesidades de la región, sirviendo de puente entre el conocimiento internacional y su implementación a nivel local. Cabe destacar, además, que la tecnología LC3 no compite, sino que se complementa con otras soluciones cementantes de bajo carbono, como los cementos que incorporan cenizas volcánicas. Ambas estrategias pueden aprovecharse en función de la disponibilidad de puzolanas naturales en cada zona, ampliando el abanico de materiales sostenibles que Latinoamérica puede adoptar sin comprometer el rendimiento del hormigón.

No obstante, aún persisten vacíos de conocimiento que deberán abordarse en investigaciones futuras. Es indispensable realizar ensayos prolongados bajo condiciones reales de exposición, incluyendo estructuras completas in situ, para evaluar el desempeño del LC3-50 en distintos escenarios climáticos y ambientales a largo plazo. También resulta prioritario ampliar los estudios frente a otros agentes agresivos poco explorados, tales como ciclos de congelamiento-descongelamiento, exposiciones prolongadas a sulfatos o variaciones térmicas extremas. Finalmente, se recomienda desarrollar análisis de ciclo de vida específicos para el contexto ecuatoriano, que abarquen todas las etapas del material

desde la extracción de materias primas hasta su disposición final con el fin de obtener una valoración más precisa de su impacto ambiental y económico.

Por lo tanto, el cemento LC3-50 no debe considerarse únicamente como un material experimental, sino como una solución real y estratégica para responder a los retos actuales de la construcción sostenible. Su capacidad para combinar un desempeño técnico confiable, una reducción sustancial de emisiones de CO₂ y el aprovechamiento eficiente de recursos locales lo convierten en un aliado fundamental en la transición hacia edificaciones más resilientes, sostenibles y responsables con el medio ambiente. Este estudio de revisión demuestra que la implementación del LC3-50 en Ecuador representa una oportunidad tangible para transformar la manera en que concebimos los materiales de construcción, contribuyendo a una industria más innovadora y firmemente comprometida con el desarrollo sostenible de la región.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Metodología, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Análisis de datos, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Investigación, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Administración del proyecto, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Fuentes de datos: H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Software, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Supervisión, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Validación, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Visualización, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Redacción—preparación del borrador original, H.R., A.B., H.M. y J.Q.; Redacción—revisión y edición, H.R., A.B., H.M. y J.Q. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses en relación con la publicación de este artículo.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

En la elaboración de este artículo, se utilizó Inteligencia Artificial Generativa con el fin de realizar correcciones gramaticales, mejorar la puntuación en la escritura de los textos, así como un soporte en la búsqueda de los artículos científicos utilizados en la investigación y la validación de DOI. Además, se empleó para asistir en la citación de las referencias bibliográficas utilizadas. Sin embargo, todas las ideas, análisis y conclusiones son responsabilidad exclusiva de los autores.

Referencias

- [1] Y. Cancio-Díaz, S. Sánchez-Berriel, U. Heierli, A. R. Favier, I. R. Sánchez-Machado, K. L. Scrivener, J. F. Martirena-Hernández y G. Habert, "Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies," *Development Engineering*, vol. 2, pp. 82-91, 2017, doi: 10.1016/j.deveng.2017.06.001.
- [2] K. L. Scrivener, F. Martirena, S. Bishnoi y S. Maity, "Calcined clay limestone cements (LC3)," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 49-56, dic. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.
- [3] N. Ijaz, W. M. Ye, Z. U. Rehman, Z. Ijaz y M. F. Junaid, "Global insights into micro-macro mechanisms and environmental implications of limestone calcined clay cement (LC3) for sustainable construction

- applications," *Science of the Total Environment*, vol. 907, p. 167794, ene. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167794.
- [4] H. K. Nangulama y S. P. Rimoy, "Effectiveness of bagasse ash incorporating limestone calcined clay cement (LC3) in improving shear strength and durability properties of black cotton soils," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2024, n. 1, ene. 2024, doi: 10.1155/adce/7112465.
- [5] B. Rath, P. T.R., F. Ali, P. Paramasivam, y M. Yusuf, "Eco-friendly innovations in flexural performance of LC3 concrete: Utilizing sugarcane bagasse ash and rubber latex for enhanced sustainability in carbonated industrial environments," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, p. e04578, jul. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04578.
- [6] J. Thorne, D. V. Bompa, M. F. Funari y N. García-Troncoso, "Environmental impact evaluation of low-carbon concrete incorporating fly ash and limestone," *Cleaner Materials*, vol. 12, p. 100242, jun. 2024, doi: 10.1016/j.clema.2024.100242.
- [7] C. Redondo-Soto, A. Morales-Cantero, A. Cuesta, I. Santacruz, D. Gastaldi, F. Canonico y M. Á. García-Aranda, "Limestone calcined clay binders based on a Belite-rich cement," *Cement and Concrete Research*, vol. 163, p. 107018, ene. 2023, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.107018
- [8] K. Scrivener, F. Martirena, S. Bishnoi, y S. Maity, "Calcined clay limestone cements (LC3)," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 49–56, dic. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017.
- [9] J. Liu, W. Zhang, Z. Li, H. Jin y L. Tang, "Mechanics, hydration phase and pore development of embodied-energy and carbon composites based on ultrahigh-volume low-carbon cement with limestone calcined clay," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01299, dic. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01299.
- [10] Y. Chen, S. C. Figueiredo, Z. Li, Z. Chang, K. Jansen, O. Çopuroğlu, y E. Schlangen, "Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture," *Cement and Concrete Research*, vol. 132, p. 106040, jun. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106040
- [11] J. Shao, S. Guo y H. Wang, "A review of the performance, sustainable applications, and research challenges of limestone-calcined clay-cement (LC3) systems," *Coatings*, vol. 15, n. 5, p. 611, may. 2025, doi: 10.3390/coatings15050611.
- [12] I. M. R. Bernal, S. Shirani, A. Cuesta, I. Santacruz y M. A. G. Aranda, "Phase and microstructure evolutions in LC3 binders by multi-technique approach including synchrotron microtomography," *Construction and Building Materials*, vol. 300, p. 124054, sep. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124054.
- [13] Y. Liu, T. Ling, M. Wang y Y. Y. Wu, "Synergic performance of low-kaolinite calcined coal gangue blended with limestone in cement mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 300, p. 124012, sep. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124012.
- [14] M. Mohammadi *et al.*, "Interfacial properties of high-strength limestone-calcined clay cement (LC3) matrix and PE fibers, surface-modified using dopamine and tannic acid," *Construction and Building Materials*, vol. 408, p. 133537, dic. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133537.
- [15] W. Jin, C. Roux, C. Ouellet-Plamondon y J.-F. Caron, "Life-cycle assessment of limestone calcined clay concrete: Potential for low-carbon 3D printing," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 41, p. e01119, sep. 2024, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e01119.
- [16] K. Ram, M. Serdar, D. Londono-Zulua y K. Scrivener, "The effect of pore microstructure on strength and chloride ingress in blended cement based on low-kaolin clay," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01242, dic. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01242.
- [17] B. Ayati, D. Newport, H. Wong, y C. Cheeseman, "Low-carbon cements: Potential for low-grade calcined clays to form supplementary cementitious materials," *Cleaner Materials*, vol. 5, p. 100099, sep. 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100099
- [18] F. R. Carnerio Ribeiro *et al.*, "Assessing hydration kinetics and rheological properties of Limestone Calcined Clay Cement (LC3): Influence of clay-mitigating and superplasticizer admixtures," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e03364, jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03364
- [19] M. A. Jungclaus, S. L. Williams, J. H. Arehart, y W. V. Srubar III, "Whole-life carbon emissions of concrete mixtures considering maximum CO₂ sequestration via carbonation," *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 206, p. 107605, jul. 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107605

- [20] B. Kanagaraj, N. Anand, U. J. Alengaram, R. S. Raj, y S. Karthick, "Limestone calcined clay cement (LC3): A sustainable solution for mitigating environmental impact in the construction sector," *Resources, Conservation & Recycling Advances*, vol. 21, p. 200197, may. 2024, doi: 10.1016/j.rcradv.2023.200197
- [21] M. Abdulqader, et al., "Physicochemical properties of LC3 concrete made using Saudi clays," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, pp. 2769-2783, jul. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.06.114
- [22] N. Cantisani, J. L. Svensen, O. F. Hansen, y J. B. Jørgensen, "Dynamic modeling and simulation of a flash clay calciner," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, n. 14, pp. 283-288, 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.08.350
- [23] Y. Chen, Y. Zhang, S. He, X. Liang, E. Schlangen, y O. Çopuroğlu, "Improving structural build-up of limestone-calcined clay-cement pastes by using inorganic additives," *Construction and Building Materials*, vol. 392, p. 131959, ago. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131959
- [24] Y. A. Al-Noaimat, et al., "3D printing of limestone-calcined clay cement: A review of its potential implementation in the construction industry," *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101115, jun. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101115
- [25] M. H. Riaz, Y. Zhou, M. Guo, B. Xi, y S. Xiang, "Development of LC3-ECC incorporating recycled fine aggregate: A novel sustainable and ductile material," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, p. e04547, jul. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04547
- [26] Y. Hu, L. Xiong, Y. Yan, and G. Geng, "Performance of limestone calcined clay cement (LC3) incorporating low-grade marine clay," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e03283, jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03283
- [27] L. Cheng, R. Kurihara, T. Ohkubo, R. Kitagaki, A. Teramoto, Y. Suda, y I. Maruyama, "Plugging effect of fine pore water in OPC and LC3 paste during accelerated carbonation monitored via single-sided nuclear magnetic resonance spectroscopy," *Cement and Concrete Research*, vol. 186, p. 107688, dic. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107688
- [28] Q. Luo, X. Zhang, J. Yu, y G. Geng, "Influence of metakaolin content on the microstructure and strength in hardened LC3 paste," *CEMENT*, vol. 19, p. 100138, mar. 2025, doi: 10.1016/j.cement.2025.100138
- [29] G. Ascensão, E. Farinini, V. M. Ferreira, y R. Leardi, "Development of eco-efficient limestone calcined clay cement (LC3) mortars by a multi-step experimental design," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 253, p. 105195, oct. 2024, doi: 10.1016/j.chemolab.2024.105195.
- [30] K. Fan, P. Du, y Y. Yao, "Compressive stress-strain relationship of limestone calcined clay cement-based UHPC matrix," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, p. e04274, jul. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04274
- [31] Y.-S. Wang, T. Kim, R. Lin, J. Li, y X.-Y. Wang, "Improved high-temperature resistance of limestone calcined clay cement (LC3) paste with biochar: Multiscale evaluation and mechanistic analysis," *Developments in the Built Environment*, vol. 18, p. 100403, abr. 2024, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100403
- [32] A. Akindahunsi, F. Avet, y K. Scrivener, "The influence of some calcined clays from Nigeria as clinker substitute in cementitious systems," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 13, p. e00411, dic. 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00443
- [33] J. M. Marangu, "Physico-chemical properties of Kenyan made calcined Clay-Limestone cement (LC3)," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 12, p. e00333, jun. 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00333
- [34] H. Wang, L. Wang, X. Qian, K. Cao, Y. Xu, Y. Fang, y L. Cui, "Hydration, compressive strength and durability of eco-friendly cement mortars containing recycled brick powder and metakaolin," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 26, n. 9, pp. 4023–4037, sep. 2022, doi: 10.1007/s12205-022-0035-3
- [35] Y.-S. Wang y X.-Y. Wang, "Multi-characterizations of hydration, microstructure and mechanical properties of a biochar-LC3 mixture," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 3691-3703, may. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.04.033
- [36] X. Li, A. Wanner, C. Hesse, S. Friesen, y J. Dengler, "Clinker-free cement based on calcined clay, slag, portlandite, anhydrite and C-S-H seeding: An SCM-based low-carbon cementitious binder approach," *Construction and Building Materials*, vol. 442, p. 137546, sep. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137546

- [37] Y. Yu, C. Gunasekara, Y. Elakneswaran, D. Robert, D. W. Law, y S. Setunge, "On the hydration of limestone-calcined kaolinitic clay cement and energy-efficient production," *Cement and Concrete Composites*, vol. 153, p. 105698, oct. 2024, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105698
- [38] L. Muchui Mugambi, S. Mujombi, V. Mutai, J. Ratumo Toeri, J. Mwit Marangu, y L. Valentini, "Potential of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) in soil stabilization for application in roads and pavements construction," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03706, dic. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03706
- [39] S. Mukherjee, R. Kumar, M. Behera, A. Goyal, y M. R. Rahman, "Rheology, mechanical properties and microstructure characterization of limestone calcined clay cement (LC3) incorporated sustainable lightweight self-compacting concrete," *Developments in the Built Environment*, vol. 21, p. 100601, mar. 2025, doi: 10.1016/j.dibe.2025.100601
- [40] N. Song, Y. Huang, G. Yang, X. Liu, y W. You, "Incorporation of limestone calcined clay cement (LC3), seawater and sea-sand in ultra-high-performance engineered cementitious composites (UHPECC): Mechanical properties, hydration and microstructure," *Structures*, vol. 75, p. 108686, may 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.108686
- [41] E. S. Arruda Junior, N. T. de Sales Braga, y M. S. Barata, "Life cycle assessment to produce LC3 cements with kaolinitic waste from the Amazon region, Brazil," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01729, jul. 2023. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01729
- [42] C. S. Malacarne, M. R. Cardoso da Silva, S. Danieli, V. Gonçalves Maciel, y A. P. Kirchheim, "Environmental and technical assessment to support sustainable strategies for limestone calcined clay cement production in Brazil," *Construction and Building Materials*, p. 125261, dic. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125261
- [43] V. Letelier, J. M. Ortega, R. M. Tremiño, B. I. Henriquéz-Jara, I. Fustos, T. Real-Herraiz, G. Moriconi, M. Á. Climent, y I. Sánchez, "The use of volcanic powder as a cement replacement for the development of sustainable mortars," *Applied Sciences*, vol. 10, n. 4, p. 1460, feb. 2020, doi: 10.3390/app10041460
- [44] R. A. Robayo-Salazar, J. Mejía-Arcila, R. Mejía de Gutiérrez, y E. Martínez, "Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 176, pp. 103–111, jul. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.017
- [45] C. E. T. Balestra, L. R. Garcez, L. C. da Silva, M. T. Veit, E. Jubanski, A. Y. Nakano, M. H. Pietrobelli, R. Schneider, y M. A. R. Gil, "Contribution to low-carbon cement studies: Effects of silica fume, fly ash, sugarcane bagasse ash and açai stone ash incorporation in quaternary blended limestone-calcined clay cement concretes," *Environmental Development*, vol. 45, p. 100792, mar. 2023, doi: 10.1016/j.envdev.2022.100792
- [46] J. F. Garcés-Vargas, Y. Díaz-Cardenas, y J. F. Martirena-Hernández, "Evaluation of the durability of concrete with the use of calcined clays and limestone in Salinas, Ecuador," *Minerals*, vol. 14, n. 5, p. 460, abr. 2024, doi: 10.3390/min14050460.
- [47] O. Canbek, N. R. Washburn, y K. E. Kurtis, "Relating LC3 microstructure, surface resistivity and compressive strength development," *Cement and Concrete Research*, vol. 160, p. 106920, oct. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106920
- [48] Q. D. Nguyen, M. Khan, y A. Castel, "Chloride diffusion in limestone flash calcined clay cement concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 117, n. 6, pp. 165–175, nov. 2020, doi: 10.14359/51725986
- [49] Y. Wang, Z. Xu, T. Mi, J. Yu, F. Xing, y W. Li, "Corrosion mechanism of reinforcement in LC3 cement pastes under coupled carbonation and chloride attack," *Cement and Concrete Composites*, vol. 140, p. 105080, jul. 2023, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105080.