

Revisión sistemática sobre el uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario: propiedades mecánicas y de durabilidad para aplicaciones en Ecuador.

L. J. Fernández-Sánchez^{1*} , L. M. Fernández-Delgado² , D. E. Fernández-Sánchez³ ,
R. S. Quintana-Vásconez¹ , Y. Díaz-Cárdenas⁴ , S. G. Castro-Angulo^{1,5} 

*Autor de Contacto: ljfernandez@pucesa.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1010>

Recibido: 05/01/2026 | Correcciones recibidas: 12/08/2026 | Aceptado: 21/08/2026 | Publicado: 01/09/2026

RESUMEN

Esta revisión sistemática evalúa el uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario en morteros y concretos, con énfasis en su aplicabilidad al contexto ecuatoriano. Se analizaron estudios indexados mediante una estrategia bibliométrica y una síntesis técnica de desempeño mecánico, durabilidad y mecanismos puzolánicos. Los resultados muestran rangos favorables de sustitución entre 10–25%, asociados al refinamiento poral y a la formación de C-S-H/C-A-S-H. No obstante, su ampliación está limitada por la variabilidad química, la finura, la disponibilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la caracterización local. La originalidad radica en discutir estos límites frente a la reducción del factor clínker. Se concluye que su aplicación requiere validación técnica, normativa, logística e industrial.

Palabras clave: ceniza volcánica; material cementante suplementario; durabilidad; reacción puzolánica; factor clínker.

Citar como: Fernández-Sánchez, L. J., Fernández-Delgado L. M., Fernández-Sánchez, D. E., Quintana-Vásconez, R. S., Díaz-Cárdenas, Y., Castro-Angulo, S. G. (2026), “Revisión sistemática sobre el uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario: propiedades mecánicas y de durabilidad para aplicaciones en Ecuador.”, Revista ALCONPAT, 16 (3), pp. 372 – 410, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1010>

¹ Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, Ambato-Ecuador.

² Universidad Tecnológica Indoamérica, Ambato-Ecuador.

³ Investigador independiente, Ambato-Ecuador.

⁴ Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara-Cuba.

⁵ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, (FIC-UANL), Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León 66455, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor L.J. Fernández-Sánchez lideró y contribuyó en la búsqueda, selección, extracción y organización de literatura científica (50%), en la síntesis de la información e integración final de los resultados (60%) y en la redacción y revisión crítica del contenido y manuscrito (70%); el autor R.S. Quintana-Vásconez contribuyó en la búsqueda, selección, extracción y organización de literatura (35%), en el análisis temático y la interpretación de los estudios incluidos (60%); el autor D.E. Fernández-Sánchez contribuyó en la búsqueda, selección, extracción y organización de literatura (15%) y en la definición, verificación, validación de la consistencia metodológica (35%); el autor L.M. Fernández-Delgado contribuyó en la definición de los criterios metodológicos (35%) y en la redacción y revisión crítica del contenido y manuscrito (15%); el autor Y. Díaz-Cárdenas contribuyó en el análisis temático y la interpretación de los estudios incluidos (40%); y S.G. Castro-Angulo contribuyó en la validación metodológica (30%), la redacción y revisión crítica del contenido y manuscrito (15%) y en la síntesis de la información e integración final de los resultados (40%).

Systematic review on the use of volcanic ash as a supplementary cementitious material: mechanical and durability properties for applications in Ecuador.

ABSTRACT

This systematic review evaluates volcanic ash as a supplementary cementitious material in mortars and concretes, emphasizing its applicability to the Ecuadorian context. Indexed studies were analyzed through a bibliometric strategy and a technical synthesis of mechanical performance, durability, and pozzolanic mechanisms. Results show favorable replacement ranges of 10–25%, associated with pore refinement and C-S-H/C-A-S-H formation. However, wider implementation is limited by chemical variability, fineness, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ availability, and the need for local characterization. The originality of this review lies in discussing these technical limits in relation to clinker factor reduction. It is concluded that its application requires technical, normative, logistical, and industrial validation.

Keywords: volcanic ash; supplementary cementitious material; durability; pozzolanic reaction; clinker factor.

Revisão sistemática sobre o uso de cinzas vulcânicas como material cimentício suplementar: propriedades mecânicas e de durabilidade para aplicações no Equador.

RESUMO

Esta revisão sistemática avalia o uso de cinza vulcânica como material cimentício suplementar em argamassas e concretos, com ênfase em sua aplicabilidade no contexto equatoriano. Foram analisados estudos indexados por meio de uma estratégia bibliométrica e de uma síntese técnica do desempenho mecânico, da durabilidade e dos mecanismos pozolânicos. Os resultados mostram faixas favoráveis de substituição entre 10% e 25%, associadas ao refinamento da estrutura porosa e à formação de C-S-H/C-A-S-H. No entanto, sua ampliação é limitada pela variabilidade química, pela finura, pela disponibilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e pela necessidade de caracterização local. A originalidade reside na discussão desses limites frente à redução do fator clínquer. Conclui-se que sua aplicação requer validação técnica, normativa, logística e industrial.

Palavras-chave: cinza vulcânica; material cimentício suplementar; durabilidade; reação pozolânica; fator clínquer.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2027.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. TABLA DE NOMENCLATURAS

Acrónimo	Significado
C-S-H	Silicato de Calcio Hidratado
C-A-S-H	Aluminosilicato de Calcio Hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Calcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
SCM	Materiales cementantes suplementarios
GWP100	Potencial de calentamiento global
TAP100	Potencial de acidificación terrestre
FEP	Potencial de eutrofización de agua dulce
MEP	Potencial de eutrofización marina
ODP _{inf}	Potencial de agotamiento de la capa de ozono
POFP	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos
PMFP	Potencial de formación de materia particulada
FDP	Potencial de agotamiento de combustibles fósiles
EC	Ecuador
GLO	Global
CV	Ceniza Volcánica
SiO ₂	Dióxido de Silicio
Al ₂ O ₃	Óxido de Aluminio
Fe ₂ O ₃	Óxido de Hierro III
CaO	Óxido de Calcio
PRISMA	Ítems de referencia preferidos para revisiones sistemáticas y metaanálisis
MgO	Óxido de Magnesio
K ₂ O	Óxido de Potasio
Na ₂ O	Óxido de Sodio
SO ₃	Óxido de Azufre
D ₅₀	Tamaño medio de partículas
BET	Brunauer-Emmett-Teller
ITZ	Zona de transición interfacial
AFm	Monosulfato de ferrita de aluminato
XRF	Fluorescencia de Rayos X
LOI	Pérdidas por Ignición
ACV	Análisis de Ciclo de Vida

2. INTRODUCCIÓN

La industria del cemento constituye uno de los sectores industriales más intensivos en carbono, debido principalmente a la producción de clínker Portland. A escala global, la fabricación de cemento representa aproximadamente entre el 7% y el 8% de las emisiones antropogénicas de CO₂, mientras que la intensidad directa de emisiones del cemento se ha mantenido cercana a 0,6 t de

CO₂ por tonelada de cemento producido en los últimos años (Garces-Vargas et al., 2024; Rovnaník et al., 2007; N. Singh et al., 2023). Esta condición se explica por la doble contribución de la calcinación de la caliza y el consumo energético del horno, lo que convierte la reducción del factor clínker en una estrategia prioritaria para disminuir la huella ambiental del concreto. En este contexto, el uso de materiales cementantes suplementarios (SCM) permite reemplazar parcialmente el cemento Portland, reducir el contenido de clínker y valorizar recursos minerales o subproductos con menor impacto ambiental (Fernández-Jiménez et al., 2023; A. Rajesh et al., 2023; Sharma et al., 2021). La ceniza volcánica, por su origen natural, potencial disponibilidad en regiones volcánicas y comportamiento puzolánico, constituye una alternativa relevante para sistemas cementantes sostenibles, especialmente en el contexto andino, donde Ecuador presenta condiciones geológicas favorables para el estudio de puzolanas naturales de origen volcánico (Cascone et al., 2025; M. U. Hossain et al., 2021; Pinto-Almeida et al., 2025; Sokołowska, 2025).

Tradicionalmente, la reducción del factor clínker se ha sustentado en el uso de SCM reportados como los subproductos industriales y las puzolanas naturales como ceniza volante, escoria granulada de alto horno, humo de sílice y puzolanas naturales. Sin embargo, la disponibilidad futura de estos, es limitada tanto por la disponibilidad como por transformaciones estructurales asociadas a la transición energética, particularmente la disminución del uso de carbón en generación eléctrica y la descarbonización progresiva de sectores metalúrgicos. Esta situación refuerza la necesidad de identificar fuentes alternativas de SCM que no dependan exclusivamente de cadenas industriales intensivas en carbono. En este sentido, las puzolanas naturales y las cenizas volcánicas adquieren relevancia estratégica, ya que pueden contribuir a la reducción del contenido de clínker sin depender de la disponibilidad futura de ceniza volante o escoria.

En el caso ecuatoriano, la producción de clínker concentra la mayor contribución ambiental dentro del sistema cementero evaluado, superando el 90% en varias categorías de impacto reportadas para la unidad funcional analizada, como se observa en la Figura 1. Este impacto es especialmente significativo en GWP100, PMFP y POFP a causa de la calcinación y combustión del horno. La producción de coque de petróleo (GLO) es la principal responsable del agotamiento de los combustibles fósiles (FDP) y contribuye a la acidificación terrestre (TAP100). El suministro de electricidad y la extracción de recursos naturales tienen un impacto en la eutrofización del agua dulce (FEP) y del mar (MEP). Con el fin de reducir los impactos más significativos del proceso cementero, se proponen las siguientes medidas prioritarias: optimizar el consumo energético, incorporar combustibles alternativos, avanzar en la descarbonización eléctrica y disminuir el factor de clínker a través de SCM (especialmente ceniza volcánica).

Desde el punto de vista físico-químico, la eficiencia de los SCM depende de su composición química y mineralógica, fracción amorfa, finura, superficie específica y capacidad para reaccionar con la portlandita Ca(OH)₂ generada durante la hidratación del cemento Portland. En sistemas cementicios con ceniza volcánica, las fases silicoaluminosas reactivas no actúan de manera aislada, sino en interacción con el calcio disponible en la matriz. Esta reacción puzolánica puede favorecer la formación secundaria de geles C-S-H y C-A-S-H, similares en función cementante a los productos principales de hidratación del cemento Portland, contribuyendo al refinamiento de la red porosa, la reducción de la conectividad capilar y la mejora del desempeño mecánico y químico frente al ingreso de agentes agresivos. No obstante, en sustituciones elevadas, la menor cantidad de clínker reduce la generación de Ca(OH)₂, lo que puede limitar la reacción puzolánica y dejar fracciones de ceniza sin reaccionar (Fernandes et al., 2025; Játiva et al., 2025; Kupwade-Patil, De Wolf, et al., 2018; Shahjalal et al., 2025; S. Singh et al., 2026; Tomoyose et al., 2020).

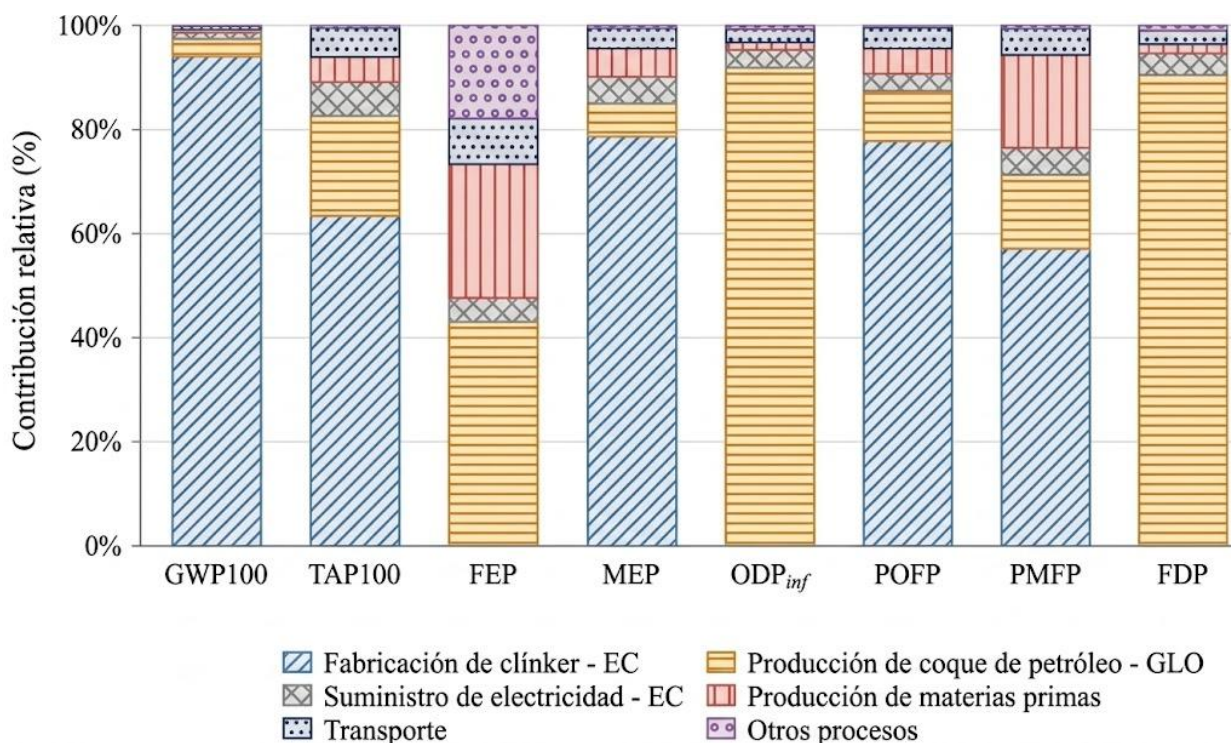


Figura 1. Contribución relativa de los procesos productivos a las categorías de impacto ambiental por tonelada métrica de clínker (unidad funcional). GWP100: potencial de calentamiento global; TAP100: potencial de acidificación terrestre; FEP: potencial de eutrofización de agua dulce; MEP: potencial de eutrofización marina; ODP_{inf}: potencial de agotamiento de la capa de ozono; POFP: potencial de formación de oxidantes fotoquímicos; PMFP: potencial de formación de materia particulada; FDP: potencial de agotamiento de combustibles fósiles; EC: Ecuador; GLO: global. Fuente: adaptado de (Petroche & Ramirez, 2022).

Ecuador se localiza en el Cinturón de Fuego del Pacífico y forma parte de una región andina caracterizada por actividad volcánica recurrente, emisiones de ceniza y presencia de depósitos piroclásticos. Esta condición geológica sugiere la existencia de fuentes potenciales de materiales volcánicos con interés para aplicaciones cementantes; sin embargo, su aprovechamiento como SCM no puede asumirse únicamente a partir de su origen volcánico. La viabilidad técnica depende de la composición química, mineralogía, fracción amorfa, finura, reactividad puzolánica, accesibilidad del material, continuidad de suministro y compatibilidad con cementos y agregados locales (Pinos-Velez et al., 2024; Toulkeridis & Zach, 2017).

En el contexto ecuatoriano, la valorización de ceniza volcánica como SCM enfrenta limitaciones que van más allá de la disponibilidad geológica. Entre ellas se encuentran la necesidad de laboratorios especializados para caracterización físico-química y mineralógica, los costos asociados al secado, molienda y clasificación del material, la variabilidad espacial y temporal de las cenizas, las restricciones de acceso a ciertas zonas por condiciones geográficas o ambientales, y la distancia entre las fuentes potenciales y las plantas cementeras o concreteras. Además, la posible localización de depósitos en zonas protegidas o de difícil acceso puede limitar su extracción y aprovechamiento industrial. Por tanto, la aplicación de ceniza volcánica en Ecuador requiere una evaluación integrada de desempeño técnico, impacto ambiental, costos de beneficio, logística y cumplimiento normativo (Cavaliere et al., 2024; Mohamad et al., 2020).

Aunque existe investigación creciente sobre el uso de CV en materiales de construcción, aún no hay un consenso claro sobre los rangos óptimos de sustitución ni sobre su efecto en propiedades mecánicas y de durabilidad. La evidencia es dispersa debido a la variabilidad química y física de la CV según su origen, lo que dificulta establecer recomendaciones técnicas sólidas para una

aplicación segura y eficiente a nivel industrial, esta variabilidad se manifiesta en diferencias significativas en el contenido de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , álcalis, fase amorfa, fases cristalinas, tamaño de partícula y superficie específica. Dichos parámetros condicionan la velocidad de reacción puzolánica, la demanda de agua, el efecto filler, la disponibilidad de calcio para la formación de C-S-H/C-A-S-H y, en consecuencia, el desempeño mecánico y la resistencia al ataque químico. (Gil-Martín et al., 2025; Shahjalal et al., 2025; Sokołowska, 2025). Por lo tanto, se hace necesaria una consolidación de los hallazgos para establecer una base de conocimiento que facilite su adopción en normativas y prácticas constructivas, especialmente en un contexto como el ecuatoriano.

En este marco, la presente revisión sistematizada tiene como objetivo evaluar críticamente el uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario en morteros y concretos, considerando: (i) su efecto sobre la resistencia a compresión y flexión; (ii) su influencia en la durabilidad, particularmente sobre la permeabilidad, el transporte de cloruros, el ataque por sulfatos y la carbonatación; (iii) los mecanismos puzolánicos y microestructurales que explican su desempeño; y (iv) los límites técnicos de los rangos de sustitución frente a la reducción del factor clínker y su posible aplicación en Ecuador. A diferencia de revisiones centradas únicamente en porcentajes de sustitución o propiedades mecánicas, este trabajo integra el análisis bibliométrico de la producción científica, la síntesis técnica de propiedades mecánicas y de durabilidad, la caracterización físico-química de las cenizas volcánicas y una discusión crítica de las condiciones necesarias para su valorización en el contexto ecuatoriano.

3. PROCEDIMIENTO

3.1 Descripción del enfoque metodológico, estrategia de búsqueda y selección

Este estudio se desarrolló como una revisión sistematizada de literatura con análisis bibliométrico complementario, orientada a sintetizar evidencia científica sobre el uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario en morteros y concretos. El procedimiento metodológico se organizó en cinco etapas: definición de preguntas de investigación, búsqueda bibliográfica, aplicación de criterios de inclusión y exclusión, extracción de datos técnicos y análisis bibliométrico-temático.

La revisión no fue planteada como un metaanálisis estadístico, debido a la heterogeneidad de los estudios incluidos en cuanto a origen de la ceniza volcánica, composición química, finura, porcentaje de sustitución, relación agua/material cementante, edad de ensayo, tipo de mezcla y método experimental, estos son datos relevantes que permiten el análisis crítico. Por ello, la síntesis se realizó de forma narrativa y comparativa, identificando tendencias, rangos de desempeño, mecanismos reportados y limitaciones técnicas para su aplicación en el contexto ecuatoriano.

Se consideraron exclusivamente artículos indexados en Scopus, por su prestigio, rigor editorial y amplia cobertura en materiales de construcción, ingeniería civil y sostenibilidad. El proceso se organizó en tres fases: búsqueda, filtrado y selección final, guiadas por tres preguntas de investigación específicas.

1. ¿Cómo influye el contenido de ceniza volcánica en la resistencia a compresión y flexión de morteros y concretos?
2. ¿Qué efecto tiene la ceniza volcánica en la durabilidad de morteros y concretos frente a sulfatos y en su permeabilidad?
3. ¿Cuáles son los rangos óptimos de contenido de ceniza volcánica para un uso sostenible y eficiente?

Estas preguntas permitieron definir los descriptores de búsqueda y los operadores booleanos o lógicos utilizados en Scopus, combinando términos como “volcanic ash”, “supplementary cementitious materials”, “compressive strength”, “flexural strength”, “durability”, “sulfate

resistance”, y “permeability”. Se aplicaron filtros para restringir los resultados a artículos revisados por pares, publicados entre 2011 y 2025, en inglés o español, dentro de las áreas temáticas de ingeniería, ciencias de los materiales y ciencias ambientales.

3.2 Fuente de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en la base de datos Scopus, seleccionada por su cobertura en ingeniería civil, ciencia de materiales, tecnología del concreto, sostenibilidad y materiales cementantes. La consulta se orientó a identificar artículos científicos y revisiones relacionados con ceniza volcánica, puzolanas naturales y materiales cementantes suplementarios aplicados a morteros y concretos.

La cadena de búsqueda utilizada fue: TITLE-ABS-KEY(("volcanic ash" OR "natural pozzolan" OR "natural pozzolans" OR "volcanic pozzolan" OR "volcanic pozzolans") AND ("supplementary cementitious material" OR "supplementary cementitious materials" OR SCM OR pozzolan) AND (concrete OR mortar) AND (strength OR durability OR permeability OR "sulfate resistance" OR "pozzolanic activity" OR "pozzolanic reactivity" OR microstructure OR "chemical composition" OR XRD OR XRF OR SEM OR "particle size" OR fineness OR "specific surface area")) AND (DOCTYPE(ar) OR DOCTYPE(re)) AND PUBYEAR > 2010

Esta decisión permitió mantener una base documental homogénea y trazable para el análisis bibliométrico; sin embargo, se reconoce que el uso de una sola base de datos puede limitar la exhaustividad de la revisión e introducir sesgo de cobertura. Por tanto, la ausencia de bases complementarias como Web of Science se declara como una limitación metodológica del estudio y deberá ser considerada en futuras revisiones ampliadas.

3.3 Criterios de Inclusión y Exclusión

Los registros identificados fueron evaluados en dos niveles. El primer nivel correspondió al análisis bibliométrico, en el cual se consideraron todos los documentos recuperados por la cadena de búsqueda y filtros aplicados en Scopus. El segundo nivel correspondió a la síntesis técnica, para la cual se seleccionaron únicamente los estudios que aportaban información verificable sobre mezclas de mortero o concreto con ceniza volcánica como SCM.

Se incluyeron estudios que cumplieron los siguientes criterios:

- Evaluar morteros, pastas o concretos con ceniza volcánica, puzolana volcánica, escoria volcánica o material volcánico natural utilizado como SCM.
- Reportar porcentaje de sustitución, dosificación o proporción de incorporación del material volcánico.
- Presentar al menos una propiedad mecánica, de durabilidad, microestructural o físico-química.
- Incluir información sobre resistencia a compresión, flexión, permeabilidad, ataque por sulfatos, transporte de agentes agresivos, actividad puzolánica, composición química, mineralogía, finura o tamaño de partícula.
- Corresponder a artículos científicos o revisiones indexadas, publicados dentro del periodo definido para la búsqueda.
- Incluir estudios sobre pastas, morteros o concretos basados en cemento Portland o sistemas cementantes comparables, en los que la ceniza volcánica, puzolana volcánica o material volcánico natural se utilice como SCM.

Se excluyeron documentos que:

- Estudios en los que la ceniza volcánica formaba parte de mezclas multicomponente, pero sin reportar resultados que permitieran distinguir su efecto individual o su contribución específica dentro del sistema cementante.

- No reportaban datos técnicos comparables sobre composición, dosificación, desempeño o caracterización.
- Correspondían a documentos no revisados por pares, resúmenes, editoriales, notas técnicas o comunicaciones sin datos experimentales.
- Presentaban duplicidad documental o información insuficiente para la extracción de datos.

3.4 Proceso de cribado y selección de estudios

La búsqueda inicial permitió identificar 422 registros en Scopus. Estos documentos constituyeron la base para el análisis bibliométrico general, incluyendo evolución temporal de publicaciones, áreas temáticas, fuentes, países y palabras clave. Sin embargo, no todos los registros fueron utilizados para la extracción técnica de datos, debido a que varios documentos correspondían a estudios generales sobre puzolanas naturales, materiales cementantes suplementarios o aplicaciones no directamente comparables con morteros y concretos con ceniza volcánica.

Posteriormente, los registros fueron sometidos a un proceso de cribado por título, resumen y palabras clave. En esta etapa se excluyeron 262 documentos por no corresponder directamente al uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario en sistemas cementantes, por abordar aplicaciones no relacionadas con morteros o concretos, o por no presentar información técnica pertinente para los objetivos de la revisión. Luego, 160 documentos fueron evaluados a texto completo, excluyéndose 50 documentos por no reportar datos suficientes sobre dosificación, desempeño mecánico, durabilidad, caracterización físico-química o mecanismos puzolánicos. Finalmente, 110 estudios fueron incluidos en la síntesis técnica de resultados.

Para mejorar la trazabilidad del proceso, se incorporó un diagrama de flujo (Figura 2) de selección de estudios y una tabla suplementaria con los documentos incluidos en la síntesis técnica, indicando autor, año, tipo de material volcánico, porcentaje de sustitución, tipo de matriz cementante, propiedades evaluadas y principales hallazgos.

El proceso de identificación, cribado, evaluación a texto completo e inclusión se resume en la Figura 2. De los 422 registros identificados, 110 estudios cumplieron los criterios establecidos para la síntesis técnica.

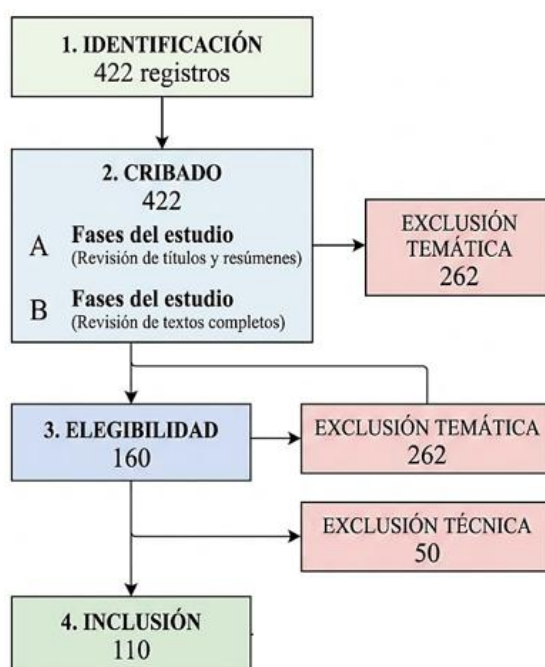


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de búsqueda, cribado e inclusión de estudios.

Fuente: elaboración propia.

Los 422 registros recuperados en Scopus se utilizaron para el análisis bibliométrico. La síntesis técnica se realizó únicamente con los 110 estudios que cumplieron los criterios de inclusión y que aportaron información verificable sobre dosificación, desempeño mecánico, durabilidad, caracterización físico-química o mecanismos puzolánicos de la ceniza volcánica como material cementante suplementario.

3.5 Extracción y síntesis de datos.

La extracción de datos se realizó únicamente sobre los 110 estudios incluidos en la síntesis técnica. Para cada estudio se registraron variables bibliográficas, metodológicas y tecnológicas. Las variables bibliográficas incluyeron autor, año y fuente de publicación. Las variables metodológicas consideraron tipo de matriz cementante, porcentaje de sustitución, relación agua/material cementante, edad de ensayo y condiciones de curado. Las variables tecnológicas incluyeron resistencia a compresión y flexión, permeabilidad, resistencia frente a sulfatos, transporte de cloruros, composición química, mineralogía, finura, tamaño de partícula, superficie específica, actividad puzolánica y productos de hidratación reportados.

La síntesis se desarrolló mediante comparación narrativa y análisis temático, agrupando los hallazgos en cuatro ejes: desempeño mecánico, durabilidad, mecanismos físico-químicos y viabilidad de aplicación (Figura 3). Debido a la heterogeneidad de materiales, diseños experimentales y condiciones de ensayo, no se aplicó metaanálisis cuantitativo.

La secuencia general de búsqueda, procesamiento bibliométrico, selección de variables y presentación de resultados se representa en la Figura 3.

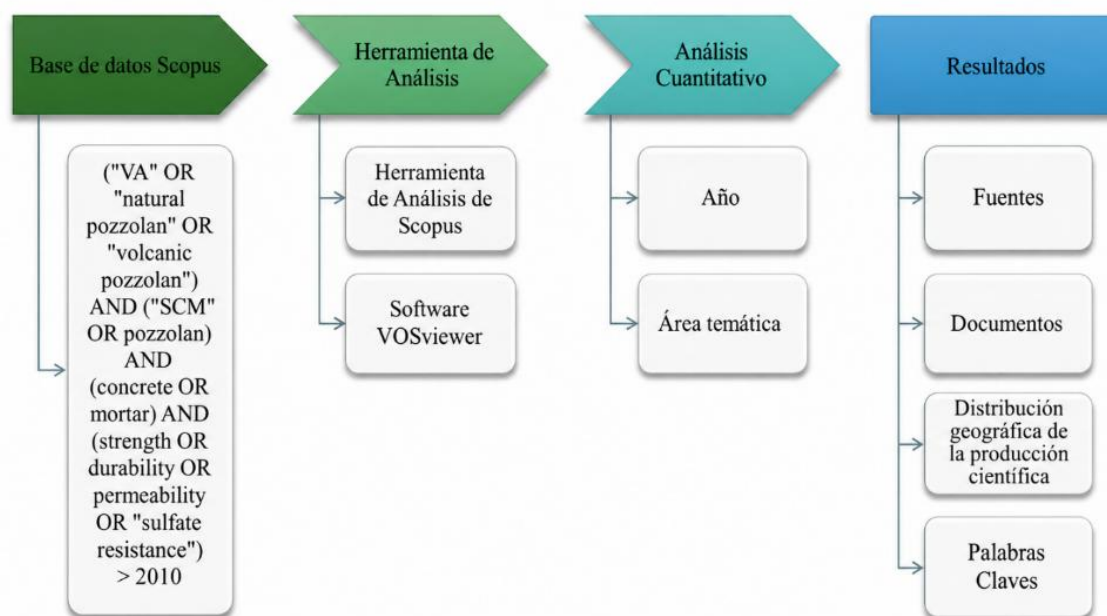


Figura 3. Metodología de búsqueda.

Fuente: elaboración propia.

3.6 Análisis bibliométrico y análisis técnico.

El análisis bibliométrico y la síntesis técnica se desarrollaron como componentes diferenciados. El análisis bibliométrico se aplicó al conjunto completo de registros recuperados en Scopus, con el objetivo de identificar tendencias de publicación, áreas temáticas, fuentes principales, distribución geográfica, colaboración científica y coocurrencia de palabras clave. Para este análisis se utilizó VOSviewer y herramientas de exportación de Scopus.

La síntesis técnica, en cambio, se limitó a los estudios que cumplieron los criterios de inclusión para extracción de datos sobre desempeño mecánico, durabilidad, caracterización físico-química y mecanismos puzolánicos. Por tanto, los 422 registros iniciales no deben interpretarse como el número de estudios incluidos en la discusión técnica, sino como la base documental del análisis bibliométrico.

3.7 Limitaciones metodológicas.

El uso exclusivo de Scopus constituye una limitación del estudio, ya que puede restringir la cobertura documental frente a revisiones que integran bases complementarias como Web of Science. Esta decisión se adoptó para mantener homogeneidad bibliométrica y trazabilidad en los metadatos analizados; sin embargo, los resultados deben interpretarse considerando este posible sesgo de cobertura. Asimismo, el estudio no fue registrado bajo un protocolo PRISMA ni se planteó como metaanálisis, debido a la heterogeneidad de los estudios disponibles en cuanto a origen de las cenizas, composición química, finura, matrices cementantes, condiciones de curado, edades de ensayo y métodos de evaluación. Por esta razón, se optó por una revisión sistematizada con análisis bibliométrico y síntesis narrativa, orientada a identificar tendencias, mecanismos y limitaciones técnicas más que a estimar un tamaño de efecto estadístico.

Dado que el objetivo del artículo incluye discutir la aplicabilidad de la ceniza volcánica en Ecuador, se realizó una búsqueda complementaria de carácter contextual orientada a identificar literatura y documentos relacionados con actividad volcánica, depósitos de ceniza, puzolanas naturales y materiales volcánicos en el contexto ecuatoriano. Esta búsqueda no se utilizó para construir el análisis bibliométrico global, sino para apoyar la discusión aplicada sobre oportunidades, restricciones y necesidades de validación local (Figura 4).

De este modo, la revisión técnica se sustentó en evidencia internacional sobre desempeño de cenizas volcánicas como SCM, mientras que el enfoque ecuatoriano se incorporó como eje de discusión contextual y de transferencia tecnológica.

La Figura 4 diferencia los dos componentes del estudio: el análisis bibliométrico aplicado a los 422 registros recuperados en Scopus y la síntesis técnica desarrollada con los 110 estudios finalmente incluidos.

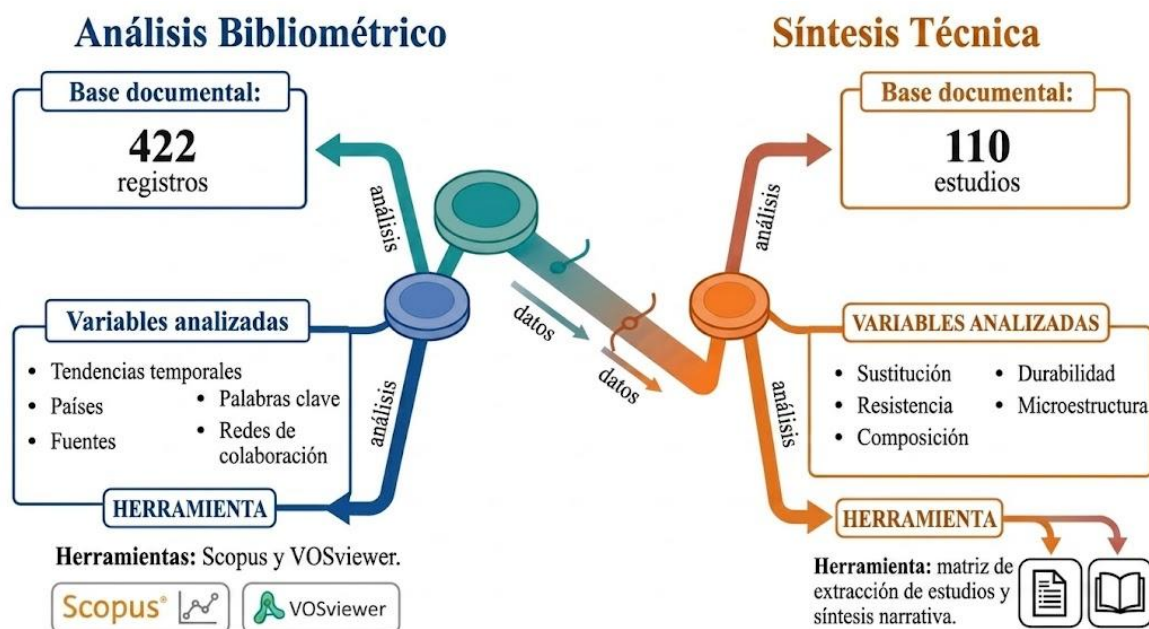


Figura 4. Diferenciación entre análisis bibliométrico y síntesis técnica.

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

Los resultados se presentan en dos niveles complementarios. En primer lugar, se expone el análisis bibliométrico de los registros recuperados en Scopus, con el propósito de caracterizar la evolución temporal, áreas temáticas, fuentes de publicación, distribución geográfica y palabras clave asociadas al estudio de la ceniza volcánica y las puzolanas naturales como materiales cementantes suplementarios. En segundo lugar, se desarrolla la síntesis técnica de los estudios seleccionados para extracción de datos, enfocada en desempeño mecánico, durabilidad, mecanismos puzolánicos, caracterización físico-química y viabilidad de aplicación. Por tanto, los registros bibliométricos no deben interpretarse como equivalentes al número de estudios incluidos en la discusión técnica.

4.1 Análisis bibliométrico de la producción científica identificada en Scopus.

4.1.1 Análisis cuantitativo.

El número de documentos por año relacionados con el uso de ceniza volcánica y puzolanas naturales como materiales cementantes suplementarios se presenta en la Figura 5. La tendencia general evidencia un incremento sostenido del interés científico entre 2011 y 2025, con un crecimiento más marcado a partir de 2015. Este comportamiento coincide con la intensificación de las investigaciones sobre reducción del factor clínker, valorización de recursos minerales naturales y desarrollo de materiales cementantes de menor impacto ambiental.

La Figura 5 muestra un primer aumento relevante en 2018, seguido de un crecimiento más pronunciado hasta alcanzar el máximo de publicaciones en 2022. Aunque en 2023 y 2024 se observa una ligera disminución, el repunte de 2025 indica que el tema mantiene vigencia científica. Esta evolución confirma que la ceniza volcánica no constituye una línea marginal, sino un campo emergente dentro de la investigación sobre SCM. Sin embargo, el aumento cuantitativo de publicaciones no implica necesariamente madurez tecnológica, ya que la aplicación industrial continúa condicionada por la variabilidad físico-química del material, la estandarización de ensayos y la validación normativa.

La evolución temporal de la producción científica se presenta en la Figura 5, en la que se observa un crecimiento sostenido desde 2015 y el mayor número de publicaciones durante los años recientes.

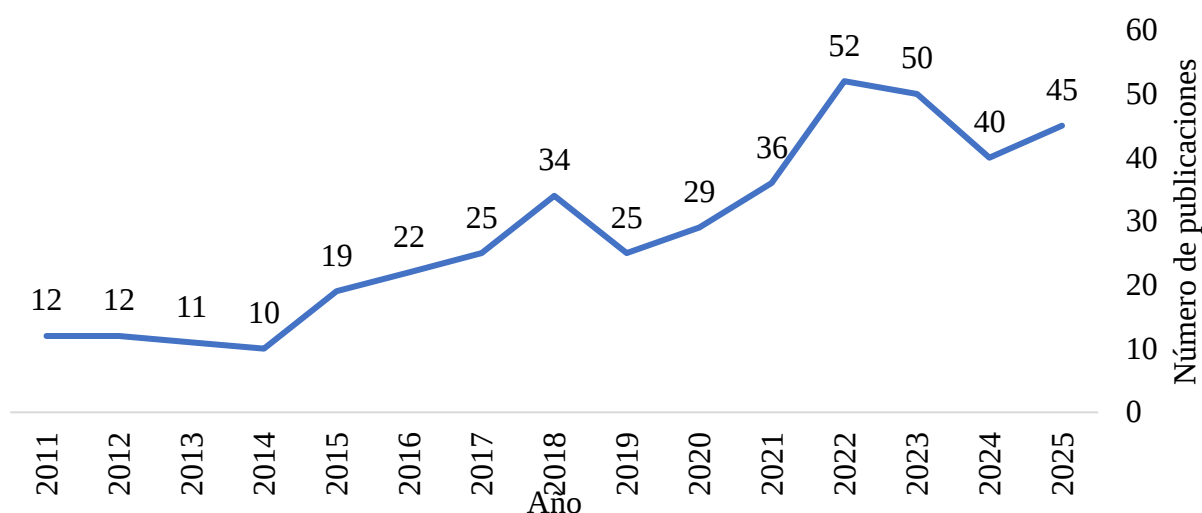


Figura 5. Evolución anual de las publicaciones sobre ceniza volcánica y puzolanas naturales como SCM. Fuente: elaboración propia a partir de datos exportados de Scopus.

La Figura 6 muestra que la mayor parte de la producción científica se concentra en las áreas de Ingeniería y Ciencia de los Materiales, lo que evidencia la orientación predominantemente técnica del campo. Esta distribución es coherente con el objetivo de la revisión, centrado en el desempeño mecánico, la durabilidad, la microestructura y la viabilidad de uso de la ceniza volcánica en matrices cementantes. La presencia de áreas complementarias, como Ciencias Ambientales, Ingeniería Química y Ciencias de la Tierra, confirma el carácter interdisciplinario del tema, especialmente por su relación con sostenibilidad, caracterización mineralógica, reducción de impactos ambientales y valorización de recursos naturales.

Como se muestra en la Figura 6, la producción científica se concentra principalmente en Ingeniería y Ciencia de los Materiales, seguida por Ciencias Ambientales, Física y Astronomía y Ciencias de la Tierra.

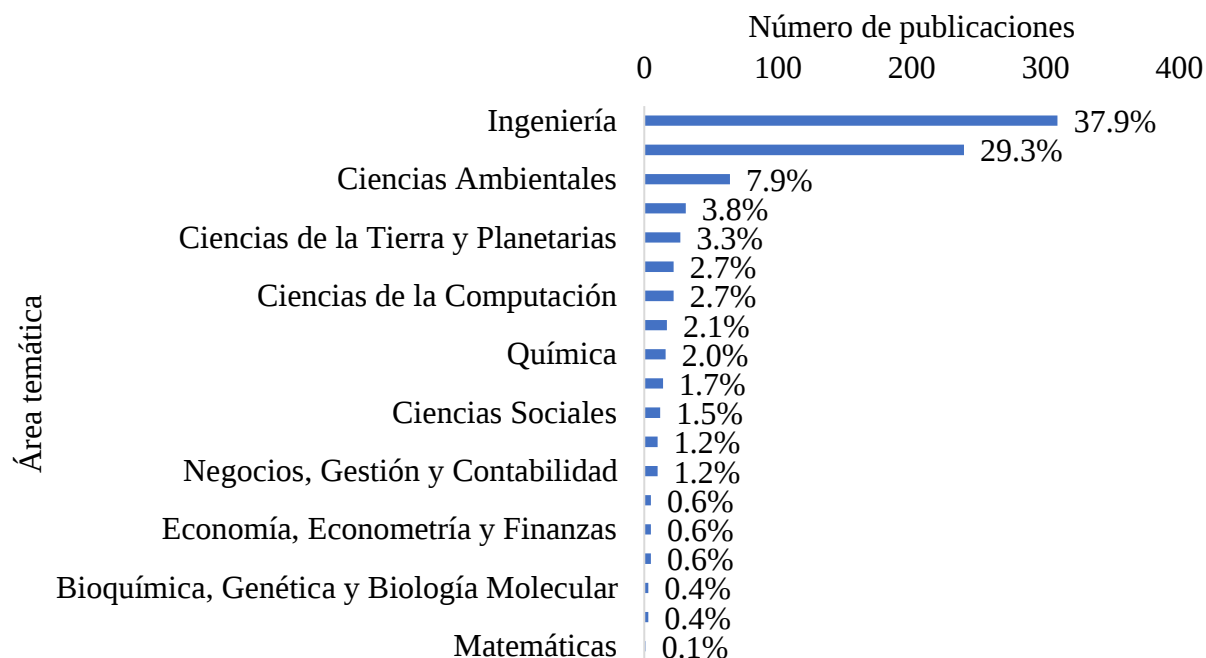


Figura 6. Número de publicaciones por área temática.
Fuente: elaboración propia a partir de datos exportados de Scopus.

4.1.2 Fuentes de publicación.

Los datos se procesaron mediante el software VOSviewer, seleccionando la opción “acoplamiento bibliográfico” como tipo de análisis. La unidad de análisis se definió como “fuentes”, y se estableció un mínimo de 2 documentos para incluir una revista en el análisis. Las principales revistas que concentran la producción científica analizada se presentan en la Figura 7. Construction and Building Materials registra el mayor número de documentos, seguida por Materials y otras fuentes especializadas en materiales cementantes y construcción sostenible.

El gráfico solo incluye las fuentes que tienen cuatro o más publicaciones. Por lo tanto, 201 artículos adicionales, que pertenecen a revistas de menor frecuencia, no se muestran en el gráfico (Figura 8). Esto muestra una concentración significativa en unas pocas revistas especializadas y también una dispersión considerable entre muchas fuentes con un número reducido de contribuciones. La estructura de relación entre las fuentes se representa en la Figura 8, obtenida mediante un análisis de acoplamiento bibliográfico en VOSviewer. El tamaño de cada nodo representa la producción documental de la revista y los vínculos expresan la intensidad de las relaciones bibliográficas entre fuentes.

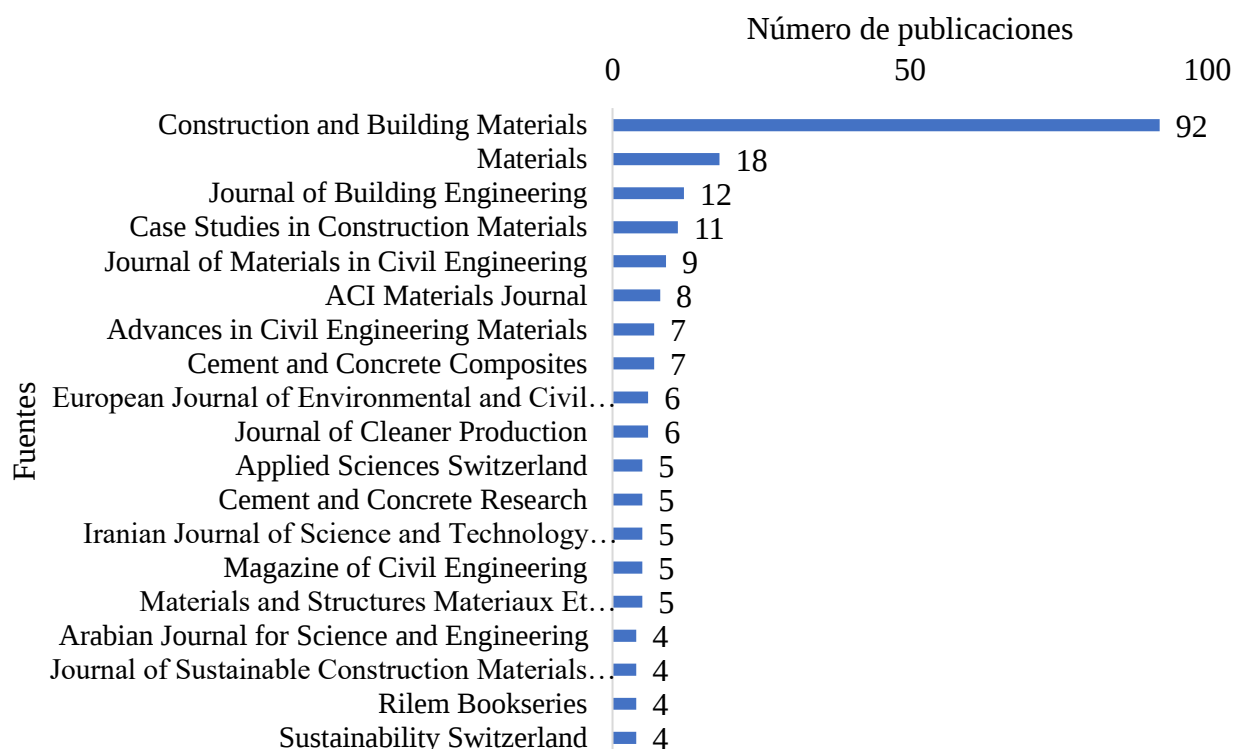


Figura 7. Principales fuentes de publicación sobre ceniza volcánica y puzolanas naturales como SCM. Fuente: elaboración propia a partir de datos exportados de Scopus.

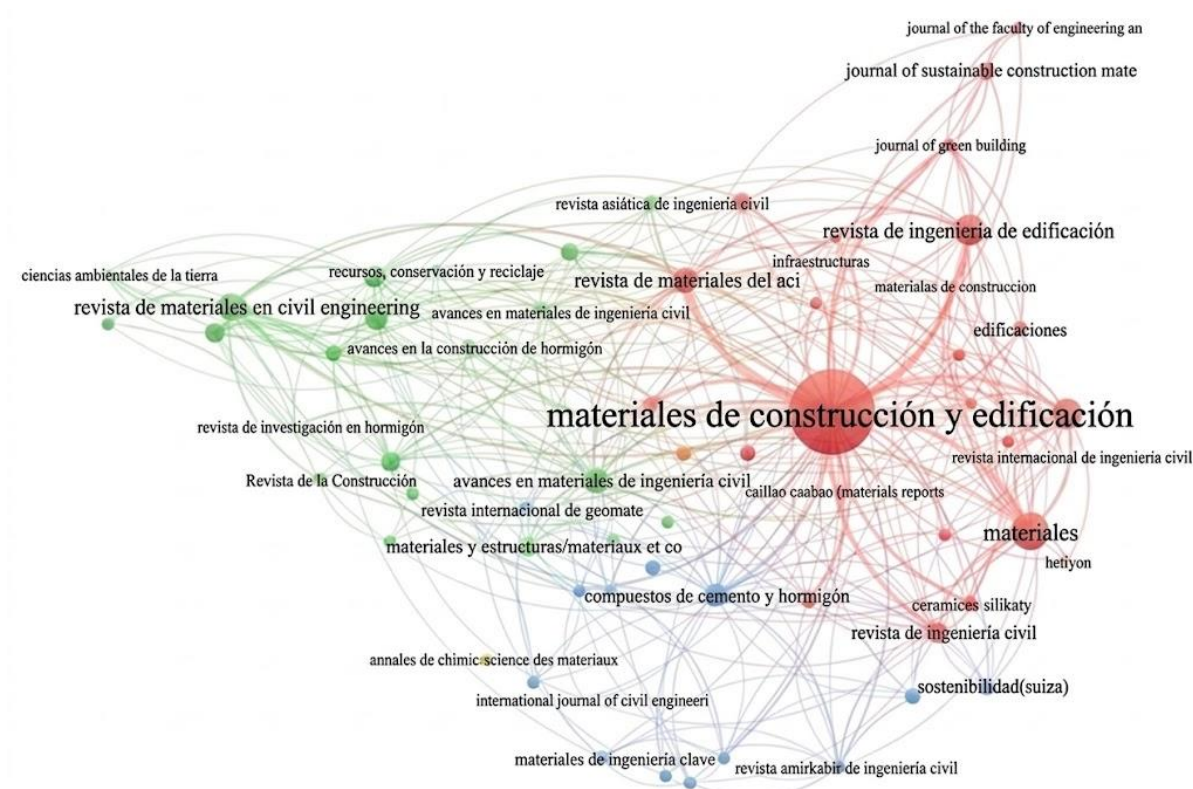


Figura 8. Red de acoplamiento bibliográfico entre fuentes de publicación. Fuente: elaboración propia mediante VOSviewer, a partir de los registros recuperados en Scopus.

La red evidencia la formación de grupos temáticos asociados con materiales cementantes, ingeniería civil y sostenibilidad. Algunas revistas con menor número de documentos presentan una elevada influencia dentro de la red, lo que indica que la relevancia bibliométrica no depende únicamente del volumen de publicaciones, sino también de sus vínculos y del impacto de los documentos publicados.

4.1.3 Distribución geográfica de la producción científica.

El análisis por país evidencia una concentración geográfica significativa de la producción científica sobre ceniza volcánica y puzolanas naturales como SCM. Como se observa en la Figura 9, Arabia Saudita, Irán y Turquía se ubican entre los países con mayor número de publicaciones, seguidos por China, España, Grecia y Egipto. Esta distribución refleja la existencia de grupos consolidados de investigación en regiones con tradición en el estudio de puzolanas naturales, materiales cementantes alternativos y durabilidad del concreto.

Es importante precisar que la Figura 9 representa producción científica por afiliación o país de publicación, no disponibilidad geológica del recurso. Por ello, la baja presencia de Ecuador en la producción bibliométrica no debe interpretarse como ausencia de ceniza volcánica, sino como una brecha de investigación aplicada. Esta distinción es relevante porque el potencial de uso de ceniza volcánica como SCM depende no solo de su presencia territorial, sino también de su composición química, fase amorfa, finura, accesibilidad, logística, tratamiento previo y validación normativa. La distribución geográfica de la producción científica se presenta en la Figura 9. El mapa representa el número de publicaciones por país de afiliación de los autores y no la disponibilidad de reservas o depósitos de ceniza volcánica.

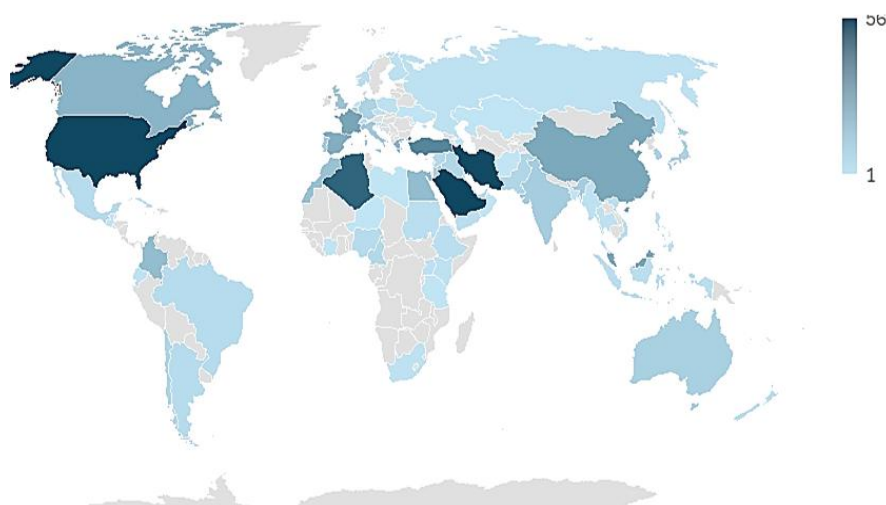


Figura 9. Distribución geográfica de la producción científica
Fuente: elaboración propia a partir de datos exportados de Scopus.

La Figura 10 muestra la red de colaboración internacional generada mediante VOSviewer. El tamaño de los nodos representa el volumen relativo de producción científica, mientras que los enlaces indican relaciones de coautoría entre países. La presencia de clústeres regionales sugiere que el desarrollo del conocimiento sobre ceniza volcánica como SCM está asociado a redes de investigación consolidadas, especialmente en Asia, Medio Oriente y Europa. Para Ecuador, esta lectura bibliométrica evidencia una oportunidad estratégica: fortalecer colaboraciones internacionales que permitan transferir metodologías de caracterización, evaluación de durabilidad y validación de mezclas cementantes con puzolanas naturales. La Figura 10 muestra la red internacional de coautoría. El tamaño de los nodos representa la producción científica de cada país, mientras que los vínculos muestran relaciones de colaboración entre autores de diferentes países.

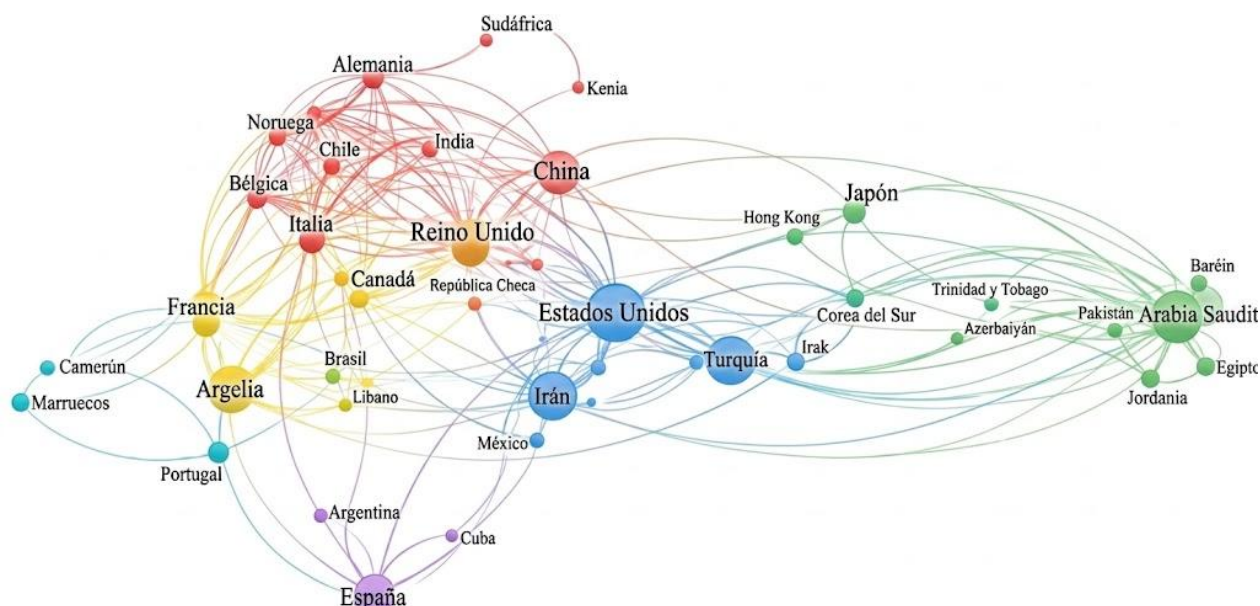


Figura 10. Visualización de la red de colaboración entre países.

Fuente: elaboración propia mediante VOSviewer, a partir de los registros recuperados en Scopus.

4.1.4 Coocurrencia de palabras clave.

El estudio de palabras clave que se llevó a cabo con VOSviewer incluyó la unificación de términos parecidos para prevenir duplicados y representar los conceptos más destacados con mayor exactitud. La Figura 11 presenta la red de coocurrencia de palabras clave, después de unificar sinónimos y variantes terminológicas. Los principales núcleos temáticos se relacionan con desempeño mecánico, durabilidad, actividad puzolánica, caracterización química y sostenibilidad. La coocurrencia de palabras clave permitió identificar los temas centrales sobre el uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario. La figura 11 muestra una red donde destacan términos asociados al desempeño mecánico, especialmente la resistencia a compresión y flexión, y a la comparación de la ceniza volcánica con otras pozolanas. También sobresalen conceptos vinculados al cemento Portland y a la durabilidad del material, como permeabilidad, resistencia a cloruros, sulfatos y efectos de congelamiento-deshielo. Además, aparecen términos relacionados con su caracterización química y mineralógica, evidenciando interés en su reactividad puzolánica. Finalmente, la presencia de palabras asociadas a geopolímeros, activación alcalina y huella de carbono indica su relevancia en investigaciones orientadas a materiales más sostenibles.

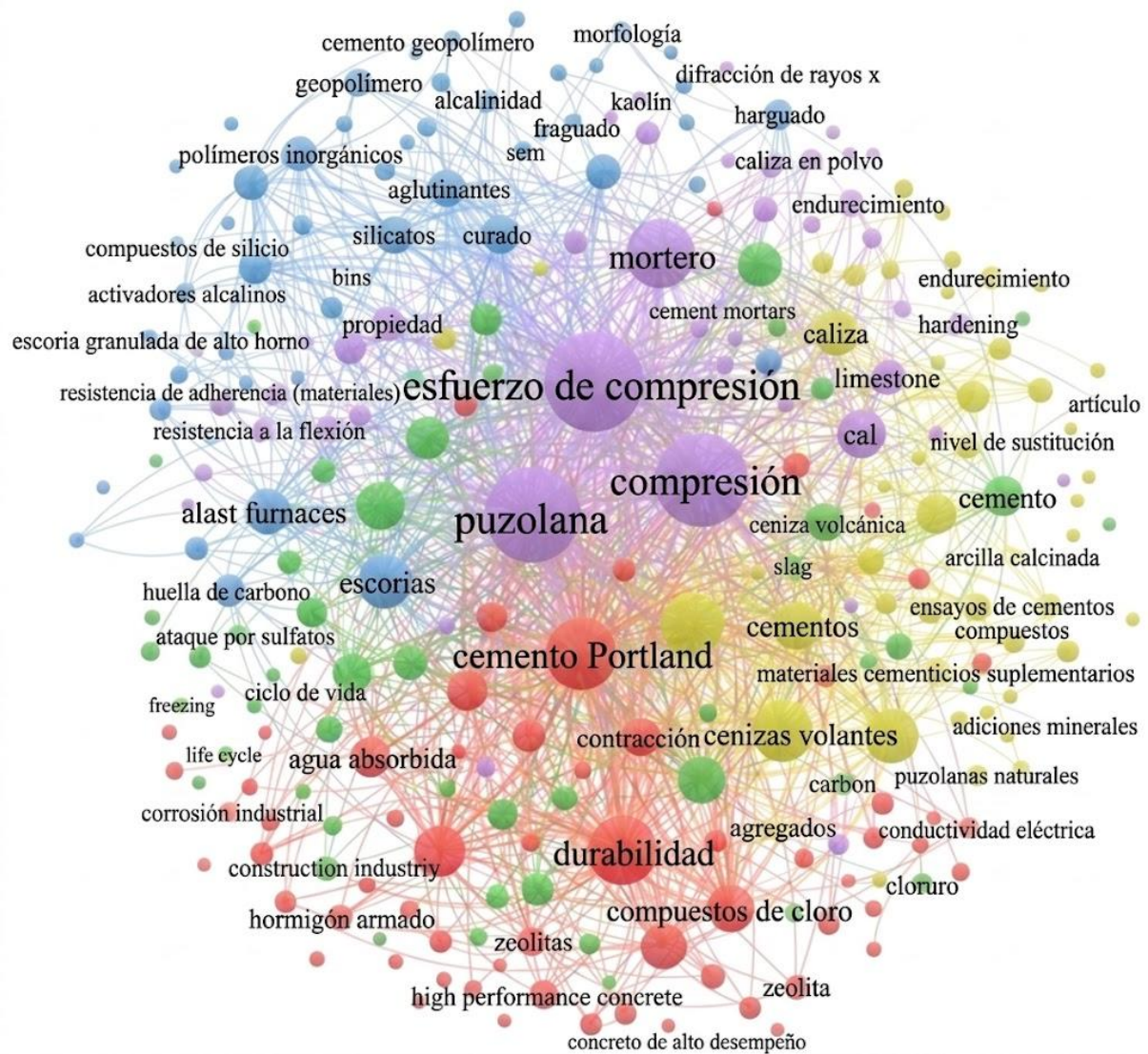


Figura 11. Visualización superpuesta de palabras clave por clúster

Fuente: elaboración propia mediante VOSviewer, a partir de los registros recuperados en Scopus.

Nota: Las palabras clave se conservan en inglés, tal como fueron recuperadas e indexadas en Scopus y procesadas en VOSviewer, con el propósito de preservar la trazabilidad, la correspondencia terminológica y la reproducibilidad del análisis bibliométrico.

4.2 Desempeño mecánico y factores que controlan la reactividad de la ceniza volcánica

El desempeño mecánico de morteros y concretos con ceniza volcánica no depende únicamente del porcentaje de sustitución del cemento, sino de la interacción entre composición química, fracción amorfa, finura, tamaño de partícula, superficie específica, disponibilidad de portlandita y condiciones de curado. Estos factores controlan la velocidad y magnitud de la reacción puzolánica. En particular, el contenido de SiO_2 y Al_2O_3 reactivos, junto con la fracción amorfa, condiciona la capacidad de la ceniza para reaccionar con el Ca(OH)_2 liberado por la hidratación del cemento Portland. La finura y la superficie específica incrementan el área de contacto y pueden favorecer tanto el efecto filler como la nucleación de productos de hidratación. Como resultado, cuando existe suficiente calcio disponible en la matriz, se promueve la formación secundaria de geles C-S-H y C-A-S-H, responsables del refinamiento poral, la densificación de la matriz y la mejora del desempeño mecánico y de durabilidad. Por el contrario, sustituciones elevadas pueden reducir la cantidad de clinker hidratable, limitar la disponibilidad de portlandita e intensificar el efecto de

dilución, dejando fracciones de ceniza parcialmente sin reaccionar (Khan et al., 2019, 2022; S. Singh et al., 2026).

La evidencia revisada muestra que los contenidos de ceniza volcánica entre 10% y 20% suelen ofrecer el equilibrio más favorable entre resistencia temprana, resistencia a edades avanzadas y trabajabilidad. En este intervalo, la ceniza volcánica puede actuar simultáneamente mediante efecto físico de relleno, nucleación de productos de hidratación y reacción puzolánica, favoreciendo la formación secundaria de C-S-H y C-A-S-H. Estos productos contribuyen al refinamiento de la red porosa, a la densificación de la matriz, a la reducción de la conectividad capilar y al desarrollo de resistencia mecánica a mediano y largo plazo (Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Lo et al., 2009; Özen & Uzal, 2021). A estos niveles, la reacción puzolánica de la CV favorece la formación adicional de geles C-S-H y C-A-S-H, densificando la microestructura y mejorando la durabilidad (Y. Cao et al., 2025; Jackson et al., 2017; Wei et al., 2005). En sustituciones moderadas (5–10%) se observan incluso incrementos simultáneos de resistencia, durabilidad y trabajabilidad (Hossain, 2005; Shahjalal et al., 2025), mientras que reemplazos superiores al 20–30% tienden a reducir la resistencia temprana y la trabajabilidad, debido a la dilución del cemento y a la reacción incompleta de la CV (Edris et al., 2021; Hasan et al., 2024; Zhou et al., 2021).

No obstante, a niveles elevados de sustitución (>30%), la resistencia a largo plazo puede mantenerse o incluso incrementarse mediante métodos de activación y mezclas sinérgicas con otros subproductos (escorias, otros materiales cementantes suplementarios y nanoaditivos), así como con regímenes de curado optimizados (Ababneh et al., 2024; Bawab et al., 2024; Díaz et al., 2013; Khan & Amin, 2017; Martín-Rodríguez et al., 2024; Zhou et al., 2021). La finura, la composición química y el contenido amorfo de la CV son factores clave que controlan su reactividad y su efecto en la resistencia (M. Cao & Zhang, 2023; Hazarika et al., 2025; Kupwade-Patil, Tyagi, et al., 2016; Masmoudi et al., 2017). Además, en ambientes agresivos, como medios marinos o a altas temperaturas, los concretos con 10–20% de CV presentan un mejor desempeño mecánico residual y mayor durabilidad frente al cemento Portland convencional (A Lachemi, 2004; Anwar Hossain, 2006; Demirel & Keleştemur, 2010; Jackson et al., 2017; Wahyuni et al., 2025). En conjunto, la literatura respalda que la CV es un SCM eficaz para mejorar la resistencia a la compresión cuando se dosifica dentro de rangos óptimos y se controla adecuadamente su activación y curado (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; Zhou et al., 2021). En conjunto, la literatura respalda que la ceniza volcánica puede mejorar la resistencia a compresión cuando se incorpora dentro de rangos adecuados de sustitución y se controlan su reactividad, finura y condiciones de curado. La Tabla 1 sintetiza comparativamente los principales efectos del contenido de ceniza volcánica sobre la resistencia temprana, la resistencia a largo plazo y la trabajabilidad.

Tabla 1. Efecto del contenido de ceniza volcánica sobre la resistencia a la compresión

Contenido de CV (% de reemplazo)	Resistencia a edades tempranas	Resistencia a largo plazo	Trabajabilidad	Efectos de activación / mezclas
5–10	Comparable / ↑	↑	↑	Mejor para trabajabilidad y durabilidad (A Lachemi, 2004; Hossain, 2005; Bashir & Elahi, 2023; Bawab et al., 2025b; Dahiru et al., 2019; Klausen et al., 2025; Shahjalal et al., 2025; Uzbaş & Aydın, 2019)

10–20	Ligera ↓ / ≈	↑	≈	Óptimo para resistencia y trabajabilidad (Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Kupwade-Patil, Chin, et al., 2018; Lo et al., 2009)
20–30	↓	≈ / ↑	↓	Requiere activación o mezclas sinérgicas (Hasan et al., 2024; Kupwade-Patil, Chin, et al., 2018; Martín-Rodríguez et al., 2024; Zhou et al., 2021)
>30	↓↓	≈ / ↑ (con activación)	↓↓	Mezclas sinérgicas y activación esenciales (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; Khan et al., 2022; Kupwade-Patil, Chin, et al., 2018; Uzbaş & Aydın, 2019; Zhou et al., 2021; Zhuginissov et al., 2026)

Leyenda: ↑ = Mejorado; ↓ = Reducido; ≈ = Comparable al control.

Fuente: elaboración propia a partir de la evidencia científica citada en cada intervalo de sustitución.

4.2.1 Variabilidad química y física de la ceniza volcánica.

La variabilidad química y física de la ceniza volcánica constituye uno de los factores que más condiciona su desempeño como SCM. A diferencia de materiales industriales más controlados, las cenizas volcánicas pueden presentar diferencias significativas en el contenido de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, álcalis, pérdida por ignición, fase amorfa, fases cristalinas, finura, tamaño de partícula y superficie específica. Esta variabilidad explica por qué los rangos óptimos de sustitución reportados en la literatura no pueden generalizarse sin caracterización previa del material.

Desde el punto de vista químico, las cenizas con mayor proporción de fases silicoaluminosas amorfas tienden a presentar mayor potencial puzolánico, siempre que exista suficiente Ca(OH)₂ disponible en la matriz cementante. En estos casos, la reacción con la portlandita puede favorecer la formación de C-S-H y C-A-S-H, productos responsables de la densificación microestructural. En cambio, cenizas con alto contenido cristalino, baja finura o limitada fracción reactiva pueden actuar predominantemente como filler, aportando beneficios físicos, pero con menor contribución química al desarrollo resistente. La variabilidad química y física identificada en los estudios revisados se presenta en la Tabla 2. La información fue extraída de los artículos originales y organizada comparativamente para mostrar las diferencias en composición química, mineralogía, finura, tamaño de partícula y superficie específica de las cenizas volcánicas evaluadas.

Tabla 2. Variabilidad química y física de la ceniza volcánica.

Autor / año	País o fuente del material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O + K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Pérdida por ignición (%)	Fase amorfa / mineralogía reportada	Finura / tamaño de partícula (D ₅₀ , porcentaje retenido o malla)	Superficie específica (m ² /kg o m ² /g, método de Blaine)	Aplicación evaluada
(K. M. A. Hossain, 2003)	Papúa Nueva Guinea (Mt. Tavurvur)	59.34	17.54	7.06	6.12	2.55	5.83	0.7	1.03	—	Retenido tamiz 75 µm: 42%	242 m ² /kg	Cemento mezclado, mortero y concreto
(Hazarika et al., 2025)	Islandia (VM 1)	43.8	14.6	13.3	11.95	7.44	2.24	—	-0.51	Albita, Anortita, Andesina, Oligoclasa	D50: 9 - 37 µm	4 - 13 m ² /g (BET)	Reactividad MR3 (SCM)
(Hazarika et al., 2025)	Islandia (VM 2)	47	12.75	17.2	9.31	4.92	3.96	—	-0.7	Albita, Anortita, Andesina, Oligoclasa	D50: 9 - 37 µm	4 - 13 m ² /g (BET)	Reactividad MR3 (SCM)
(Hazarika et al., 2025)	Islandia (VM 3)	65.6	14.9	7.7	3.62	0.83	6.71	—	1.44	Olivino, Albita, Oligoclasa	D50: 9 - 37 µm	4 - 13 m ² /g (BET)	Reactividad MR3 (SCM)
(Hazarika et al., 2025)	Islandia (VM 4)	61.7	14.05	6.04	6.61	2.86	5.35	—	2.45	Albita, Anortita, Oligoclasa	D50: 9 - 37 µm	4 - 13 m ² /g (BET)	Reactividad MR3 (SCM)
(Flores Medina et al., 2015)	Pozolana Natural	55	15.9	4.2	2.2	1.5	9.5	—	11.2	—	—	—	Concreto

(Edris et al., 2021)	Jordania (Norte)	34.39	4.59	31.5	24.11	0.49	1.30 (K ₂ O)	—	—	Toba volcánica	< 75 µm	—	Concreto
(Demirel & Keleştemur, 2010)	Turquía (Mt. Meryem)	49.52	16.72	11.3	8.26	4.54	—	—	1.68	Pómez	—	—	Concreto
(Amine et al., 2017)	Pozolana 1 (Pz1)	49.5	18	10	7.5	5.5	7	0.1	1.6	—	—	—	Adición mineral
(al-Swaidani et al., 2016)	Siria (Dirat-at-Tulul)	46.52	13	11.4	10.1	9.11	2.91	0.3	2.58	Escoria; Olivino, Plagioclasa, Vidrio	D50: 17.5 µm (inter-molido)	3200 cm ² /g	Mortero y concreto
(Dahiru et al., 2019)	Nigeria (Jos Plateau)	28.1	18	35.1	0.29	0.26	0.28	—	15.9	—	< 75 µm	—	Concreto
(Zunino & Scrivener, 2024)	Pozolana Natural (NP)	68.97	13.92	2.09	1.51	0.73	7.01	0.1	4.27	—	—	2.89 m ² /g (BET)	Pasta de cemento de bajo clinker
(Letelier et al., 2018)	Chile (V. Calbuco)	57.76	14.54	11	8.27	2.44	4.55	—	—	Vidrio volcánico (~57%)	< 75 µm	285 m ² /kg	Concreto
(Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016)	Arabia Saudita (Basalto)	38.89	13	12.4	9.09	6.16	4.43	0.1	1.8	Fase amorfa: 71.7%; Anortita, Forsterita	D50: 10.0 µm; Media: 17.14 µm	—	Pasta de cemento

(Djon Li Ndjock et al., 2017)	Camerún (P1)	40.1	16.3	13.5	6.3	5.3	1.3	—	11.1	Amorfo: 42.5%; Muscovita, Hematita	—	7319 cm ² /g	Geopolímero
(Hossain, 2005)	México	68.2	11.2	1.8	1	0.2	0.20 (Na ₂ O)	0	—	—	—	—	Concreto marino
(Jackson et al., 2017)	Italia (Neapolitano)	38.9 - 60.2	18.6 - 30.7	—	0.4 - 10.7	0.0 - 0.2	7.9 - 19.0	—	—	Phillipsita (Zeolita)	—	—	Cemento mineral
(Jubera-Pérez et al., 2024)	España (La Palma)	38.2	14.1	18.6	11.2	6.5	4.5	0.2	—	Amorfo: 63.5 - 72.5%	D: 23, 28 y 45 µm	—	Mortero (SAI)
(Yu et al., 2015)	China (Jiangxi - NQ)	74.81	11.15	1.87	1.39	0.16	7.72	—	1.71	Amorfo: 76.8%; Cuarzo, Labradorita	90% < 45 µm	—	Mortero
(Zeyad et al., 2023)	VPD (Polvo de pómez)	48.06	16.83	7.63	12.52	6.59	3.65	0.3	1.61	Cuarzo, fase amorfa aluminosilicatada	1.0 - 15 µm	4090 cm ² /g	Concreto
(Keshta et al., 2022)	Egipto (Wadi El-Anbgy)	67.04	14.9	2.59	3.27	1.72	6.54	0.3	2.83	—	Pasa tamiz #170	—	Concreto
(Martín-Rodríguez et al., 2024)	España (La Palma)	41.56	14.49	14.7	11.92	5.57	5.96	0.2	—	Diópsido, Augita, Magnetita, Bytownita	96% < 45 µm; 91% < 32 µm	—	Cemento híbrido y alcalino

Fuente: elaboración propia a partir de los datos reportados en los estudios citados en la primera columna.

Nota: VM1–VM4, MR3 y Pz1 corresponden a los códigos de identificación empleados por los autores de los estudios originales; “—” indica información no reportada.

4.3 Efecto sobre la resistencia a la flexión.

La evidencia científica muestra que la resistencia a la flexión del concreto y del mortero con ceniza volcánica (CV) depende fuertemente del porcentaje de sustitución del cemento. De manera consistente, los estudios coinciden en que los rangos de reemplazo entre 10–20%, siendo 15% el valor más frecuente, permiten maximizar la resistencia a la flexión, con incrementos significativos respecto a las mezclas de control (Al-Swaidani, 2017; Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; A. Hossain et al., 2006; Keshta et al., 2022; Shahjalal et al., 2025). Este comportamiento se atribuye a la reacción puzolánica de la CV, que genera geles adicionales de C-S-H y C-A-S-H, promoviendo la densificación de la matriz cementante y el refinamiento de la zona de transición interfacial (ITZ) (Bawab et al., 2024; Khan et al., 2022; Nováková et al., 2024; Peng et al., 2024; Wang et al., 2025). A sustituciones superiores al 20%, la resistencia tiende a estabilizarse o disminuir, principalmente por efectos de dilución del cemento e incompleta reacción puzolánica, aunque el curado prolongado puede mitigar parcialmente esta pérdida (Ali et al., 2023; Anwar Hossain, 2006; Hasan et al., 2024; Keshta et al., 2022; Mohamad et al., 2020; Zeyad et al., 2023; Zhuginissov et al., 2026).

Asimismo, la finura de la ceniza volcánica y los métodos de activación juegan un papel determinante: partículas más finas y tratamientos físicos o químicos incrementan la reactividad y favorecen la resistencia a la flexión (al-Swaidani et al., 2016; Begaye et al., n.d.; Khan et al., 2019; Khan & Amin, 2017; J. Liu et al., 2017; L. P. Singh et al., 2017; Xiong et al., 2022; Zhang et al., 2025). No obstante, contenidos elevados de CV afectan la trabajabilidad y el tiempo de fraguado, especialmente por encima del 25–35% de reemplazo (Bawab et al., 2024, 2025b; Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain, 2003), lo que requiere el uso de aditivos y estrategias de pretratamiento (Keshta et al., 2022; Ogunbode & Hassan, 2011; Zhang et al., 2025).

La Tabla 3 sintetiza la influencia del porcentaje de sustitución de ceniza volcánica sobre la resistencia a flexión de morteros y concretos. La evidencia analizada indica que los mayores incrementos suelen alcanzarse en el intervalo de 10–15 %, mientras que contenidos superiores al 25–35 % tienden a reducir el desempeño debido al efecto de dilución y a la menor disponibilidad de productos de hidratación.

Tabla 3. Efecto de la sustitución de ceniza volcánica (CV) en la resistencia a la flexión de morteros y concretos.

Porcentaje de reemplazo de CV	Tendencia en la resistencia a la flexión	Mecanismo dominante	Efecto en trabajabilidad/fraguado	Referencias
0% (control)	Valor de referencia	Hidratación normal del cemento	Normal	(Al-Swaidani, 2017; Hasan et al., 2024)
5%	↑ Incremento moderado (hasta +15–17%)	Micro-relleno y activación temprana	Ligera disminución	(Shahjalal et al., 2025; L. P. Singh et al., 2017)
10%	↑↑ Alto incremento	Formación óptima de C-S-H y C-A-S-H, refinamiento del ITZ	Aceptable	(Al-Swaidani, 2017; Hasan et al., 2024; A. Hossain et al., 2006; Shahjalal et al., 2025)
15%	↑↑ Máximo incremento (óptimo)	Densificación de la matriz e ITZ	Leve reducción	(Al-Swaidani, 2017; Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; A. Hossain et al., 2006)

20%	↑ / ↔ Meseta	Beneficio puzolánico máximo con inicio de dilución	Reducción moderada	(Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; A. Hossain et al., 2006)
25–35%	↓ Disminución	Dilución del cemento e hidratación incompleta	Disminución notable	(Ali et al., 2023; Hasan et al., 2024; Zeyad et al., 2023)
>40%	↓↓ Disminución severa	Excesiva dilución, baja reactividad	Fraguado lento, baja trabajabilidad	(Bawab et al., 2024; K. M. A. Hossain, 2003)

Fuente: elaboración propia a partir de la evidencia científica citada en cada rango de sustitución.

Nota: ↑ indica incremento; ↓ indica disminución; ↔ indica comportamiento estable respecto a la mezcla de control.

4.4 Estrategias de optimización para ampliar el uso de ceniza volcánica.

Para ampliar el uso de ceniza volcánica más allá de los rangos convencionales de sustitución, no basta con incrementar su dosificación. Se requiere optimizar su desempeño mediante estrategias de beneficio y diseño de mezcla. La molienda controlada puede aumentar la superficie específica y acelerar la reacción puzolánica, aunque debe equilibrarse con la demanda de agua, la compatibilidad con aditivos superplastificantes y el incremento potencial del consumo energético asociado al procesamiento del material. La clasificación granulométrica permite reducir partículas gruesas de baja reactividad y mejorar el efecto filler, mientras que la activación térmica o química puede incrementar la disponibilidad de fases reactivas. No obstante, estas estrategias deben evaluarse mediante criterios técnicos, energéticos, económicos y ambientales, ya que tratamientos intensivos podrían disminuir parte de los beneficios asociados a la reducción del contenido de clínker (Khan et al., 2022; J. Rajesh & Kandasamy, 2025; Zhao et al., 2018).

Otra estrategia consiste en formular sistemas binarios o ternarios que combinen ceniza volcánica con otros SCM o con cementos de distinta composición, buscando equilibrar disponibilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, contenido de alúmina reactiva, refinamiento poral y desempeño mecánico. Estas alternativas podrían permitir mayores reducciones del factor clínker sin comprometer durabilidad; sin embargo, requieren validación experimental específica para cada fuente de ceniza, especialmente en contextos como Ecuador, donde la variabilidad mineralógica y logística condiciona la estandarización del material (Bawab et al., 2024; de Siqueira & Cordeiro, 2022; Rodrigues et al., 2022).

4.5 Impacto en la durabilidad: resistencia a sulfatos.

La incorporación de ceniza volcánica (CV) mejora de forma significativa la resistencia del concreto y del mortero frente al ataque por sulfatos, principalmente por su actividad puzolánica, que reduce el contenido de hidróxido de calcio y refina la estructura de poros, limitando el ingreso de iones sulfato y la formación de etringita expansiva (Bawab et al., 2025b; Canpolat et al., 2007; Das Gupta et al., 2025). Los niveles óptimos de reemplazo se sitúan entre 10–20%, donde se logra un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica temprana y durabilidad a largo plazo, aunque contenidos de hasta 40% pueden emplearse cuando se prioriza el desempeño frente a sulfatos sobre la resistencia inicial (Das Gupta et al., 2025; A. Hossain et al., 2006; Kupwade-Patil, De Wolf, et al., 2018).

Desde el punto de vista microestructural, la CV reduce la porosidad, incrementa la velocidad de pulso ultrasónico y densifica la matriz cementante, dificultando la difusión de sulfatos y la expansión interna (Al-jabali et al., 2025). Además, el consumo de aluminatos reactivos y de

Ca(OH)₂ disminuye la nucleación y crecimiento de etringita, reduciendo la microfisuración (Amine et al., 2017; Bawab et al., 2025a; Khan et al., 2022; Rols et al., 2000; Souza et al., 2023; Zunino & Scrivener, 2025). La finura y el contenido amorfo de la CV influyen de manera decisiva en su eficacia, ya que partículas más finas y con mayor fase amorfa aceleran la reacción puzolánica y potencian la resistencia a sulfatos (Djon Li Ndjock et al., 2017; Jaturapitakkul et al., 2007; Jubera-Pérez et al., 2024; Shahjalal et al., 2025; Suraneni et al., 2019; Yu et al., 2015). En condiciones de exposición ambiental severa, como ciclos de humectación-secado, la CV mantiene un mejor desempeño que el cemento Portland convencional, especialmente en reemplazos del 20–30% (Gao et al., 2010; Omikrine Metalssi et al., 2024). En conjunto, la evidencia respalda que la CV es un material altamente efectivo para incrementar la durabilidad del concreto en ambientes sulfatados, siempre que se optimicen su dosificación, finura y régimen de curado (Al-jabali et al., 2025; Bawab et al., 2025b; Das Gupta et al., 2025; Hasan et al., 2024; Kiran Kumar et al., 2024; Nair & Viswanathan, 2023; Wang et al., 2023).

Los niveles de reemplazo del 10-20% han demostrado ser particularmente efectivos para mejorar esta propiedad, aunque se han reportado buenos desempeños con niveles de hasta el 40% (K. M. A. Hossain & Lachemi, 2004; Sideris & Savva, 2001). El desempeño de la CV en este ámbito es comparable e incluso superior al de otros SCM convencionales (Khan et al., 2022; Siddique, 2012).

4.6 Impacto en la durabilidad: permeabilidad.

La permeabilidad, que mide la facilidad con la que fluidos y agentes agresivos (como agua y cloruros) pueden penetrar en el concreto, es un indicador fundamental de su durabilidad. La incorporación de ceniza volcánica (CV) como reemplazo parcial del cemento reduce de manera significativa la permeabilidad del concreto, principalmente por el refinamiento de la estructura porosa y la densificación de la matriz derivados de su reacción puzolánica (A Lachemi, 2004; Darwis et al., 2018; Edris et al., 2021; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Vedalakshmi et al., 2003). Los resultados más consistentes se reportan en rangos de 10–20% de sustitución, donde se alcanzan los menores valores de absorción y permeabilidad, junto con una mejora sustancial de la resistencia a la penetración de cloruros, con reducciones de hasta 80–90% en la difusividad (Altimari et al., 2025; Anwar Hossain, 2006; Edris et al., 2021; Ibrahim et al., 2025). Para contenidos mayores (20–40%), la permeabilidad continúa disminuyendo, aunque con pérdidas de resistencia temprana, siendo estos niveles adecuados cuando se prioriza la durabilidad a largo plazo sobre el desempeño mecánico inicial (Al-Swaidani, 2017; Anwar Hossain, 2006; A. Hossain et al., 2006; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007). Sin embargo, reemplazos superiores al 40% pueden generar mayor porosidad y ceniza no reaccionada, comprometiendo tanto la resistencia mecánica como la carbonatación (Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016; Lammertijn & De Belie, 2008). Desde el punto de vista microestructural, la CV reduce la conectividad de poros, disminuye el diámetro poral dominante y favorece la formación de productos puzolánicos (C-S-H, Al-tobermorita, phillipsita), lo que limita el transporte de agua y cloruros (Elshinawy et al., 2025; A. Hossain, n.d.; Hu & Du, 2013; Jackson et al., 2017; Játiva et al., 2025; Vedalakshmi et al., 2003). La finura, el origen y la activación de la CV influyen directamente en su eficacia, observándose mejores resultados con cenizas finas y alto contenido amorfo (Khan et al., 2019; Mitrović, 2011). La formación de sal de Friedel contribuye adicionalmente a la inmovilización de cloruros (A Lachemi, 2004; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2004; J. C. Liu et al., 2023; Tomoyose et al., 2020). En ambientes agresivos, como zonas marinas o con ciclos húmedo-seco, los concretos con CV presentan un comportamiento superior frente al cemento Portland convencional (Ho et al., 2023; A. Hossain, n.d.). No obstante, a altos niveles de reemplazo, el incremento de la profundidad de carbonatación constituye una limitación que debe ser mitigada mediante un diseño de mezcla optimizado, curado adecuado y el uso combinado con otros SCM o nano-aditivos (Flores Medina et al., 2015; A. Hossain et al., 2006; Ibrahim et al., 2025). En conjunto, la evidencia confirma que

la CV es altamente efectiva para mejorar la impermeabilidad del concreto cuando se dosifica dentro de rangos óptimos y bajo condiciones de curado apropiadas (Kupwade-Patil, Palkovic, et al., 2018; Sharfuddin Ahmed et al., n.d.; Vedalakshmi et al., 2003).

Los efectos identificados sobre la durabilidad se resumen en la Tabla 4. En términos generales, los contenidos entre 10 % y 20 % muestran los resultados más favorables frente a permeabilidad, ingreso de cloruros y ataque por sulfatos; no obstante, el desempeño depende de la composición y finura de la ceniza, las condiciones de curado y el ambiente de exposición. En sustituciones elevadas, la menor reserva alcalina puede incrementar el riesgo de carbonatación.

Tabla 4. Resumen de los efectos en la durabilidad.

Propiedad	Rango óptimo de CV	Efecto principal	Mecanismo dominante	Límite técnico	Referencias
Resistencia a sulfatos	10–20% / hasta 40% en ciertos casos	Menor expansión y mayor durabilidad	Refinamiento poral, consumo de portlandita, menor formación expansiva	Depende de aluminatos, curado y composición de la ceniza	(Bawab et al., 2025b; Canpolat et al., 2007; Das Gupta et al., 2025; A. Hossain et al., 2006; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2004; Kupwade-Patil, De Wolf, et al., 2018; Sideris & Savva, 2001)
Microestructura en ambientes sulfatados	10–30%	Matriz más densa y menor microfisuración	Refinamiento de poros y consumo de aluminatos		(Al-jabali et al., 2025; Amine et al., 2017; Bawab et al., 2025a; Khan et al., 2022; Rols et al., 2000; Souza et al., 2023; Zunino & Scrivener, 2025)
Permeabilidad al agua	10–20%	Reducción de permeabilidad	Densificación y menor conectividad capilar	Puede aumentar demanda de agua si la ceniza es muy fina	(A Lachemi, 2004; Darwis et al., 2018; Edris et al., 2021; K. M. A. Hossain & Lachemi,

					2007; Vedalakshmi et al., 2003)
Difusión de cloruros	10–20%	Menor penetración de cloruros	Refinamiento poral y posible fijación química	Requiere evaluar relación Al_2O_3 /fases AFm	(Altimari et al., 2025; Anwar Hossain, 2006; Edris et al., 2021; Ibrahim et al., 2025; J. C. Liu et al., 2023; Tomoyose et al., 2020)
Ambientes agresivos (marinos, ciclos húmedo–seco)	20–30% en algunos sistemas	Mejor desempeño a largo plazo	Curado prolongado y matriz refinada	No extrapolar sin caracterización local	(Hossain, 2005; Gao et al., 2010; Ho et al., 2023; Omikrine Metalssi et al., 2024)
Reemplazos elevados	>40%	Aumento de porosidad y carbonatación	Ceniza no reaccionada y efecto de dilución		(Flores Medina et al., 2015; Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016; Lammertijn & De Belie, 2008)

Fuente: elaboración propia a partir de los estudios citados en cada propiedad evaluada.

Aunque los rangos moderados de sustitución presentan el mejor equilibrio entre propiedades mecánicas y durabilidad, su contribución a una reducción profunda del factor clínker continúa siendo limitada. Por ello, la Tabla 5 presenta una interpretación crítica de los rangos de sustitución, relacionando el desempeño técnico esperado con su potencial de reducción del factor clínker, los riesgos asociados y las estrategias de optimización necesarias.

Tabla 5. Interpretación crítica de los rangos de sustitución frente a la reducción del factor clínker.

Rango de sustitución	Desempeño técnico esperado	Contribución a reducción del factor clínker	Riesgo principal	Estrategia de optimización
5–10%	Mejora moderada por efecto filler y nucleación	Baja	Impacto ambiental limitado	Usar en cementos convencionales sin cambios mayores
10–20%	Mejor equilibrio mecánico y durabilidad	Moderada	Depende de reactividad y curado	Control de finura y caracterización química

20–30%	Potencial ambiental mayor	Media-alta	Resistencia temprana menor	Molienda, curado prolongado, aditivos
30–40%	Posible en sistemas optimizados	Alta	Falta de portlandita y efecto de dilución	Sistemas ternarios, activación, cementos adecuados
>40%	Alto potencial ambiental, pero desempeño dependiente de activación y diseño de mezcla	Muy alta	Baja resistencia temprana, ceniza no reaccionada y posible aumento de carbonatación por menor reserva alcalina	Validación experimental estricta; no recomendación general

Fuente: elaboración propia a partir de la síntesis crítica de los resultados reportados en los estudios incluidos.

Como se observa en la Tabla 5, los contenidos entre 10 % y 20 % ofrecen el balance técnico más favorable, aunque su impacto sobre la reducción del factor clínker es moderado. Los reemplazos entre 20 % y 40 % presentan un mayor potencial ambiental, pero requieren control de finura, curado prolongado, aditivos o sistemas ternarios para compensar la menor resistencia temprana y la reducción de portlandita disponible. Por encima del 40 %, el uso de ceniza volcánica no puede recomendarse de manera general, debido al riesgo de dilución, presencia de partículas no reaccionadas y mayor susceptibilidad a la carbonatación.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Análisis de los hallazgos.

Los resultados bibliométricos evidencian que el interés científico en la ceniza volcánica como material cementante suplementario ha crecido de forma sostenida desde 2015, con una producción concentrada principalmente en las áreas de Ingeniería y Ciencia de los Materiales. Esta orientación confirma que la literatura ha priorizado la evaluación del desempeño mecánico, la durabilidad y la caracterización físico-química de las mezclas cementantes con materiales volcánicos, como se muestra en las Figuras 5, 6 y 11.

La distribución geográfica revela una concentración significativa de la producción científica en países como Irán, Arabia Saudita y Turquía, acompañada de redes de colaboración consolidadas en Asia, Medio Oriente y Europa, según las Figuras 9 y 10. En contraste, la participación ecuatoriana continúa siendo limitada, pese a que el país se ubica en una región de actividad volcánica recurrente y presenta fuentes potenciales de materiales volcánicos con interés cementante (Pinos-Velez et al., 2024; Toulkeridis & Zach, 2017). Esta diferencia entre disponibilidad geológica potencial y desarrollo científico constituye una brecha de investigación aplicada, aunque no permite afirmar por sí sola que exista disponibilidad industrial comprobada del recurso.

El análisis de palabras clave confirma que la literatura se articula alrededor de la resistencia mecánica, la durabilidad, la actividad puzolánica, la composición química y la microestructura. Estos resultados proporcionan el marco para interpretar críticamente los rangos de sustitución, los mecanismos físico-químicos y las limitaciones asociadas a la variabilidad de las cenizas volcánicas.

5.2 El equilibrio óptimo en el desempeño mecánico.

El análisis de las propiedades mecánicas muestra que la ceniza volcánica puede mejorar la resistencia a compresión y flexión cuando se emplea dentro de rangos moderados de sustitución y presenta suficiente reactividad. En términos generales, el intervalo de 10–20% ofrece el mejor equilibrio entre resistencia a edades tempranas y desarrollo resistente a largo plazo, como se resume en la Tabla 1 (Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Kupwade-Patil, Chin, et al., 2018; Lo et al., 2009).

En este intervalo, las fases silicoaluminosas reactivas de la ceniza consumen parte de la portlandita generada durante la hidratación del clinker y favorecen la formación secundaria de C-S-H y C-A-S-H, contribuyendo a la densificación de la matriz y al refinamiento de la red porosa (Y. Cao et al., 2025; Jackson et al., 2017; Wei et al., 2005). Por el contrario, sustituciones superiores al 30% tienden a reducir la resistencia temprana debido al efecto de dilución, la menor cantidad de clinker hidratable y la posible presencia de partículas de ceniza sin reaccionar (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; Zhou et al., 2021).

La formación de C-A-S-H está condicionada por la disponibilidad de silicio y aluminio reactivos, la fracción amorfa de la ceniza, la presencia de calcio proveniente de la portlandita, el ambiente alcalino, la finura y las condiciones de curado. En consecuencia, la presencia de ceniza volcánica no garantiza por sí sola la formación de estos productos; el mecanismo depende de la interacción entre la reactividad del material y las condiciones químicas de la matriz cementante (Fernandes et al., 2025; Játiva et al., 2025; Kupwade-Patil, De Wolf, et al., 2018; Tomoyose et al., 2020).

Esta interpretación explica por qué las sustituciones moderadas suelen superar a los reemplazos elevados. Cuando existe suficiente clinker hidratable, la matriz dispone de portlandita para sostener la reacción puzolánica; cuando el reemplazo es excesivo, disminuye la fuente de calcio y aumenta la fracción de ceniza potencialmente no reaccionada. No obstante, este límite puede desplazarse mediante molienda, activación, curado prolongado o sistemas cementantes ternarios, siempre que su eficacia técnica y ambiental sea comprobada (Ababneh et al., 2024; Bawab et al., 2024; Khan & Amin, 2017; Martín-Rodríguez et al., 2024; Zhou et al., 2021).

Para la resistencia a flexión, la evidencia ubica el rango más favorable entre 10% y 15%, como se presenta en la Tabla 3. Este comportamiento se relaciona con el refinamiento de la matriz y de la zona de transición interfacial, que mejora la adherencia árido–pasta y la respuesta frente a esfuerzos de tracción por flexión (Bawab et al., 2024; Khan et al., 2022; Peng et al., 2024). Sin embargo, incrementos adicionales pueden reducir la trabajabilidad y retrasar el fraguado, especialmente cuando la finura del material aumenta la demanda de agua o cuando predomina el efecto de dilución (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain, 2003).

En conjunto, la finura, la composición química, la fracción amorfa, los procesos de activación y el régimen de curado determinan si una sustitución elevada puede mantener un desempeño mecánico aceptable. Por ello, el porcentaje de ceniza volcánica no debe utilizarse como único criterio de diseño (M. Cao & Zhang, 2023; Hazarika et al., 2025; Kupwade-Patil, Tyagi, et al., 2016; Masmoudi et al., 2017).

5.3 Durabilidad: beneficios y límites de desempeño.

La evidencia científica confirma que la ceniza volcánica (CV) mejora de forma significativa la durabilidad del concreto, especialmente frente al ataque por sulfatos y la penetración de cloruros. Los rangos de sustitución del 10–20% resultan óptimos para equilibrar desempeño mecánico y durabilidad, aunque niveles de hasta 40% pueden evaluarse cuando se prioriza la resistencia química a largo plazo, aunque su comportamiento depende de la reactividad y del diseño de la mezcla, como se sintetiza en la Tabla 4. Este comportamiento se explica por la reacción puzolánica de la CV, que consume la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), refina la estructura de poros y limita la formación

de etringita expansiva en ambientes sulfatados (Bawab et al., 2025b; Canpolat et al., 2007; Das Gupta et al., 2025).

Asimismo, en el rango de 10–20%, se reportan reducciones de hasta 80–90% en la permeabilidad y en la difusión de cloruros, atribuibles a la densificación de la matriz y a la formación de sal de Friedel, que inmoviliza químicamente los cloruros (Anwar Hossain, 2006; Edris et al., 2021; Ibrahim et al., 2025). No obstante, reemplazos superiores al 40% pueden incrementar la profundidad de carbonatación y reducir la resistencia mecánica debido a la disminución de la reserva alcalina del concreto (Flores Medina et al., 2015; Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016; Lammertijn & De Belie, 2008). Por tanto, el contenido de CV debe definirse como un parámetro de diseño crítico, particularmente relevante para contextos con alta disponibilidad de recursos volcánicos como Ecuador.

5.4 Oportunidades y condiciones para la valorización de ceniza volcánica en Ecuador.

Ecuador presenta condiciones geológicas favorables para investigar cenizas volcánicas y puzolanas naturales como potenciales materiales cementantes suplementarios, debido a su ubicación en una región de actividad volcánica recurrente. Sin embargo, esta condición no equivale automáticamente a disponibilidad industrial, ya que el aprovechamiento depende de la accesibilidad, continuidad, volumen, composición química, mineralogía y reactividad de cada fuente (Pinos-Velez et al., 2024; Toulkeridis & Zach, 2017).

La principal oportunidad para Ecuador consiste en desarrollar una base técnica que permita diferenciar entre cenizas con potencial puzolánico, materiales que requieren tratamiento previo y fuentes que no presentan reactividad suficiente. Esta necesidad se justifica por la variabilidad del contenido de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , fase amorfa, mineralogía, finura y superficie específica reportada para materiales volcánicos de diferentes procedencias (Gil-Martín et al., 2025; Shahjalal et al., 2025; Sokołowska, 2025). En consecuencia, los rangos de sustitución obtenidos con cenizas de otras regiones no deben extrapolarse directamente a materiales ecuatorianos.

Los procesos de tratamiento deben definirse de acuerdo con las características iniciales del material. El secado puede ser necesario para controlar la dosificación; la molienda y la clasificación granulométrica pueden aumentar la superficie específica y mejorar el efecto filler; y la activación mecánica, térmica o química puede evaluarse cuando la reactividad sea insuficiente. No obstante, estas alternativas pueden incrementar la demanda energética, los costos y las emisiones asociadas, por lo que deben justificarse mediante un balance técnico, económico y ambiental (Ababneh et al., 2024; Khan & Amin, 2017; Martín-Rodríguez et al., 2024; Zhang et al., 2025).

La logística también condiciona la viabilidad industrial. La distancia entre las fuentes, las plantas cementeras, las concreteras y las obras puede modificar los beneficios ambientales y económicos obtenidos mediante la reducción del clínker. Por ello, un material con comportamiento favorable en laboratorio podría no ser viable si requiere transporte prolongado, procesamiento energético intensivo o no presenta regularidad en calidad y suministro (Cavalieri et al., 2024; Mohamad et al., 2020).

En el plano normativo, la incorporación de ceniza volcánica requiere criterios de aceptación relacionados con la composición química, finura, pérdida por ignición, actividad puzolánica, resistencia relativa y durabilidad, los cuales deberán adaptarse a las características de los cementos, agregados y condiciones de exposición locales.

En consecuencia, las oportunidades para Ecuador deben entenderse como una agenda de investigación, normalización y transferencia tecnológica. En la Tabla 6 se muestran las condiciones principales para la valorización de la ceniza volcánica como SCM, incluyendo disponibilidad real del recurso, caracterización, tratamiento, desempeño, logística, impacto ambiental y control normativo.

Tabla 6. Condiciones para la valorización de ceniza volcánica como material cementante suplementario en Ecuador.

Dimensión	Aspecto crítico	Información requerida	Implicación para Ecuador
Disponibilidad del recurso	Presencia de depósitos o emisiones aprovechables	Inventario geológico, volumen, accesibilidad y continuidad	No debe asumirse disponibilidad industrial sin datos
Caracterización química	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, álcalis, SO ₃	XRF, LOI, control químico	Define si el material puede actuar como puzolana
Caracterización mineralógica	Fase amorfa, fases cristalinas, vidrio volcánico	XRD, cuantificación de fase amorfa	Controla la reactividad puzolánica
Propiedades físicas	Finura, tamaño de partícula, superficie específica	Granulometría, Blaine/BET	Influye en reactividad, demanda de agua y trabajabilidad
Beneficio del material	Secado, molienda, clasificación	Protocolo de procesamiento	Mejora uniformidad y desempeño
Desempeño mecánico	Compresión, flexión, resistencia relativa	Ensayos en mortero y concreto	Define rangos de sustitución viables
Durabilidad	Sulfatos, cloruros, permeabilidad, carbonatación	Ensayos de vida útil y exposición	Determina seguridad para infraestructura
Logística	Distancia a cementeras/concreteras, transporte, humedad	Análisis técnico-económico	Puede definir la viabilidad real
Normativa nacional e internacional	Criterios de aceptación de puzolanas naturales y SCM	Comparación con requisitos internacionales y adaptación a cementos/agregados locales	Necesaria para adopción industrial y control de calidad
Tratamiento del material	Secado, molienda, clasificación y posible activación	Energía requerida, costo, mejora de reactividad y efecto ambiental	El tratamiento debe mejorar desempeño sin anular beneficios ambientales
Impacto ambiental	Reducción de clínker vs. energía de tratamiento	ACV y análisis económico	Evita falsas mejoras ambientales

Fuente: elaboración propia a partir del análisis crítico de la evidencia internacional y de las condiciones identificadas para el contexto ecuatoriano.

La Tabla 6 evidencia que la disponibilidad geológica constituye solo la primera condición para una posible aplicación industrial. La viabilidad real dependerá de que las fuentes presenten continuidad,

accesibilidad y uniformidad composicional; además, los beneficios derivados de la reducción del clínker deberán superar los impactos y costos asociados al secado, molienda, clasificación y transporte. Por tanto, antes de una incorporación normativa o industrial, será necesario validar las cenizas ecuatorianas con cementos y agregados locales, bajo condiciones de exposición representativas del país.

En síntesis, la evidencia revisada indica que las sustituciones entre 10% y 25% ofrecen el equilibrio más consistente entre desempeño mecánico, durabilidad y refinamiento microestructural, aunque estos rangos no constituyen criterios universales. Su eficacia depende de la fracción amorfa, la finura, la disponibilidad de portlandita, las condiciones de curado y el diseño de la mezcla; mientras que reemplazos elevados requieren activación o sistemas ternarios para limitar el efecto de dilución y el riesgo de carbonatación (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016; Zhou et al., 2021). Para Ecuador, la transferencia de estos resultados exige caracterización local, evaluación logística, validación ambiental y criterios normativos antes de una incorporación industrial (Pinos-Velez et al., 2024; Toulkeridis & Zach, 2017).

6. CONCLUSIONES

La revisión sistematizada y el análisis bibliométrico complementario permitieron evaluar el desempeño mecánico, la durabilidad, los mecanismos puzolánicos y las condiciones de aplicación de la ceniza volcánica como material cementante suplementario. A partir de la evidencia analizada, se establecen las siguientes conclusiones:

1. Los contenidos de ceniza volcánica entre 10% y 25% presentan, en términos generales, el equilibrio más favorable entre resistencia mecánica, durabilidad y refinamiento microestructural. No obstante, este intervalo es orientativo y no constituye un criterio universal de dosificación, debido a la variabilidad de la composición química, mineralogía, fracción amorfa, finura, tipo de cemento, relación agua/material cementante y condiciones de curado.
2. El desempeño favorable de la ceniza volcánica se relaciona con su actividad puzolánica y con el efecto físico de sus partículas. La reacción de las fases silicoaluminosas con la portlandita puede promover la formación secundaria de C-S-H y C-A-S-H, reducir la conectividad capilar y densificar la matriz. En sustituciones elevadas, la menor disponibilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el efecto de dilución pueden limitar la reacción, reducir la resistencia temprana y dejar una fracción del material sin reaccionar.
3. Las sustituciones moderadas pueden mejorar la resistencia frente al ingreso de agua, cloruros y sulfatos; sin embargo, los reemplazos elevados pueden reducir la reserva alcalina y aumentar la susceptibilidad a la carbonatación. Por tanto, la contribución de la ceniza volcánica a la reducción del factor clínker debe evaluarse conjuntamente con la resistencia mecánica, la durabilidad y la vida útil, y no únicamente a partir del porcentaje de cemento sustituido.
4. Para Ecuador, la ceniza volcánica representa una alternativa potencial, pero todavía condicionada a la validación local. Su aplicación requiere identificar y caracterizar las fuentes disponibles, evaluar la variabilidad del material, definir los tratamientos necesarios, comprobar su comportamiento con cementos y agregados locales y analizar la logística, los costos, el impacto ambiental y los criterios normativos. En consecuencia, su incorporación industrial requiere validación técnica, normativa, logística y ambiental antes de establecer rangos de sustitución aplicables al país.

En otras palabras, la valorización de la ceniza volcánica en Ecuador no debe limitarse a la extrapolación directa de rangos óptimos internacionales, sino que exige el establecimiento de una

agenda nacional de investigación aplicada y transferencia tecnológica. Para transitar de la identificación territorial del recurso a su incorporación segura y viable en la industria de la construcción, es imperativo ejecutar caracterizaciones detalladas de las fuentes locales, evaluar procesos de tratamiento y molienda controlada, y desarrollar estudios de durabilidad en condiciones reales de exposición. Finalmente, el éxito de esta alternativa sostenible depende de la creación de marcos normativos y criterios de control de calidad específicos que garanticen la compatibilidad logística, ambiental y económica de la ceniza volcánica como SCM en el contexto ecuatoriano.

7. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la “Escuela de Hábitat, Infraestructura y Creatividad” y a la “Dirección de Investigación” de la “Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ambato” por su apoyo en la realización de esta investigación.

8. REFERENCIAS

- A Lachemi, K. M. (2004). *Residual strength and durability of volcanic ash concrete exposed to high temperature*.
- Ababneh, A. N., Matalkah, F., & Al-Akhras, M. (2024). *The use of graphene nanoplatelets for enhancement of the compressive strength of mortar containing high-levels of natural Pozzolan*. Construction and Building Materials, 449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138302>
- Ali, M. K., Kareem, Q., Ahmad, S., Shawkat, I. A., & Kassim, M. M. (2023). *Compressive and Flexural Strength of High-Volume Fly Ash Mortars Aged with Air-entraining Admixtures*. E3S Web of Conferences, 427. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342702017>
- Al-jabali, H. M., Edris, W. F., Al-Tamimi, M., Al Sayed, A. A. K. A., & Selouma, T. I. (2025). *Evaluation of the degradation of mortar with volcanic tuff replacement via destructive and non-destructive testing*. Case Studies in Construction Materials, 22. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04308>
- Al-Swaidani, A. M. (2017). *Production of more durable and sustainable concretes using volcanic scoria as cement replacement*. Materiales de Construcción, 67(326). <https://doi.org/10.3989/mc.2017.00716>
- al-Swaidani, A. M., Aliyan, S. D., & Adarnaly, N. (2016). *Mechanical strength development of mortars containing volcanic scoria-based binders with different fineness*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 19(2), 970–979. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.12.006>
- Altamari, F., Barbieri, L., Saccani, A., & Lancellotti, I. (2025). *Recycling Volcanic Lapillus as a Supplementary Cementitious Material in Sustainable Mortars*. Recycling, 10(4). <https://doi.org/10.3390/recycling10040153>
- Amine, Y., Leklou, N., & Amiri, O. (2017). *Effect of supplementary cementitious materials (scm) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes*. Energy Procedia, 139, 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.254>
- Anwar Hossain, K. M. (n.d.). *Performance of Volcanic Ash Based Precast and In Situ Blended Cement Concretes in Marine Environment*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200517:6694>
- Anwar Hossain, K. M. (2006). *High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures*. Cement and Concrete Composites, 28(6), 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.013>
- Bashir, M. I., & Elahi, A. (2023). *Micro Structural Study of Concrete with Indigenous Volcanic Ash* †. Engineering Proceedings, 44(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2023044019>

- Bawab, J., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & Khatib, J. (2024). *Synergetic impact of volcanic ash and calcium carbide residue on the properties and microstructure of cementitious composites*. Construction and Building Materials, 439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137390>
- Bawab, J., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & Khatib, J. (2025a). *Recycling of volcanic ash and carbide slag in blended mortars: A multi-criteria performance assessment*. Environmental Challenges, 20. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101222>
- Bawab, J., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & Khatib, J. (2025b, August). *Optimizing the Mix Design of Cementitious Composites Incorporating Volcanic Ash by Taguchi-TOPSIS Method*. Proceedings of the 11th World Congress on New Technologies. <https://doi.org/10.11159/icceia25.155>
- Begaye, M. L., Aboubakr, S. H., Kim, J. J., & Reda Taha, M. M. (n.d.). *NANO-CREEP OF SYNTHETIC CSH PRODUCED USING 1.5 AND 0.7 CAO/SIO 2 MIXTURE RATIOS*.
- Canpolat, F., Yurdusev, M. A., Targan, S., & Yilmaz, K. (2007). *Sulfate resistance of mortars with and without silica fume and natural pozzolan*. Sustainable Construction Materials and Technologies - International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 325–332.
- Cao, M., & Zhang, H. (2023). *Fractal characteristics of particle groups and mechanochemical effects of Yellow River sediment after mechanical grinding*. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 12(10), 1322 – 1333. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2218841>
- Cao, Y., Chen, L., Xie, G., Zhang, L., & Fan, Z. (2025). *Simulation the Hydration Process and Products Evolution of Low-Heat Cement Blended with Fly Ash*. In G. Feng, B. Zhang, W. X.-Y., J. Zhao, & A. Almerich-Chulia (Eds.), *Sustainable Civil Infrastructures* (pp. 393–401). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87959-3_34
- Cascone, S., Fazio, M., & Saeli, M. (2025). *Building Sustainability with Volcanic Ash: A Green Roof System Innovation*. Lecture Notes in Civil Engineering, 611 LNCE, 134–149. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71863-2_9
- Cavalieri, M., Ferrara, P. L., Finocchiaro, C., & Martorana, M. F. (2024). *An Economic Analysis of the Use of Local Natural Waste: Volcanic Ash of Mt. Etna Volcano (Italy) for Geopolymer Production*. Sustainability (Switzerland), 16(2). <https://doi.org/10.3390/su16020740>
- Dahiru, D., Ibrahim, M., & Gado, A. A. (2019). *Evaluation of the Effect of Volcanic Ash on the Properties of Concrete 1 2 3*. In ATBU Journal of Environmental Technology (Vol. 12).
- Darwis, F., Banggu, I., & Sultan, M. A. (2018). *The Effects Of Volcanic Ash On The Strength And Permeability Mortar*. <https://doi.org/10.2991/icst-18.2018.78>
- Das Gupta, S., Zayed, A., Ferraro, C., & Riding, K. (2025). *Sulfate Durability of Type IL-Slag Blended Cement under Different Curing Exposures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 37(12). <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-20938>
- de Siqueira, A. A., & Cordeiro, G. C. (2022). *Sustainable Cements Containing Sugarcane Bagasse Ash and Limestone: Effects on Compressive Strength and Acid Attack of Mortar*. Sustainability (Switzerland), 14(9). <https://doi.org/10.3390/su14095683>
- Demirel, B., & Keleştemur, O. (2010). *Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume*. Fire Safety Journal, 45(6–8), 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.08.002>
- Díaz, J. E., Izquierdo, S. R., de Gutiérrez, R. M., & Gordillo S., M. (2013). *Ternary mixture of portland cement, blast furnace slag and limestone: Mechanical strength and durability; [Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad]*. Revista de la Construcción, 12(3), 53 – 60.
- Djon Li Ndjock, B. I., Elimbi, A., & Cyr, M. (2017). *Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation*. Journal of Non-Crystalline Solids, 463, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.02.024>

- Edris, W. F., Abdelkader, S., Salama, A. H. E., & Al Sayed, A. A. K. A. (2021). *Concrete behaviour with volcanic tuff inclusion*. Civil Engineering and Architecture, 9(5), 1434–1441. <https://doi.org/10.13189/CEA.2021.090516>
- Elshinawy, A., Yousry Elshikh, M. M., Kaloop, M. R., El-Demerdash, W. E., & Elemam, W. E. (2025). *An experimental investigation on mechanical characteristics of steel-fiber-reinforced volcanic concrete*. Next Materials, 6. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2024.100308>
- Fernandes, I. V., Gonçalves da Silva, A. G. A., Santos, M. D., Nascimento, C. F. G., Lima, V. M. E., Holanda, R. M., & Melo Neto, A. A. (2025). *Physicochemical and microstructural interactions between cement and textile sludge ash for application in dry concrete*. Journal of Building Engineering, 112, 113919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113919>
- Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I., Maltseva, O., & Palomo, A. (2023). *Sustainable Cements: Hybrid Alkaline Cements Overview*. In RILEM Bookseries (Vol. 40, pp. 626–639). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7_68
- Flores Medina, N., Barluenga, G., & Hernández-Olivares, F. (2015). *Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement*. Construction and Building Materials, 96, 556–566. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.050>
- Gao, R., Zhao, S., Li, Q., & Chen, J. (2010). *Experimental study of the deterioration mechanism of concrete under sulfate attack in wet-dry cycles*. Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal, 43(2), 48–54.
- Garces-Vargas, J. F., Díaz-Cardenas, Y., & Martirena Hernandez, J. F. (2024). *Evaluation of the Durability of Concrete with the Use of Calcined Clays and Limestone in Salinas, Ecuador*. Minerals, 14(5). <https://doi.org/10.3390/min14050460>
- Gil-Martín, L. M., Oliveira, M. J., Fernández-Ruiz, M. A., Branco, F. G., & Hernández-Montes, E. (2025). *Sustainable Use of Volcanic Ash in Mortars as a Replacement for Cement or Sand: Shrinkage and Physical and Mechanical Properties*. Materials, 18(15). <https://doi.org/10.3390/ma18153694>
- Hasan, M. S., Karmokar, J., & Mahmood, S. M. F. (2024). *Strength and Workability of Concrete Incorporating Volcanic Ash as a Partial Replacement for Cement*. Lecture Notes in Civil Engineering, 512 LNCE, 251–258. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63280-8_26
- Hazarika, A., Huang, L., Erlingsson, S., de Weerd, K., Löfgren, I., Iftikhar, S., & Babaahmadi, A. (2025). *Characterization, activation and reactivity – A case study of Nordic volcanic materials for application as Supplementary Cementitious Materials*. Case Studies in Construction Materials, 22. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04096>
- Ho, L. S., Ngo, H. T. T., Vu, H. T., Nguyen, S. T., Chau, V. N., & Dang, V. Q. (2023). *Durability of mortar and concrete containing pozzolans as a partial cement replacement in the marine environment: a review*. Journal of Science and Transport Technology, 3(3), 13 – 25. <https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2023.en.3.3.13-25>
- Hossain, A. (n.d.). *Lightweight structural concrete incorporating volcanic materials for sustainable construction*.
- Hossain, A., Khandaker, M. A., & Lachemi, M. (2006). *Development of volcanic ash concrete: Strength, durability, and microstructural investigations*. ACI Materials Journal.
- Hossain, K. M. A. (2003). *Blended cement using volcanic ash and pumice*. Cement and Concrete Research, 33(10), 1601–1605. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00127-3)
- Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2004). *Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar*. Cement and Concrete Research, 34(4), 695–702. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.021>

- Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2007). *Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete*. Cement and Concrete Research, 37(5), 759–766. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.014>
- Hossain, M. U., Dong, Y., & Ng, S. T. (2021). *Influence of supplementary cementitious materials in sustainability performance of concrete industry: A case study in Hong Kong*. Case Studies in Construction Materials, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00659>
- Hu, Y. J., & Du, Y. L. (2013). *Effect of pore structure on the chloride permeability of concrete with mineral admixture*. Advanced Materials Research, 690–693, 835–838. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.835>
- Ibrahim, M., Bahraq, A. A., Salami, B. A., Alhems, L. M., Hussaini, S. R., Nasir, M., & Adewumi, A. A. (2025). *Pore Structure Characterization and Environmental Assessment of Ground Volcanic Pumice-Based Alkali-Activated Concrete*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00791-3>
- Jackson, M. D., Mulcahy, S. R., Chen, H., Li, Y., Li, Q., Cappelletti, P., & Wenk, H. R. (2017). *Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete*. American Mineralogist, 102(7), 1435–1450. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5993CCBY>
- Játiva, A., Corominas, A., & Etxeberria, M. (2025). *Durable Mortar Mixes Using 50% of Activated Volcanic Ash as A Binder*. Materials, 18(8). <https://doi.org/10.3390/ma18081777>
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W., & Saeting, T. (2007). *Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash*. Construction and Building Materials, 21(7), 1399–1405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.005>
- Jubera-Pérez, F. J., Jaizme-Vega, E., Rosa-Orihuela, R., Damas-Montesdeoca, R., Hernández-Díaz, C., Rodríguez-Díaz, J., & González-Díaz, E. (2024). *Pozzolan activity of volcanic ashes produced by the eruption of the Tajogaite Volcano in La Palma, Canary Islands*. Construction and Building Materials, 419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135498>
- Keshta, M. M., Elshikh, M. M. Y., Abd Elrahman, M., & Youssf, O. (2022). *Utilizing of Magnetized Water in Enhancing of Volcanic Concrete Characteristics*. Journal of Composites Science, 6(10). <https://doi.org/10.3390/jcs6100320>
- Khan, K., & Amin, M. N. (2017). *Influence of fineness of volcanic ash and its blends with quarry dust and slag on compressive strength of mortar under different curing temperatures*. Construction and Building Materials, 154, 514–528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.214>
- Khan, K., Amin, M. N., Saleem, M. U., Qureshi, H. J., Al-Faiad, M. A., & Qadir, M. G. (2019). *Effect of fineness of basaltic volcanic ash on pozzolanic reactivity, ASR expansion and drying shrinkage of blended cement mortars*. Materials, 12(16). <https://doi.org/10.3390/ma12162603>
- Khan, K., Amin, M. N., Usman, M., Imran, M., Al-Faiad, M. A., & Shalabi, F. I. (2022). *Effect of Fineness and Heat Treatment on the Pozzolan Activity of Natural Volcanic Ash for Its Utilization as Supplementary Cementitious Materials*. Crystals, 12(2). <https://doi.org/10.3390/cryst12020302>
- Kiran Kumar, V., Seshadri Sekhar, T., & Srinivasa Rao, P. (2024). *EXPERIMENTAL STUDIES ON QUATERNARY BLENDED CONCRETE UNDER ACID RESISTANCE, SULPHATE RESISTANCE, WATER PERMEABILITY, AND CHLORIDE PERMEABILITY*. Indian Concrete Journal, 98(9), 51–58.
- Klausen, A. B. E., Menga, A., & Kanstad, T. (2025). *Compressive strength development of concretes with volcanic ash exposed to realistic temperature conditions*. In M. Briffaut & J. M. Torrenti (Eds.), fib Symposium (pp. 825–833). fib. The International Federation for Structural Concrete.
- Kupwade-Patil, K., Al-Aibani, A. F., Abdulsalam, M. F., Mao, C., Bumajdad, A., Palkovic, S. D., & Büyüköztürk, O. (2016). *Microstructure of cement paste with natural pozzolan volcanic ash*

- and Portland cement at different stages of curing. *Construction and Building Materials*, 113, 423–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.084>
- Kupwade-Patil, K., Chin, S., Ilavsky, J., Andrews, R. N., Bumajdad, A., & Büyüköztürk, O. (2018). *Hydration kinetics and morphology of cement pastes with pozzolanic volcanic ash studied via synchrotron-based techniques*. *Journal of Materials Science*, 53(3), 1743–1757. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1659-4>
- Kupwade-Patil, K., De Wolf, C., Chin, S., Ochsendorf, J., Hajiah, A. E., Al-Mumin, A., & Büyüköztürk, O. (2018). *Impact of Embodied Energy on materials/buildings with partial replacement of ordinary Portland Cement (OPC) by natural Pozzolan volcanic Ash*. *Journal of Cleaner Production*, 177, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.234>
- Kupwade-Patil, K., Palkovic, S. D., Bumajdad, A., Soriano, C., & Büyüköztürk, O. (2018). *Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography*. *Construction and Building Materials*, 158, 574–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.165>
- Kupwade-Patil, K., Tyagi, M., Brown, C. M., & Büyüköztürk, O. (2016). *Water dynamics in cement paste at early age prepared with pozzolanic volcanic ash and Ordinary Portland Cement using quasielastic neutron scattering*. *Cement and Concrete Research*, 86, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.04.011>
- Lammertijn, S., & De Belie, N. (2008). *Porosity, gas permeability, carbonation and their interaction in high-volume fly ash concrete*. *Magazine of Concrete Research*, 60(7), 535–545. <https://doi.org/10.1680/mac.2008.60.7.535>
- Letelier, V., Ortega, J. M., Tarela, E., Muñoz, P., Henríquez-Jara, B. I., & Moriconi, G. (2018). *Mechanical performance of eco-friendly concretes with volcanic powder and recycled concrete aggregates*. *Sustainability (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/su10093036>
- Liu, J. C., Hossain, M. U., Xuan, D., Ali, H. A., Ng, S. T., & Ye, H. (2023). *Mechanical and durability performance of sustainable concretes containing conventional and emerging supplementary cementitious materials*. *Developments in the Built Environment*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100197>
- Liu, J., Wu, K., Wang, Y., & Yang, Y. (2017). *Effects of fly ash/diatomite admixture with variable particle sizes on the mechanical properties and porosity of concrete*. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 32(5), 1072–1079. <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1713-8>
- Lo, T. Y., Nadeem, A., Tang, W. C. P., & Yu, P. C. (2009). *The effect of high temperature curing on the strength and carbonation of pozzolanic structural lightweight concretes*. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1306–1310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.026>
- Martín-Rodríguez, P., Fernández-Jiménez, A., Alonso, M. del M., Palomo, A., & García-Lodeiro, I. (2024). *Valorisation of “La Palma” Volcanic Ash for Making Portland-Blended, Alkaline and Hybrid Portland-Alkaline Cements*. *Materials*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/ma17010242>
- Masmoudi, R., Kupwade-Patil, K., Bumajdad, A., & Büyüköztürk, O. (2017). *In situ Raman studies on cement paste prepared with natural pozzolanic volcanic ash and Ordinary Portland Cement*. *Construction and Building Materials*, 148, 444–454. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.016>
- Mitrović, A. A. (2011). *Pozzolan obtained by mechanochemical treatment of kaolinite clay*. *AIP Conference Proceedings*, 1400, 82–86. <https://doi.org/10.1063/1.3663090>
- Mohamad, S. A., Al-Hamd, R. K. S., & Khaled, T. T. (2020). *Investigating the effect of elevated temperatures on the properties of mortar produced with volcanic ash*. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0274-4>

- Nair, N. A., & Viswanathan, T. S. (2023). *β -CaSiO₃ and colloidal n-SiO₂ based blended cement composites- their properties, regression analysis and micro-characterization studies*. *Materiales de Construcción*, 73(350). <https://doi.org/10.3989/mc.2023.304722>
- Nováková, I., Jhatial, A. A., Kekez, S., Gjerløw, E., Gulik, V., Kannathasan, K. R., Vaišnoras, M., & Krasnikovs, A. (2024). *Investigating the Influence of Oil Shale Ash and Basalt Composite Fibres on the Interfacial Transition Zone in Concrete*. *Buildings*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/buildings14071952>
- Ogunbode, E. B., & Hassan, I. O. (2011). *Effect of addition of calcium nitrate on selected properties of concrete containing volcanic ash*. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 10(19), 29–38.
- Omikrine Metalssi, O., Quiertant, M., Jabbour, M., & Baroghel-Bouny, V. (2024). *Effect of Exposure Conditions on Mortar Subjected to an External Sulfate Attack*. *Materials*, 17(13). <https://doi.org/10.3390/ma17133198>
- Özen, S., & Uzal, B. (2021). *Effect of mineralogical composition of clinoptilolite-bearing tuffs on their performance as a natural pozzolan in cementitious systems*. *Advances in Concrete Construction*, 12(1), 25–31. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.1.025>
- Peng, G., Zhang, G., Zuo, X., Ding, H., Chen, X., Wang, H., & Liu, X. (2024). *Mechanism for the Influence of Added Hydrated Lime on Mechanical Properties of Ultra-high Strength Concrete*. *Cailiao Daobao/Materials Reports*, 38(3). <https://doi.org/10.11896/cldb.22060068>
- Petroche, D. M., & Ramirez, A. D. (2022). *The Environmental Profile of Clinker, Cement, and Concrete: A Life Cycle Perspective Study Based on Ecuadorian Data*. *Buildings*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/buildings12030311>
- Pinos-Velez, V. P., Araujo, G. S., Echeverria-Paredes, P., Abril, M., Acosta, S., Cipriani-Ávila, I., Moulatlet, G. M., & Capparelli, M. V. (2024). *Acute and Chronic Ecotoxicity of Daphnia magna Exposed to Ash Leachate from the Cotopaxi Volcano, Ecuador*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 113(3). <https://doi.org/10.1007/s00128-024-03946-2>
- Pinto-Almeida, C., Abril-Camino, A., & Abril-Camino, D. (2025). *Mechanical Performance of Volcanic Ash Concrete Showing Modulus Reduction with Strength Retention*. *Civil Engineering Journal*, 11(10), 4422–4435. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-10-024>
- Rajesh, A., Gowdhaman, D., & Sumathi, A. (2023). *Utilization of industrial and agricultural waste as supplementary cementitious addition in bacteria concrete—a review*. In *Valorization of Wastes for Sustainable Development: Waste to Wealth*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95417-4.00016-0>
- Rajesh, J., & Kandasamy, S. (2025). *Particle size reduction effects on fly ash pozzolanic performance in cement*. *Construction and Building Materials*, 494, 143458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143458>
- Rodrigues, A. L. M. V., Mendes, Á. Á. F., Gomes, V., Battagin, A. F., Saade, M. R. M., & Da Silva, M. G. (2022). *Environmental and Mechanical Evaluation of Blended Cements With High Mineral Admixture Content*. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.880986>
- Rols, S., Ambroise, J., Péra, J., & Chabannet, M. (2000). *Calcined paper sludge-pozzolanic admixture to improve sulfate resistance of concrete*. In V. M. Malhotra (Ed.), *American Concrete Institute, ACI Special Publication: SP-192* (pp. 353–367). American Concrete Institute.
- Rovnaník, P., Teplý, B., & Rovnaníková, P. (2007). *Concrete mix and environmental load in the context of durability and reliability*. *CESB 2007 PRAGUE International Conference - Central Europe Towards Sustainable Building*, 2.
- Shahjalal, M., Sabrin, R., Bachu, H. A. E., Habib, M. M. L., Mobasharah, N., & Billah, A. H. M. (2025). *Repurposing waste pozzolans for cleaner mortar production: mechanical and durability*

- properties with microstructural behavior. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 52(9), 1698–1717. <https://doi.org/10.1139/cjce-2025-0014>
- Sharfuddin Ahmed, M., Kayali, O., & Anderson, W. (n.d.). *Evaluation of Binary and Ternary Blends of Pozzolan Materials Using the Rapid Chloride Permeability Test*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200921:9446>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., & Scrivener, K. (2021). *Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review*. *Cement and Concrete Research*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- Siddique, R. (2012). *Properties of concrete made with volcanic ash*.
- Sideris, K. K., & Savva, A. E. (2001). *Resistance of Fly Ash and Natural Pozzolans Blended Cement Mortars and concrete to carbonation, sulfate attack and chloride ion penetration*. American Concrete Institute, ACI Special Publication, SP-199, 275–293. <https://doi.org/10.14359/10499>
- Singh, L. P., Zhu, W., Howind, T., & Sharma, U. (2017). *Quantification and characterization of C-S-H in silica nanoparticles incorporated cementitious system*. *Cement and Concrete Composites*, 79, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.004>
- Singh, N., Sharma, R. L., & Yadav, K. (2023). *Sustainable development by carbon emission reduction and its quantification: an overview of current methods and best practices*. In *Asian Journal of Civil Engineering* (Vol. 24, Number 8, pp. 3797–3822). Institute for Ionics. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00732-z>
- Singh, S., Sahu, I., Majmundar, B. P., David, R., Singh, J., Vanitha, S., & Thakur, G. (2026). *Multi-Scale evaluation and predictive modeling of volcanic Ash–Silica fume aggregate concrete for sustainable construction*. *Architecture, Structures and Construction*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s44150-026-00187-1>
- Sokołowska, J. J. (2025). *Utilizing Sakurajima Volcanic Ash as a Sustainable Partial Replacement for Portland Cement in Cementitious Mortars*. *Sustainability* (Switzerland), 17(17). <https://doi.org/10.3390/su17177576>
- Souza, M. T., Onghero, L., Sakata, R. D., Neto, F. C., de Campos, C. E. M., de Castro Pessôa, J. R., Repette, W. L., & de Oliveira, A. P. N. (2023). *Insights into the acting mechanism of ettringite in expansive Portland cement*. *Materials Letters*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134496>
- Suraneni, P., Hajibabaei, A., Ramanathan, S., Wang, Y., & Weiss, J. (2019). *New insights from reactivity testing of supplementary cementitious materials*. *Cement and Concrete Composites*, 103, 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.017>
- Tomoyose, A., Noguchi, T., Sodeyama, K., & Higashi, K. (2020). *Concrete with high-purity volcanic glass fine powder manufactured from pyroclastic deposit*. *SN Applied Sciences*, 2(5). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2614-6>
- Toulkeridis, T., & Zach, I. (2017). *Wind directions of volcanic ash-charged clouds in Ecuador—implications for the public and flight safety*. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 242–256. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1199445>
- Uzbaş, B., & Aydın, A. C. (2019). *Analysis of Fly Ash Concrete With Scanning Electron Microscopy and X-Ray Diffraction*. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 13(4), 100–110. <https://doi.org/10.12913/22998624/114178>
- Vedalakshmi, R., Raj, A. S., Srinivasan, S., & Babu, K. G. (2003). *Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique*. *Thermochimica Acta*, 407(1–2), 49–60. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00286-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00286-7)
- Wahyuni, Abdullah, Mulyati, S., & Hayati, Y. (2025). *Performance analysis of ordinary portland cement and portland pozzolan cement in improving sea sand and sea water concrete with*

- zeolite powder. *Journal of Ecological Engineering*, 26(4), 264–274. <https://doi.org/10.12911/22998993/200278>
- Wang, Y., Hu, Y., He, X., Su, Y., Strnadel, B., & Miao, W. (2023). *Hydration and compressive strength of supersulfated cement with low-activity high alumina ferronickel slag*. *Cement and Concrete Composites*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104892>
- Wang, Y., Liu, H., Nie, Z., Xue, R., Zhu, W., & Sun, X. (2025). *Experimental investigation into the influence of calcium aluminate cement on the micro- and macro-mechanical properties of the interfacial transition zone in geopolymer concrete*. *Developments in the Built Environment*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100618>
- Wei, F., Lu, Y., Lan, X., & Xu, Z. (2005). *Hydration products of fly ash cement-based material*. Kuei Suan Jen Hsueh Pao/ *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 33(1), 52-56+62.
- Xiong, C., Zhou, Y., Jin, Y., Liu, C., & Feng, P. (2022). *Fabrication, structure, and mechanical properties of a high-order calcium silicate hydrate based on polymer and pH tuning*. *Materials Today Communications*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105020>
- Yu, L., Zhou, S., & Deng, W. (2015). *Pozzolanic activity of volcanic rocks from Southern Jiangxi Province, China*. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 5(3), 176–198. <https://doi.org/10.1080/21650373.2015.1010660>
- Zeyad, A. M., Shubaili, M., & Abutaleb, A. (2023). *Using volcanic pumice dust to produce high-strength self-curing concrete in hot weather regions*. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01927>
- Zhang, J., Yang, Y., Li, X., & Chi, C. (2025). *Alkali activation of industrial waste fly ash to produce high-value-added C-S-H seeds*. *Advances in Cement Research*. <https://doi.org/10.1680/jadcr.24.00141>
- Zhao, J., Li, D., Liao, S., Wang, D., Wang, H., & Yan, P. (2018). *Influence of mechanical grinding on pozzolanic characteristics of circulating fluidized bed fly ash (CFA) and resulting consequences on hydration and hardening properties of blended cement*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132(3), 1459–1470. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7103-4>
- Zhou, Z., Sofi, M., Sabri, Y., Liu, J., Kang, S., & Mendis, P. (2021). *Microstructural Investigation of High-Volume Fly Ash Composites Containing Nano-Calcium Silicate Hydrate Crystals*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003974](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003974)
- Zhuginissov, M. T., Kuldeyev, E. I., Nurlybayev, R. E., Khamza, Y. Y., Orynbekov, Y. S., & Iskakov, A. (2026). *Use of fly ash and ground tuff as pozzolanic additives in lightweight structural*. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, 339(4), 38–51. <https://doi.org/10.31643/2026/6445.39>
- Zunino, F., & Scrivener, K. (2025). *Hydration and strength development of low-clinker (<50 %) factor limestone calcined clay cements (LC3): A comparative study with natural pozzolans*. *Construction and Building Materials*, 499, 144075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144075>
- Zunino, F., & Scrivener, K. L. (2024). *The Key Role of Limestone Calcined Clay Cements on the Roadmap towards Eco-Efficient Cement and Concrete*.