



Innovación constructiva para infraestructuras climáticamente inteligentes en Panamá

Constructive innovation for climate-smart infrastructure in Panamá

Gabriel Montúfar

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá
gabriel.montufar@up.ac.pa, <https://orcid.org/0000-0003-3392-3728>

Fecha de recepción: 07/08/2025

Fecha de aceptación: 03/10/2025

DOI <https://doi.org/10.48204/synergia.v4n2.8554>

Resumen

Los impactos del cambio climático sobre la construcción son especialmente graves en climas tropicales, como el panameño, donde elevadas temperaturas, humedad sostenida y lluvias fuertes facilitan los mecanismos de degradación de la construcción. Este artículo expone una revisión sistemática reciente acerca de la incorporación de la nanotecnología en geo-polímeros como opción sostenible de infraestructura resistente al clima en el Canal de Panamá, redes viales, puertos y entornos urbanos. Se describe el comportamiento de algunos nano-materiales representativos: nano-sílice, nano-alúmina, nano-TiO₂, nano-ZnO, nano-arcillas y nanotubos, describiendo también sus mecanismos de acción: perfeccionamiento de la microestructura, disminución de la porosidad, densificación de la matriz y formación de geles N-A-S-H/C-A-S-H. La evidencia compilada se traduce en marcadas aumentos en resistencia a compresión y flexión, módulo elástico, estabilidad térmica; mejora de durabilidad frente a cloruros, sulfatos y ataque ácido; y funciones como la foto-catalítica auto-limpiante. En términos medioambientales, el uso de subproductos (cenizas volantes, escorias, residuos de construcción) permiten una reducción del CO₂ de hasta un 80% frente al cemento Portland, soportan estrategias de economía circular. Se generan tablas comparativas de propiedades y se hace mención del potencial de modelos de aprendizaje automático que permiten predecir desempeño y optimizar mezclas en función de las condiciones locales. Las aplicaciones priorizadas para Panamá incluyen elementos expuestos a ambientes marinos y ciclos húmedo-seco, pavimentos sometidos a islas de calor y sistemas urbanos vulnerables.

Palabras clave: nanotecnología, materiales de construcción, ingeniería civil, cambio climático





Abstract

The impacts of climate change on construction are especially severe in tropical climates, such as Panama's, where high temperatures, sustained humidity, and heavy rainfall facilitate building degradation mechanisms. This article presents a recent systematic review on the incorporation of nanotechnology in geo-polymers as a sustainable option for climate-resilient infrastructure in the Panama Canal, road networks, ports, and urban environments. The behavior of some representative nanomaterials is described: nano-silica, nano-alumina, nanoTiO₂, nanoZnO, nano-clays, and nanotubes. Their mechanisms of action are also described: microstructure enhancement, porosity reduction, matrix densification, and formation of N-A-S-H/C-A-S-H gels. The evidence compiled translates into marked increases in compressive and flexural strength, elastic modulus, and thermal stability; improved durability against chlorides, sulfates, and acid attack; and functions such as self-cleaning photocatalytic properties. In environmental terms, the use of byproducts (fly ash, slag, construction waste) enables a CO₂ reduction of up to 80% compared to Portland cement and supports circular economy strategies. Comparative property tables are generated, and mention is made of the potential of machine learning models that predict performance and optimize mixes based on local conditions. Prioritized applications for Panama include elements exposed to marine environments and wet-dry cycles, pavements subject to heat islands, and vulnerable urban systems.

Keywords: nanotechnology, construction materials, civil engineering, climate change

Introducción

Es conocido que el uso del cemento Portland lleva a un incremento de la huella de carbono y a una aceleración de la degradación en climas tropicales extremados por las altas temperaturas, la alta humedad y por los eventos extremos (Ahmed et al., 2021). En el caso de Panamá, se han podido caracterizar desde el año 2023 sequías y cambios de precipitaciones que impactan la disponibilidad de agua, el comportamiento de vías y la estabilidad del suelo/laderas, lo que ha derivado en una mayor exposición y riesgo de la infraestructura (Ahmed et al., 2022; Imtiaz et al., 2020). Dentro de la literatura se ha referido a los geo-polímeros como una alternativa a emisiones con menor huella de carbono y con mayor durabilidad gracias a la utilización de subproductos industriales y en donde la nanotecnología ha afinado microestructuras, reducido la porosidad y propiciado la aparición de geles de reacciones que mejoran el comportamiento del material (Shilar et al., 2022; Drabczyk et al., 2023).





Aumentos en las resistencias mecánicas y estabilidad frente a agentes agresores han podido ser documentados mediante el uso de nano-refuerzos específicos (Mohammad et al., 2023), así como un buen comportamiento cuando expuestos a la salinidad en ambientes marinos/ribereños, recursos que aparecen como relevantes para el istmo panameño (Wong, 2022; Kaya & Dahi Taleghani, 2025). Hasta cierto punto metodologías y protocolos han sido reportados como aplicaciones en el desarrollo de las mezclas y su evaluación en laboratorio y en campo (Selvarani et al., 2021). Sin embargo, las brechas permanecen en la evidencia extendida bajo ciclos húmedo – seco /salinidad; islas de calor urbano, así como en la evaluación de impactos asimétricos sobre comunidades vulnerables (Konbr & Mamdouh, 2022).

Objetivos de la investigación: (1) entrecruzar evidencia acerca de geo-polímeros nucleados que estén nano-modificados en contextos tropicales; (2) cuantificar efectos de nano-materiales sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad; (3) evaluar idoneidad para escenarios panameños marino-costeros y urbanos; (4) indagar sobre modelos predictivos de optimización de dosificaciones en función de condiciones locales.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión sistemática guiada por PRISMA sobre los geo-polímeros nano-modificados aplicados a la infraestructura en climas tropicales con especial atención a Panamá. El diseño responde a los objetivos que se establecen: sintetizar evidencias, evaluar los efectos de los nano-materiales, valorar su desempeño en situaciones locales y bosquejar un marco para la predicción de sus dosificaciones. Para la búsqueda se emplearon las bases de datos Scopus, Web of Science y Google Scholar entre los años 2010 y 2025, combinando términos en español e inglés vinculados a geo-polímeros, nanotecnología (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , CNT), durabilidad y ambientes marino-costero-tropicales.





El diagrama esbozado por PRISMA expone: identificados N₁, tras la depuración de duplicados-N₂, cribados por título-resumen-N₃, evaluados a texto completo-N₄ e incluidos-N₅. Se incluyeron estudios que tuviesen datos cuantitativos de propiedades mecánicas y/o de durabilidad en matrices geo-poliméricas con nano-materiales, además de revisiones con síntesis de efectos y trabajos transferibles a obra civil en climas tropicales. Se eliminaron artículos no revisados por pares o sin resultados cuantitativos comparables. La obtención de datos siguió un formulario de extracción estandarizado que tomó el precursor, el activador y la molaridad, las condiciones de curado, el tipo y la dosis de nano-material, la edad del ensayo y las métricas (fc, ft, módulo, porosidad, RCPT, ataque químico, estabilidad térmica y, cuando está presente, huella de CO₂).

Los métodos estandarizados que se informa tomaron, entre otros, los estandarizados. ej. RCPT, SEM/XRD) no son re-descriptos y son referidos según la propia bibliografía; si se aplicó modificación, dicha adaptación fue explicitada: el formulario fue ajustado para clasificar los escenarios de exposición panameños (marino-salino; húmedo-seco; isla de calor urbana). La calidad de los trabajos fue evaluada mediante la verificación de la coherencia interna de los datos, de completitud de las variables y de claridad desde la base metodológica, y los riesgos de sesgo de publicación se discutieron de forma narrativa por la heterogeneidad de diseños.

El análisis combinó la síntesis cualitativa temática con la síntesis cuantitativa descriptiva basada en medianas, rangos y razones de mejora respecto de los controles para fc, ft, porosidad, RCPT y en resistencia química. En su conjunto, este procedimiento metodológico satisface los objetivos: constituye una base robustecida (PRISMA) para la síntesis, cuantifica efectos por tipo y dosis de nano-refuerzo, traduce resultados a escenarios panameños por medio del etiquetado de exposición y permite la optimización de mezclas a través de un esquema predictivo reproducible.





Resultados y discusión

Los geo-polímeros nano-modificados presentan incrementos notorios en sus propiedades mecánicas, las que son muy importantes para infraestructuras que deben soportar cargas dinámicas bajo clima tropical. Por otro lado, la incorporación de nano-sílice (NS) en geo-polímeros, por ejemplo, de metacaolín, logra aumentar su resistencia a la compresión en un 34.3% (de 39.1 MPa a 52.5 MPa a 28 días), la que se considera óptima con dosis la dosis del 6% en peso, mejorando en un mismo porcentaje la resistencia a la tracción dividida y en un 39.4% la resistencia a flexión (Mohmmad et al., 2023).

La razón de esta mejora estaría dada por la refinación de la microestructura, donde la NS cumple la función de rellenos de poros para, además, acelerar la formación de geles aluminosilicatos y llegar así a generar una matriz con altas densidades y resistencias. Esa mejora viene dada por la optimización de la microestructura, donde el NS se comporta como relleno de poros al mismo tiempo que incrementa el índice de formación de geles de alumino-silicato acabando en una matriz más densa y con un componente de mayor resistencia (Asim et al., 2024). De forma similar, la mezcla de nano-alúmina (NA) al 4% en compuestos de servicio basados en feldespato potásico aumentan la resistencia a la compresión hasta los 41.82 MPa y a la de tracción dividida hasta los 3.7 MPa con un descenso muy notable en la absorción de agua y a la vez incrementando de este modo la durabilidad general (Nanthini et al., 2024).

De acuerdo con revisiones en profundidad, nano-materiales como los nanotubos de carbono (CNT) se utilizan para incrementar la resistencia a flexión en geo-polímeros impresos en 3D hasta un 89% con adiciones de un 1% de nano-grafito. Otros ejemplos hacen referencia a que nano- CaCO_3 puede incrementar la dureza en un 60% en geo-polímeros curados mediante calor (Drabczyk et al., 2023). Más aún, se ha indicado que la relación de un 2% de nano- SiO_2 en geo-polímeros de cenizas volantes alcanza un 80% de mejora de la resistencia de compresión en muestras curadas a temperatura ambiente, como así también se ha constatado por un aumento del módulo elástico, por otro lado de





una disminución del número de poros, esto es confirmado por un análisis SEM (Drabczyk et al., 2023); CNT al 0,02% aún aumenta la compresión en un 81% a los 28 días como resultado de un comportamiento de refuerzo fibroso que previene la germinación de grietas (Shilar et al., 2022; Ünal et al., 2023; Indwar et al., 2024). Por otro lado, se tiene al 2% de nano- Al_2O_3 el cual plantea un aumento del 25% en la resistencia a la compresión (de 24 a 30 MPa); nano-arcilla al 2% incrementa en un 23,4% (de 37,2 a 45,9 MPa) como confirmación de la densificación micro-estructural, lo que también se observa en XRD (Shilar et al., 2022).

Para geo-polímeros híbridos se tiene un resultado de 53,2 MPa de compresión, 2,5% de NS; combinaciones con nano- CaCO_3 pueden alcanzar los 69,7 MPa a 12 M de molaridad, lo que destaca también el papel sináptico de los nano-materiales en la mejora de la resistencia mecánica (Shilar et al., 2022); a su vez, esta mejora de resistencias se predice mediante modelos de aprendizaje automático como lo es el regresor de gradiente extremo (Extreme Gradient Regressor, XGBR) con un R^2 superior al 0,99 en compresión y de 0,96 en tensión, determinando que el contenido de escoria de alto horno influye en un 65% y la edad de curado en un 25% de disposición, contribuyendo al diseño predictivo de aplicaciones en Panamá (Zhou et al., 2024). La Tabla 1 presenta una síntesis cuantitativa de las características mecánicas de los geo-polímeros nano-modificados, estructurada en función del tipo de precursor, la molaridad del activador, el régimen de curado, el nano-material y la dosis.

Tabla 1.

Comparación de propiedades mecánicas entre geo-polímeros nano-modificados y cemento Portland.

Material	Resistencia a la compresión (MPa, 28 días)	Resistencia a flexión (MPa)	Porosidad (%)	Referencia
Cemento Portland convencional	30-40	4-6	10-15	(Ahmed et al., 2021)
Geo-polímero con NS (2-6%)	50-70	6-8	5-8	(Mohmmad et al., 2023; Drabczyk et al., 2023)





Geo-polímero con NA (1-4%)	45-60	5-7	6-9	(Nanthini et al., 2024; Shilar et al., 2022)
Geo-polímero con CNT (0.5-1%)	55-75	7-10	4-7	(Drabczyk et al., 2023; Shilar et al., 2022)
Geo-polímero con nano-TiO₂ (5%)	40-65	5-9	7-10	(Ahmed & Aly, 2025)
Geo-polímero con nano-ZnO (2.5%)	45-65	5-8	11-15	(Ahmed & Aly, 2025)

Nota. La Tabla 1 resume las propiedades mecánicas de geo-polímeros nano-modificados por precursor, régimen de curado, tipo y dosis de nano-material. Se reportan resistencia a compresión y flexión y, cuando corresponde, módulo elástico; los resultados se presentan a edades comparables y como razón de mejora frente al testigo. Los procedimientos de ensayo siguen las normas citadas por cada estudio; no se re-describe el método. Elaborada por el autor (2025).

Dicha tabla, junto con una explicación exhaustiva de las reducciones en porosidad que, no obstante, incrementan la resistencia a la humedad tropical, se extrajeron de los recuentos binarios que se indican en la sección de Estudios revisados, donde se muestra cómo los geo-polímeros nano-modificados poseen un rendimiento mecánico superior al cemento Portland convencional... Por ejemplo, la fila del geo-polímero con NS tiene un rango de resistencia a la compresión de 50-70 MPa, lo que significa un incremento notable respecto a los 30-40 MPa del cemento Portland, paralelo a un descenso en la porosidad a 5-8%, lo que significa mejor densidad interna y menos susceptibilidad de las estructuras al agua y a la humedad del entorno (como sería el caso de su uso en Panamá).

Igualmente, las entradas para CNT muestran incrementos en la resistencia a flexión hasta un rango de entre 7-10 MPa, lo que es óptimo para estructuras expuestas a flexión, como puentes o pavimentos con referencias directas de los estudios que soportan estos valores medidos experimentalmente. En términos generales, la tabla pone de manifiesto el hecho de que los nano-materiales no solo incrementan las métricas asociadas a los dos tipos de geo-polímeros planteados, sino que también, contribuyen a optimizar una





microestructura que es evidenciada, mediante análisis como SEM y XRD en las fuentes que hemos recogido, favoreciendo las aplicaciones en las infraestructuras climáticamente inteligentes en donde tanto la carga mecánica, como la exposición ambiental, son de vital importancia.

Las Propiedades Térmicas y de Durabilidad

Las propiedades térmicas y de durabilidad de los geo-polímeros se ven claramente reforzadas por los nano-materiales, lo que también hace de estas propiedades ideales para sustratos de entornos incompletos como los tropicoplateau con abundante exposición a los climatogramas húmedos de temperatura. Nano-arcilla aumenta la estabilidad térmica hasta los 300 °C, y el óxido de grafeno mejora la conductividad térmica, lo cual resulta útil para pavimentos en regiones cálidas al reducir el efecto isla de calor (Girish et al., 2024; De Masi et al., 2024). En medios marinos, los geo-polímeros tienen una permeabilidad al cloruro un 50% inferior al cemento Portland y la resistencia a sulfatos se ve incrementada por CNT, evitando la degradación de estructuras en contacto con agua salina como es el Canal de Panamá (Wong, 2022; Kaya & Dahi Taleghani, 2025).

El uso de NS (Nano-compuestos de Sílice) reduce la porosidad y la absorción de agua, lo que eleva la resistencia a ácidos entre un 30% y un 50%. Además, mejora la estabilidad térmica hasta alcanzar los 300°C, lo que ayuda a mitigar los daños causados por ciclos de temperatura en climas cambiantes (Chen et al., 2024; Drabczyk et al., 2023). Por su parte, el Nano-ZnO otorga propiedades auto-limpiantes, siendo capaz de degradar contaminantes orgánicos hasta en un 61% bajo la luz solar, lo que resulta beneficioso para infraestructura urbana en regiones húmedas donde la presencia de moho y suciedad puede acelerar la corrosión (Ahmed & Aly, 2025).

En contextos de alta presión o aplicaciones en profundidad, los geo-polímeros pueden resistir presiones superiores a 400 bar y altas temperaturas, además de presentar una disminución de emisiones entre un 40% y un 80%, lo que prolonga la vida útil de las infraestructuras costeras (Kaya & Dahi Taleghani, 2025). La inclusión de nano-arcilla en





un 2.5% en geo-polímeros elaborados con escoria y cenizas volantes aumenta la resistencia a la compresión en un 26% a 200°C, confirmando su estabilidad térmica mejorada (Drabczyk et al., 2023).

El Nano-TiO₂ al 5% también contribuye a aumentar la resistencia a la carbonatación y disminuye el encogimiento por secado, mientras que la incorporación de nano-arcilla en un rango del 2% al 5% eleva la resistencia a ácidos entre un 15% y un 35%, y reduce la permeabilidad al cloruro entre un 25% y un 45%, con una estabilidad notable que puede llegar hasta los 800°C (Ahmed & Aly, 2025; Khan et al., 2025). En los geo-polímeros basados en arcilla, el proceso de curado a temperaturas de 60°C a 80°C optimiza estas propiedades, aunque la adición de nano-materiales intensifica estos efectos (Khan et al., 2025). Estas mejoras no solo contribuyen a la durabilidad de los materiales, sino que también ayudan a reducir los costos de mantenimiento en entornos tropicales propensos a la erosión y la corrosión. Se expone en la Tabla 2 una consolidación de indicadores de durabilidad pertinentes a las condiciones climáticas tropicales y marítimas.

Tabla 2

Efectos de nano-materiales en propiedades de durabilidad de geo-polímeros

Nanomaterial	Dosis óptima (%)	Mejora en resistencia a ácidos (%)	Reducción en permeabilidad al cloruro (%)	Mejora en estabilidad térmica (°C)	Mejora en autolimpieza (%)	Referencia
Nano-sílice	2-6	30-50	40-60	Hasta 300	N/A	(Chen et al., 2024; Drabczyk et al., 2023)
Nano-alúmina	1-4	20-40	30-50	200-400	N/A	(Nanthini et al., 2024)
Nano-TiO ₂	5-10	25-45	35-55	300-500	40-60	(Ahmed & Aly, 2025; Drabczyk et al., 2023)



Nano-arcilla	2-5	15-35	25-45	Hasta 800	N/A	(Khan et al., 2025; Drabczyk et al., 2023)
CNT	0.5-1	20-40	40-60	400-600	N/A	(Shilar et al., 2022)
Nano-ZnO	2.5	15-30	20-40	200-300	Hasta 61	(Ahmed & Aly, 2025)

Nota. La Tabla 2 consolida indicadores de durabilidad para climas tropicales y marino-costeros: porosidad, absorción de agua, penetración/difusión de cloruros (RCPT o equivalentes), pérdida de masa por ataque químico, profundidad de carbonatación y desempeño en ciclos húmedo–seco. Los resultados se expresan como valores absolutos y porcentaje de cambio respecto al testigo, agrupados por nano-material y dosis. Los protocolos se consignan según las fuentes originales; cualquier adaptación se indica en las notas. Elaborada por el autor (2025).

Esta tabla amplia y exhaustiva resume las mejoras en durabilidad al mismo tiempo que muestra el potencial que tienen las propiedades, como la resistencia térmica y la auto-limpieza, para mitigar impactos climáticos en Panamá, disponiendo para cada métrica de unas referencias específicas que las respaldan. Por ejemplo, para el caso de nano-TiO₂ se tiene una mejora en auto-limpieza de un 40-60%, lo que quiere decir que los contaminantes que se descomponen bajo la exposición solar se sanan de manera eficiente, algo que resulta adecuado para las condiciones climáticas tropicales que permiten que las superficies expuestas se ensucien, lo que a su vez produce un impacto negativo que acelera la degradación; esto se complementa con una reducción de la permeabilidad al cloruro del 35-55%, un valor crítico para reducir la corrosión en ambientes salinos como el Canal de Panamá.

La fila de nano-arcilla ofrece estabilidad térmica hasta los 800°C, con lo que se pueden empezar a hacer aplicaciones en pavimentos que sean resistentes a temperaturas altas, mejorando al mismo tiempo la resistencia a ácidos en un 15-35% para unas condiciones de erosión química relacionadas con las lluvias ácidas. En definitiva, la tabla pone de manifiesto que las dosis óptimas de nano-materiales producen efectos sinérgicos,



corroborados con experimentos, que no sólo extienden la vida útil de las estructuras, sino que también disminuyen el número de intervenciones necesarias, asociado a principios de sostenibilidad en contextos vulnerables como el panameño.

Aspectos de Sostenibilidades y Predictivos

En el marco de la sostenible, los geo-polímeros nano-modificados disminuye hasta un 80% las emisiones de CO₂ si se ponen en uso subproductos industriales como cenizas volantes y escoria de alto horno, junto con residuos de demolición. Esto se traduce en el fomento de la economía circular, disminuyendo el impacto ambiental relacionado con los cementos Portland, cuya producción requiere de un alto trabajo y extracción de recursos naturales no renovables (Imtiaz et al., 2020; Ahmed et al., 2022; De Masi et al., 2024). Esta reducción no reduce sólo el avance del cambio climático, sino que también utiliza en Panamá residuos locales (cenizas provenientes de plantas térmicas, escorias de industrias metalúrgicas), transformando pasivos ambientales en activos constructivos y llevando a cabo conferencias para alcanzar las metas nacionales que se han fijado para alcanzar la neutralidad carbono en 2050.

Los compuestos auto-limpiantes, con nano-ZnO al 2.5% en mezclas de ceniza volante y bentonita, incrementan el rendimiento en el removimiento de contaminantes hasta un 61%, además de obtener un 20% de incremento en la resistencia a la compresión y una reducción de porosidad que pasa de 15% a 11%, lo que incrementa la durabilidad de las estructuras y reduce la necesidad de limpiezas químicas contaminantes (Ahmed & Aly, 2025). La incorporación de nano-materiales tales como nano-arcilla o nano-TiO₂ en geo-polímeros que utilizan residuos de construcción y demolición establece la posibilidad de mejorar la aislación térmica, llegando a reducir el consumo energético en los edificios hasta un 30-40% en climas tropicales en donde la gran acumulación de calor requiere de sistemas de enfriamiento intensivos de acuerdo a lo que han llegado a documentar Girish et al. (2024); De Masi et al. (2024).

Esto también es parte de la sostenibilidad reduciendo la huella de carbono operativa y fomentando el reciclaje de materiales como en las investigaciones que han utilizado





polvos de vidrio residuales como solidificadores de suelos geo-poliméricos con propiedades mecánicas similares al cemento en un 70% y menos de las emisiones (Inazumi et al., 2025). Si bien en la parte predictiva, los modelos de aprendizaje de máquinas como el boosting ensemble XGBR predicen con más de un 90% de precisión las resistencias y funcionan suficientemente bien para identificar los factores que contribuyen (contenido de escoria, 65%; curado, 25%) con la ventaja de poder hacer simulaciones de parámetros de mezclas antes de la producción, evitando desperdicios (Zhou et al., 2024; Asteris et al., 2021).

Todos aquellos modelos que se proponen hasta ahora permiten el diseño de mezclas que atiendan condiciones locales panameñas en las variantes de humedad y temperatura, pero además también contemplan la datificación a través de aprendizaje automático con el fin de predecir fallos estructurales y ofrecer incrementos en durabilidad, evitando gastos en daños degradantes y medioambientales a largo plazo. Por ejemplo, en geo-polímeros con nano-sílice, las predicciones ofrecen la posibilidad de ajustar dosis para incrementar el incremento de sostenibilidad con la restricción del rendimiento, garantizando una longevidad mejorada y una menor generación de residuos (Chen et al., 2024). En definitiva, dicha serie de aspectos vuelven a enfatizar la sostenibilidad ecológica y su escalabilidad desde la eficiencia económica, con un coste de ciclo de vida 21-38% menor al de un cemento tradicional y promoviendo su adopción en proyectos de infraestructura verde en Panamá (Adnan & Anas, 2025).

Discusión

Estos resultados fortalecen y confirman el potencial de la transformación que se puede generar a partir de los geo-polímeros nano-modificados, en puntos donde estas infraestructuras climáticamente inteligentes serán localizadas en Panamá. La baja permeabilidad y alta resistencia térmica de los materiales, en el Canal de Panamá, son de importancia extrema, porque en este sitio las sequías hacen bajar las reservas de agua, elevando la evaporación debido al aumento de temperaturas. Por lo tanto, la baja permeabilidad y alta resistencia térmica de estos materiales evitarán la corrosión salina y





disminuyen el costo de mantenimiento, además de alargar la vida útil en condiciones HPHT (Kaya & Dahi Taleghani, 2025). Para caminos en áreas de inundación como lo es el Darién, las propiedades de baja retracción y térmicamente durables reducen las tensiones por expansión, teniendo el nano-TiO₂ como el principal promotor de auto-climatización contra contaminantes orgánicos (Girish et al., 2024; Ahmed & Aly, 2025).

Sostenibilidad es la clave: reducciones en emisiones de CO₂ hasta un 80% y uso de subproductos como cenizas volantes, en sintonía con las metas del país de neutralidad de carbono para 2050, reinsertando residuos industriales locales (Imtiaz et al., 2020; Inazumi et al., 2025). Desafío: reducción del flujo, que es supresible por el uso de super-plastificantes y la correcta configuración de curado a una alta humedad, donde una aplicación a temperaturas de 60 a 80°C hace mejorar la fuerza sin degradación (Mohmmad et al., 2023; Khan et al., 2025). Los geo-polímeros, comparados con el cemento Portland, han mostrado menor costo por ciclo de vida, en 21-38%, y son más resistentes que el cemento Portland a sulfatos y cloruros (Adnan & Anas, 2025; Wong, 2022).

Las aplicaciones futuras abarcarán pavimentos auto-limpiantes en puertos, estructuras resistentes a huracanes mediante integración de fibras e inteligencia artificial en la predicción de fallos, estudiando vulnerabilidades urbanas como inundaciones en Panamá City (Asteris et al., 2021; Zhou et al., 2024). Brechas: pocas pruebas locales de materiales como bambú híbrido combinados con geo-polímeros en climas tropicales para impulsar la resiliencia y equidad ambiental (Valente et al., 2021).

Conclusiones

Esta investigación hace ver que los geo-polímeros nano modificado representan una vía razonablemente válida y con ventajas ambientales para infraestructuras resilientes en climas tropicales. La revisión sistemática ordena y consolida evidencias cuantitativas sobre mejoras mecánicas y de durabilidad en complemento a nano-sílice, nano-alúmina,





TiO₂, ZnO, nano-arcillas y CNT y las traduce a criterios de aplicación para escenarios de interacciones marina-salinas, ciclos húmedo-seco e isla de calor urbana panameña. En este sentido el significado es doble: por una parte, contribuye con una base comparativa y reproducible en términos de síntesis cuantitativa descriptiva para optar por dosificaciones según perfil de desempeño; por la otra responde a éstas con las mejoras de reducción de las emisiones implementando subproductos alineándose así desempeño técnico y metas de sostenibilidad del país.

La adopción práctica en cambio es una de las fricciones que dan vida a la conectividad funcional entre el estado de la literatura y la toma de decisiones: se ofrecen guías de selección, se proponen marcos predictivos de optimización de mezclas en función de los datos locales y se recomienda el levantamiento de pilotos y control de calidad en la impulsión de riesgos en la implementación. Con ello se permite ir escalando aplicaciones en función de un menor coste de ciclo de vida -menor coste no es sinónimo de peores resultados- y menos mantenimiento en entornos agresivos y se dejó además delimitadas algunas de las brechas prioritarias -ensayos prolongados en condiciones tropicales y estandarización local- que marcarán una agenda de I+D aplicada a Panamá.

Referencias bibliográficas

- Adnan, A., & Anas, M. (2025). Geopolymer concrete as a sustainable alternative to OPC. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00155-8>
- Ahmed, D. A., & Aly, A. A. (2025). Sustainable construction: Development of self-cleaning geopolymer composite with fly ash, and bentonite incorporated with nano-ZnO. *Sustainable Environment Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1186/s42834-025-00256-y>
- Ahmed, H. U., Mohammed, A. A., Rafiq, S., Mohammed, A. S., Mosavi, A., Sor, N. H., & Qaidi, S. M. A. (2021). Compressive strength of sustainable geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review. *Sustainability*, 13(24), 13502. <https://doi.org/10.3390/su132413502>





- Ahmed, H. U., Mahmood, L. J., Muhammad, M. A., Faraj, R. H., Qaidi, S. M. A., Sor, N. H., Mohammed, A. S., & Mohammed, A. A. (2022). Geopolymer concrete as a cleaner construction material: An overview on materials and structural performances. *Cleaner Materials*, 5, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100111>
- Asim, N., Badiei, M., Samsudin, N. A., Mohammad, M., Razali, H., & Hui, D. (2024). Clean technology option development for smart and multifunctional construction materials: Sustainable geopolymer composites. *Journal of Building Engineering*, 91, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109932>
- Asteris, P. G., Koopialipoor, M., Armaghani, D. J., Kotsonis, E. A., & Lourenço, P. B. (2021). Prediction of cement-based mortars compressive strength using machine learning techniques. *Neural Computing and Applications*, 33, 13089–13121. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06004-8>
- Chen, P., Tian, F., Zhang, J., Li, Y., & Wei, Y. (2024). Effect of nano-silica on mechanical properties and shrinkage of alkali-activated slag cementitious material. *Developments in the Built Environment*, 19, 100525. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100525>
- De Masi, R. F., Ruggiero, S., Russo, A., & Vanoli, G. P. (2024). Geopolymer-based insulated wall incorporating construction and demolition waste: Experimental assessment of thermo-physical behavior. *Energy and Buildings*, 322, 114743. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114743>
- Drabczyk, A., Kudłacik-Kramarczyk, S., Korniejenko, K., Figiela, B., Furtos, G., & Eliche Quesada, D. (2023). Review of geopolymer nanocomposites: Novel materials for sustainable development. *Materials*, 16(9), 3478. <https://doi.org/10.3390/ma16093478>
- Girish, M. G., Shetty, K. K., & Nayak, G. (2024). Thermal characteristics of fly ash–slag based geopolymer concrete for sustainable road construction in tropical region. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s42947-024-00492-2>
- Intiaz, L., Rehman, S. K. U., Memon, S. A., Khan, M. K., & Javed, M. F. (2020). A review of recent developments and advances in eco-friendly geopolymer concrete. *Applied Sciences*, 10(21), 7838. <https://doi.org/10.3390/app10217838>
- Inazumi, S., Hashimoto, R., Hontani, Y., Yoshimoto, A., Shishido, K.-i., & Chao, K. C. (2025). Development of environmentally sustainable geopolymer-based soil solidifiers using waste siding and glass powders. *Cleaner Engineering and Technology*, 26, 100976. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100976>





- Indwar, R., Mishra, U., & Titiksh, A. (2024). Geopolymer concrete containing nanomaterials—a step toward sustainable construction. *Environmental Science and Pollution Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34172-2>
- Kaya, E., & Dahi Taleghani, A. (2025). Geopolymers for deep-sea energy infrastructure: A review of applications and challenges. *Environmental Earth Sciences*, 84(5), 12339. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12339-5>
- Khan, R., Iqbal, S., Soliyeva, M., Ali, A., & Elboughdiri, N. (2025). Advanced clay-based geopolymer: Influence of structural and material parameters on its performance and applications. *RSC Advances*, 15(16), 12443–12471. <https://doi.org/10.1039/D4RA07601J>
- Konbr, U., & Mamdouh, H. (2022). A proposed strategy to evaluate nanomaterials in construction to boost sustainable architecture. *Civil Engineering and Architecture*, 10(7), 3206–3226. <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100732>
- Mohmmad, S. H., Shakor, P., Muhammad, J. H., Hasan, M. F., & Karakouzian, M. (2023). Sustainable alternatives to cement: Synthesizing metakaolin-based geopolymer concrete using nano-silica. *Construction Materials*, 3(3), 276–286. <https://doi.org/10.3390/constrmater3030018>
- Nanthini, M., Ganesan, R., & Jaganathan, V. (2024). Incorporation of nanoalumina in potassium feldspar-based phosphoric acid activated geopolymer composites: A sustainable approach. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 13(3), 89–98. <https://doi.org/10.13074/jent.2024.09.243840>
- Selvarani, G., Pushpam, K. V., Iyer, C. B., & others. (2021). Nanotechnology and its role in sustainable development in construction industry. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(4), 1–5. https://www.academia.edu/download/66226015/nanotechnology_and_its_role_IJERTCONV9ISO4005.pdf
- Shilar, F. A., Ganachari, S. V., Patil, V. B., Khan, T. M. Y., Almakayeel, N. M., & Alghamdi, S. (2022). Review on the relationship between nano modifications of geopolymer concrete and their structural characteristics. *Polymers*, 14(7), 1421. <https://doi.org/10.3390/polym14071421>
- Ünal, M. T., Gökçe, H. S., Ayough, P., Alnahhal, A. M., Şimşek, O., & Nehdi, M. L. (2023). Nano material and fiber-reinforced sustainable geopolymers: A systematic critical review. *Construction and Building Materials*, 403, 133325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133325>



Valente, M., Sambucci, M., & Sibai, A. (2021). Geopolymers vs. cement matrix materials: How nanofiller can help a sustainability approach for smart construction applications—A review. *Nanomaterials*, 11(8), 2007. <https://doi.org/10.3390/nano11082007>

Wong, L. S. (2022). Durability performance of geopolymer concrete: A review. *Polymers*, 14, 868. <https://doi.org/10.3390/polym14050868>

Zhou, J., Tian, Q., Ahmad, A., & Huang, J. (2024). Compressive and tensile strength estimation of sustainable geopolymer concrete using contemporary boosting ensemble techniques. *Reviews on Advanced Materials Science*, 63(1), 0014. <https://doi.org/10.1515/rams-2024-0014>

