



AVANCES EN GEOPOLÍMEROS REFORZADOS CON QUITINA: HACIA ALTERNATIVAS SOSTENIBLES AL CEMENTO PORTLAND

ADVANCES IN CHITIN-REINFORCED GEOPOLYMERS: TOWARDS SUSTAINABLE ALTERNATIVES TO PORTLAND CEMENT

AVANÇOS EM GEOPOLÍMEROS REFORÇADOS COM QUITINA: RUMO A ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS AO CIMENTO PORTLAND

Autor

- ✉ Hortencia Asanza^{1,*}
- ✉ Hacı Baykara²
- ✉ David Anzules³

¹Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas (FCNM), ESPOL Universidad Politécnica, Ecuador.

²Faculty of Mechanical Engineering and Production Science (FIMCP), ESPOL Polytechnic University, Guayaquil

³Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Física, Universidad Técnica de Manabí (UTM), Portoviejo, Ecuador

* Autor para correspondencia.

Editor Académico

Pedro Rivero Antúnez 

Citación sugerida: Asanza, H., Baykara, H., Anzules, D. (2024). ADVANCES IN CHITIN-REINFORCED GEOPOLYMERS: TOWARDS SUSTAINABLE ALTERNATIVES TO PORTLAND CEMENT. Revista Bases de la Ciencia, 9(1), 39-52. DOI: 10.33936/revbasdelaciencia.v9i1.6695

Recibido: 15/02/2024
Aceptado: 29/04/2024
Publicado: 30/04/2024

Resumen

 Este estudio evalúa los avances en geopolímeros reforzados con quitina como alternativas sostenibles al Cemento Portland Ordinario (CPO), con el objetivo de abordar los desafíos medioambientales asociados con la producción de CPO. Mediante la integración de metodologías de síntesis y caracterización de materiales compuestos, se investigó la incorporación de quitina derivada de fuentes biológicas en la matriz de geopolímeros. Los principales resultados muestran que la adición de quitina mejora las propiedades mecánicas, como la tenacidad y la durabilidad de los geopolímeros, además de reducir significativamente el impacto ambiental en comparación con el CPO tradicional. Las conclusiones destacan que los geopolímeros reforzados con quitina no solo ofrecen un rendimiento superior en términos de resistencia y sostenibilidad, sino que también representan una opción viable para la construcción verde, alineándose con las prácticas globales de reducción de emisiones y uso eficiente de recursos.

Palabras clave: geopolímeros, quitina, sostenibilidad, Cemento Portland

Abstract

This study evaluates advances in chitin-reinforced geopolymers as sustainable alternatives to Ordinary Portland Cement (OPC), with the objective of addressing the environmental challenges associated with OPC production. By integrating composite synthesis and characterization methodologies, the incorporation of chitin derived from biological sources into the geopolymer matrix was investigated. The main results show that the addition of chitin improves the mechanical properties, such as toughness and durability of the geopolymers, in addition to significantly reducing the environmental impact compared to traditional OPC. The findings highlight that chitin-reinforced geopolymers not only offer superior performance in terms of strength and sustainability, but also represent a viable option for green construction, aligning with global practices of emission reduction and resource efficiency.

Keywords: geopolymers, chitin, sustainability, Portland cement

Resumo

Este estudo avalia os avanços em geopolímeros reforçados com quitina como alternativas sustentáveis ao cimento Portland comum (OPC), com o objetivo de abordar os desafios ambientais associados à produção de OPC. Ao integrar metodologias de síntese e caracterização de materiais compostos, foi investigada a incorporação de quitina derivada de fontes biológicas na matriz do geopolímero. Os principais resultados mostram que a adição de quitina melhora as propriedades mecânicas, como a resistência e a durabilidade dos geopolímeros, além de reduzir significativamente o impacto ambiental em comparação com o OPC tradicional. As descobertas destacam que os geopolímeros reforçados com quitina não apenas oferecem desempenho superior em termos de resistência e sustentabilidade, mas também representam uma opção viável para a construção ecológica, alinhando-se às práticas globais de redução de emissões e eficiência de recursos.

Palavras chave: geopolímeros, quitina, sustentabilidade, cimento Portland





1. Introducción

Desde su patente en 1824 por Joseph Aspdin, el Cemento Portland Ordinario (CPO) ha sido fundamental en la industria de la construcción por su resistencia, durabilidad y versatilidad. Sin embargo, la fabricación de CPO es intensiva en energía y genera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), contribuyendo significativamente al cambio climático global (Peter Hewlett, 2003; Scrivener & Kirkpatrick, 2008). En respuesta a estos desafíos ambientales, la ciencia de materiales ha explorado alternativas más sostenibles. Los geopolímeros se destacan entre estas alternativas por su menor impacto ambiental y capacidad para utilizar materiales reciclados (Davidovits, 1994; Provis & Deventer, 2009).

A diferencia del CPO, los geopolímeros no requieren altas temperaturas durante su producción, lo que reduce tanto el consumo de energía como las emisiones de gases contaminantes. Estos materiales también ofrecen excelentes propiedades mecánicas y durabilidad frente a condiciones ambientales adversas, lo que los hace idóneos para aplicaciones en construcción civil y de infraestructuras (Duxson et al., 2007; McLellan et al., 2011).

Además, la quitina, un biopolímero derivado de exoesqueletos de artrópodos y otros organismos, ha emergido como un refuerzo potencial para los geopolímeros. Reconocida por su alta resistencia mecánica y biodegradabilidad, la quitina mejora significativamente las propiedades mecánicas y la sostenibilidad de los geopolímeros, proporcionando una solución ecológica y eficiente para el sector de la construcción (Ifuku & Saimoto, 2012; Rinaudo, 2006).

El propósito de este artículo es examinar los desarrollos recientes en geopolímeros reforzados con quitina, analizando cómo su incorporación no solo mejora las características del material, sino que también contribuye a un futuro más sostenible en la construcción. Este análisis incluirá una discusión sobre la viabilidad de los geopolímeros como una alternativa sostenible al CPO, con un enfoque específico en la mejora de las propiedades mecánicas y la reducción del impacto ambiental.

2. Preparación, caracterización de materiales sostenibles

2.1. Cemento Portland Ordinario (CPO)

2.1.1. Importancia del Cemento Portland Ordinario (CPO)

El Cemento Portland Ordinario (CPO) desempeña un papel crucial en la industria de la construcción. Su amplia utilización para la producción de hormigón y mortero lo hace indispensable en la creación de infraestructuras civiles, edificaciones, pavimentos, y otros elementos estructurales críticos (Habert, 2013). Su versatilidad y propiedades de endurecimiento garantizan la durabilidad y la seguridad estructural, aspectos esenciales en el desarrollo urbano y la ingeniería civil.

Además, los avances en la tecnología del cemento han llevado a investigaciones centradas en mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del CPO. Estudios recientes han explorado métodos para optimizar la mezcla de materiales y las técnicas de fabricación para reducir su impacto ambiental y mejorar la eficiencia energética durante su producción (Nallive Yopez et al., 2012).

2.1.2. Impacto Ambiental del CPO

El CPO es también una fuente significativa de emisiones de CO_2 , contribuyendo entre el 5% y el 8% de las emisiones globales anualmente. Estas cifras resaltan la necesidad urgente de enfoques de construcción más sostenibles (EPA, 2021; Khaiyum et al., 2023). Las emisiones derivan principalmente de dos procesos industriales: la calcinación de la caliza (carbonato de calcio) para producir cal (óxido de calcio) y la fabricación de clínker, proceso que además requiere la quema de combustibles fósiles para alcanzar las temperaturas necesarias en los hornos de cemento (Andrew, 2021).

2.2. Geopolímeros como Alternativa Sostenible

2.2.1. Definición de geopolímero

Desde su introducción en 1978 por Joseph Davidovits, los geopolímeros han marcado un hito significativo en el campo de los materiales de construcción avanzados. Davidovits fue pionero al introducir el término “geopolímero”, explorando sus estructuras y aplicaciones potenciales, lo cual sentó las bases para futuras investigaciones (Davidovits, 1979).

Un cemento geopolímero es un aluminosilicato sintético que se solidifica a temperatura ambiente. Está formado por cadenas y redes tridimensionales extensas de átomos de silicio y aluminio unidos por oxígenos, que surgen de la reacción química entre materiales ricos en sílice y aluminio con soluciones alcalinas. A diferencia del cemento Portland tradicional, el cemento geopolímero se formula principalmente a partir de materias primas naturales mínimamente procesadas o subproductos industriales, lo que le otorga una reducida huella de carbono (Davidovits, 1994; Provis & Deventer, 2009). El gel geopolimérico resultante se solidifica en una estructura compacta y resistente, similar a la piedra, exhibiendo propiedades mecánicas superiores y una destacada resistencia a ambientes químicos adversos. Además, posee la capacidad de formar fuertes enlaces químicos con diferentes agregados a base de roca, consolidándose como una opción innovadora y sostenible en el mundo de la construcción (Davidovits, 2013).

Varios investigadores han explotado y revisado como materias primas esenciales para la producción de geopolímeros, en respuesta a los desafíos ambientales de gestión de residuos. Las materias primas naturales mencionadas y sus respectivos referentes son: caolín, metakaolín (Rashad, 2013), zeolita (Baykara et al., 2022; Nikolov et al., 2020; Ulloa et al., 2018), laterita (Rodrigue Kaze et al., 2021), ceniza volcánica (Djobo et al., 2017), ceniza de arroz, ceniza volante, entre otros. Estos materiales inorgánicos reaccionan con un activador alcalino, como una solución de silicato de sodio e hidróxido de sodio, para formar una matriz sólida con propiedades mecánicas y químicas deseables (Hardjito & Rangan, 2005).

2.2.2. Fundamentos de los Geopolímeros

Los geopolímeros son materiales inorgánicos formados por la reacción alcalina de materiales ricos en aluminosilicato como metacaolín o ceniza volante con soluciones alcalinas, generando un entramado tridimensional. Estos materiales no solo exhiben una excelente resistencia a la compresión y a la tracción, resistencia al fuego y durabilidad en ambientes ácidos, sino que su producción puede resultar en hasta un 80% menos de emisiones de CO₂ comparado con el CPO (Duxson et al., 2007; Provis & Van Deventer, 2014).

2.2.3. Propiedades de los Geopolímeros

Los geopolímeros han demostrado poseer propiedades mecánicas superiores a las del cemento Portland, incluyendo resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y durabilidad en ambientes agresivos. Estas propiedades se deben a la formación de enlaces químicos fuertes en la matriz geopolimérica, como los enlaces Si-O-Si y Al-O-Si, que contribuyen a la estructura tridimensional y a la resistencia del material (Davidovits, 1994; Van Riessen et al., 2009).

Las propiedades mecánicas de los geopolímeros compuestos de biopolímero, como la resistencia a la compresión y a la flexión, son aspectos clave para evaluar su idoneidad como materiales de construcción (Baykara et al., 2020a; Łach et al., 2021; Zhang & Wang, 2016). A continuación, se detalla información relevante sobre estas propiedades.

2.2.4. Mecanismos de Formación de Geopolímeros

La formación de geopolímeros implica una reacción de policondensación en estado sólido entre los precursores inorgánicos y el activador alcalino. Durante esta reacción, los grupos Si-O y Al-O en las materias primas minerales reaccionan con los iones alcalinos para formar enlaces de silicio-oxígeno-aluminio en la estructura del geopolímero. La cantidad de activador alcalino y la relación Si/Al influyen en la formación de la estructura geopolimérica y sus propiedades (Davidovits, 1991).

2.2.5. Aplicaciones de los Geopolímeros

Los geopolímeros, con su versatilidad y propiedades únicas, han sido adoptados en una variedad de sectores, desde la edificación de infraestructuras hasta la creación de materiales de revestimiento y matrices para compuestos avanzados. Además, su habilidad para contribuir en la remediación de suelos tóxicos destaca su relevancia en temas medioambientales. Su singularidad radica en su capacidad para incorporar materiales de desecho o subproductos industriales en su producción, lo que no solo minimiza su huella de carbono, sino que también los posiciona como una alternativa ecológica y sostenible en el panorama de los materiales modernos (Davidovits, 1991, 2013; Provis & Deventer, 2009).

2.2.6. Resistencia a la Compresión y a la flexión de los Geopolímeros

La resistencia a la compresión de los geopolímeros reforzados con quitina mostró un aumento significativo, mejorando de dos a tres veces en comparación con los geopolímeros no reforzados. Este aumento se atribuye principalmente a la reducción de la porosidad, que se redujo hasta en un 40% en los compuestos ricos en quitina (ASTM C 109, 2009; Łach et al., 2021).



Varios estudios han demostrado que la adición de biopolímeros, como la quitina, puede mejorar notablemente las propiedades mecánicas de los geopolímeros (ver Tabla 1). Los biopolímeros actúan como refuerzos, aumentando la capacidad de carga y mejorando la resistencia estructural del material. Este aumento en la resistencia se atribuye a la formación de enlaces adicionales entre la matriz geopolimérica y los biopolímeros, fortaleciendo así la estructura del material (Qin et al., 2021; Zhang & Wang, 2016).

Tabla 1. Estudio de Resistencia Mecánica.

Estudio	Mejora en Resistencia a la Compresión	Mejora en Resistencia a la Flexión
Cured cuttlebone/chitosan-heated clay composites: Microstructural T characterization and practical performances (Mourak et al., 2019)	Con el 5% hueso de sebio/ quitina: Incremento de 200%-300%	Incremento del 200%-300%
Insights into setting time, rheological and mechanical properties of chitin nanocrystals- and chitin nanofibers-cement paste (Haider, Jian, Zhong, et al., 2022)	Incrementa hasta un 12%	Incrementa hasta un 40%
Preparation, characterization, and evaluation of compressive strength of polypropylene fiber reinforced geopolymer mortars (Baykara et al., 2020)	Incremento del 125%, 50 MPa	Mejora significativa
Impact of chitin nanofibers and nanocrystals from waste shrimp shells on mechanical properties, setting time, and late-age hydration of mortar (Haider, Jian, Li, et al., 2022)	Hasta un 9% (7 días), 2.5% (28 días)	15% (7 días), 24% (28 días)
Portland cement concrete doped with chitosan: mechanical and microstructural properties (Da Silva et al., 2023)	34% (7 días), 7.5% (28 días)	14% (28 días)
Effect of chitosan on the mechanical properties and acid resistance of metakaolin-blast furnace slag-based geopolymers (T. Wang et al., 2023)	Con la adición de quitina hasta un 5%, alcanzó un máximo de 33.7 MPa. Mejorando hasta un 15%	Mejora de hasta un 25%
Mechanical Properties of Raffia Fibres Reinforced Geopolymer Composites (Korniejenko et al., 2018)	Mejora del 36.6%	Mejor del 22%
Experimental and Numerical Investigation of the Mechanical Properties of a Fiber-Reinforced Geopolymer Mortar (Chen et al., 2023)	Incremento del 8%	Incremento del 40.7%
Mechanical Properties of MiniBars™ Basalt Fiber-Reinforced Geopolymer Composites (Furtos et al., 2024)	Incremento en el módulo de flexión de 3.33–5.92 veces	Incremento de 11.59 – 25.97 veces

Fuente: Elaboración propia

La resistencia a la flexión de los geopolímeros reforzados con quitina también presentó una mejora notable, incrementándose de dos a tres veces en comparación con los geopolímeros no reforzados. La incorporación de quitina facilitó la movilidad de iones y mejoró la reactividad de la illita, contribuyendo así a la formación de estructuras más resistentes (ASTM C 348, 2009; Łach et al., 2021).

La adición de biopolímeros puede mejorar la resistencia a la flexión de los geopolímeros al actuar como refuerzos dispersos en la matriz geopolimérica. Los biopolímeros pueden aumentar la tenacidad y la rigidez del material, lo que resulta en una mayor resistencia a la flexión (Acierno et al., 2022; Agumba et al., 2024; Baykara et al., 2017; Ebhodaghe & Ndibe, 2022). Además, la distribución uniforme de los biopolímeros en la matriz geopolimérica ayuda a dispersar las tensiones y prevenir la propagación de grietas, lo que contribuye a una mayor resistencia a la flexión (Ebhodaghe & Ndibe, 2022; Oh & Hwang, 2013).

Es importante mencionar que la resistencia a la compresión y a la flexión de los geopolímeros compuestos de biopolímero puede depender de varios factores, como la concentración y la distribución de los biopolímeros en la matriz, la relación líquido-sólido, el tipo y la dosificación de los activadores alcalinos, y las condiciones de curado. Por lo tanto, es crucial realizar estudios específicos para optimizar estas variables y obtener las propiedades mecánicas deseadas en los geopolímeros compuestos (Das et al., 2023; Galed Ceresuela, 2005).

La Tabla 1 muestra algunos estudios realizados sobre la resistencia mecánica como lo es la resistencia a la compresión y a la flexión.

2.2.7. Caracterización de los Geopolímeros

La caracterización de los biopolímeros y geopolímeros implica analizar y evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de estos materiales con el fin de comprender su comportamiento y su idoneidad para diferentes aplicaciones (Davidovits, 1991; Lynch et al., 2018). Los biopolímeros, como la quitina y el quitosano, son materiales de origen natural que presentan propiedades únicas y diversas aplicaciones (Galed Ceresuela, 2005; Singh et al., 2017). La caracterización de los biopolímeros implica el análisis de su composición química, estructura molecular, propiedades térmicas, morfología y propiedades mecánicas (Das et al., 2023; Galed Ceresuela, 2005; Piekarska et al., 2023). Estas características son evaluadas mediante técnicas como espectroscopía, microscopía, análisis termogravimétrico y ensayos mecánicos (Blanco & Siracusa, 2021).

Los geopolímeros son materiales inorgánicos que se forman mediante la activación de aluminosilicatos con una solución alcalina (Provis & Deventer, 2009; Xu & Van Deventer, 2000). La caracterización de los geopolímeros implica la evaluación de propiedades como la resistencia mecánica, porosidad, densidad aparente, absorción de agua, estabilidad térmica y durabilidad frente a condiciones ambientales (Aziz et al., 2023; Zhang & Wang, 2016). Estas propiedades se determinan mediante técnicas como ensayos de compresión, análisis de porosidad, microscopía y pruebas de resistencia química (Blanco & Siracusa, 2021).

2.2.8. Técnicas Utilizadas de Caracterización en Geopolímeros

La caracterización avanzada de geopolímeros implica el uso de diversas técnicas analíticas para comprender su composición, estructura y propiedades. Entre las técnicas más comúnmente utilizadas se encuentran la Difracción de Rayos X Cuantitativa (QXRD), la Termogravimetría-Análisis Diferencial de Escaneo (TGA-DSC), la Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) y la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) (Ali et al., 2022; Blanco & Siracusa, 2021).

La técnica de difracción de rayos X cuantitativa (QXRD) proporciona información detallada sobre la estructura cristalina de los geopolímeros, permitiendo la identificación de fases cristalinas y amorfas presentes en el material (Ali et al., 2022; Madsen et al., 2011). Por otro lado, la termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido (TGA-DSC) permite estudiar la estabilidad térmica y las transiciones de fase en los geopolímeros, lo que es crucial para comprender su comportamiento frente a diferentes condiciones de temperatura y humedad (Blanco & Siracusa, 2021; Van Riessen et al., 2009).

La espectroscopía infrarroja por la transformada de Fourier (FTIR) es una técnica espectroscópica que permite analizar las vibraciones moleculares de los materiales, lo que proporciona información sobre los enlaces químicos presentes en los geopolímeros y su estructura molecular (Ojeda & Dittrich, 2012; Yusuf, 2023). Finalmente, la Microscopía electrónica de barrido (SEM) proporciona imágenes de alta resolución de la morfología superficial y la estructura microscópica de los geopolímeros, lo que facilita la observación de la distribución de fases y la presencia de defectos a nivel microscópico (Aziz et al., 2023; Raj et al., 2022; Susan Swapp, 2024).

2.2.9. Activadores Alcalinos

Los activadores alcalinos juegan un papel crucial en la geopolimerización, facilitando la formación de estructuras aluminosilicatos densas y duraderas. El hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH), en combinación con silicato de sodio o silicato de potasio, son los activadores alcalinos más prevalentes en este proceso. Estos compuestos no solo promueven la formación del geopolímero, sino que también mejoran sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Pioneros en la investigación de geopolímeros, como (Davidovits, 1991; Palomo et al., 1999; Xu & Van Deventer, 2000), han arrojado luz sobre el papel vital de estos activadores y han confirmado las notables propiedades mecánicas de los geopolímeros formados utilizando tales sustancias activadoras.



2.3. Quitina

La quitina, un biopolímero natural obtenido principalmente de los desechos de crustáceos, es el segundo biopolímero más abundante después de la celulosa. Se caracteriza por su alta resistencia, biocompatibilidad y biodegradabilidad (Rinaudo, 2006). La extracción de quitina involucra desmineralización, desproteinización y desacetilación, resultando en un material que puede ser funcionalizado para mejorar la interacción con matrices inorgánicas (Ifuku & Saimoto, 2012). En geopolímeros, la incorporación de quitina ha mostrado mejorar la ductilidad y la resistencia a la compresión, posiblemente debido a la formación de enlaces covalentes y de hidrógeno entre la quitina y la matriz aluminosilicato (Singh et al., 2017; Esmaily & Soroushian, 2019).

2.3.1 Propiedades y Estructura Química de la Quitina

La quitina es un polisacárido natural esencial, descubierto en 1811 por Henri Braconnot (Hirano et al., 1996), que se sitúa entre los polímeros naturales más comunes después de la celulosa (Muzzarelli et al., 2012). Es producida por una amplia variedad de organismos y forma parte estructural de exoesqueletos de artrópodos y paredes celulares de hongos. Comercialmente, se extrae principalmente de exoesqueletos de cangrejos y gambas. Su extracción requiere tratamientos ácidos y alcalinos y, ocasionalmente, decoloración (Giji et al., 2022; Morin-Crini et al., 2019). Dadas las variaciones en la estructura según la fuente, los métodos de procesamiento deben ajustarse adecuadamente. Aunque la quitina es poco soluble, su transformación y caracterización son áreas de interés en desarrollo (Kumar Dutta et al., 2004; Rinaudo, 2006).

La quitina es un biopolímero estructural que se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza. Se caracteriza por su alta resistencia mecánica, rigidez, biocompatibilidad y biodegradabilidad (Singh et al., 2017). Es uno de los polímeros naturales más abundantes después de la celulosa y se extrae principalmente de los exoesqueletos de crustáceos como cangrejos y camarones (Fereidoon & Reem, 2005; Piekarska et al., 2023).

La quitina es reconocida como el segundo polisacárido natural más abundante en la Tierra, después de la celulosa. Está compuesto por 2-acetamido-2-desoxi-beta-D-glucosa con enlaces beta (1→4), comúnmente conocida como N-acetilglucosamina, como se ilustra en la figura 1. Aunque con frecuencia se la considera un derivado de la celulosa, la quitina no es producida por organismos sintetizadores de celulosa. Estructuralmente, la quitina es similar a la celulosa; sin embargo, contiene grupos de acetamida (-NHCOCH₃) en las posiciones C-2. El quitosano, el principal derivado de la quitina, es un polímero lineal compuesto por 2-amino-2-desoxi-β-D-glucopiranososa enlazada a α (1→4). Se deriva de la quitina mediante un proceso llamado N- desacetilación, que se produce en diversos grados y da como resultado un copolímero de N-acetilglucosamina y glucosamina, como se muestra en la Figura 1. Los avances recientes en la química de la quitina son dignos de mención, y destacan su versatilidad y aplicabilidad en la investigación biomédica y en otros campos (Kumar Dutta et al., 2004; Ravi Kumar, 2000).

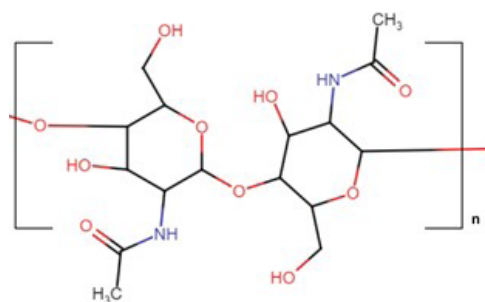


Figura 1. El gráfico muestra la estructura química de la quitina (Kumar Dutta et al., 2004; Páez et al., 2012; Singh et al., 2017).

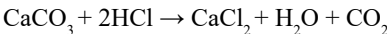
2.3.2. Métodos de Extracción de la Quitina

La quitina, un biopolímero natural que abunda en los exoesqueletos de los crustáceos y en las paredes celulares de los hongos, se extrae mediante un proceso de varios pasos que incluye la desmineralización, la desproteinización y, si es necesario, la decoloración. La desmineralización suele utilizar tratamientos ácidos para disolver el carbonato cálcico,

mientras que la desproteínización implica soluciones alcalinas para eliminar las proteínas, purificando así la quitina (Kozma et al., 2022; NCBI, 2023; Pakizeh et al., 2021). La decoloración, a menudo un paso adicional, busca eliminar los pigmentos para conseguir un producto estéticamente más atractivo (NCBI, 2023). A pesar de la eficacia de estos métodos tradicionales, cada vez son más objeto de escrutinio por su impacto medioambiental, lo que ha provocado un aumento de la investigación hacia técnicas de extracción más sostenibles (Mohan et al., 2022; Pachapur et al., 2016). Los procesos de obtención de quitina se detallan en las siguientes subsecciones:

2.3.3. Desmineralización

Este paso inicial elimina el carbonato cálcico y otros materiales inorgánicos de los exoesqueletos de crustáceos. Consiste en tratar la materia prima con ácido clorhídrico (HCl) diluido, que reacciona con el carbonato cálcico para formar cloruro cálcico (CaCl₂), agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂), disolviendo eficazmente los componentes inorgánicos. Esto puede representarse mediante la siguiente reacción.



Tras la reacción, el sólido restante está compuesto principalmente por quitina unida a proteínas y pigmentos (Kozma et al., 2022; Younes & Rinaudo, 2015).

2.3.4. Desproteínización

Tras la desmineralización, se lleva a cabo la desproteínización para eliminar el contenido de proteínas. Esto se consigue tradicionalmente tratando el material con una solución diluida de hidróxido de sodio (NaOH) o KOH. La solución alcalina descompone las proteínas, que luego pueden lavarse. Las condiciones de reacción, como la concentración de NaOH y la temperatura (normalmente entre 65°C y 100°C), son fundamentales para garantizar la eliminación completa de las proteínas sin dañar la estructura de la quitina (Gharibzadeh et al., 2023; Kumirska et al., 2010).

2.3.5. Aplicaciones de la Quitina

La quitina, un biopolímero versátil y abundante en la naturaleza, ofrece una amplia gama de aplicaciones en diversos campos debido a sus propiedades únicas mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Aplicaciones de la Quitina.

Aplicación	Descripción
Industria Biomédica	Fabricación de apósitos y vendajes para heridas debido a su capacidad para promover la cicatrización y reducir el riesgo de infección gracias a sus propiedades antimicrobianas (Ifuku & Saimoto, 2012; Ravi Kumar, 2000; Younes & Rinaudo, 2015). Además, la quitina y sus derivados se han investigado como materiales para la regeneración de tejidos, como en la ingeniería de tejidos óseos y cartilaginosos, debido a su biocompatibilidad y capacidad para proporcionar un entorno propicio para el crecimiento celular (Fereidoon & Reem, 2005; Muzzarelli et al., 2012).
Industria Alimentaria	Utilizada como aditivo en productos alimenticios para mejorar su estabilidad y textura. Exploración de su potencial como agente encapsulante para la liberación controlada de compuestos bioactivos, como vitaminas y antioxidantes, en alimentos funcionales y suplementos dietéticos (Kumirska et al., 2010; Pérez et al., 2012).
Purificación de Aguas Residuales	Eficaz en la purificación de aguas residuales y la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos debido a su capacidad para adsorber metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos nocivos (Fereidoon & Reem, 2005; Ifuku & Saimoto, 2012; Morin-Crini et al., 2019).
Industria de la Construcción	Incrementa la resistencia mecánica de los geopolímeros, mejorando la tenacidad y la resistencia a la compresión. Contribuye a la creación de materiales de construcción más sostenibles y muestra resistencia mejorada al fuego y a la humedad, ideales para áreas propensas a estas exposiciones (Fereidoon & Reem, 2005; Muzzarelli et al., 2012). Utilizar quitina, un recurso renovable, en la fabricación de geopolímeros contribuye a la creación de materiales de construcción más sostenibles, ayudando a reducir los residuos industriales (Younes & Rinaudo, 2015; Dinga & Wen, 2022; Ifuku & Saimoto, 2012).
Entornos Sensibles (Hospitales, Clínicas)	La biocompatibilidad de la quitina y sus propiedades antimicrobianas hacen que los geopolímeros reforzados sean ideales para estos entornos, previniendo la formación de moho y el crecimiento bacteriano, contribuyendo a un ambiente más higiénico (Ravi Kumar, 2000).

Fuente: Elaboración propia





Cada una de estas características destaca el potencial de la quitina como un aditivo valioso en la producción de geopolímeros para la industria de la construcción, promoviendo materiales más eficientes y ecológicos

3. Avances en Geopolímeros Reforzados con Quitina

Los avances en geopolímeros reforzados con quitina han demostrado un potencial significativo a nivel mundial. Investigaciones recientes muestran que estos materiales superan las limitaciones de los materiales convencionales como el cemento Portland, ofreciendo reducciones en emisiones de CO₂ y aprovechando materiales locales y residuos industriales industriales (Aguar et al., 2022; Boros et al., 2023; Ziejewska, Ak, et al., 2023; Ziejewska, Grela, et al., 2023). Estos geopolímeros presentan altas resistencias mecánicas, baja conductividad térmica y densidad reducida, ideales para la construcción de muros y estructuras que requieran ligereza y resistencia (Nguyen et al., 2022; Provis & Deventer, 2009).

A pesar de la información limitada sobre el uso específico de estos materiales en Ecuador, el país posee un gran potencial para adoptar estas tecnologías debido a su biodiversidad y recursos naturales. La integración de materiales sostenibles en las prácticas constructivas locales podría mejorar significativamente la sostenibilidad y eficiencia de recursos (Baykara et al., 2020a; Riofrio et al., 2021).

La quitina derivada de cangrejos y camarones ha mostrado excelentes resultados en la mejora de la resistencia a la compresión y la durabilidad de los geopolímeros (Gharibzadeh et al., 2023; Gijiu et al., 2022; Pakizeh et al., 2021). Estudios indican que la quitina de estas fuentes contribuye significativamente a las propiedades estructurales de los geopolímeros, ampliando su uso en la construcción sostenible y la mitigación de residuos industriales (Essel et al., 2018; Ikram et al., 2021).

Desde 2011, se intensifica el uso de quitina derivada de desechos marinos, fomentando prácticas de economía circular y mejorando las propiedades de los geopolímeros. Esta aplicación no solo es ecológica sino también económica, ofreciendo una solución a los residuos de la industria pesquera (S. L. Wang et al., 2011; Younes & Rinaudo, 2015)

Las mejoras en resistencia a la compresión y durabilidad se observaron desde 2015, adecuadas para escenarios de construcción más exigentes (Korniejenko et al., 2016; Smolyakov et al., 2016).

En 2020, se discutieron desarrollos en la caracterización físico-química de la quitina y su procesamiento en diversos materiales compuestos y funcionales, destacando su valor económico como material de refuerzo eficiente para aplicaciones como la purificación de agua y la ingeniería de tejidos (Maury-Ramirez et al., 2020; Rowles & O'Connor, 2003).

A partir del 2021 los estudios continúan avanzando en la formulación y aplicación de geopolímeros reforzados con quitina, con un enfoque particular en la sostenibilidad y la viabilidad en la construcción. Las investigaciones recientes abordan desde la nanoescala hasta las aplicaciones a gran escala, evaluando el impacto ambiental y la viabilidad económica de estos compuestos (Das et al., 2023; Ikram et al., 2021; Lam et al., 2023; Poblócki et al., 2024; Sambucci et al., 2021; Thambiliyagodage et al., 2023; Yanat & Schroën, 2023)

4. Conclusiones

Este estudio evidencia que los geopolímeros reforzados con quitina superan al Cemento Portland Ordinario en términos de rendimiento mecánico y sostenibilidad ambiental (Da Silva et al., 2023; McLellan et al., 2011). La adición de quitina mejora significativamente las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y a la flexión, debido a la formación de enlaces covalentes y de hidrógeno entre la quitina y la matriz aluminosilicato, resultando en una matriz más robusta y durable (Haider, Jian, Li, et al., 2022; Haider, Jian, Zhong, et al., 2022; Smolyakov et al., 2016; Younes & Rinaudo, 2015). Además, estos geopolímeros representan una opción más ecológica por su menor consumo de energía y reducción de emisiones de CO₂, alineándose con las prácticas globales de reducción de la huella de carbono.

Además, el uso de quitina, un subproducto de la industria pesquera, en la producción de estos geopolímeros contribuye a la economía circular, optimizando el uso de recursos y minimizando los desechos industriales. Aunque los beneficios ambientales y mecánicos son claros, es crucial evaluar la viabilidad económica para su adopción a gran escala. Los estudios futuros deberán considerar los costos de producción y la disponibilidad de materias primas en distintas regiones para

garantizar un impacto positivo y sustentable tanto económico como ambiental, promoviendo así su aplicación en la construcción verde y sostenible.

5. Referencias

- Acierno, D., Patti, A., Yin Boey, J., Keong Lee, C., & Seng Tay, G. (2022). *Factors Affecting Mechanical Properties of Reinforced Bioplastics: A Review*. <https://doi.org/10.3390/polym14183737>
- Aguiar, de, Zhong, Q., Tian, X., Xie, G., Luo, X., & Peng, H. (2022). *materials Investigation of Setting Time and Microstructural and Mechanical Properties of MK/GGBFS-Blended Geopolymer Pastes*. <https://doi.org/10.3390/ma15238431>
- Agumba, D. O., Pham, D. H., Park, G., Kumar, B., & Kim, J. (2024). *Strength and toughness of bioderived resin based on hyperbranched crosslinking and its application to cellulose long Filament-Reinforced polymer composite*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108098>
- Ali, A., Wai Chiang, Y., & Santos, R. M. (2022). *Citation: minerals X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions*. <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Andrew, R. M. (2021). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*, 10(4), 1–20. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-152>
- ASTM C 109. (2009). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) 1*. www.astm.org,
- ASTM C 348. (2009). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars 1*. www.astm.org,
- Aziz, I. H. A., Abdullah, M. M. A. B., Razak, R. A., Yahya, Z., Salleh, M. A. A. M., Chaiprapa, J., Rojviriya, C., Vizureanu, P., Sandu, A. V., Tahir, M. F. M., Abdullah, A., & Jamaludin, L. (2023). Mechanical Performance, Microstructure, and Porosity Evolution of Fly Ash Geopolymer after Ten Years of Curing Age. *Materials*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/MA16031096>
- Baykara, H., Cornejo, M. H., Espinoza, A., García, E., & Ulloa, N. (2020a). Preparation, characterization, and evaluation of compressive strength of polypropylene fiber reinforced geopolymer mortars. *Heliyon*, 6(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03755>
- Baykara, H., Cornejo, M. H., Espinoza, A., García, E., & Ulloa, N. (2020b). Preparation, characterization, and evaluation of compressive strength of polypropylene fiber reinforced geopolymer mortars. *Heliyon*, 6(4), e03755. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E03755>
- Baykara, H., Cornejo, M. H., Murillo, R., Gavilanes, A., Paredes, C., & Elsen, J. (2017). Preparation, characterization and reaction kinetics of green cement: Ecuadorian natural mordenite-based geopolymers. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(3), 1–12. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1057-z>
- Baykara, H., Solorzano, M. D. L. M., Echeverria, J. J. D., Cornejo, M. H., & Tapia-Bastidas, C. V. (2022). The use of zeolite-based geopolymers as adsorbent for copper removal from aqueous media. *Royal Society Open Science*, 9(3). <https://doi.org/10.1098/rsos.211644>
- Blanco, I., & Siracusa, V. (2021). *materials The Use of Thermal Techniques in the Characterization of Bio-Sourced Polymers*. <https://doi.org/10.3390/ma14071686>
- Boros, A., Erdei, G., & Korim, T. (2023). Development of Alkali Activated Inorganic Foams Based on Construction and Demolition Wastes for Thermal Insulation Applications. *Materials*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/MA16114065>
- Chen, C. C., Tsai, Y. K., Lin, Y. K., Ho, P. H., & Kuo, C. Y. (2023). Experimental and Numerical Investigation of the Mechanical Properties of a Fiber-Reinforced Geopolymer Mortar Blast Resistant Panel. *Polymers*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/POLYM15163440>
- Da Silva, J. R. P., Da Silva, R. O. H., Silva, A. F., França, E. L. T., Hernández, E. P., & de Farias, P. M. A. (2023). Portland cement concrete doped with chitosan: mechanical and microstructural properties | Concreto de cimento



- Portland dopado com quitosana: propriedades mecânicas e microestrutural. *Revista Materia*, 28(2). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0037>
- Das, A., Ringu, T., Ghosh, S., & Pramanik, Nabakumar. (2023). *A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers*. 80, 7247–7312. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04443-4>
- Davidovits, J. (1979). SYNTHESIS OF NEW HIGH-TEMPERATURE GEO-POLYMERS FOR REINFORCED PLASTICS/COMPOSITES. <https://www.researchgate.net/publication/284154696>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. <https://www.researchgate.net/publication/284651826>
- Davidovits, J. (2013). *GEOPOLYMER CEMENT*. www.geopolymer.org
- Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., & Kumar, S. (2017). Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4433–4446. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8230-8>
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete.” *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590–1597. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>
- Ebhodaghe, S. O., & Ndibe, H. (2022). Mechanical Properties of Biopolymers. *Handbook of Biopolymers*, 1–16. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6603-2_11-1
- EPA. (2021). *2019 Direct Carbon Intensities Quartile Metric Ton CO₂ / Metric Ton of Clinker Metric Ton CO₂ / Metric Ton of Cement Carbon Intensity*. <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text->
- Essel, T. Y. A., Koomson, A., Seniagya, M.-P. O., Cobbold, G. P., Kwofie, S. K., Asimeng, B. O., Arthur, P. K., Awandare, G., Tiburu, E. K., Gh, B. O. A.), & Gh, G. A.). (2018). Chitosan Composites Synthesized Using Acetic Acid and Tetraethylorthosilicate Respond Differently to Methylene Blue Adsorption. *Polymers*, 10, 466. <https://doi.org/10.3390/polym10050466>
- Fereidoon, S., & Reem, A. (2005). CHITIN, CHITOSAN, AND CO-PRODUCTS: CHEMISTRY, PRODUCTION, APPLICATIONS, AND HEALTH EFFECTS. *Elsevier Inc.*
- Furtos, G., Prodan, D., Sarosi, C., Moldovan, M., Korniejenko, K., Miller, L., Fiala, L., & Iveta, N. (2024). Mechanical Properties of MiniBars™ Basalt Fiber-Reinforced Geopolymer Composites. *Materials*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/MA17010248>
- Galed Ceresuela, G. (2005). *Biopolímeros quitina/quitosano: optimización de los procesos de obtención y caracterización funcional*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=195057&info=resumen&idioma=SPA>
- Gharibzadeh, M., Osfour, S., Jamekhorshid, A., & Jafari, S. A. (2023). Microbial chitin extraction and characterization from green tiger shrimp waste: A comparative study of culture mediums along with bioprocess optimization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 125213. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.125213>
- Gîjiu, C. L., Isopescu, R., Dinculescu, D., Memecică, M., Apetroaei, M. R., Anton, M., Schröder, V., & Rău, I. (2022). Crabs Marine Waste—A Valuable Source of Chitosan: Tuning Chitosan Properties by Chitin Extraction Optimization. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 4492, 14(21), 4492. <https://doi.org/10.3390/POLYM14214492>
- Habert, G. (2013). Environmental impact of Portland cement production. *Eco-Efficient Concrete*, 3–25. <https://doi.org/10.1533/9780857098993.1.3>

- Haider, M. M., Jian, G., Li, H., Miller, Q. R. S., Wolcott, M., Fernandez, C., & Nassiri, S. (2022). Impact of chitin nanofibers and nanocrystals from waste shrimp shells on mechanical properties, setting time, and late-age hydration of mortar. *Scientific Reports* |, 12, 20539. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24366-4>
- Haider, M. M., Jian, G., Zhong, T., Li, H., Fernandez, C. A., Fifield, L. S., Wolcott, M., & Nassiri, S. (2022). Insights into setting time, rheological and mechanical properties of chitin nanocrystals- and chitin nanofibers-cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104623>
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and Properties of Low-calcium Fly Ash Based Geopolymer LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE By Faculty of Engineering Curtin University of Technology. *Australia : University of Technology Perth, January*, 48.
- Hirano, S., Chanzy, H., Roberts, G., Stevens Win, W. N., Ng, C., Pichyangkura, S., Chandkrachang, S., Jaworska, M., & Szweczyk, K. V. (1996). *Chitosan production routes and their role in determining the p 22 structure and properties of the product Chitosan from A bsidia sp. _ ^.*
- Ifuku, S., & Saimoto, H. (2012). Chitin nanofibers: Preparations, modifications, and applications. In *Nanoscale* (Vol. 4, Issue 11, pp. 3308–3318). <https://doi.org/10.1039/c2nr30383c>
- Ikram, R., Jan, B. M., Qadir, M. A., Sidek, A., Stylianakis, M. M., Kenanakis, G., Plascencia-Jatomea, M., Aracely, N., & López, P. (2021). *polymers Recent Advances in Chitin and Chitosan/Graphene-Based Bio-Nanocomposites for Energetic Applications*. <https://doi.org/10.3390/polym13193266>
- Khaiyum, M. Z., Sarker, S., & Kabir, G. (2023). Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context. *Sustainability*, 15(21), 15407. <https://doi.org/10.3390/su152115407>
- Korniejenko, K., Frączek, E., Pytlak, E., & Adamski, M. (2016). Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Procedia Engineering*, 151, 388–393. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.395>
- Korniejenko, K., Łach, M., & Miłkowska, J. (2018). Mechanical Properties of Raffia Fibres Reinforced Geopolymer Composites. In *Advances in Natural Fibre Composites* (pp. 135–144). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64641-1_13
- Kozma, M., Acharya, B., & Bissessur, R. (2022). Chitin, Chitosan, and Nanochitin: Extraction, Synthesis, and Applications. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 3989, 14(19), 3989. <https://doi.org/10.3390/POLYM14193989>
- Kumar Dutta, P., Dutta, J., & Tripathi, V. S. (2004). Chitin and chitosan: Chemistry, properties and applications. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 63, 20–31.
- Kumirska, J., Czerwicka, M., Kaczyński, Z., Bychowska, A., Brzozowski, K., Thöming, J., & Stepnowski, P. (2010). Application of spectroscopic methods for structural analysis of chitin and chitosan. In *Marine Drugs* (Vol. 8, Issue 5, pp. 1567–1636). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/md8051567>
- Łach, M., Kluska, B., Janus, D., Kabat, D., Plawecka, K., Korniejenko, K., Guigou, M. D., & Choińska, M. (2021). Effect of Fiber Reinforcement on the Compression and Flexural Strength of Fiber-Reinforced Geopolymers. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 10443, 11(21), 10443. <https://doi.org/10.3390/AP112110443>
- Lam, W. S., Lam, W. H., & Lee, P. F. (2023). *materials The Studies on Chitosan for Sustainable Development: A Bibliometric Analysis*. <https://doi.org/10.3390/ma16072857>
- Lynch, J. L. V., Baykara, H., Cornejo, M., Soriano, G., & Ulloa, N. A. (2018). Preparation, characterization, and determination of mechanical and thermal stability of natural zeolite-based foamed geopolymers. *Construction and Building Materials*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.253>
- Madsen, I. C., Scarlett, N. V. Y., & Kern, A. (2011). Description and survey of methodologies for the determination of amorphous content via X-ray powder diffraction. *Zeitschrift Fur Kristallographie*, 226(12), 944–955. <https://doi.org/10.1524/ZKRI.2011.1437>
- Maury-Ramirez, A. C., Flores-Colen, I., & Kanematsu, H. (2020). *Advanced Coatings for Buildings*. www.mdpi.com/journal/coatings



- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymers pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Mohan, K., Ganesan, A. R., Ezhilarasi, P. N., Kondamareddy, K. K., Rajan, D. K., Sathishkumar, P., Rajarajeswaran, J., & Conterno, L. (2022). Green and eco-friendly approaches for the extraction of chitin and chitosan: A review. *Carbohydrate Polymers*, 287, 119349. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.119349>
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G., & Crini, G. (2019). Applications of chitosan in food, pharmaceuticals, medicine, cosmetics, agriculture, textiles, pulp and paper, biotechnology, and environmental chemistry. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1667–1692. <https://doi.org/10.1007/S10311-019-00904-X>
- Mourak, A., Hajjaji, M., & Alagui, A. (2019). Cured cuttlebone/chitosan-heated clay composites: Microstructural characterization and practical performances. *Journal of Building Engineering*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100872>
- Muzzarelli, R. A. A., Boudrant, J., Meyer, D., Manno, N., Demarchis, M., & Paoletti, M. G. (2012). Current views on fungal chitin/chitosan, human chitinases, food preservation, glucans, pectins and inulin: A tribute to Henri Braconnot, precursor of the carbohydrate polymers science, on the chitin bicentennial. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 995–1012. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2011.09.063>
- Nallive Yopez, O., Bedoya Montolla, C., & Gómez Eusse, J. (2012). Hacia un avance ambiental y tecnológico de la construcción con tierra como patrimonio futuro. Del bloque de suelo cemento (BSC) al bloque de tierra con geopolímeros (BTG). *Apuntes*, 25(1757–9763), 240–245. <http://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:3653/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=ce1f09e4-a2f6-4f03-99ed-d04fea29f426%40sessionmgr113&vid=4&hid=124>
- NCBI, N. C. for B. I. (2023). *Chitosan* | C56H103N9O39 | CID 71853 - PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Chitosan>
- Nguyen, V. V., Le, V. S., Louda, P., Szczypiński, M. M., Ercoli, R., Vojtěch, R., Łoś, P., Prałat, K., Plaskota, P., Pacyniak, T., & Buczkowska, K. E. (2022). Low-Density Geopolymer Composites for the Construction Industry. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 304, 14(2), 304. <https://doi.org/10.3390/POLYM14020304>
- Nikolov, A., Nugteren, H., & Rostovsky, I. (2020). Optimization of geopolymers based on natural zeolite clinoptilolite by calcination and use of aluminate activators. *Construction and Building Materials*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118257>
- Oh, D. X., & Hwang, D. S. (2013). A biomimetic chitosan composite with improved mechanical properties in wet conditions. *Biotechnology Progress*, 29(2), 505–512. <https://doi.org/10.1002/BTPR.1691>
- Ojeda, J. J., & Dittrich, M. (2012). Fourier transform infrared spectroscopy for molecular analysis of microbial cells. *Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.)*, 881, 187–211. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-827-6_8
- Pachapur, V. L., Guemiza, K., Rouissi, T., Sarma, S. J., & Brar, S. K. (2016). Novel biological and chemical methods of chitin extraction from crustacean waste using saline water. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(8), 2331–2339. <https://doi.org/10.1002/JCTB.4821>
- Páez, G., Rincón, M., Araujo, K., & Aiello-Mazzarri, C. (2012). *Quitina y Quitosano, polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones*. <https://www.researchgate.net/publication/235431334>
- Pakizeh, M., Moradi, A., & Ghassemi, T. (2021). Chemical extraction and modification of chitin and chitosan from shrimp shells. *European Polymer Journal*, 159, 110709. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2021.110709>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Peter Hewlett. (2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (4th Edition).

- Piekarska, K., Sikora, M., Owczarek, M., Jóźwik-Pruska, J., & Wiśniewska-Wrona, M. (2023). Chitin and Chitosan as Polymers of the Future—Obtaining, Modification, Life Cycle Assessment and Main Directions of Application. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 793, 15(4), 793. <https://doi.org/10.3390/POLYM15040793>
- Pobłocki, K., Pawlak, M., Drzeżdżon, J., Gawdzik, B., & Jacewicz, D. (2024). Clean production of geopolymers as an opportunity for sustainable development of the construction industry. *Science of The Total Environment*, 928, 172579. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.172579>
- Provis, J., & Deventer, V. (2009). *Geopolymers*.
- Qin, Y., Chen, X., Li, B., Guo, Y., Niu, Z., Xia, T., Meng, W., & Zhou, M. (2021). Study on the mechanical properties and microstructure of chitosan reinforced metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 271, 121522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121522>
- Raj, R. S., Arulraj, G. P., Anand, N., Kanagaraj, B., Lubloy, E., & Naser, M. Z. (2022). Nano Calcium Carbonate (NCC), Nano Zinc oxide (NZ), Graphene Oxide (GO). *Nano Glass Powder (NGP) and Nano-Clay*. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100114>
- Rashad, A. M. (2013). Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition-A comprehensive overview. In *Construction and Building Materials* (Vol. 41, pp. 303–318). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>
- Ravi Kumar, M. N. V. (2000). A review of chitin and chitosan applications. In *Reactive and Functional Polymers* (Vol. 46, Issue 1, pp. 1–27). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(00)00038-9)
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. In *Progress in Polymer Science (Oxford)* (Vol. 31, Issue 7, pp. 603–632). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- Riofrio, A., Alcivar, T., & Baykara, H. (2021). Environmental and Economic Viability of Chitosan Production in Guayas-Ecuador: A Robust Investment and Life Cycle Analysis. *ACS Omega*, 6(36), 23038–23051. https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.1C01672/ASSET/IMAGES/LARGE/AO1C01672_0011.JPEG
- Rodrigue Kaze, C., Ninla Lemougna, P., Alomayri, T., Assaedi, H., Adesina, A., Kumar Das, S., Lecomte-Nana, G. L., Kamseu, E., Chinje Melo, U., & Leonelli, C. (2021). Characterization and performance evaluation of laterite based geopolymer binder cured at different temperatures. *Construction and Building Materials*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121443>
- Rowles, M., & O'Connor, B. (2003). Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. *Journal of Materials Chemistry*, 13(5), 1161–1165. <https://doi.org/10.1039/B212629J>
- Sambucci, M., Sibai, A., & Valente, M. (2021). Recent advances in geopolymer technology. A potential eco-friendly solution in the construction materials industry: A review. *Journal of Composites Science*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/JCS5040109>
- Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025>
- Singh, R., Shitiz, K., & Singh, A. (2017). Chitin and chitosan: biopolymers for wound management. *International Wound Journal*, 14(6), 1276–1289. <https://doi.org/10.1111/iwj.12797>
- Smolyakov, G., Pruvost, S., Cardoso, L., Alonso, B., Belamie, E., & Duchet-Rumeau, J. (2016). AFM PeakForce QNM mode: Evidencing nanometre-scale mechanical properties of chitin-silica hybrid nanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 151, 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.042>
- Susan Swapp. (2024). *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
- Thambiliyagodage, C., Jayanetti, M., Mendis, A., Ekanayake, G., Liyanaarachchi, H., & Vigneswaran, S. (2023). *materials Review Recent Advances in Chitosan-Based Applications-A Review*. <https://doi.org/10.3390/ma16052073>
- Ulloa, N. A., Baykara, H., Cornejo, M. H., Rigail, A., Paredes, C., & Villalba, J. L. (2018). Application-oriented mix design



- optimization and characterization of zeolite-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.101>
- Van Riessen, A., Rickard, W., & Sanjayan, J. (2009). Thermal properties of geopolymers. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, 315–342. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.315>
- Wang, S. L., Liang, T. W., & Yen, Y. H. (2011). Bioconversion of chitin-containing wastes for the production of enzymes and bioactive materials. *Carbohydrate Polymers*, 84(2), 732–742. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2010.06.022>
- Wang, T., Yang, L., Rao, F., Jiang, K., & Byrinnai, C. (2023). Effect of chitosan on the mechanical properties and acid resistance of metakaolin-blast furnace slag-based geopolymers. *Environmental Science and Pollution Research*, 1, 3. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25676-4>
- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. In *Int. J. Miner. Process* (Vol. 59). www.elsevier.nl/locate/ijminpro
- Yanat, M., & Schroën, K. (2023). *Advances in chitin-based nanoparticle use in biodegradable polymers: A review*. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120789>
- Younes, I., & Rinaudo, M. (2015). Chitin and Chitosan Preparation from Marine Sources. Structure, Properties and Applications. *Marine Drugs*, 13(3), 1133. <https://doi.org/10.3390/MD13031133>
- Yusuf, M. O. (2023). *Bond Characterization in Cementitious Material Binders Using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy*. <https://doi.org/10.3390/app13053353>
- Zhang, Z., & Wang, H. (2016). The pore characteristics of geopolymer foam concrete and their impact on the compressive strength and modulus. *Frontiers in Materials*, 3. <https://doi.org/10.3389/FMATS.2016.00038/FULL>
- Ziejewska, C., Ak, A. B., Hodor, K., & Hebda, M. (2023). *Eco-Friendly Coal Gangue and/or Metakaolin-Based Lightweight Geopolymer with the Addition of Waste Glass*. <https://doi.org/10.3390/ma16176054>
- Ziejewska, C., Grela, A., Mierzwinski, D., & Hebda, M. (2023). *materials Influence of Waste Glass Addition on the Fire Resistance, Microstructure and Mechanical Properties of Geopolymer Composites*. <https://doi.org/10.3390/ma16176011>

Contribución de autores

Autor	Contribución
Hortencia Esperanza Asanza Sánchez	Conceptualización, tratamiento, curado e interpretación de datos, escritura y edición final del escrito.
Haci Baykara	Conceptualización, metodología, Revisión final manuscrito.
David Anzules	Revisión final manuscrito.