

# Propiedades fisicomecánicas, desempeño y durabilidad de morteros geopoliméricos a base de puzolana natural tipo piedra pómez

## Physicomechanical properties, performance and durability of Colombian natural puzzolan of pumice-type based geopolymer mortars

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.17>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 24/10/2020. Fecha de Aceptación: 18/11/2020.

**Hernando Álvarez Mantilla** 

Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia)  
hmantilla@gmail.com

**Carlos Alberto Ríos Reyes** 

Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia)  
carios@uis.edu.co

**Oscar Mauricio Castellanos Alarcón** 

Universidad de Pamplona. Villa del Rosario (Colombia)  
oscarmca@yahoo.es

Para citar este artículo:

H. Álvarez Mantilla, C. Ríos Reyes & O. Castellanos Alarcón, “Propiedades fisicomecánicas, desempeño y durabilidad de morteros geopoliméricos a base de puzolana natural tipo piedra pómez”, *INGECUC*, vol. 17. no. 1, pp. 216–228. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.17>

### Resumen

**Introducción**— En los últimos años, los investigadores han estado evaluando el uso potencial de una amplia gama de materias primas en la producción de geopolímeros. Este trabajo reporta la conveniencia de utilizar una puzolana natural tipo piedra pómez de Paipa (Colombia) como material de sustitución del cemento (100% de puzolana) en la producción de morteros geopoliméricos.

**Objetivo**— El objetivo de esta investigación se enfoca en el uso de la piedra pómez como materia prima en la producción de cementos geopoliméricos con el fin de establecer su comportamiento mecánico y durabilidad.

**Metodología**— Se utilizaron cemento Portland tipo I, puzolana natural y arena como materiales de partida en la preparación de morteros geopoliméricos a partir de la activación alcalina de puzolana natural. Los morteros geopoliméricos fueron preparados y ensayados según las normas del Instituto Colombiano de Normas Técnicas e Instituto Nacional de Vías.

**Resultados**— Los ensayos en geopolímeros ofrecen resultados alentadores y muestran un buen potencial en la preparación de cemento con puzolana exhibiendo una adecuada durabilidad y resistencia a la compresión relativamente alta a los 28 días para ser aceptado en el desarrollo de nuevos materiales cementantes.

**Conclusiones**— El uso de puzolana natural en la producción de geopolímeros se vuelve importante por su papel en la durabilidad del mortero en condiciones ambientales extremas y agresivas.

**Palabras clave**— Geopolímeros; piedra pómez; puzolana natural; cemento; morteros

### Abstract

**Introduction**— In recent years, researchers have been evaluating the potential use of a wide range of raw materials in the production of geopolymers. This paper reports the convenience of using a natural puzzolan of pumice type from Paipa (Colombia) as a substitute material for cement (100% puzzolan) in the production of geopolymeric mortars.

**Objective**— The objective of this research focuses on the use of pumice stone as raw material in the production of geopolymeric cements in order to establish its mechanical behavior and durability.

**Method**— Type I Portland cement, natural puzzolan and sand were used as starting materials in the preparation of geopolymeric mortars from the alkaline activation of natural puzzolan. The geopolymeric mortars were prepared and tested according to the standards of the Colombian Institute of Technical Standards and the National Institute of Roads.

**Results**— The tests in geopolymers offer encouraging results and show a good potential in the preparation of cement with puzzolan exhibiting an adequate durability and resistance to relatively high compression at 28 days to be accepted in the development of new cementitious materials.

**Conclusions**— The use of natural puzzolan in the production of geopolymers becomes important for its role in the durability of the mortar under extreme and aggressive environmental conditions.

**Keywords**— Geopolymers; pumice; natural puzzolan; cement; mortars

## I. INTRODUCCIÓN

El cemento Portland tipo I es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción para la producción de concreto, especialmente en los países en desarrollo, gracias a sus excelentes propiedades mecánicas en estado endurecido, costo relativamente bajo y versatilidad [1]. A nivel mundial se producen anualmente billones de toneladas de Cemento Portland Ordinario (CPO) [2], cifra que se espera aumente como consecuencia del crecimiento poblacional y desarrollo socioeconómico. Sin embargo, la industria cementera es también una de las más contaminantes, ya que explota recursos naturales y emite grandes volúmenes de gases contaminantes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) [3]. Las emisiones de  $\text{CO}_2$  están asociadas a la descarbonatación de la caliza en el horno de clinkerización [4]. La industria cementera promueve la búsqueda de soluciones para la conservación y protección de los recursos no renovables mediante el desarrollo de materiales cementantes que precisen de un menor consumo de energía en su formación, degraden menos el medioambiente y emitan menos gases contaminantes a la atmósfera, como parte del marco de las políticas de sostenibilidad de los diferentes acuerdos internacionales. Diferentes aglutinantes inorgánicos como materiales alternativos al cemento Portland han sido utilizados en estudios anteriores debido a razones ambientales, económicas y técnicas [3], [5]-[8]. En los últimos años, muchos trabajos de investigación se han llevado a cabo para determinar la posibilidad de utilizar residuos industriales tales como escorias cristalizadas de alto horno [9]-[11], cenizas volantes [12]-[16], cenizas de incineradora [17], residuos de reciclado de aluminio [18]-[19], cenizas de papeleras [20], residuos cerámicos [4], [21] y residuos mineros [22]-[24], así como materiales geológicos [25]-[29], como materiales alternativos en la fabricación de materiales cementantes, lo cual se ha convertido en un medio muy efectivo para alcanzar, en gran parte, dicho desarrollo sostenible. Por otra parte, la piedra pómez encontrada en regiones volcánicas es otro tipo de puzolana que está recibiendo atención en la producción de cementos geopoliméricos [30]. El uso de puzolanas naturales como la piedra pómez puede generar grandes beneficios en términos de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros [6]. Sin embargo, estos efectos beneficiosos dependen del tipo, cantidad, finura y composición química de la puzolana. El término “geopolímero” fue usado por primera vez en 1988 [31] para designar una nueva clase de polímeros inorgánicos formados por redes 3D amorfas de tetraedros alternados de  $\text{AlO}_4$  y  $\text{SiO}_4$  de gran estabilidad térmica y química, no inflamables, con buenas propiedades mecánicas y fácilmente procesables a temperaturas inferiores a  $100^\circ\text{C}$  y presión atmosférica. El proceso químico de geopolimerización involucra dos etapas: 1) disolución de los materiales de partida en soluciones alcalinas para formar una gel rica en Si-Al sobre la superficie de los materiales, y 2) policondensación para formar cadenas poliméricas [32]. Sin embargo, el mecanismo exacto de polimerización aún no ha sido determinado completamente. Los geopolímeros en combinaciones apropiadas de materias primas y agentes activadores pueden ofrecer buenas propiedades fisicomecánicas y desempeño y durabilidad en condiciones extremas [33]-[37]. Colombia es rica en puzolanas naturales, y la piedra pómez se puede encontrar en varias regiones del país. Por lo tanto, esta investigación llevó a cabo un estudio sobre el uso de la piedra pómez como materia prima en la producción de morteros geopoliméricos, estableciendo sus propiedades fisicomecánicas, desempeño y durabilidad en condiciones extremas a partir de la evaluación de la resistencia a la compresión al ataque a altas temperaturas y al ataque químico con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{MgSO}_4$ .

## II. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### A. Materias primas

El cemento Portland tipo I de referencia usado en este estudio es fabricado por Holcim (Colombia) S.A., Nobsa (Boyacá). La puzolana natural corresponde a una roca volcánica de origen piroclástico, la cual fue obtenida de una cantera de explotación de Cemex Colombia S.A., localizada en los alrededores de Paipa (Boyacá). Esta se secó al sol durante tres días con el fin de eliminar el agua sin alterar sus propiedades físicas, luego se fragmentó en un

triturador de placas marca RETSCH, pulverizo en un mortero de ágata electrónico marca RETSCH 100 RM, y tamizo con el fin de utilizar el tamaño de partícula inferior a  $125\ \mu\text{m}$  para la preparación de las probetas geopoliméricas. La arena utilizada en la preparación de las diferentes mezclas fue extraída del Río Chicamocha (Santander), la cual es reconocida por su alta calidad para la preparación de materiales de alta resistencia. Los morteros geopoliméricos fueron preparados a partir de la activación alcalina de puzolana natural, usando como agentes activantes hidróxido de sodio (NaOH) en lentejas del 98% de pureza adquirido y silicato de sodio ( $\text{NaSiO}_3$ ) neutro 42 con relación molar  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O} \approx 3.0$ , adquiridos a nivel comercial (CONQUIMICA).

### B. Caracterización de materias primas

La finura del cemento y de la puzolana se determinó por medio de la norma NTC 226 [38], mientras que el peso específico y la absorción máxima del cemento fueron determinados según la norma INV E-222 [39]. Las fases minerales cristalinas y amorfas presentes en la puzolana se determinaron en un difractómetro de rayos X marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB bajo las siguientes condiciones analíticas: radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5406\ \text{\AA}$ ), voltaje 40 kV, amperaje 30 mA, rango de medición  $2\text{-}70^\circ$  ( $2\theta$ ), tiempo de muestro/paso 2 s, intervalo de muestreo  $0.02^\circ$  ( $2\theta$ ), monocromador de grafito, rendijas DS  $1^\circ$ , RS  $0.3\ \text{mm}$  y SS  $1^\circ$ . La identificación de fases minerales se realizó mediante el proceso de búsqueda de comparación (búsqueda/coincidencia) utilizando la base de datos cristalográfica Powder Diffraction File (PDF-2) del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD). Considerando que el tamaño de partícula del polvo de puzolana puede afectar efectivamente las propiedades tanto húmedas como secas de un geopolímero, la puzolana se pulverizó en un mortero de ágata hasta obtener un polvo relativamente fino el cual se pasó por tamiz malla 200 ( $\sim 75\ \mu\text{m}$ ). El análisis granulométrico de la arena se llevó a cabo por medio de la norma INV E-123 [40], determinando inicialmente el peso de la fracción granular y separando las partículas en sus diferentes tamaños (1.180 mm, 0.600 mm, 0.425 mm, 0.250 mm y 0.150 mm) con el uso de tamices en orden decreciente. Finalmente se determinó el peso de cada fracción retenida, verificando que la suma de los pesos retenidos en cada tamiz fuera igual al peso de la fracción granular inicial, con una tolerancia del 0.5%. La presencia de materia orgánica se obtuvo por medio del valor de azul de metileno en agregados finos, según la norma INV E-235 [41]. El peso específico de la arena se determinó por medio de la norma NTC 221 [42]. Por otra parte, con el fin de establecer el efecto de la presencia de impurezas, la arena se lavó en el tamiz de 200 ( $75\ \mu\text{m}$ ) con el fin de eliminar impurezas tales como materia orgánica o arcillas.

### C. Preparación de morteros

En la preparación de morteros se siguió la norma NTC 220 [43]. A continuación, se describe el diseño establecido en la preparación de probetas experimentales (Fig. 1). En primer lugar, se limpiaron, secaron y engrasaron los moldes (Fig. 1a). Las proporciones calculadas de materias primas fueron pesadas en una balanza electrónica digital de exactitud 0.1% para la medición en trabajos de laboratorio y calibración según la Norma NTC 2031 [44] con el fin de preparar mezclas homogéneas sustituyendo el CPO por la puzolana y el agua por la solución activante ( $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ ); las proporciones que se utilizaron fueron de 1 parte de CPO o puzolana y 2.75 partes de arena y una relación de agua o solución activante/puzolana de 0.485. Esto fue seguido de una adición de agua o solución activante a cada mezcla en condiciones de agitación hasta obtener una pasta cementante. Finalmente, esta pasta se vertió en los moldes hasta alcanzar el 50% de su capacidad, compactando las mezclas cementantes (Fig. 1b). Una nueva cantidad de pasta se vertió en los moldes hasta completar el 100% de su capacidad, compactando nuevamente las mezclas cementantes y retirando el exceso de pasta en los moldes (Fig. 1c), los cuales fueron entonces cubiertos con plástico. Después de 24 horas se retiraron las probetas experimentales de los moldes (Fig. 1d), las cuales fueron rotuladas (Fig. 1e).

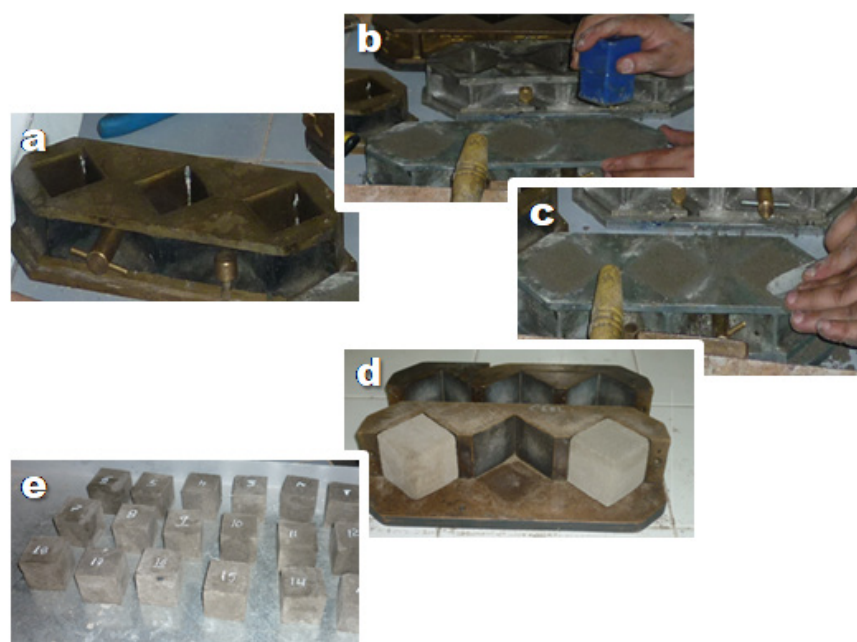


Fig. 1. Procedimiento de preparación de las probetas.  
Fuente: Autores.

La **Tabla 1** sintetiza el protocolo seguido durante la preparación de morteros de CPO y geopoliméricos. La solución activante se preparó disolviendo NaOH en agua destilada hasta que se obtuvo una concentración 8M, la cual fue mezclada con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  en una relación NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  de 1:2.5, de acuerdo a lo propuesto en estudios previos [45]-[46].

TABLA 1. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA PREPARACIÓN DE MORTEROS DE CPO Y GEOPOLIMERICOS.

Morteros de CPO					
CPO	ANL		.AL		Relación $\text{H}_2\text{O}$ CPO
1 parte	2.75 partes		2.75 partes		0.485
	CPO-ANL		CPO-AL		Ensayo
	Curado a $T_{\text{amb}}$		Curado a $T_{\text{amb}}$		
	N° probetas experimentales				
	9		9		Resistencia a la compresión (7, 14, y 28 días)
	9		9		Ataque con $\text{H}_2\text{SO}_4$ (4 semanas)
	9		9		Ataque con $\text{HgSO}_4$ (4 semanas)
	6		6		Resistencia a altas temperaturas
Morteros geopoliméricos					
PUZ	AKL		.AL		Relación SA CPO
1 parte	2.75 partes		2.75 partes		0.485
	G-ANL G-ANL-65		G-.AL G-AL-65		Ensayo
	Curado a $T_{\text{amb}}$	Curado a 65°C	C Curado a $T_{\text{amb}}$	Curado a 65°C	
	N° probetas experimentales				
	9	9	9	9	Resistencia a la compresión (7, 14, y 28 días)
	9	9	9	9	Ataque con $\text{H}_2\text{SO}_4$ (4 semanas)
	9	9	9	9	Ataque con $\text{HgSO}_4$ (4 semanas)
	6	6	6	6	Resistencia a altas temperaturas

CPO, cemento Portland ordinario; PUZ: puzolita; ANL, arena no lavada; AL, arena lavada; SA, solución activante ( $\text{NaOH} + 8\text{M} + \text{NaSiO}_3$ , en relación 1:2.5); CPO-ANL, Mortero de CPO con ANL; CPO-AL, Mortero de CPO con AL; G-ANL, Geopolímero con ANL curado a temperatura ambiente; G-AXL-65, Geopolímero con AXL curado a 65°C; G-A.L, Geopolímero con AL curado a temperatura ambiente; G-AL-65, Geopolímero con AL curado a 65°C

Fuente: Autores.

#### D. Ensayos tecnológicos

La determinación de la resistencia a la compresión se realizó siguiendo la norma NTC 220 [43] de la siguiente manera: Las probetas fueron curadas durante 7, 14 y 28 días en un cuarto húmedo (cámara húmeda) en donde permanecieron hasta el momento de realizar los ensayos por triplicado a fin de obtener un valor promedio. El ensayo de ataque con ácidos se realizó con el fin de someter los morteros (de CPO y geopoliméricos) a condiciones extremas de exposición,

simulando una situación de ambientes altamente corrosivos. Las probetas fueron curadas durante 21 días, luego fueron expuestas a una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) de pH = 1, cuyo volumen de solución fue cuatro veces mayor que el volumen de estas, a lo largo de cuatro semanas (2 ensayos sobre la misma mezcla por cada semana para sacar un promedio), dejándose un testigo de cada mezcla para evaluarlo a las nueve semanas. El ataque con  $H_2SO_4$  fue evaluado mediante la pérdida de peso y el ensayo de resistencia a la compresión. La prueba de resistencia al ataque con  $MgSO_4$  se realizó de la misma forma que el ataque con  $H_2SO_4$ ; la concentración de  $MgSO_4$  fue de 50 g/L. Esta interacción puede producir efectos negativos sobre los morteros, tales como expansión, agrietamiento, pérdida de masa y desintegración. El ataque con  $MgSO_4$  fue evaluado mediante la pérdida de peso y el ensayo de resistencia a la compresión. Con el fin de determinar el comportamiento frente a altas temperaturas se trabajó con dos probetas de cada mezcla con 28 días de curado; las probetas fueron expuestas por un periodo de dos horas a las temperaturas de 300°C, 600°C y 1000°C. En cada mezcla se evaluó la pérdida de peso y la resistencia a la compresión. La porosidad de los morteros fue determinada mediante las técnicas de saturación y flotación. Las probetas fueron pesadas y sumergidas en agua durante 24 horas, extrayéndose y secándose. El peso de la probeta se tomó antes y después del proceso.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. *Propiedades físicas de las materias primas*

Las propiedades físicas de las materias primas son de gran importancia como quiera que de estas depende su futura aplicación industrial. El patrón de difracción de rayos X de la puzolana natural (Fig. 2) revela que este geomaterial consiste principalmente de una mezcla de una fase vítrea esencialmente rica en  $SiO_2$  y cuarzo cristalino, con trazas de anortoclasa, halloisita y sepiolita. La fase amorfa (vidrio volcánico) da lugar a un amplio pico de baja intensidad en el rango de  $2\theta$  de 15°-35°. El cuarzo -  $SiO_2$  (JCPDS 010-77-1060) representa la fase cristalina más abundante, la cual se caracteriza por presentar picos intensos dentro de los que se destaca aquel a  $2\theta$  de 26.7°, que es el pico característico (101). Otras fases cristalinas como anortoclasa -  $Na_{0.667}K_{0.333}AlSi_3O_8$  (JCPDS 010-75-1630), halloisita -  $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$  (JCPDS 000-29-1489) y sepiolita -  $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$  (JCPDS 000-13-0595) presentan picos de baja intensidad. La difracción de rayos X en polvo, aunque es principalmente una herramienta para la caracterización de fases cristalinas, también proporciona un medio para investigar materiales amorfos [47]-[48], los cuales carecen de un arreglo tridimensional de largo alcance y producen picos de reflexión amplios con bajas intensidades en los patrones de difracción de rayos X. La piedra pómez representa un material heterogéneo constituido por una mezcla de materiales amorfos y cristalinos como la reportada por otros autores [49]-[51]. La naturaleza esencialmente silíceo y amorfa de esta puzolana natural favorece su reactividad en medios alcalinos como el cemento Portland. La industria del cemento requiere que los materiales alternativos al cemento Portland presenten una gran cantidad de vidrio volcánico como es el caso de la puzolana natural utilizada en este estudio, la cual podría clasificarse como una de piedra pómez ácida con presencia de poros independientes de diferente morfología, tamaño y geometría que generalmente presentan una membrana vítrea, los cuales generan ventajas en términos de aislamiento térmico y acústico en la industria de la construcción [52]. El peso específico de la puzolana es de 2.12 gr/ml, mientras que la finura de este material es del 93.42%. La arena utilizada como agregado fino esta principalmente compuesta de cuarzo, feldespatos potásico, moscovita, plagioclasa, anfíboles y fragmentos de roca. El tamaño de grano de las partículas varía de 1.19 mm (malla 16) a 0.149 mm (malla 100) y la morfología de los granos varía de angular a subangular. El peso específico y la absorción máxima de la arena fueron de 2.52 gr/ml y 1.42 gr/ml, respectivamente. Por lo tanto, estas características de la arena juegan un papel decisivo en su calidad y hacen de esta una materia prima apta para la preparación de morteros [53]. La finura del cemento es del 99.31% mientras que el peso específico de este material es de 2.89 gr/ml, los cuales están dentro de los rangos establecidos por las normas NTC 226 [38] e INV E-222 [39], respectivamente. Estos parámetros son de gran importancia en el diseño de las mezclas para la preparación de morteros.

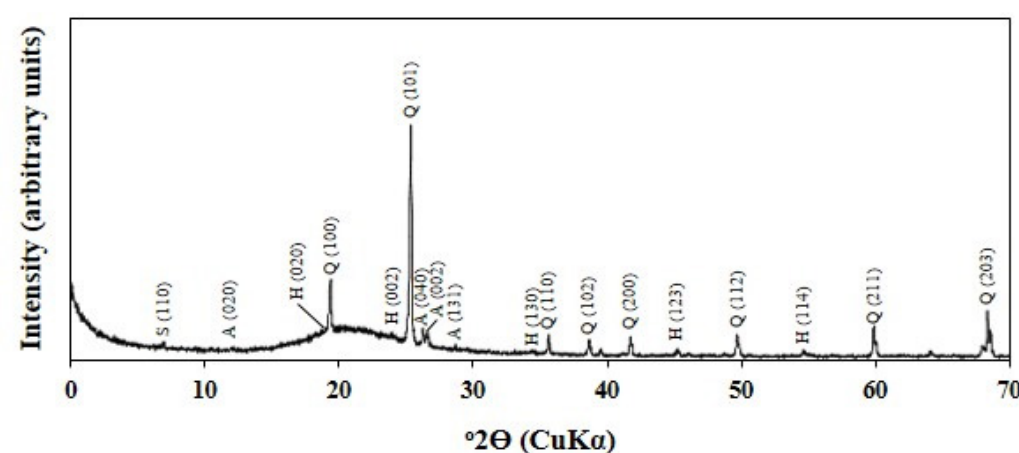


Fig. 2. Patrón de difracción de rayos X de la puzolana natural tipo piedra pómez ilustrando los índices de Miller de las principales reflexiones. Q, cuarzo; A, anortoclasa; H, halloisita; S, sepiolita.

Fuente: Autores.

La [Tabla 2](#) resume los ensayos tecnológicos desarrollados en probetas experimentales o morteros a base de CPO y geopoliméricos (G), utilizando arena no lavada (ANL) y arena lavada (AL) para evaluar la resistencia a la compresión de las probetas curadas durante 7, 14, 28, y 80 días y el desempeño y la durabilidad de las probetas curadas durante 28 días en condiciones extremas (altas temperaturas (300°C, 600°C y 1000°C) y ataques químicos con  $H_2SO_4$  y  $MgSO_4$ ).

TABLA 2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS.

		C'PO-AXL		CPO-AL		G-AXL		GAL		G-AXL-65		G-AL-65	
		MPa	%	MPa	%	MPa%	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
Promedio de la resistencia a la compresión de las probetas experimentales y porcentaje con respecto al CPO													
tiempo de curado (días)	7	17.55	100	19.34	100	13.31	76	14.26	74	13.00	74	14.44	75
	14	23.35	100	25.42	100	16.63	71	18.25	72	16.93	73	18.48	73
	28	27.40	100	28.88	100	18.26	67	19.73	68	18.58	68	20.10	70
	80	27.92	100	29.00	100	19.40	69	19.96	69	19.16	69	19.52	67
Resistencia a la compresión de morteros sometidos a altas temperaturas y porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión													
Temperatura (°C)	300	25.18	8	26.02	10	18.82	3	19.10	3	18.92	2	19.00	2
	600	15.10	45	16.34	43	14.62	20	15.25	23	14.20	24	15.12	25
	1000	2.74	90	3.70	87	5.30	71	6.45	67	4.88	74	6.12	70
Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión al ataque con $H_2SO_4$ después de 9 semanas													
tiempo de ataque (semanas)	9		37.09		35.14		9.55		8.24		11.40		9.84
Porcentaje de pérdida de resistencia a la compresión al ataque con $MgSO_4$ después de 9 semanas													
tiempo de ataque (semanas)	9		30.08		28.71		12.36		11.86		13.81		12.63

Fuente: Autores.

### B. Resistencia a la compresión

La [Fig. 3](#) ilustra el comportamiento mecánico de los morteros geopoliméricos frente a los morteros de CPO de referencia. Las mezclas preparadas con arena lavada presentaron mejores resultados que aquellas con arena no lavada, lo cual puede ser debido a que la arena lavada está libre de materia orgánica o arcillas que afectan la resistencia a la compresión de los morteros. La literatura existente sobre el uso de materiales alternativos al cemento Portland muestra que la resistencia a la compresión disminuye, dependiendo del contenido de piedra pómez debido a la reducción del contenido de clínker en la mezcla de cemento [54]-[55]. La [Tabla 2](#) muestra los resultados de la resistencia a la compresión de las probetas experimentales curadas durante 7, 14, 28, y 80 días. Las probetas con mejor desempeño mecánico corresponden a las mezclas de CPO-AL y CPO-ANL con valores de 27.92 MPa y 29.00 MPa, respectivamente, a los 80 días de curado. Las probetas geopoliméricas alcanzaron entre 66 y 75% de la resistencia adquirida

por las probetas de CPO. Las probetas curadas a 65°C durante 24 horas presentan una resistencia a la compresión ligeramente mayor que la de las probetas curadas a temperatura ambiente; esta diferencia se ve marcada sólo a tempranas edades de curado, ya que hay una aceleración en la reacción de geopolimerización [13]-[14], la cual depende de la composición mineralógica y de la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de la fuente de aluminosilicato utilizada. Es evidente que la piedra pómez utilizada en este estudio como fuente de aluminosilicato pura es posible de activar, ya que contiene fases cristalinas (anortoclasa, halloisita y sepiolita) que contribuyen con  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , aunque es importante ajustar la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  aproximadamente a 2.0 [56]. Por lo tanto, la activación alcalina de la puzolana tiene un comportamiento cementante parecido al CPO. Estos resultados son muy similares a los reportados en la literatura [6], [28], [30], [54]-[56].

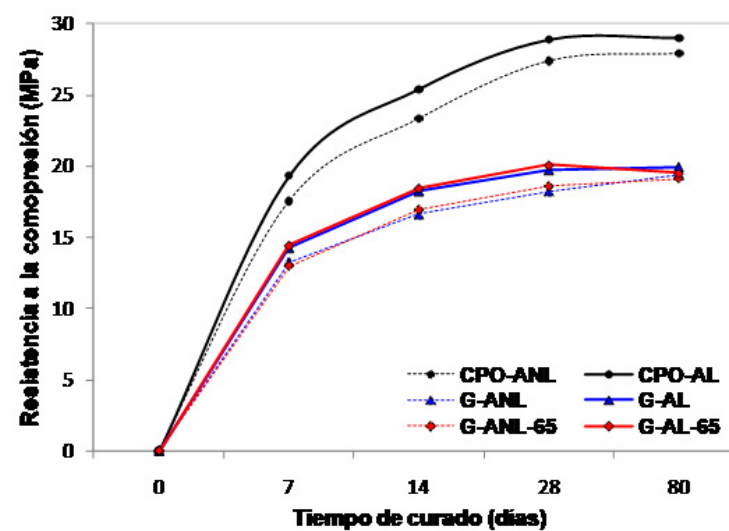


Fig. 3. Resistencia a la compresión de morteros en función del tiempo de curado.  
Fuente: Autores.

### C. Resistencia a la compresión a altas temperaturas

Los morteros de CPO expuestos a 1000°C presentaron una reducción del 87%-90% de la resistencia a la compresión con relación a su valor inicial. Por otra parte, los geopolímeros expuestos a la misma temperatura presentaron una reducción del 67%-73% de la resistencia a la compresión con relación a su valor inicial. La Fig. 4 revela que las probetas geopoliméricas presentaron un comportamiento mecánico más estable frente a las altas temperaturas que las probetas de referencia como está indicado por las líneas de tendencia, cuya pendiente es más suave para los morteros geopoliméricos con relación a aquella de los morteros de CPO. La pérdida de peso en las probetas fue determinada para los diferentes rangos de temperaturas a que fueron expuestas y comparadas con los pesos iniciales. La pérdida de humedad inicial a 300°C fue de 8.15%-8.80% del peso inicial en las probetas de CPO, mientras que las probetas geopoliméricas para esta misma temperatura tuvieron una pérdida de 5.41%-6.78% del peso inicial, lo cual es debido a la pérdida de agua capilar. A esta temperatura, los morteros de CPO mostraron las mayores resistencias a la compresión (25.18 MPa-26.02 MPa) con relación a las obtenidas en los morteros geopoliméricos, las cuales están en el rango de 18.82 MPa-19.10 MPa. Entre 600°C y 1000°C, la pérdida de peso para las probetas de CPO fue de 9.82%-12.66%, lo cual está relacionado con procesos de deshidratación de los minerales arcillosos y liberación de  $\text{CO}_2$ , mientras que las probetas geopoliméricas tuvieron una pérdida de 6.64%-9.29%. A 600°C, las probetas analizadas mostraron valores de resistencias a la compresión muy similares (14.20 MPa-16.34 MPa). A 1000°C, los morteros de CPO mostraron las menores resistencias a la compresión (2.74 MPa-3.70 MPa) con relación a las obtenidas en los morteros geopoliméricos, las cuales están en el rango de 4.88 MPa-6.45 MPa. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a la compresión de probetas curadas durante 28 días sometidas a altas temperaturas. Estos resultados indican que las probetas geopoliméricas presentaron un mejor comportamiento a altas temperaturas con respecto al de las probetas de CPO, disminuyendo en menor proporción sus valores de resistencia a la compresión y peso inicial a altas temperaturas. Ciertas investigaciones [57] demostraron que la resistencia a la compresión de los geopolímeros a base de piedra pómez es reducida a altas temperaturas, particularmente después de 600°C, lo cual está en concordancia con los resultados obtenidos en el presente estudio.

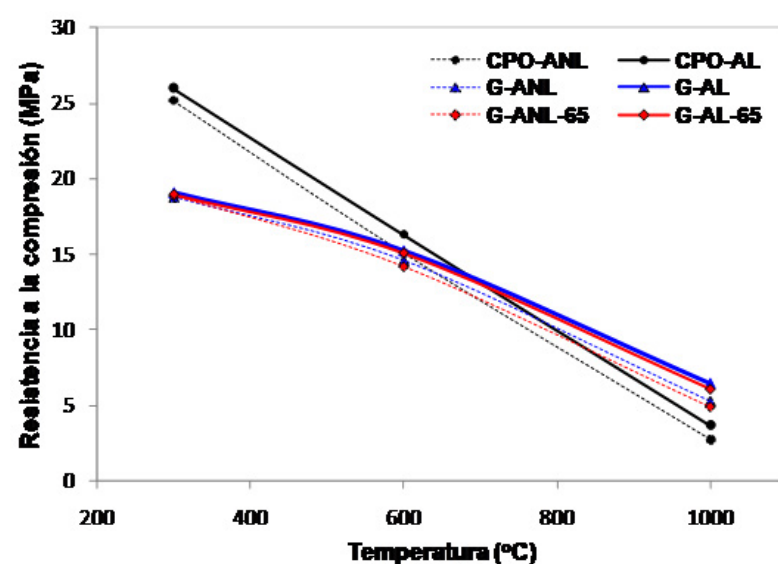


Fig. 4. Resistencia a la compresión de morteros sometidos a altas temperaturas.  
Fuente: Autores.

#### D. Resistencia a la compresión al ataque con $H_2SO_4$

La Fig. 5 ilustra la evolución de la resistencia a la compresión de los morteros geopoliméricos y de CPO curados durante 21 días, los cuales se sumergieron en una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con un pH de 1 durante 1, 2, 3, 4 y 9 semanas. Los morteros de CPO tuvieron una pérdida de resistencia a la compresión durante las 9 semanas, siendo mayor durante las primeras 4 semanas. Los morteros geopoliméricos mostraron muy poca pérdida de resistencia a la compresión a lo largo de las 9 semanas. La pérdida de resistencia a la compresión fue de 35.14%-37.09% para las probetas de CPO, siendo mayor en aquellas preparadas con arena no lavada, y de 8.24%-11.40%, para las probetas geopoliméricas, siendo mayor en aquellas preparadas con arena no lavada y a 65°C. Estos resultados indican que la pérdida de resistencia a la compresión fue mayor en los morteros de CPO con relación a los morteros geopoliméricos. Los valores de resistencia a la compresión de los morteros de CPO mostraron una disminución con el tiempo desde 24.86 MPa-27.08 MPa (después de 1 semana) hasta 16.48 MPa-18.16 MPa (después de 9 semanas), mientras que los morteros geopoliméricos, a pesar de que mostraron igualmente una disminución en los valores de resistencia a la compresión, esta fue más pequeña (entre 18.76 MPa-19.44 MPa después de 1 semana y 16.10 MPa-17.85 MPa después de 9 semanas). Según diversos estudios [58], durante los primeros días de inmersión en  $H_2SO_4$  ocurre un fenómeno de saturación del espacio poroso de los geopolímeros, lo cual genera una ligera mejora en su resistencia a la compresión. No obstante, aunque el efecto a corto plazo frente al ataque químico con  $H_2SO_4$  fue favorable para la resistencia a la compresión de los geopolímeros, es probable que ocurra un efecto adverso a mediano y largo plazo, lo cual podría causar una disminución de la resistencia a la compresión de los geopolímeros. No se observaron daños en la superficie de las probetas experimentales ni cambios significativos en su peso después de la exposición en medio ácido durante 9 semanas. La Tabla 2 presenta los porcentajes de pérdida de resistencia a la compresión por el ataque con  $H_2SO_4$  después de 9 semanas.

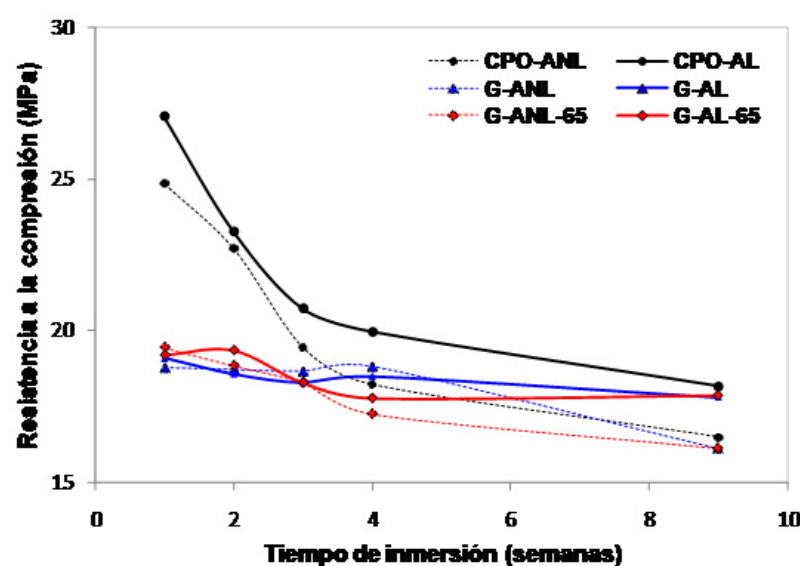


Fig. 5. Resistencia a la compresión de morteros atacados con  $H_2SO_4$ .  
Fuente: Autores.



### E. Resistencia a la compresión al ataque con $MgSO_4$

La Fig. 6 ilustra la evolución de la resistencia a la compresión de los morteros geopoliméricos y de CPO curados durante 21 días, los cuales se sumergieron en una solución de sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ) de concentración 50 g/L a pH controlado durante 1, 2, 3, 4 y 9 semanas. La pérdida de resistencia a la compresión fue de 28.71%-30.08% para las probetas de CPO, siendo mayor en aquellas preparadas con arena no lavada, y de 11.86%-13.81%, para las probetas geopoliméricas, siendo mayor en aquellas preparadas con arena no lavada y a 65°C. La pérdida de resistencia a la compresión fue mayor en los morteros de CPO con relación a los morteros geopoliméricos, lo cual está en concordancia con los resultados obtenidos por otras investigaciones [59]. El uso de piedra pómez en la preparación de geopolímeros favorece la resistencia al ataque con  $MgSO_4$  [59]-[61]. Para varios trabajos [60], la presencia de piedra pómez mejora el desempeño y durabilidad de los geopolímeros debido a su reacción puzolánica con  $Ca(OH)_2$  para producir un mayor volumen sólido de gel de silicato de calcio cementoso, y el consumo de  $Ca(OH)_2$  por la piedra pómez impide la formación de ettringite. Los valores de resistencia a la compresión de los morteros de CPO mostraron una disminución con el tiempo desde 24.12 MPa-25.38 MPa (después de 1 semana) hasta 18.32 MPa-19.96 MPa (después de 9 semanas), mientras que los morteros geopoliméricos, a pesar de que mostraron igualmente una disminución en los valores de resistencia a la compresión, esta fue más pequeña (entre 18.68 MPa-19.60 MPa después de 1 semana y 15.60 MPa-17.30 MPa después de 9 semanas). En general, las probetas sufrieron expansión, agrietamiento, pérdida de peso (ligeramente menor en los morteros geopoliméricos) y desintegración por el ataque con  $MgSO_4$ . La Tabla 2 presenta los porcentajes de pérdida de resistencia a la compresión por el ataque con  $MgSO_4$  después de 9 semanas.

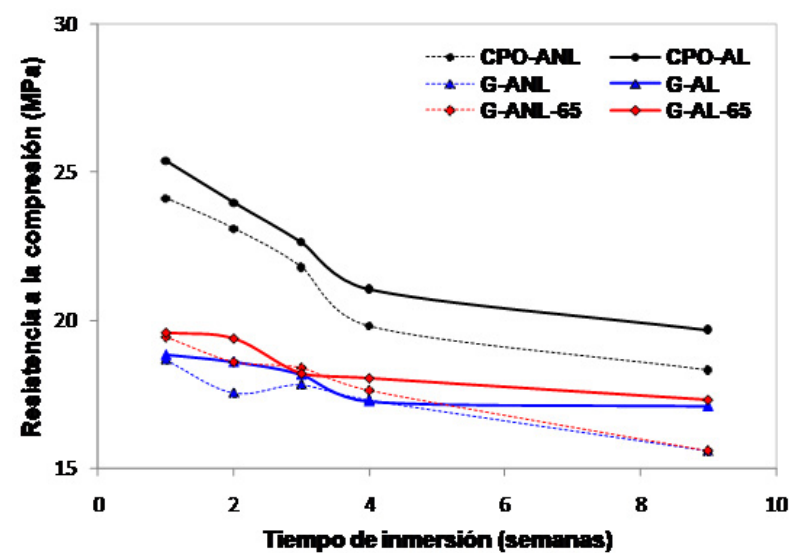


Fig. 6. Resistencia a la compresión de morteros atacados con  $MgSO_4$ .  
Fuente: Autores.

### F. Porosidad

La Tabla 3 resumen los resultados de porosidad y densidad de los morteros con una edad de curado de 28 días que fueron ensayados. Los morteros geopoliméricos presentaron una porosidad mayor respecto a los morteros de CPO, confirmando el efecto de que la porosidad es desfavorable para el rendimiento mecánico de los geopolímeros a base de piedra pómez, los cuales además cuando son activados con una concentración 8M de NaOH es cuando generan mayores valores de porosidad y absorción de agua [62]. Esto puede ser atribuido a que la puzolana utilizada en la preparación de morteros geopoliméricos no presentó una finura igual a aquella del CPO. El comportamiento de la densidad es inverso a la porosidad como quiera que a mayor porosidad (14.42%-22.55%) es menor la densidad (1.63 g/cm<sup>3</sup>-1.87 g/cm<sup>3</sup>). De otra parte, la densidad de las probetas geopoliméricas fue menor comparada con la de las probetas de CPO. Los geopolímeros que se curaron durante 24 horas a 65°C mostraron una porosidad más alta que los geopolímeros curados a temperatura ambiente, lo cual es debido a que la reacción de geopolymerización (solución activante-puzolana) se lleva a cabo

de forma rápida generando la formación de una fase amorfa y otra semicristalina, lo que, al principio es positivo para el desarrollo de la resistencia a la compresión pero, debido a que los productos reaccionantes tienen una estructura poco ordenada, la pasta de cemento se vuelve más porosa y la resistencia a la compresión a partir de los 28 días se empieza a debilitar.

TABLA 3. POROSIDAD Y DENSIDAD DE LOS MORTEROS.

Parámetro	CPO-AXL	CPO-AL	G-AXL	G-AL	G-AXL-65	G-AL-65
Volumen total (cm <sup>3</sup> )	121.43	131.48	120.14	119.90	119.26	126.68
Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )	12.34	14.53	25.05	17.29	26.90	25.82
Porosidad (%)	10.16	11.05	20.85	14.42	22.55	20.38
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2.01	1.98	1.69	1.87	1.63	1.67

Fuente: Autores.

#### IV. CONCLUSIONES

La puzolana natural (piedra pómez) utilizada en la preparación de geopolímeros podría clasificarse como piedra pómez ácida altamente pura con una estructura amorfa. Los resultados obtenidos mostraron que es posible producir geopolímeros de bajo costo y valor agregado utilizando puzolana natural tipo piedra pómez y que los morteros obtenidos a partir de la activación alcalina de puzolana presentan ventajas comparativas con relación al mortero de CPO a nivel de sus propiedades fisicomecánicas y de desempeño y durabilidad en condiciones extremas. La mayor parte de los factores (relación agua/cemento, condiciones de curado, etc.) que afectan al proceso de fabricación y propiedades finales (resistencia mecánica, desempeño y durabilidad) de los morteros de CPO también afectan la preparación y calidad final de los morteros geopoliméricos. En términos generales, los morteros geopoliméricos a base de piedra pómez presentan propiedades fisicomecánicas y desempeño y durabilidad que los catalogan como materiales de excelente calidad con relación a los morteros de CPO. Los morteros geopoliméricos alcanzaron resistencias a la compresión de 19.16 MPa-19.96 MPa inferiores a las obtenidas con los morteros de CPO (27.92 MPa-29.00 MPa) a los 80 días de curado. Los morteros geopoliméricos que alcanzaron las mayores resistencias a la compresión fueron aquellos que se elaboraron con arena lavada ya sea curados a temperatura ambiente (19.96 MPa) o a 65°C (19.52 MPa), lo que demuestra la importancia de utilizar arenas limpias o libres de materia orgánica para alcanzar altas resistencias mecánicas. La resistencia a la compresión de los geopolímeros a base de piedra pómez es reducida a altas temperaturas, particularmente después de 600°C. Los morteros geopoliméricos no mostraron ningún cambio reconocible de color después de ser sometidos a ataques químicos con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y MgSO<sub>4</sub>, preservándose estructuralmente intactos. De otra parte, se produjeron pérdidas de peso muy bajo en los morteros geopoliméricos con relación a los morteros de CPO después de 9 semanas de estar inmersas en las soluciones de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y MgSO<sub>4</sub>, confirmando su alta resistencia contra el ataque químico. Los geopolímeros que se curaron durante 24 horas a 65°C mostraron una porosidad más alta que los geopolímeros curados a temperatura ambiente, lo cual es debido a que la reacción de geopolimerización (solución activante-puzolana) se lleva a cabo de forma rápida generando la formación de una fase amorfa y otra semicristalina.

#### FINANCIAMIENTO

Artículo de investigación científica el cual forma parte del trabajo de pregrado de Álvarez "Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria", apoyado por la Universidad Industrial de Santander.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo de la Universidad Industrial de Santander y la empresa Andina Ingeniería Ltda. Los autores expresan sus agradecimientos a estos dos organismos por las facilidades analíticas suministradas para el desarrollo de las pruebas experimentales. Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad Industrial de Santander para financiar a H. Álvarez. Nos gustaría expresar nuestra gratitud al geólogo Orlando Ardila por su apoyo y colaboración durante el desarrollo experimental en el Laboratorio de Andina Ingeniería Ltda. Los autores están muy agradecidos con las personas e instituciones mencionadas por su apoyo.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Mejía, S. Delvasto & R. Talero, “Permeability properties of cement mortars blended with Silica Fume, Fly Ash, and Blast Furnace Slag,” *Corrosion in Tropical Environments*, ASTM STP 1399, pp. 190–196, Jan. 2000. <https://doi.org/10.1520/STP13562>
- [2] J. S. Coutinho, “The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures,” *Cem Concr Compos*, vol. 25, no. 1, pp. 51–59, Jan. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00055-5)
- [3] E. Gartner, “Industrially interesting Approaches to low CO2 Cements,” *Cem Concr Res*, vol. 34, no. 9, pp. 1489–1498, Sep. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
- [4] F. Puertas, A. Barra, M. F. Gazulla, M. P. Gomez, M. Palacios & S. Martínez-Ramírez, “Ceramic wastes as raw materials in Portland cement clinker fabrication: characterization and alkaline activation,” *Mater Const*, vol. 56, no. 281, pp. 73–84, 2006. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i281.94>
- [5] M. C. G. Juenger, F. Winnefeld, J.L. Provis & J. H. Ideker, “Advances in alternative cementitious binders,” *Cem Concr Res*, vol. 41, no. 12, pp. 1232–1243, Dec. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>
- [6] A. B. Kizilkanat, D. Oktay, N. Kabay & M. M. Tufekci, “Comparative Experimental Study of Mortars Incorporating Pumice Powder or Fly Ash,” *J Mater Civ Eng*, vol. 28, no. 2, pp. 1–7, Feb. 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001407](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001407)
- [7] L. Kaizhi, R. Yu, Z. Shui, X. Li, S. Wu, C. Wuo, B. Yu & S. Wu, “Optimization of autogenous shrinkage and microstructure for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on appropriate application of porous pumice,” *Constr Build Mater*, vol. 214, pp. 369–381, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.089>
- [8] A.M. Zeyad, A.H. Khan & B.A. Tayeh, “Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers,” *J Mater Res Technol*, vol. 9, no. 1, pp. 806–818, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.021>
- [9] J. Sanjayan and B. Sioulas, “Strength of slag-cement cured in place and in other conditions,” *ACI Mater J*, vol. 97, no. 5, pp. 603–611, Sep. 2000. Available: <https://www.worldcat.org/title/aci-materials-journal/oclc/13846872>
- [10] T. W. Cheng & J.P. Chiu, “Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag,” *Miner Eng*, vol. 16, no. 3, pp. 205–210, Mar. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00008-6)
- [11] A. Karthik, K. Sudalaimani, C. T. Vijayakumar & S. S. Saravanakumar, “Effect of bio-additives on physico-chemical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self-cured geopolymer mortars,” *J Hazard Mater*, vol. 361, pp. 56–63, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.078>
- [12] J.C. Swanepoel & C.A. Strydom, “Utilization of fly ash in a geopolymeric material,” *Appl Geochem*, vol. 17, no. 8, pp. 1143–1148, Aug. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00005-7)
- [13] T. Bakharev, “Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing,” *Cem Concr Res*, vol. 35, no. 6, pp. 1224–1232, Jun. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.031>
- [14] A. Fernández-Jimenez & A. Palomo, “Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator,” *Cem Concr Res*, vol. 35, no. 10, pp. 1984–1992, Oct. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.003>
- [15] G. Kürklü & G. Görhan, “Investigation of usability of quarry dust waste in fly ash-based geopolymer adhesive mortar production,” *Constr Build Mater*, vol. 217, pp. 498–506, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.104>
- [16] A. Wongsu, R. Kunthawatwong, S. Naenudon, V. Sata & P. Chindaprasirt, “Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar,” *Constr Build Mater*, vol. 241, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118143>
- [17] P.H. Shih & S. Yokohama, “Behaviour of chloride ions in hardened ecocement: New type of Portland cement made from municipal waste incinerator ash,” *11 International Congress on the Chemistry of Cement*, ICCC, Durban, SA, pp. 1271–1281, 11-16 May, 2003.

- [18] F. Puertas, M.T. Blanco-Varela & T. Vazquez, "Behaviour of cement mortars containing an industrial waste from aluminum refining. Stability in Ca(OH)<sub>2</sub> solutions," *Cem Concr Res*, vol. 29, no. 10, pp. 1673–1680, Oct. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00157-X)
- [19] C. Leiva, Y. Luna-Galiano, C. Arenas, B. Alonso-Fariñas & C. Fernández-Pereira, "A porous geopolymer based on aluminum-waste with acoustic properties," *Waste Manag*, vol. 95, pp. 504–512, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.042>
- [20] A. Hauser, U. Eggenberger & T. Mumenthaler, "Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete," *Cem Concr Res*, vol. 29, no. 3, pp. 297–302, Mar. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00207-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00207-5)
- [21] M. Keppert, E. Vejmelková, P. Bezdička, M. Doleželová, M. Čáchová, L. Scheinherrová, J. Pokorný, M. Vyšvařil, P. Rovnaníková & R. Černý, "Red-clay ceramic powders as geopolymer precursors: Consideration of amorphous portion and CaO content," *Appl Clay Sci*, vol. 161, pp. 82–89, Sep. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.019>
- [22] M. Singh & M. Garg, "Making of anhydrite cement from waste gypsum," *Cem Concr Res*, vol. 30, no. 4, pp. 571–577, Abr. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00209-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00209-X)
- [23] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes & S. Jalali, "Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder," *Constr Build Mater*, vol. 22, no. 6, pp. 1201–1211, Jun. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.022>
- [24] P. Soares, A. T. Pinto, V. M. Ferreira & A. J. Labrincha, "Geopolímeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros," *Mat Const*, vol. 58, no. 291, pp. 23–34, Jul. 2008. Disponible en <https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/105/144>
- [25] A. Gharzouni, B. Samet, S. Baklouti, E. Joussein & S. Rossignol, "Addition of low reactive clay into metakaolin-based geopolymer formulation: Synthesis, existence domains and properties," *Powder Technol*, vol. 288, pp. 212–220, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.012>
- [26] N. Hamdi, I.B. Messaoud & E. Srasra, "Production of geopolymer binders using clay minerals and industrial wastes," *C R Chim*, vol. 22, no. 2–3, pp. 220–226, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.11.010>
- [27] İ. Ustabaş & A. Kaya, "Comparing the pozzolanic activity properties of obsidian to those of fly ash and blast furnace slag," *Constr Build Mater*, vol. 164, pp. 297–307, Mar. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.185>
- [28] S. Top, H. Vapur, M. Altiner, D. Kaya & A. Ekicibil, "Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as aggregates," *J Mol Struct*, vol. 1202, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127236>
- [29] N. Eroshkina & M. Korovkin, "The Effect of the Mixture Composition and Curing Conditions on the Properties of the Geopolymer Binder Based on Dust Crushing of the Granite," *Procedia Eng*, vol. 150, pp. 1605–1609, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.137>
- [30] K.M.A. Hossain, "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete," *Cem Concr Res*, vol. 34, no. 2, pp. 283–291, Feb. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.004>
- [31] J. Davidovits, "Soft Minerallurgy and Geopolymers," proceedings of the *1st International Conference on Geopolymer*, ICG'88, Compiègne, FR, 1–3 Jun. 1988.
- [32] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer & L. Lorenzen, "Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash," *Metall Mater Trans B*, vol. 29, no. 1, pp. 283–291, Feb. 1998. <https://doi.org/10.1007/s11663-998-0032-z>
- [33] T. Bakharev, "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions," *Cem Concr Res*, vol. 35, no. 6, pp. 1233–1246, Jun. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.002>
- [34] D. L. Y. Kong, J. G. Sanjayan & K. Sagoe-Crentsil, "Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures," *Cem Concr Res*, vol. 37, no. 12, pp. 1583–1589, Dec. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.021>
- [35] X. Guo, H. Shi & W.A. Dick, "Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer," *Cem Concr Compos*, vol. 32, no. 2, pp. 142–147, Feb. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>
- [36] M. Jin, F. Lian, R. Xia & Z. Wang, "Formulation and durability of a geopolymer based on metakaolin/tannery sludge," *Waste Manag*, vol. 79, pp. 717–728, Sep. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.039>
- [37] M. Vafaei, A. Allahverdi, P. Dong & N. Bassim, "Acid attack on geopolymer cement mortar based on waste-glass powder and calcium aluminate cement at mild concentration," *Constr Build Mater*, vol. 193, pp. 363–372, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.203>
- [38] Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio de los tamices 75 µm (M200) y 150 µm (M100), *NTC 226*, ICONTEC, 1998. Disponible en <https://www.coursehero.com/file/41268695/NTC226PDF/>
- [39] Gravedad específica y absorción de agregados finos, *INV E-222*, INVIAS, 2007. Disponible en <https://es.slideshare.net/UCGcertificacionvial/gravedad-especifica-y-absorcin-de-agregado-fino>

- [40] Análisis granulométrico de suelos por tamizado, *INV E-123*, INVIAS, 2007. Recuperado de <http://www.lms.uni.edu.pe/labsuelos/MODOS%20OPERATIVOS/Analisis%20granulometrico%20por%20tamizado.pdf>
- [41] Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenante mineral, *INV E-235*, INVIAS, 2007. Disponible en <https://es.scribd.com/document/111282589/INV-E-235-07-Azul-de-Metileno>
- [42] Determinación de la densidad del cemento hidráulico, *NTC 221*, ICONTEC, 1998. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC221.pdf>
- [43] Método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm de lado, *NTC 220*, ICONTEC, 1998. Recuperado de [https://kupdf.net/download/ntc-220-determinacion-de-la-resistencia-de-morteros-de-cemento-hidraulico-usando-cubos-de-50-mm-o-508-mm-de-lado\\_5b032c61e2b6f5475424a809\\_pdf](https://kupdf.net/download/ntc-220-determinacion-de-la-resistencia-de-morteros-de-cemento-hidraulico-usando-cubos-de-50-mm-o-508-mm-de-lado_5b032c61e2b6f5475424a809_pdf)
- [44] Instruments de pesaje de funcionamiento no automáticos. Requisitos metrológicos y Técnicos. Pruebas, *NTC 2031*, ICONTEC, 2014. Recuperado de [https://members.wto.org/crnattachments/2016/TBT/COL/16\\_1549\\_01\\_s.pdf](https://members.wto.org/crnattachments/2016/TBT/COL/16_1549_01_s.pdf)
- [45] R. Thenmozhi, R.V. Lakshmi, A.A. Francis & B.M. Meenal, "Strength behaviour of light weight aggregate based geopolymer concrete," *IJIRSET*, vol. 7, no. 5, pp. 4755–4762, May. 2018. Available: [http://www.ijirset.com/upload/2018/may/51\\_Strength.pdf](http://www.ijirset.com/upload/2018/may/51_Strength.pdf)
- [46] K. L. Aughenbaugh, T. Williamson & M. C. G. Juenger, "Critical evaluation of strength prediction methods for alkali-activated fly ash," *Mater Struct*, vol. 48, no. 3, pp. 607–620, Mar. 2015. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0496-z>
- [47] M. C. Rowe, B.S. Ellis & A. Lindeberg, "Quantifying crystallization and devitrification of rhyolites by means of X-ray diffraction and electron microprobe analysis," *Am Min*, vol. 97, no. 10, pp. 1685–1699, Oct. 2012. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4006>
- [48] C. N. Achilles, R. V. Morris, S. J. Chipera, D. W. Ming and E. B. Rampe, "X-ray diffraction reference intensity ratios of amorphous and poorly crystalline phases: Implications for CheMin on the Mars Science Laboratory mission," presented at *44th LPSC*, LPSC, Wol, USA, 18–22 Mar. 2013. Available: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/3072.pdf>
- [49] O. Gencel, "Characteristics of fired clay bricks with pumice additive," *Energy Build*, vol. 102, pp. 217–224, Sep. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.031>
- [50] M. Malakootian, S. Bahraini, M. Malakootian & M. Zarrabi, "Removal of tetracycline antibiotic from aqueous solutions using natural and modified pumice with magnesium chloride," *Adv Environ Biol*, vol. 10, no. 8, pp. 46–56, Sep. 2016. <https://doi.org/10.17795/jjhr-37583>
- [51] M. Heydari, K. Karimyan, M. Darvishmotevalli, A. Karami, Y. Vasseghian, N. Azizi, M. Ghayebzadeh & M. Moradi, "Data for efficiency comparison of raw pumice and manganese-modified pumice for removal phenol from aqueous environments - Application of response surface methodology," *Data Br*, vol. 20, pp. 1942–1954, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.09.027>
- [52] L. Gündüz, A. Sariisik, M. Davraz, D. Ugur & O. Cankiran, *Pumice Technology*, ISE, TR: SDU, 1998.
- [53] L. Gutiérrez, "El concreto y otros materiales para la construcción. MZL, CO: UNAL, 2003.
- [54] K. M. A. Hossain, "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete," *Cem Concr Res*, vol. 34, no. 2, pp. 283–291, Feb. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.004>
- [55] S. Yazicioğlu & B. Demğrel, "The Effect of the Pumice of Elazığ Region used as a Pozzolanic Additive on the Compressive Strength of Concrete in Increasing Cure Ages," *FUMBD*, vol. 18, no. 3, pp. 367–374, Jan. 2006.
- [56] M. E. Valenzuela, "Estudio experimental de las propiedades de geoplímeros sintetizados a partir de puzolana natural," *memoria*, dpto Ing Civil, UCh, SCL, CL, 2013. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114679>
- [57] M. M. Yadollahi, A. Benli & R. Demirboğa, "Effects of elevated temperature on pumice based geopolymer composites," *Plast Rubber Compos*, vol. 44, no. 6, pp. 226–237, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1179/1743289815Y.0000000020>
- [58] E. Caballero, W. Sánchez & C.A. Ríos, "Síntesis de geoplímeros a partir de la activación alcalina de residuos de minería del oro," *Ing Compet*, vol. 16, no. 1, pp. 317–330, Jan. 2014. <https://doi.org/10.25100/iyc.v16i1.3735>
- [59] N. Değirmenci & A. Yilmaz, "Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar," *IJEMS*, vol. 18, pp. 61–68, Feb. 2011. Available: [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/11207/1/IJEMS%2018\(1\)%2061-68.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/11207/1/IJEMS%2018(1)%2061-68.pdf)
- [60] K. M. A. Hossain, "Pumice based blended cement concretes exposed to marine environment: Effects of mix composition and curing conditions," *Cem Concr Compos*, vol. 30, no. 2, pp. 97–105, Feb. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.013>
- [61] H. Binici & O. Aksogan, "Sulfate resistance of plain and blended cement," *Cem Concr Compos*, vol. 28, no. 1, pp. 39–46, Jan. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.08.002>
- [62] I. B. Messaoud, N. Hamdi & E. Srasra, "Physicochemical Characterization of Geopolymer Binders and Foams Made from Tunisian Clay," *Adv Mater Sci Eng*, vol. 2018, pp. 1–8, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9392743>

**Hernando Álvarez Mantilla** received the BSc in Geology from the Universidad Industrial de Santander (Colombia). He has worked as field geologist in Geoamerica Ltda and HVM Ingenieros, as Geologist in HVM Ingenieros and Antek SAS, and as Mudlogger in GEOLOG International. <https://orcid.org/0000-0001-8364-5039>

**Carlos Alberto Ríos Reyes** received the BSc in Geology and the Post-graduate Diploma in University Teaching from the Universidad Industrial de Santander (Colombia). The Shimane University (Japan) conferred on him the degree of MSc in Geology, and the University of Wolverhampton (England) conferred him the degree of PhD in Applied Sciences. He has been working as a full-time Lecturer of the School of Geology (Universidad Industrial de Santander). He is a specialist in mineralogy, experimental and environmental mineralogy, petrology and geochemistry of metamorphic rocks. Actually, he is the Director of the Microscopy Laboratory of the Universidad Industrial de Santander. <https://orcid.org/0000-0002-3508-0771>

**Oscar Mauricio Castellanos Alarcón** received the BSc in Geology from the Universidad Industrial de Santander (Colombia). The Shimane University (Japan) conferred on him the degree of MSc in Geology. Actually, he is a PhD candidate at the Universidad Nacional de Colombia. He has been working as a full-time Lecturer of the Program of Geology (Universidad de Pamplona). He is specialist in mineralogy, experimental mineralogy, petrology and geochemistry of metamorphic rocks. <https://orcid.org/0000-0003-0620-0540>