



SITUACIÓN ACTUAL DE LA SÍNTESIS Y UTILIZACIÓN DE GEOPOLÍMEROS

CURRENT SITUATION OF THE SYNTHESIS AND USE OF GEOPOLYMERS

Luis Alberto, Vásquez Coraspe¹

Recibido 13/04/2021: Aprobado: 20/06/2021

RESUMEN

El cemento es uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizados a nivel mundial. Por cada tonelada producido se emite una de CO₂ a la atmósfera, adicionalmente, su elaboración requiere un gasto energético implicando las afectaciones ambientales propias de la actividad minera. Una alternativa ecoamigable la representa los materiales geopoliméricos, los cuales son matrices poliméricas inorgánicas que pueden cumplir la función aglutinante del cemento, cuya producción minimiza la huella de carbono. Los geopolímeros pueden ser elaborados empleando como precursores residuos industriales ricos en óxidos de silicio y aluminio, mediante un proceso de activación alcalina, representando una alternativa para la revalorización de muchos pasivos ambientales, permitiendo producir concretos de hasta 50 Mpa de resistencia a la compresión. En la presente investigación se elaboró un análisis bibliométrico y patentométrico de las tendencias actuales en la utilización y síntesis de geopolímeros, así como, de la evolución del proceso tecnológico durante los últimos 20 años. Para ello, se desarrolló una ecuación de búsqueda y posteriormente se empleó la plataforma Patent Inspiration para el análisis de patentes y Thomson Reuters para las publicaciones científicas. Se encontró que los países líderes en el patentamiento de esta tecnología son China, Corea y Estados Unidos. La presente cartografía de los geopolímeros posibilita dar a conocer esta innovación tecnológica para el desarrollo de materiales de construcción amigables con el ambiente los cuales aún no han sido investigados ampliamente en Venezuela.

Palabras clave: geopolímeros; aluminio-silicatos; activación alcalina; inteligencia tecnológica

¹Luis Alberto Vásquez Coraspe, Ingeniero Químico. Investigador en el Centro Nacional de Tecnología Química Coordinación de Energía y Ambiente. Caracas, Venezuela. Correo: lvasquez.cntq@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3190-9877>

ABSTRACT

Cement is one of the most widely used building materials worldwide. For every ton produced, one ton of CO₂ is emitted into the atmosphere, additionally, its production requires energy expenditure, implying the environmental effects of the mining activity. An eco-friendly alternative is represented by geopolymeric materials, which are inorganic polymeric matrices that can fulfill the binder function of cement, whose production minimizes the carbon damages. Geopolymers can be made using as precursors industrial residues rich in silicon and aluminum oxides, through an alkaline activation process, representing an alternative for the revaluation of many environmental liabilities, allowing the production of concretes of up to 50 Mpa of compressive strength. In the present investigation, a bibliometric and patentometric analysis of current trends in the use and synthesis of geopolymers was carried out, as well as the evolution of the technological process during the last 20 years. For this, a search equation was developed and later the Patent Inspiration platform was used for patent analysis and Thomson Reuters for scientific publications. It was found that the leading countries in patenting this technology are China, Korea and the United States. The present cartography of geopolymers makes it possible to publicize this technological innovation for the development of environmentally friendly construction materials which have not yet been widely investigated in Venezuela.

Keywords: *geopolymers; aluminum-silicates; alkaline activation; technological intelligence*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado muchas investigaciones en torno a nuevos materiales de construcción, con el objetivo de buscar alternativas que permitan disminuir el uso de cemento debido a los efectos contaminantes que implica la producción del mismo. Se ha estimado, que para producir una tonelada de cemento se genera aproximadamente una de CO₂ [1], siendo la producción de cemento por sí sola responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones mundiales de los gases de efecto invernadero [2]. Por otra parte, los concretos en base a cemento *Portland* tradicional son altamente susceptibles a sufrir los ataques de cloruros y sulfatos [3], teniendo que ser demolidas y reemplazadas muchas estructuras especialmente en las zonas costeras.

Si se toma en consideración la baja durabilidad del material, su continua y creciente demanda en el mercado global y lo contaminante que es su producción, se plantea un panorama nada alentador para la biósfera, donde estará expuesta a un impacto ascendente y acelerado, que requiere la búsqueda urgente e inmediata de alternativas. Una de las opciones más atractivas lo representan los geopolímeros. Estos son polímeros inorgánicos, constituidos por redes tridimensionales de enlaces del tipo siloxo, Si-O-Si (silicio-oxígeno) y enlaces sialato, Si-O-Si-O-Si-O-Al (silicio-oxígeno-aluminio) [4], los cuales se pueden obtener mediante la activación alcalina de materiales ricos en óxidos de aluminio y silicio, tales como las cenizas volantes y otros residuos industriales permitiendo la revalorización de los mismos,

contribuyendo de este modo a la disminución de pasivos ambientales.

Estos materiales pueden ser empleados como aglutinante en sustitución del cemento, dando origen a concretos geopoliméricos, cuyas características de resistencia a la compresión son similares y hasta superiores a las de concretos a base de cemento *Portland*, poseyendo a su vez otras características deseables, como baja temperatura de fraguado, mayor resistencia al fuego y mayor resistencia a los ataques de cloruros y sulfatos. El siguiente estado del arte responde a la necesidad de estudiar las potencialidades de este nuevo material, analizando las tendencias en su síntesis, en el estudio de sus características y en el desarrollo de sus aplicaciones a nivel mundial.

2. DESARROLLO

2.1. Materiales Precursores para la Síntesis de Geopolímeros

Los geopolímeros se elaboran principalmente mediante el uso de activadores alcalinos y de aluminosilicatos, materiales ricos en silicio y aluminio, por lo tanto, una variedad de arcillas y materiales de origen natural, como el caolín y metacaolín, así como un gran número de residuos industriales y agro-industriales pueden servir de materia prima para su síntesis. El activador alcalino más utilizado es una mezcla de hidróxido de sodio y de silicato sódico, sin embargo, también se ha empleado hidróxido de potasio, hidróxido de calcio y carbonato sódico.

Ankur et al. [7] elaboraron una revisión sobre geopolímeros derivados a partir de residuos industriales, donde destacaron cenizas volcánicas, lodo rojo, escoria de alto horno triturada, polvo de horno de cemento, cenizas de aceite de palma africana entre otros materiales empleados. Encontraron que era posible obtener concreto geopolimérico de alta resistencia conforme se incrementa la finura de los precursores llegando a alcanzarse hasta 65 Mpa de resistencia a la compresión. Sin embargo, dada la variabilidad en las composiciones y características de los precursores se requieren condiciones de síntesis también variables que dificultan el establecimiento de un estándar único para la aplicación industrial de estos precursores. En otra investigación, Sore [8] emplearon matakaolin combinado con diferentes proporciones de cenizas de cascarilla de arroz alcanzando resistencias de 23–25 Mpa para la pasta luego de un curado a 60°C. Por su parte en Nimwinya [9], utilizaron cenizas de cascarilla de arroz combinadas con polvo calcinado de lodos de plantas depuradoras de agua obteniendo para relaciones $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 4,9 -5,9 resistencias a la compresión de 19 Mpa para la pasta, lo cual alcanza los requerimientos mínimos del cemento portland ordinario. Se

evidencia que es posible el empleo de una gran variedad de precursores en la síntesis de estos materiales permitiendo la revalorización de diversos pasivos ambientales.

2.2. Aplicaciones de los Geopolímeros

Adicionalmente a sus aplicaciones como material de construcción los geopolímeros han sido planteados para la solidificación / inmovilización (S/I) de metales pesados [10-15] e incluso de elementos radiactivos [16] [17]. Rozineide [18] elaboraron geopolímeros con cenizas de fondo y metacaolín encontrando porcentajes de S/I cercanos al 100% para muestras con Pb, Cr, Cu, Fe, Sn, As y Ni. Qin Li [19] compararon la inmovilización de radio núcleos de $^{137}\text{Cs}^+$ en matrices de cemento portland con la obtenida con matrices geopoliméricas elaboradas con cenizas volantes, encontrándose que las matrices solidificadas con geopolímero presentan una menor concentración de la fracción acumulativa del lixiviado y una mayor resistencia a la compresión que las elaboradas con cemento portland ordinario.

En los últimos años los geopolímeros están siendo utilizados en el área de catálisis, estos materiales exhiben mesoporosidad, al tiempo que ofrecen la ventaja de poseer bajos costos de fabricación con una red que se puede formar a temperatura ambiente [20] [21]. Sudhanshu Sharma [22] desarrollaron catalizadores básicos incorporando iones de calcio en matrices geopoliméricas de aluminosilicatos obteniendo resultados prometedores que los perfilan como una alternativa económica para la catálisis heterogénea de biodiesel.

Se han realizado otras investigaciones para evaluar su utilización para el tratamiento y filtrado de aguas [23-26]. Los investigadores Yaojun Zhang [27] estudiaron la degradación fotocatalítica de azul de metileno en aguas residuales empleando un geopolímero elaborado con cenizas volantes. Se encontró una eficiencia de degradación fotocatalítica del azul de metileno superior al 92,79 % bajo radiación ultravioleta debido a la sinergia entre los efectos de adsorción y fotocatalisis por semiconductores. Incluso se ha llegado a plantear la utilización de geopolímeros con fines médicos para la dosificación de medicamentos [28-30].

3. METODOLOGÍA

La presente es una investigación documental basado en el análisis bibliométrico y patentométrico del estudio y utilización de los materiales geopoliméricos a nivel mundial. Para la realización de este trabajo se desarrolló la siguiente ecuación de búsqueda:

$$\text{geopolymer* OR ("alkali activated" OR "alkali-activated" AND slag)} \quad (1)$$

La cual se empleó en las plataformas Patent Inspiration [5] y Thomsom Reuters [6] para la

búsqueda, clasificación, tratamiento y análisis de datos de patentes y artículos científicos para el período 1997 – 2017.

4. RESULTADOS

4.1. Bibliometría y Patentometría

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos con la ecuación de búsqueda planteada en (1).

Tabla 1. Resultados de muestreo aplicando la ecuación de búsqueda

Ecuación	Plataforma	Fecha Muestreo	Filtros	Resultados
geopolymer* OR ("alkali activated" OR "alkali-activated" AND slag)	Patent Inspiration	10/04/18	Título y Abstract Una por familia 1997-2017	880
	Thomson Reuters	12/04/18	Título 1997-2017	3208

Se observa que empleando la plataforma Patent Inspiration, para una búsqueda en el Título y en el Abstract, aplicando los filtros de una patente por familia de patentes y el período 1997 – 2017 se obtuvo un total de 880 patentes en el área de geopolímeros. De igual manera, empleando la plataforma Thomson Reuters para el mismo período y búsquedas sólo en el título se encontró una totalidad de 3208 publicaciones científicas. Observando el detalle de la búsqueda en la Figura 1, detectándose un ritmo creciente en la cantidad de patentes y de publicaciones científicas que son presentadas por año, evidenciándose un creciente interés de la comunidad científica tanto en la generación de conocimiento como en el desarrollo de aplicaciones para este nuevo material.

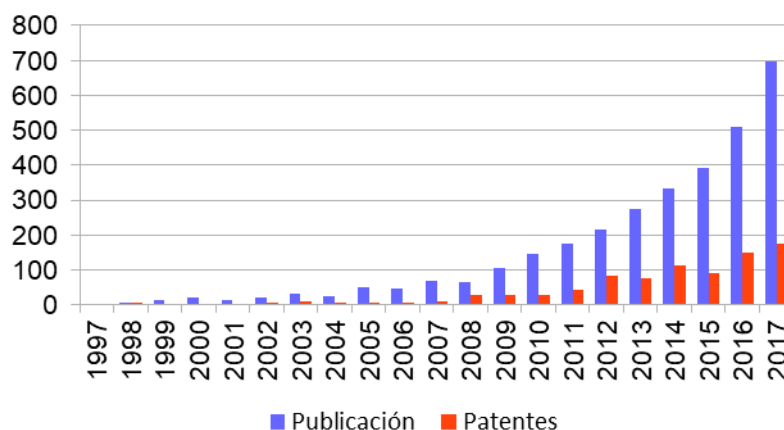


Figura 1. Número de publicaciones vs. número de patentes por año en el área de geopolímeros
Fuente: Patent Inspiration y Thomson Reuters

4.2. Análisis de Patentes

En la Figura 2 se observa la tendencia de patentamiento, la cual es creciente. En dicha tendencia se puede constatar que la tecnología aún no está en su etapa de madurez, puesto que aún no se ha desarrollado la curva “S”, que es el indicativo de tecnologías plenamente establecidas.

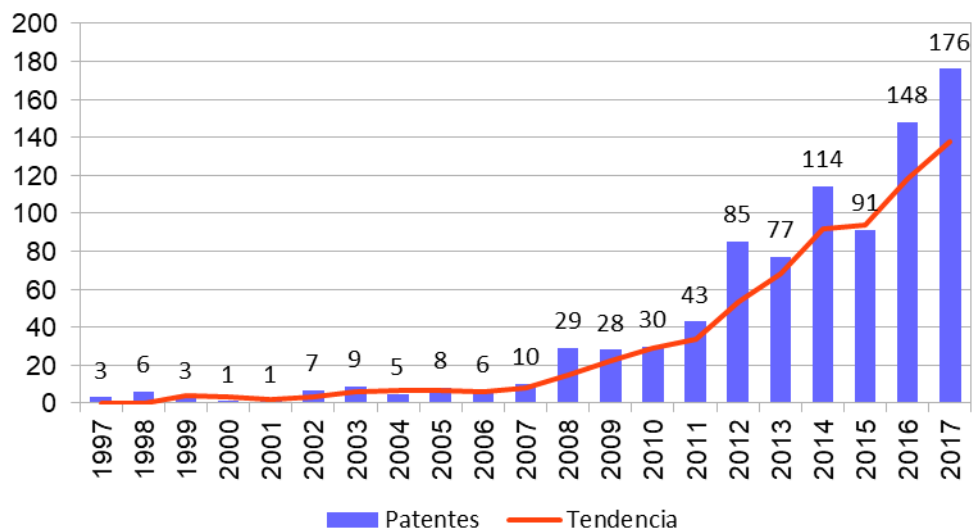


Figura 2. Número de patentes por año y tendencia de patentamiento en el área de geopolímeros.

Fuente: Patent Inspiration. Muestreo elaborado el 10/04/18

Encontrándose que los países líderes en el desarrollo de patentes para esta tecnología son China, con un total de 212 patentes, seguido por la República de Corea con 116 patentes ocupando el tercer puesto Estados Unidos con un total de 80 patentes en el área, como se observa en la Figura 3.

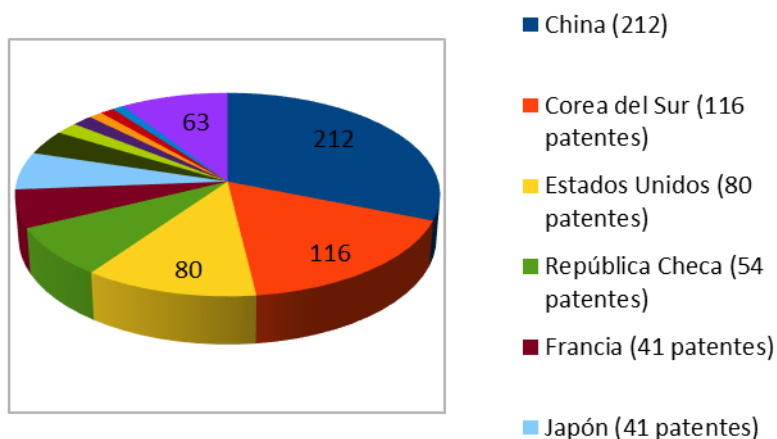


Figura 3. Distribución de países con solicitudes de patentes en el área de geopolímeros

Fuente: Patent Inspiration. Muestreo elaborado el 10/04/18

De igual manera, los tres primeros lugares de los países donde se introducen estas patentes son ocupados por China, la República de Corea y Estados Unidos. En la Figura 4 se observa como a partir del año 2012 los aplicantes de patentes han mostrado un mayor interés por patentar en China que en los otros países evidenciando que el país asiático presenta una mayor potencialidad para el desarrollo de los geopolímeros.

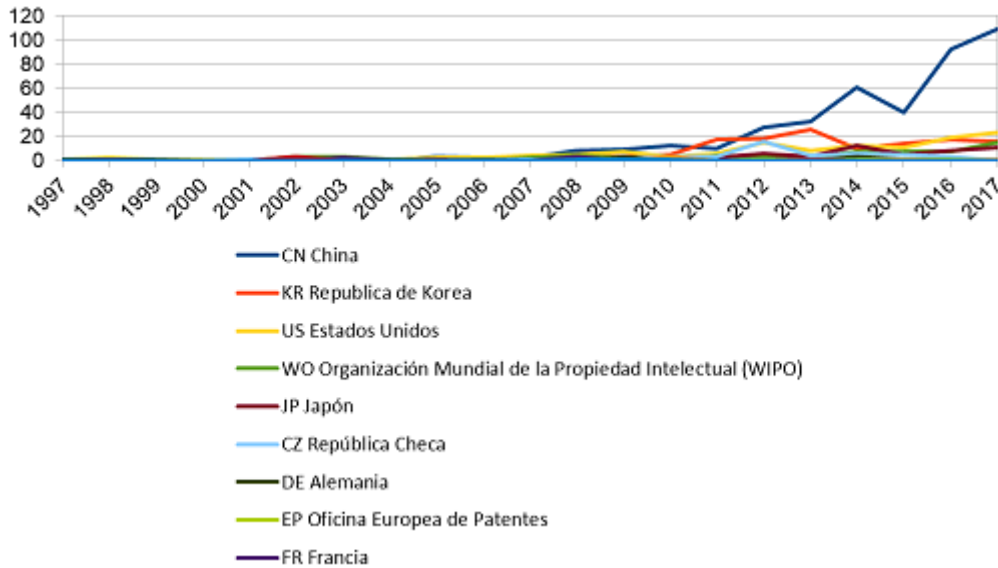


Figura 4. Línea de tiempo de países en los que se patenta en el área de geopolímeros
Fuente: Patent Inspiration. Muestreo elaborado el 10/04/18

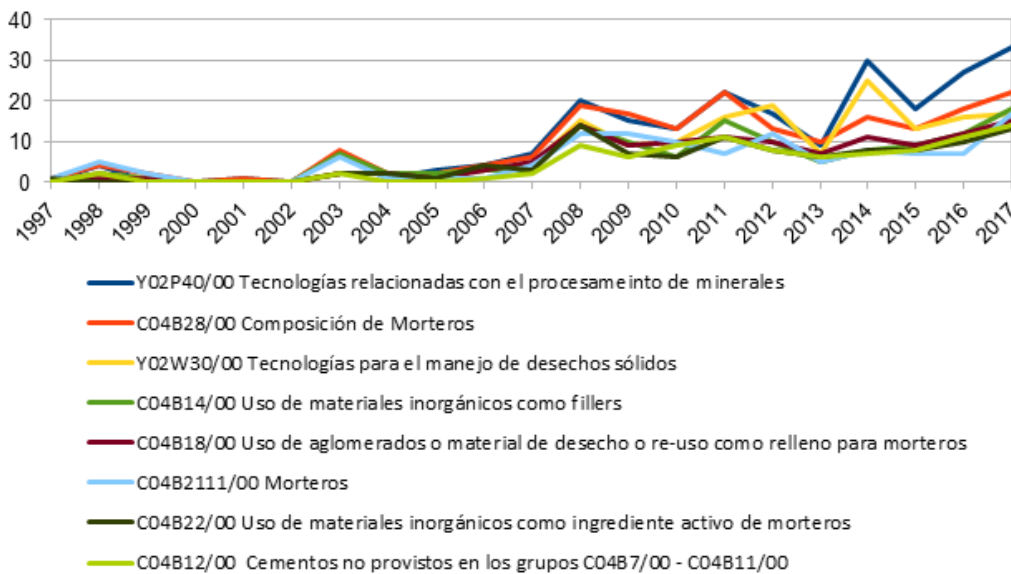


Figura 5. Evolución de los códigos CPC en el área de geopolímeros
Fuente: Patent Inspiration. Muestreo elaborado el 10/04/18

En la Figura 5 se muestra la evolución de los códigos CPC (Clasificación Cooperativa de Patentes), donde se observa que los mayores intereses en el patentamiento de este material están orientados a “tecnologías relacionadas con el procesamiento de minerales” con el

código Y02P40/00, seguido por los códigos C04B28/00 para la “composición de morteros” y el código Y02W30/00 sobre las “tecnologías para el manejo de desechos sólidos”. Esto evidencia la potencialidad de los geopolímeros para la revalorización de residuos industriales como materiales de construcción. En la Tabla 2 se presentan los aplicantes líderes en el patentamiento de geopolímeros, donde se observa que en su mayoría son universidades de China, destacando la Universidad Guangxi con 21 patentes. De igual manera se observa a la empresa norte americana Shclumberger Technology Corp, [31] especializada en el área de petróleo y perforación, su interés deriva de las aplicaciones de estos materiales en la cementación de pozos petroleros.

Tabla 2. *Aplicantes con mayor número de patentes en el área de geopolímeros*
Fuente: Patent Inspiration. Muestreo elaborado el 10/04/18

Aplicantes	Patentes
Universidad Guangxi (China)	21
Shclumberger Technology Corp (USA)	11
Universidad Nacional Chonnam (Sur Corea)	11
Universidad de Arquitectura y Tecnología Xi’an (China)	11
Universidad Técnica da Liberec (República Checa)	10
Davidovits Joseph (Francia)	9
Universidad China de Geociencias Wuhan (China)	9
Universidad de Tecnología Wuhan (China)	9
Universidad de Nanjing (China)	9
Consejo de Investigación Científica e Industrial (India)	8
Universidad de Tecnología del sur de China (China)	8
Ciencia de los nuevos materiales y tecnología Guangxi Qili Co. Ltd. (China)	8
Porcherie Oliver (Francia)	7
Universidad Yamaguchi (Japón)	7
Railway Tehcnical Research Institute (Japón)	7

De igual manera destaca como aplicante el francés Porcherie Olivier, quien trabaja para la empresa Shclumberger pero que ha introducido 7 patentes de manera particular como aplicante. Sus patentes se encuentran orientadas a la utilización de este material en el campo de la perforación petrolera.

En la Figura 6 se presentan los principales inventores en el área de materiales geopoliméricos. Se observa que en su mayoría son investigadores chinos, lo cual es coherente con el hecho de que la mayoría de las patentes son presentadas por universidades chinas, siendo este el país líder en patentamiento para estos materiales. Destaca el investigador chino Xuemin Cui de la Universidad Guangxi con 20 patentes.

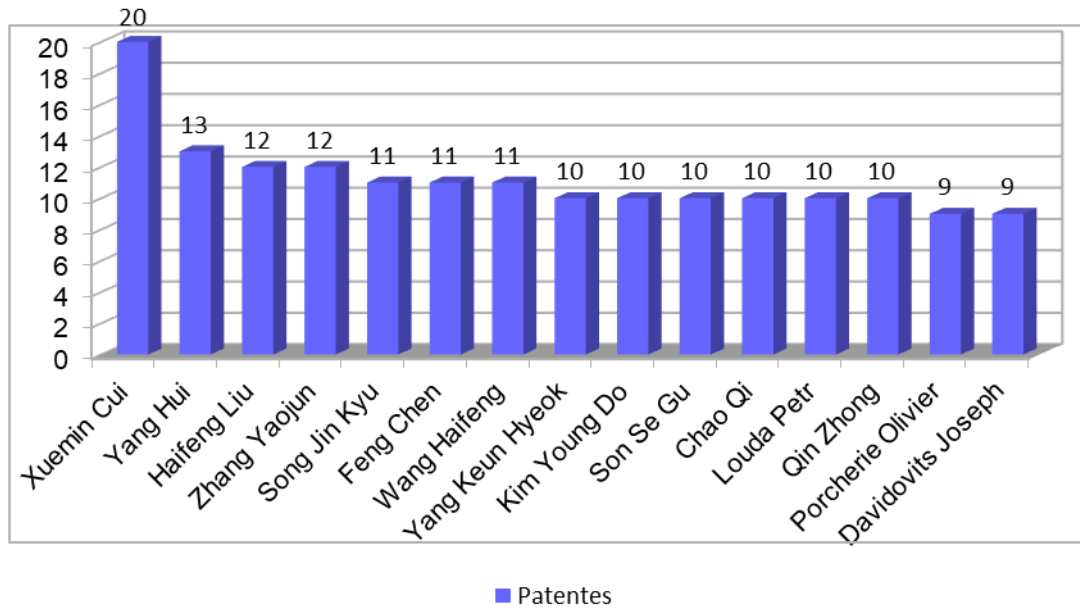


Figura 6. Inventores con el mayor número de patentes en el área de geopolímeros
 Fuente: Patent Inspiration. Muestreo elaborado el 10/04/18

4.4. Análisis de Publicaciones

En la Figura 7 se presenta la evolución del volumen de publicaciones científicas presentadas por año durante el período 1997–2017 para la ecuación de búsqueda planteada en la metodología. Dicha gráfica está fundamentada en información obtenida en la base de datos de la plataforma Thomson Reuters, donde se observa un ritmo creciente en el desarrollo de publicaciones científicas en este campo de investigación, implicando que actualmente es un área activa de desarrollo de conocimiento.

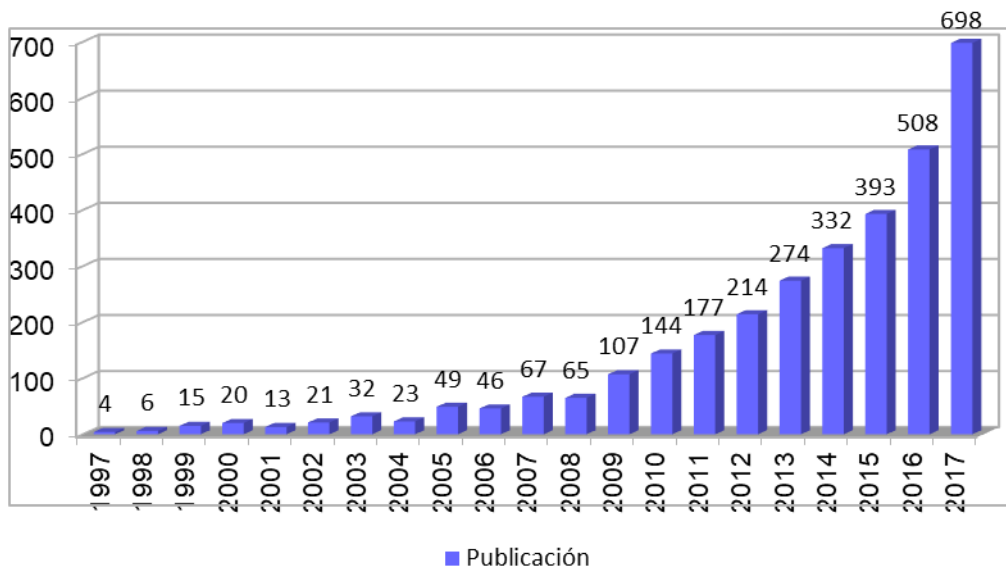


Figura 7. Número de publicaciones por año en el área de geopolímeros
 Fuente: Thomson Reuters. Muestreo elaborado el 12/04/18



De la data bibliométrica obtenida en Thomson Reuters se observa que los países que presentan el mayor número de publicaciones científicas referentes a los geopolímeros son China con 539 publicaciones, Australia con 509 publicaciones y Estados Unidos con 304 publicaciones. Que coinciden con los países donde más se aplica esta tecnología, en Australia el aeropuerto de Wellcamp y el instituto del cambio climático se construyeron con geopolímeros y existe la empresa constructora Wagners [32] que emplea este material. En Estados Unidos existe la empresa constructora Geopolymer Solutions [33] especializada en el ramo.

En la Figura 8 se observa que los principales países con publicaciones científicas sobre geopolímeros son prácticamente los mismos que los países con patentes, pero variando las cantidades de las publicaciones y el orden de los países. En líneas generales se observa que en esta área del conocimiento los países líderes presentan un mayor número de publicaciones científicas que de patentes, siendo la República de Corea el único país que presenta igual número de patentes que de publicaciones científicas con 116 investigaciones publicadas.

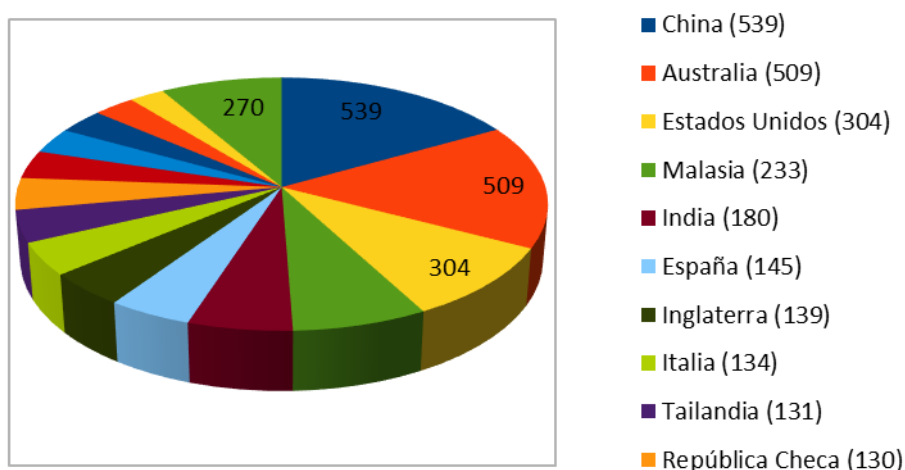


Figura 8. Distribución de países con publicaciones en el área de geopolímeros
Fuente: Thomson Reuters. Muestreo elaborado el 12/04/18

En la Figura 9 se presentan los investigadores con mayor volumen de publicaciones científicas referentes a geopolímeros y a la activación alcalina de aluminio silicatos, siendo el ingeniero químico de origen sudafricano Jan Stephanus Jakob Van Deventer, de la universidad de Melbourne, Australia, el investigador con el mayor número de publicaciones en el área. El segundo investigador destacado por el volumen de publicaciones es el Ingeniero químico y matemático de la universidad de Melbourne John Provis con 112 publicaciones científicas sobre materiales geopoliméricos, actualmente se desempeña en la Universidad de Sheffield en el Reino Unido en el área de materiales cementantes.

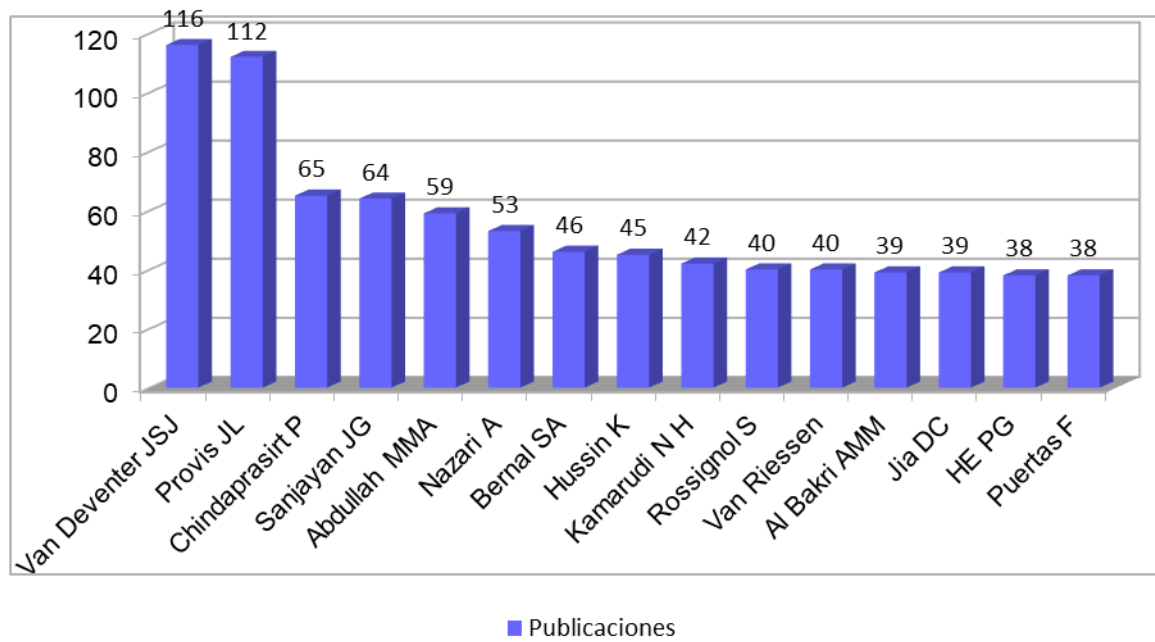


Figura 9. Investigadores con el mayor número de publicaciones en el área de geopolímeros

Fuente: Thomson Reuters. Muestreo elaborado el 12/04/18

Otro investigador destacado por el volumen de publicaciones científicas es P Chindaprasirt, profesor del departamento de Ingeniería Civil de la universidad Khon Kaen de Tailandia, con 65 investigaciones publicadas en el campo de los geopolímeros. Empleando la herramienta VOSviewer [34] para las 500 publicaciones más citadas de acuerdo a la base de datos de Thomson Reuters, utilizando un umbral de 5 documentos por autor se obtuvo el mapa bibliométrico de coautoría presentado en la figura 10, donde se puede visualizar las redes de cooperación entre diversos autores en el área de materiales geopoliméricos.

Se obtuvo que para un total de 907 autores, 56 cumplían con la condición de tener al menos 5 documentos publicados, encontrándose un total de 19 grupos y 80 vínculos. En la Figura 10 se observa que, de los 19 grupos, en su mayoría sin cooperación entre sí, hay dos grupos que se nuclean en torno al investigador tailandés P Chindaprasirt y otros cinco grupos que presentan estrecha colaboración teniendo como principales investigadores a Van Deventer y a John Provis. Tomando los grupos en torno a los investigadores con mayor centralidad en el mapa bibliométrico de coautoría de la Figura 10 y representando el promedio de los años en los que los investigadores realizaron sus publicaciones se obtiene el mapa bibliométrico de la Figura 11. En dicho grafo se observa que el investigador Van Deventer tiene al 2006 como año promedio para sus publicaciones, mientras las investigaciones publicadas de John Provis se encuentran en torno al año 2010.

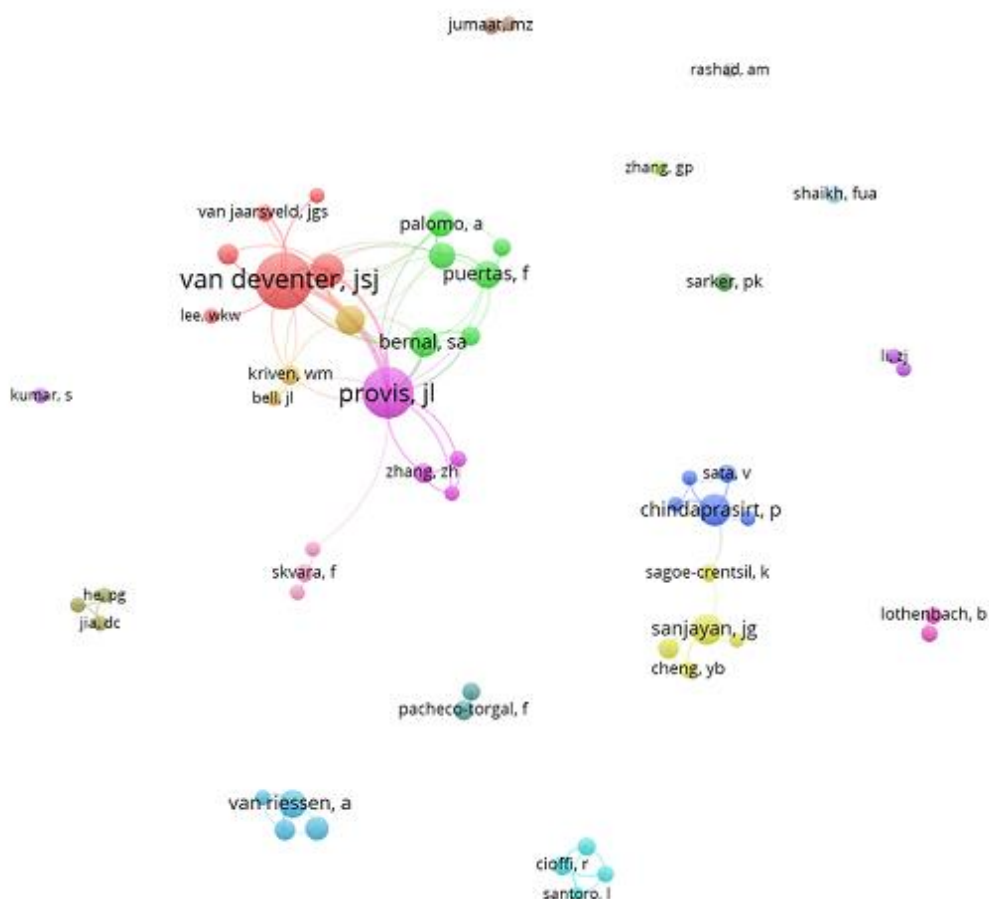


Figura 10. Mapa de coautoría para las 500 publicaciones más citadas. Fuente: VOSviewer a partir de data de Thomson Reuters

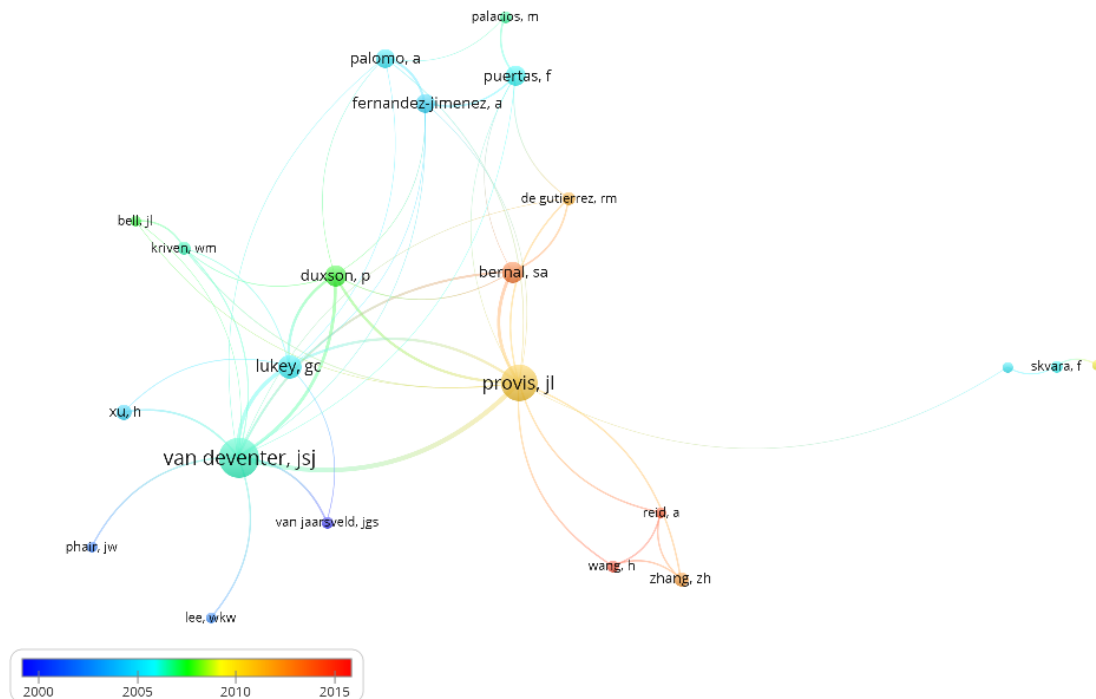


Figura 11. Mapa de coautoría del grupo principal en función del año de publicación. Fuente: VOSviewer a partir de data de Thomson Reuters

En la Tabla 3 se presentan las cinco publicaciones más citadas en el área [35-39], donde se observa que los autores de cuatro de esas publicaciones forman parte de los grupos cooperativos presentados en el grafo bibliométrico de coautoría de la Figura 11, siendo la publicación más citada un estado del arte de geopolímeros con 1007 citaciones donde destacan entre los autores Van Deventer y John Provis.

Tabla 2. *Aplicantes con mayor número de patentes en el área de geopolímeros*
Fuente: Patent Inspiration. Muestreo elaborado el 10/04/18

Año	Título	Autores	Editorial	Citas
2007	Geopolymer technology: the current state of the art	P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo & J. S. J. Van Deventer	SPRINGER	1007
1999	Alkali-activated fly ashes- A cement for the future	Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T.	PERGAMON-ELSEIVER SCIENCE LTD	901
2000	The geopolymerization of aluminio-silicate minerals	Hua Xu, J. Deventer	ELSEIVER SCIENCE BV	554
2005	Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties	Duxson P., Provis J L, Lukey GC, Mallicoat SW., M.Kriven WM, van Deventer JSJ	ELSEIVER SCIENCE BV	491
2005	The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation	Yip CK, Lukey GC, van Deventer JSJ	PERGAMON-ELSEIVER SCIENCE LTD	335

5. CONCLUSIONES

El ascendente volumen de material bibliográfico y de patentes referente a la síntesis y aplicaciones de los geopolímeros evidencia que existe un interés creciente tanto de la comunidad científica como de la industria en torno a este nuevo material, configurándose como una posible alternativa tanto para la elaboración de concretos más ecológicos como para la revalorización de residuos industriales. Sin embargo, a pesar del gran volumen de patentes encontrado, la curva de tendencia señala que aún no se ha desarrollado la curva S, implicando que la tecnología aún se encuentra en su etapa de crecimiento y desarrollo. Esto plantea una oportunidad abierta para la investigación y la innovación en esta área.

Otro indicio de tratarse de una tecnología aún no establecida plenamente, se encuentra en el hecho de presentarse un mayor volumen de publicaciones científicas que de patentes, posiblemente debido a que la variedad en las composiciones de las escorias y posibles precursores no permite definir un estándar único que facilite la rápida aplicación industrial de estos materiales. Aún así, ya existen constructoras que comercialmente emplean los

geopolímeros en Australia y Estados Unidos.

Se encontró que el país líder tanto en patentamiento como en generación de publicaciones científicas es China. Esto se debe a la gran capacidad industrial de este país, sus requerimientos de crecimiento, su alta demanda de materiales de construcción y al volumen de pasivos ambientales y la necesidad de revalorización que ese mismo aparato industrial genera. También es China donde se introducen la mayor cantidad de patentes, al ser la región donde los aplicantes de diversos países ven tanto la necesidad de proteger como la oportunidad de industrializar su innovación.

Dada la variedad de aplicaciones y de precursores para la síntesis que poseen los materiales geopoliméricos y en vista de sus prometedoras ventajas tanto ecológicas como de resistencia mecánica y química, los geopolímeros se plantean como una posible solución a los requerimientos de materiales de construcción del futuro.

6. REFERENCIAS

- [1] J. Davidovits, "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries," *World Resour. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 263–278, 1994
- [2] D. Hardjito, S. E. Wallah, Dody M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan, "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," no. February, 2016
- [3] A. Neville, "Chloride Attack of Reinforcement Concrete an Overview.Pdf," *Materials and Structures*, vol. 28, pp. 63–70, 1995
- [4] J. Davidovits, "Properties of Geopolymer Cements," *First Int. Conf. Alkaline Cem. Concr.*, pp. 131–149, 1994
- [5] "Search and analyze patents - PatentInspiration." [Online]. Available: <http://www.patentinspiration.com/>.
- [6] "Home | Thomson Reuters." [Online]. Available: <https://www.thomsonreuters.com/en.html>.
- [7] A. Mehta and R. Siddique, "An overview of geopolymers derived from industrial by-products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 127, pp. 183–198, 2016
- [8] S. O. Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, and F. Tsobnang, "Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 301–311, 2016
- [9] E. Nimwinya *et al.*, "A Sustainable Calcined Water Treatment Sludge and Rice Husk Ash Geopolymer," *J. Clean. Prod.*, 2016
- [10] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer, and L. Lorenzen, "The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications," *Miner. Eng.*, vol. 10, no. 7, pp. 659–669, 1997
- [11] S. Lee, A. van Riessen, C. M. Chon, N. H. Kang, H. T. Jou, and Y. J. Kim, "Impact of activator type on the immobilisation of lead in fly ash-based geopolymer," *J. Hazard. Mater.*, vol. 305, pp. 59–66, 2016

- [12] H. W. Nugteren, M. B. Ogundiran, G. Witkamp, and M. T. Kreutzer, "Coal fly ash activated by waste sodium aluminate solutions as an immobilizer for hazardous waste," *2011 World Coal Ash Conf.*, pp. 1–10, 2011
- [13] D. C. Comrie, J. H. Paterson, and D. J. Ritcey, "Applications of Geopolymer Technology to Waste Stabilization," *Third Int. Conf. New Front. Hazard. Waste Manag. Proc.*, p. 161–165, 1989
- [14] L. Zheng, W. Wang, and Y. Shi, "The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer," *Chemosphere*, vol. 79, no. 6, pp. 665–671, 2010
- [15] Z. Yunsheng, S. Wei, C. Qianli, and C. Lin, "Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer," *J. Hazard. Mater.*, vol. 143, no. 1–2, pp. 206–213, 2007
- [16] A. D. Cozzi, C. J. Bannochie, P. R. Burket, C. L. Crawford, and C. M. Jantzen, "Immobilization of radioactive waste in fly ash based geopolymers," *2011 World Coal Ash Conf. – May 9-12, 2011 Denver, CO, USA*, 2011
- [17] J. Temuujin *et al.*, "Utilization of radioactive high-calcium Mongolian flyash for the preparation of alkali-activated geopolymers for safe use as construction materials," *Ceram. Int.*, vol. 40, no. PB, pp. 16475–16483, 2014
- [18] R. A. A. Boca Santa, C. Soares, and H. G. Riella, "Geopolymers with a high percentage of bottom ash for solidification/immobilization of different toxic metals," *J. Hazard. Mater.*, vol. 318, pp. 145–153, 2016
- [19] Q. Li *et al.*, "Immobilization of simulated radionuclide ^{137}Cs by fly ash-based geopolymer," *J. Hazard. Mater.*, vol. 262, pp. 325–331, 2013
- [20] P. Sazama, O. Bortnovsky, J. Dědeček, Z. Tvaržková, and Z. Sobalík, "Geopolymer based catalysts-New group of catalytic materials," *Catal. Today*, vol. 164, no. 1, pp. 92–99, 2011
- [21] S. Candamano, P. Frontera, A. Macario, F. Crea, J. B. Nagy, and P. L. Antonucci, "Preparation and characterization of active Ni-supported catalyst for syngas production," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 96, pp. 78–86, 2015
- [22] S. Sharma, D. MedPELLI, S. Chen, and D. K. Seo, "Calcium-modified hierarchically porous aluminosilicate geopolymer as a highly efficient regenerable catalyst for biodiesel production," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 80, pp. 65454–65461, 2015
- [23] R. M. Novais, L. H. Buruberri, M. P. Seabra, and J. A. Labrincha, "Novel porous fly-ash containing geopolymer monoliths for lead adsorption from wastewaters," *J. Hazard. Mater.*, vol. 318, pp. 631–640, 2016
- [24] T. Luukkonen *et al.*, "Removal of ammonium from municipal wastewater with powdered and granulated metakaolin geopolymer," *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 39, no. 4, pp. 414–423, 2018
- [25] Y. Ge, Y. Yuan, K. Wang, Y. He, and X. Cui, "Preparation of geopolymer-based inorganic membrane for removing Ni^{2+} from wastewater," *J. Hazard. Mater.*, vol. 299, pp. 711–718, 2015
- [26] M. Naghsh and K. Shams, "Synthesis of a kaolin-based geopolymer using a novel fusion method and its application in effective water softening," *Appl. Clay Sci.*, vol. 146, no. March, pp. 238–245, 2017

- [27] Y. Zhang and L. Liu, "Fly ash-based geopolymer as a novel photocatalyst for degradation of dye from wastewater," *Particuology*, vol. 11, no. 3, pp. 353–358, 2013
- [28] E. Jämstorp, J. Forsgren, S. Bredenberg, H. Engqvist, and M. Strømme, "Mechanically strong geopolymers offer new possibilities in treatment of chronic pain," *J. Control. Release*, vol. 146, no. 3, pp. 370–377, 2010
- [29] J. Forsgren, C. Pedersen, M. Strømme, and H. Engqvist, "Synthetic geopolymers for controlled delivery of oxycodone: Adjustable and nanostructured porosity enables tunable and sustained drug release," *PLoS One*, vol. 6, no. 3, 2011
- [30] B. Cai, H. Engqvist, and S. Bredenberg, "Evaluation of the resistance of a geopolymer-based drug delivery system to tampering," *Int. J. Pharm.*, vol. 465, no. 1–2, pp. 169–174, 2014
- [31] "Geopolymer Institute – Promoting the geopolymer science since 1979." [Online]. Available: <https://www.geopolymer.org/>.
- [32] "Wagners." [Online]. Available: <https://www.wagner.com.au/>.
- [33] "Advance Concrete and Cement - Geopolymer Solutions." [Online]. Available: <http://www.geopolymertech.com/>.
- [34] "VOSviewer - Visualizing scientific landscapes." [Online]. Available: <http://www.vosviewer.com/>.
- [35] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007
- [36] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, 1999
- [37] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, 2000
- [38] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. J. Van Deventer, "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 269, no. 1–3, pp. 47–58, 2005