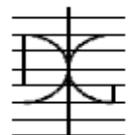


# HUELLA DE CARBONO DE BLOQUES DE SUELO ESTABILIZADO CON GEOPOLÍMEROS PREPARADOS A PARTIR DE MATERIALES RESIDUALES: APLICACIÓN EN PAÍSES EN DESARROLLO

Por:

Rebeca Martínez García

Septiembre 2017

Autor / Author: Rebeca Martínez García		Fecha / Date: Septiembre 2017
Título / Title HUELLA DE CARBONO DE BLOQUES DE SUELO ESTABILIZADO CON GEOPOLÍMEROS PREPARADOS A PARTIR DE MATERIALES RESIDUALES: APLICACIÓN EN PAÍSES EN DESARROLLO		
Directores del trabajo / Supervisores: Pr. Dña. Ana Maria Mellado Romero Pr. D. José María Monzó Balbuena	Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 54
Departamento / Department: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL		
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Palabras clave / Keywords: Geopolímero, Huella de Carbono, Cemento Portland, Ecomateriales, Bloques de Tierra Comprimida, Disolución Activadora, Material Precursor		
Código Unesco: 33.05.05		



## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas las personas que han sido partícipes y me han acompañado en esta nueva y diferente etapa de mi vida. Ha sido una etapa llena cambios y emociones, una de las más difíciles donde, no sólo he aprendido académicamente, sino también personalmente.

Primero, agradecer de todo corazón a mis tutores, Ana María Mellado y José María Monzó, que me han ayudado, apoyado y enseñado muchísimo durante todo este tiempo, agradecer su comprensión y dedicación, que han hecho posible la redacción de este trabajo. Siempre han estado ahí cuando les he necesitado y han tenido mucha paciencia conmigo.

Al profesor Silvio Delvasto Arjona, residente en Colombia, por su amabilidad y colaboración, aportando datos actuales y necesarios para la redacción de este trabajo.

A todos los profesores del Máster, que son impecables como profesionales y como personas; gracias por la comprensión, el apoyo y todos los conocimientos que me han brindado.

Agradecer, por supuesto, a todos mis compañeros del Máster; he conocido personas increíbles que se han convertido en grandes amigos. En especial, a Ricardo Carranza y Fausto Daniel Escobar que han sido mi pilar en estos dos años y sin ellos no habría sido lo mismo.

A mis amigos de Ingeniería Civil, Youssef y Kawtar, que aunque estén lejos se preocupan por mí y siempre tienen tiempo para animarme a realizar todos mis proyectos.

A mi familia y amigos, en especial a mi pareja, que está conmigo día tras día motivándome a mejorar y seguir adelante.

Y lo más importante, a mis padres, que les debo todo, siempre me apoyan y me ayudan a que consiga todo lo que me proponga, me han dado grandes valores por los que lucho y todo el amor del universo. Y cómo no, a mi bebé, que llegó a mi vida este año y ha hecho que todo sea un reto pero me ha enseñado que nada es imposible si realmente lo deseas.

¡¡Mil gracias!!

## RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado el cálculo de la Huella de Carbono en la fabricación de bloques de suelo estabilizado con geopolímeros preparados con un material precursor a base de residuo de catalizador de craqueo catalítico del petróleo (FCC) y una disolución activadora preparada por mezcla de hidróxido sódico y ceniza de cáscara de arroz (CCA), comparando el resultado con el que proporcionaría la fabricación de bloques de suelo estabilizado con cemento Portland, y así demostrar la mejora medioambiental de la utilización del conglomerante de activación alcalina. Se ha realizado el cálculo referido a un contexto de países en desarrollo, concretamente para el caso de la ciudad de Barranquilla, en Colombia, a fin de establecer la aplicación de estos bloques para la fabricación de viviendas de bajo coste económico y medioambiental en este país.

En el cálculo se ha considerado tanto las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a los materiales utilizados para la fabricación de los bloques, como a las generadas durante el proceso de fabricación (concretamente el amasado) y al transporte de las materias primas desde su origen hasta el lugar de fabricación de los mismos.

Los resultados del cálculo muestran la excelente mejora medioambiental que supone la utilización del conglomerante de activación alcalina propuesto frente al tradicional cemento Portland. Esta mejora se ve acentuada por el hecho de emplear materiales residuales en la preparación del geopolímero; esto se traduce en que las emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas para los bloques fabricados con geopolímero son prácticamente la mitad que las generadas cuando se emplea cemento Portland.

Por otro lado, se ha relacionado el resultado de la huella de Carbono obtenida para los bloques fabricados con geopolímero con otras propiedades de interés en lo que se refiere a las propiedades mecánicas de los mismos; concretamente con la resistencia a compresión. Los resultados muestran las buenas prestaciones que presentan estos bloques y la viabilidad de éstos para constituir un material adecuado en la construcción de viviendas de bajo coste en el contexto de países en desarrollo.

Finalmente, se han realizado un cálculo estimado del coste económico que supone la preparación de cada tipo de bloques, con respecto a las prestaciones mecánicas que nos ofrecen, mostrando los resultados que el geopolímero tiene un coste más reducido para un mismo valor de resistencia mecánica a compresión final proporcionado por el bloque que el del cemento. Esto nos indica que incluso a nivel económico, el geopolímero es más rentable que el cemento Portland convencional, aspecto muy importante en el contexto referido en este trabajo, es decir, países en desarrollo.

## ABSTRACT

In the present work the Carbon Footprint was calculated from stabilized soil blocks with geopolymers prepared with a precursor based on catalytic cracking of petroleum (FCC) catalyst residue and an activator solution prepared by mixing sodium hydroxide and rice husk ash (RHA), comparing the result with that would provide the manufacture of soil blocks stabilized with Portland cement. The results have shown the environmental improvement of the use of the alkaline activation conglomerate against Portland cement. The calculation referred to a context of developing countries, specifically for the case of the city of Barranquilla, Colombia, has been carried out in order to establish the application of these blocks for the production of low-cost housing in this country.

The calculation has considered both the CO<sub>2</sub> emissions associated with the materials used for the manufacture of the blocks, as well as those generated during the manufacturing process and the transportation of the raw materials from its origin to the place of manufacture.

The results of the calculation show the excellent environmental improvement involved in the use of the proposed alkaline activating binder against the traditional Portland cement. This improvement is accentuated by the use of residual materials in the preparation of the binder; the CO<sub>2</sub> emissions calculated for blocks made with geopolymer are practically half that generated when Portland cement is used.

On the other hand, the result of the Carbon Footprint obtained for the blocks manufactured with geopolymer were related with other properties of interest; specifically with the resistance to compression strength. The results show the good performance of these blocks and the feasibility of these blocks to constitute a suitable material in the construction of low-cost housing in the context of developing countries.

Finally, the economic calculations of each preparation have been made with respect to the mechanical performance offered to us, and the results show that the geopolymer has a lower cost in terms of mechanical strength than ordinary Portland cement, an important characteristic in the context of developing countries.

# ÍNDICE

## **1. INTRODUCCIÓN**

- 1.1 LOS PROBLEMAS MEDIO-AMBIENTALES ACTUALES
- 1.2 CONTAMINACIÓN DEBIDA AL CEMENTO PORTLAND
- 1.3 ECOMATERIALES
- 1.4 LA TIERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN
- 1.5 CONGLOMERANTES ALTERNATIVOS: LOS GEOPOLÍMEROS
- 1.6 NECESIDAD DE VIVIENDAS EN PAÍSES EN DESARROLLO

## **2. OBJETIVO DEL TRABAJO**

## **3. LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA**

## **4. GEOPOLÍMERO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LOS BLOQUES**

- 4.1 MATERIAL PRECURSOR
- 4.2 DISOLUCIÓN ACTIVADORA

## **5. PARTE EXPERIMENTAL**

- 5.1 PLANTEAMIENTO DEL CÁLCULO
- 5.2 MATERIALES CONSIDERADOS
  - 5.2.1 TIERRA
  - 5.2.2 AGUA
  - 5.2.3 CEMENTO
  - 5.2.4 FCC
  - 5.2.5 CCA
  - 5.2.6 NaOH
- 5.3 EQUIPOS UTILIZADOS
  - 5.3.1 AMASADORA
  - 5.3.2 PRENSADORA
  - 5.3.3 CAMIÓN DE TRANSPORTE

## 5.4 DOSIFICACIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

### 5.4.1 BLOQUES DE SUELO ESTABILIZADO CON GEOPOLÍMERO

### 5.4.2 BLOQUES DE SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO PORTLAND

### 5.4.3 BLOQUES DE SUELO SIN ESTABILIZAR

## 5.5 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

## 5.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 5.7 CONCLUSIONES

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 LOS PROBLEMAS MEDIO-AMBIENTALES ACTUALES

La crisis ambiental por la que está pasando el Planeta es una realidad y nos está preocupando cada vez más. Durante los últimos 100 años, la destrucción que todavía sufre nuestro planeta ha alcanzado límites que hacen obvias sus consecuencias generándose situaciones como el calentamiento global, producto del efecto invernadero, cuya principal causa es las altas emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), provocan cambios en la composición de la atmósfera terrestre alterando el flujo natural de radiación infrarroja absorbida por la superficie y provocando un incremento en la temperatura de la atmósfera, la litosfera y la hidrosfera del planeta. Las actividades humanas han ido incrementando la cantidad y proporción de estos gases en la atmósfera. La gran mayoría de ellos procede de la quema de combustibles fósiles. La superficie terrestre se ha calentado durante el último siglo en unos 0,8 °C (Fig 1)<sup>1</sup> y según las cifras de la ONU<sup>2</sup>, se prevé que la temperatura media de la superficie del planeta aumente entre 1,4 y 5,8 °C de aquí a 2100. Esto puede llegar a causar en un futuro catástrofes en todo el mundo, como por ejemplo inundaciones, entre otras cosas, poniendo en peligro a nuestro planeta.

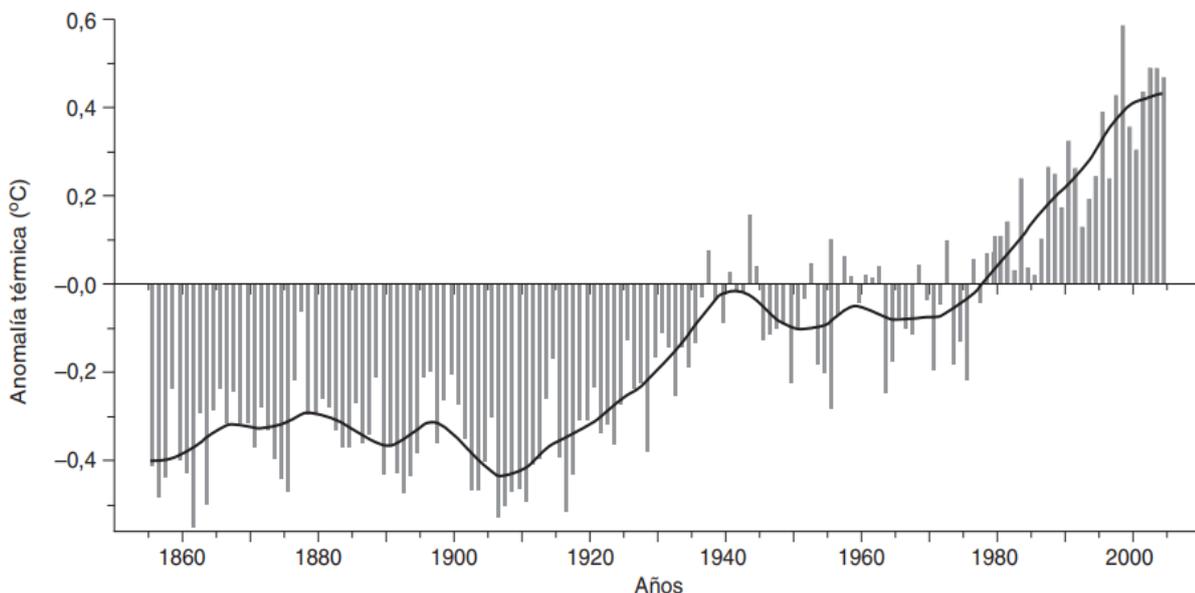


Fig 1. Anomalía térmica de la temperatura global del aire durante el último siglo y medio.

Fuente: Jones & Palutikof (CRU, University of East Anglia, East Anglia, UK)<sup>1</sup>

Debido a esta insostenible situación, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) estableció el Protocolo de Kioto cuyo objetivo fue conseguir reducir un 5,2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012.<sup>3</sup> Este primer periodo ya concluido, fue el único mecanismo internacional que se llevó a cabo para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos. Para ello, se dispusieron objetivos legalmente obligatorios para que los países industrializados redujeran las

emisiones de los 6 gases de efecto invernadero de origen humano como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

En la tabla siguiente podemos ver la reducción de emisión de CO<sub>2</sub> de cada país y su grado de compromiso con el protocolo de Kioto en los años (2008-2012)<sup>4</sup>

	Protocolo Kyoto 1990 (millones de toneladas)	2012 (millones de toneladas)	Variación 2011 - 2012 (%)	EMISIONES 2008 -2012 (%)	
				Objetivo Kyoto I	{-} Reducen {+} Aumentan
Alemania	1.232,40	939,1	1,1	-21	-23,62
Austria	79	80,1	-3,3	-13	4,91
Bélgica	145,7	116,5	-3	-7,5	-14,04
Dinamarca	69,3	51,6	-8,6	-21	-15,03
España	289,8	340,8	-1,5	15	23,68
Finlandia	71	61	-8,8	0	-4,69
Francia	563,9	490	0	0	-9,96
Grecia	107	111	-3,3	25	11,87
Holanda	213	191,7	-1,7	-6	-6,39
Irlanda	55,6	58,5	1,4	13	10,96
Italia	516,9	460,1	-5,4	-6,5	-4,16
Luxemburgo	13,2	11,8	-2,4	-28	-8,74
Portugal	60,1	68,8	-0,8	27	20,23
Reino Unido	776,3	580,8	3,2	-12,5	-23,18
Suecia	72,2	57,6	-5,2	4	-15,31
UE 15	4.265,50	3.619,50	-0,8	-8	-11,85

Tabla 1. Datos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por países.<sup>4</sup>

Fue en la decimoctava Conferencia de las Partes (COP 18) sobre cambio climático donde se ratificó el segundo periodo de vigencia del Protocolo de Kioto desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020. La duración de este segundo periodo del Protocolo es de 8 años, con metas concretas para el 2020.

Durante la XXI Conferencia sobre Cambio Climático (COP 21), se negoció el Acuerdo de París; un acuerdo dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que establece medidas para la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI), que será aplicable una vez finalice la vigencia del Protocolo de Kioto en el año 2020.

Hasta el 3 de noviembre de 2016 este instrumento internacional había sido firmado por 97 partes.<sup>5</sup> De esta manera se cumplió la condición para la entrada en vigor del acuerdo al ser ratificado por más de 55 partes que suman más del 55 por ciento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

El 1 de junio de 2017, el presidente Donald Trump anunció la retirada de Estados Unidos de este acuerdo, dadas sus promesas de campaña en pro de los intereses económicos de la nación. Todos los demás países del mundo reiteraron su compromiso y comunicaron que no se iban a retirar del acuerdo aunque Estados Unidos lo hiciese. Los países latinoamericanos que más se habían involucrado en la consecución de los objetivos fijados en el acuerdo expresaron su preocupación

por la reducción de transferencia de tecnología y financiación internacional que supondría la retirada de Estados Unidos para su proceso de transición energética.

Con todo esto se ha conseguido una reducción del 22,6% en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990 en 37 países industrializados y la UE, cuando el compromiso inicial era de una disminución del 5%.

Ahora más que nunca necesitamos comprometernos y fomentar el desarrollo sostenible, buscando solucionar las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para solucionar sus propias necesidades.

Es hora de asumir los errores cometidos y de trabajar para hacer lo posible por remediarlos. El desafío del siglo XXI es construir y fomentar comunidades sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

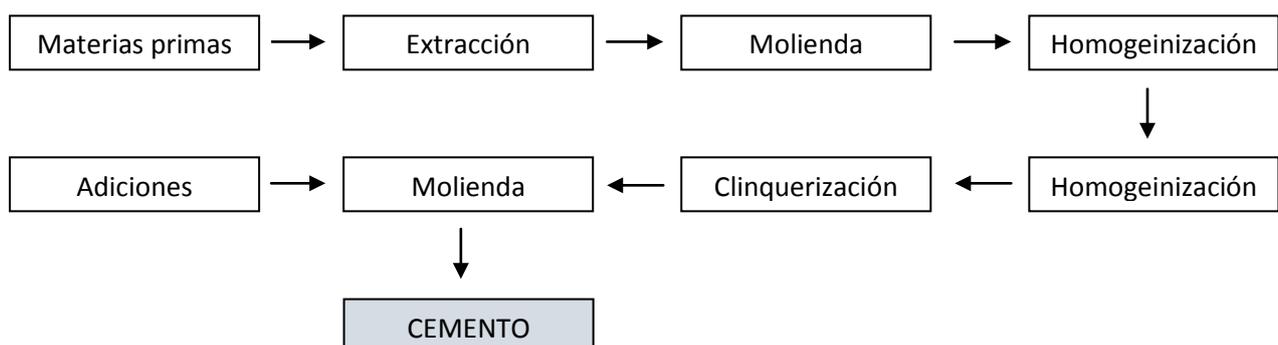
## 1.2 CONTAMINACIÓN DEBIDA AL CEMENTO PORTLAND

Siempre se ha dicho que la construcción es uno de los sectores que más influye en el cambio climático fundamentalmente porque la fabricación de cemento Portland provoca una emisión considerable de CO<sub>2</sub>, que llega a ser el 5% del balance total de emisiones mundiales.<sup>6</sup> Incluso determinados informes avisan de que la industria de la construcción, en su conjunto, podría ser responsable de generar entre el 40 y el 50% de todos los gases de efecto invernadero.<sup>7</sup>

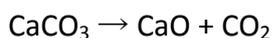
Esto se debe a que uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción es el hormigón cuyo elemento principal es el cemento. Cada tonelada de cemento producida por el sistema convencional produce una tonelada de CO<sub>2</sub>; si en lugar de cemento convencional, producimos cementos especiales podemos llegar a reducir la cifra de emisiones de CO<sub>2</sub> a 0,4 toneladas por tonelada producida<sup>8,9</sup>.

Aproximadamente el 5-9% de las emisiones totales antropogénicas de CO<sub>2</sub> están relacionadas con la producción de hormigón. Esto es causado por la producción masiva y el uso de cemento en el sector de la construcción; 85% de las emisiones de hormigón están asociadas con la fabricación de cemento; por lo que su contribución es de aproximadamente el 3-5% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub><sup>8,9</sup>. Cualquier mejora en la fabricación de cemento puede tener un gran impacto en la reducción del CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera.

### Proceso de fabricación del cemento Portland



Para obtener cemento se parte de una mezcla de arcilla y caliza que se hornea a altas temperaturas. El resultado es lo que se denomina Clínger y se compone generalmente de 63-70% de CaO, 19-24% de SiO<sub>2</sub>, 3-7% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 1-5% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> por el peso que forman las principales fases minerales Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, CaAl<sub>2</sub>O<sub>6</sub> y Ca<sub>2</sub>AlFeO<sub>5</sub> (o Ca<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) cuando se quema a aproximadamente 1450°C. La descomposición de la caliza en la preparación del Clinker supone aproximadamente la mitad del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la fabricación del cemento, debido a la reacción de descarbonatación:



La relación entre el CO<sub>2</sub> derivado de la materia prima y el CO<sub>2</sub> derivado del combustible puede, por supuesto, variar en la práctica, pero la proporción 60/40 muestra el camino hacia la reducción de la emisión de CO<sub>2</sub>. Se puede producir cemento Portland con menos emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera haciendo Clinker con menos calcio, usando un combustible sin emisión de CO<sub>2</sub>, con un cemento que contenga menos Clinker o realizando una captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub><sup>10</sup>. Las soluciones más exitosas que existen actualmente para reducir dichas emisiones son la utilización de puzolanas como sustituto del cemento Portland, ya sea como adición, sustituyendo parte de este último o añadiéndolas directamente en el proceso de fabricación del cemento, o la investigación de nuevos materiales conglomerantes como los geopolímeros que sustituyan al cemento portland como material de construcción.

La lucha contra los problemas urgentes de vivienda en los países en desarrollo impulsa la disponibilidad masiva de materiales de construcción. Se prevé que la demanda de cemento se duplicará para 2050 y la mayor parte de este aumento vendrá de los países en desarrollo en los que aún no se ha desarrollado la infraestructura. El crecimiento de la población hará presión sobre la expansión de las áreas urbanas existentes.<sup>11</sup>

### 1.3 ECOMATERIALES

Realmente casi todos los materiales son renovables en un periodo de tiempo más o menos largo, pero sólo podemos considerar “sostenibles” aquéllos que pueden regenerarse antes del final de la vida útil del producto del que forman parte.

Un objetivo importante de la construcción sostenible es conseguir un proceso cíclico en la industria de la construcción de forma que los materiales y los productos puedan ser recuperados, reciclados y reutilizados; pero no podemos olvidar que el reciclaje conlleva un gasto energético y la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Es por ello, que una buena forma de reducir la huella de carbono y mejorar la sostenibilidad en este sector es utilizando ecomateriales.

La ONG EcoSur fue una de las primeras entidades en el uso de este término en 1991 para denominar los materiales viables económica y ecológicamente. Los Ecomateriales son productos naturales, sin compuestos químicos de síntesis, que no dañan al ser humano ni al planeta teniendo una huella ecológica mínima y promueven el uso de tecnologías tradicionales utilizando materiales locales, pero también nuevas interpretaciones y desarrollos.<sup>12</sup>

Durante mucho tiempo, la construcción se ha centrado únicamente en los materiales modernos que han ido apareciendo como el acero y el cemento dejando a un lado los materiales “de toda la vida”, como puede ser el barro y otros que son de un coste mucho más reducido. Además, los gobiernos han creado legislaciones de construcción que impiden a una mayoría de sus ciudadanos construir su vivienda. La producción manual y descentralizada de materiales peligran, al concentrarse en compañías grandes y urbanas.

Los Ecomateriales trabajan con tecnologías tradicionales como son mampostería de piedra, adobe y ladrillo, quema eficiente de ladrillos de barro, quema de cal en hornos pequeños y también en la construcción de techos de bóvedas. Para que un material de construcción tradicional sea considerado como Ecomaterial debe cumplir las siguientes condiciones:

- Se utilicen recursos y materia prima local
- Tengan un bajo consumo de energía en su transformación y uso
- Que no sean contaminantes
- Que tengan facilidad de mantenimiento
- De bajo coste
- Que sea de baja conductividad e inercia térmica
- Tengan bajos costes de inversión
- Permitan un control básico para garantizar la calidad de lo producido
- Tengan baja capacidad de generar ruidos y desechos
- No produzcan daño o enfermedades profesionales a la fuerza de trabajo en sus procesos de producción o uso
- Facilitar la producción, ya sea esta artesanal o industrial.

Con la utilización de este tipo de materiales se pretende una disminución en la tala de árboles y el consumo de energía eléctrica, eliminar las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, incentivar el reciclaje de materiales de construcción, etc., lo que ayuda a reducir los costes en la construcción respetando el medio ambiente.

## **1.4 LA TIERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN**

La tierra la tenemos disponible en cualquier lugar; hay tierra en abundancia en todas partes y podemos disponer de ella fácilmente para construir. Es el material de construcción más usado por el hombre a lo largo de la historia.

Se han encontrado adobes de tierra moldeados a mano en la ciudad de Jericó cuyos orígenes se remontan al octavo milenio antes de nuestra era, así como moldes de geometría regular en madera para la elaboración de adobes que aparecieron casi simultáneamente en Sumeria y Perú, hace

alrededor de 5 000 años, los cuales permitieron una mayor producción de adobes y de mejor calidad.<sup>13</sup>

En Europa y Asia se pueden encontrar construcciones en tierra que datan de los siglos VII y VI a.C. En Grecia todavía se conservan murallas hechas a partir de bloques de tierra cocida al sol que datan del siglo IV d.C.<sup>14</sup>

En África el uso de la tierra cocida se ha mantenido vigente como una tradición cuyos orígenes se ubican en las grandes civilizaciones antiguas de ese continente, razón por la cual en países como Egipto y Costa de Marfil se encuentran construcciones recientes que se han realizado de manera similar a las construcciones antiguas.

En América, en la mayoría de los pueblos precolombinos, fue generalizado el uso de la tierra, especialmente del adobe.<sup>15</sup> En Perú se encuentran las ruinas de notables templos construidos en tierra 200 años antes de la llegada de los españoles.

En el territorio donde actualmente se encuentra Colombia surgieron importantes culturas indígenas, la cuales desarrollaron ciudades con evidentes formas simbólicas, utilizando los recursos existentes en su entorno inmediato. Durante el período de la conquista y colonia, las técnicas indígenas se adecuaron a las técnicas traídas desde el continente europeo, lo que estableció el uso de del bahareque, el adobe y la tapia pisada, con lo que fueron construidas la gran mayoría de las ciudades del país.

Antiguamente, las primeras casas se construían con tierra cruda y es ahora, cuando se investiga sobre sus aplicaciones para el entorno y la construcción más responsable.

Este tipo de material tiene una gran diversidad de ventajas para la construcción siendo una opción altamente económica; es un material inocuo, lo que quiere decir que no contiene ningún tipo de sustancia tóxica siempre que provenga de un suelo que no haya sido contaminado; además, es completamente reciclable siempre y cuando no se haya mezclado con ningún producto hecho por el hombre, como ocurre con el cemento que después de su uso no se podría integrar totalmente el material en la naturaleza. Como ya hemos mencionado anteriormente, es muy fácil de obtener localmente ya que cualquier tipo de tierra es útil para construir utilizando diferentes técnicas de construcción, incluso llegando a realizar mezclas con otro material para mejorar la mezcla como cal, yeso o paja.

La construcción con tierra cruda es sencilla y requiere poco gasto energético, ya que no necesita un gran transporte de materiales ni una elevada temperatura de cocción, aunque, si bien es cierto, necesita un mayor esfuerzo e implicación de los constructores. No provoca un gran impacto, por lo que, su obtención es respetuosa siempre y cuando sea del propio emplazamiento evitando la deforestación o la minería. Además, la tierra tiene una elevada capacidad de inercia térmica; puede almacenar calor y cederlo posteriormente creando un clima agradable sobre todo en lugares con cambios extremos de temperatura.

En cuanto al aislamiento acústico, son ideales como barrera para el ruido; no se incendia ni pudre y permite una buena regulación de la humedad debido a que es transpirable.



Fig 2. Edificio en Alemania construido con tierra y técnicas mixtas de tierra con otros materiales.



Fig 3. Una Kashba en Marruecos construida con tierra

## 1.5 CONGLOMERANTES ALTERNATIVOS: LOS GEOPOLÍMEROS

Entre las alternativas potenciales que existen actualmente para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del cemento portland, está la utilización de puzolanas como sustituto del cemento Portland, ya sea como adición, sustituyendo parte de este último o añadiéndolas directamente en el proceso de fabricación del cemento, produciendo así los denominados cementos puzolánicos. Otra de las alternativas es la investigación de nuevos materiales conglomerantes que sustituyan totalmente al cemento portland como material de construcción; estos nuevos materiales son entre otros, los denominados cementos de activación alcalina o geopolímeros.

En 1972, el profesor Joseph Davidovits, acuñó el término “geopolímero” para designar a polímeros inorgánicos de aluminosilicatos. Los geopolímeros se preparan a partir de un precursor (material inorgánico rico en silicio (Si) y aluminio (Al) como pueden ser puzolanas naturales, ceniza volante, escorias de alto horno en estado vítreo, entre otros que reacciona con una disolución activadora (solución cáustica formada por agua y un hidróxido alcalino) y una fuente de sílice amorfa, que por reacción con el hidróxido se transformará en silicato; a este proceso se le llama geopolimerización. A excepción del hidróxido alcalino, el resto de materiales pueden ser residuos, lo que implica una importante disminución en lo que a emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se refiere, es decir, a su Huella de Carbono.<sup>16-17</sup>

La nueva rama de los geopolímeros ya había sido descubierta por la Unión Soviética en 1950 con el nombre de los cementos de suelo (Soil Cements), fueron los científicos Víctor Glukhovskiy y Pavel Krivenko quienes preguntándose por qué las estructuras y edificios de la antigüedad, pirámides en especial, duraban tanto, los analizaron y observaron que tras la presencia de alcalinos libres en las matrices cerámicas podría estar la respuesta.<sup>18</sup>

En la siguiente tabla se observan los hechos más importantes relacionados con los geopolímeros desde 1950<sup>19</sup>:

<b>AUTOR</b>	<b>AÑO</b>	<b>EPISODIO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
<b>Glukhovsky y Krivenko</b>	1950s	Primeras escorias alcalinamente activadas mediante productos CSH y aluminosilicatos hidratados que se usan en construcción	Los aluminosilicatos hidratados son descubiertos y utilizados
<b>Davidovits</b>	1972	Cambio del lenguaje técnico para la transferencia de información científica básica	El término "geopolímero" es acuñado
<b>Davidovits y Orlinsky</b>	1988	Actas de la primera conferencia europea sobre los geopolímeros en mineralogía	Resumen de los trabajos de geopolímeros de los años 80
<b>Wastiels et al.</b>	1993	Geopolímero basados en cenizas volantes	Primer registro de geopolímeros a partir de la activación alcalina de cenizas volantes
<b>Rahier et al.</b>	1996-1997	Aluminosilicatos sintetizados a bajas temperaturas	Trabajos preliminares de geopolímeros basados en meta caolín
<b>Xu and van Deventer</b>	2000, 2002	Geopolimerización de múltiples minerales	Geopolimerización de nuevos residuos aluminosilicatos
<b>Duxson et al.</b>	2007	Publicación del informe "Tecnología de los geopolímeros: estado actual del arte"	Amplio número de informes y revisiones sobre los geopolímeros
<b>Davidovits</b>	2008	Publicación: " Química de los geopolímeros y aplicaciones" 2ª Edición	
<b>Provis y van Deventer</b>	2009	Publicación: " Geopolímeros: estructura, procesos, propiedades y aplicaciones industriales"	

Tabla 2. Resumen de la historia de los geopolímeros.<sup>19</sup>

La geopolimerización es una reacción que se produce a baja temperatura y comienza al ponerse en contacto un material compuesto fundamentalmente por aluminio y silicio (en forma de aluminosilicato) con una solución activadora alcalina, que consigue la formación de una estructura nueva formada por cadenas poliméricas. Dichas cadenas surgen a raíz de la policondensación de los iones silicato y aluminato que forman unidades tetraédricas llamadas silato. Es una reacción que incluye la condensación y polimerización de iones ortosilicatos que son considerados como hipotéticos monómeros. Generalmente la reacción involucra: disolución, transporte y poli condensación.<sup>20</sup>

En la siguiente imagen se observan diferentes redes de grupos sialato, en cinco estructuras diferentes:

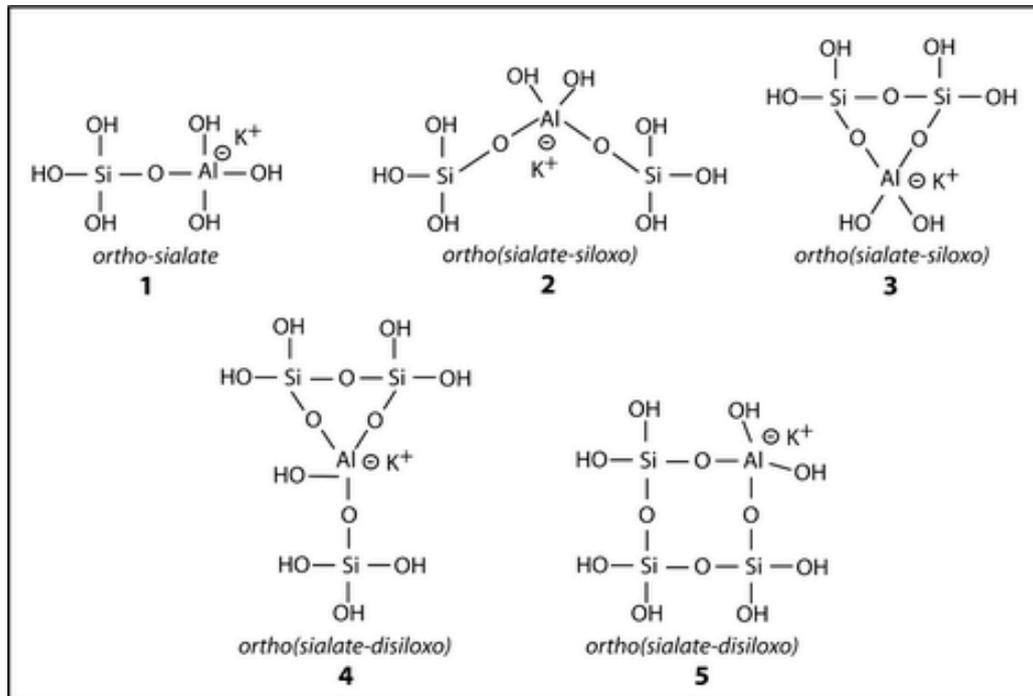
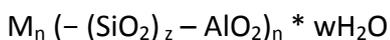


Fig 4. Grupo de Siliatos<sup>21</sup>

En las cavidades de la red, iones positivos tales como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  o  $\text{NH}_4^+$  se asocian con el aluminio, ya que los grupos  $\text{AlO}_4$  tienen una carga negativa debido al estado de oxidación tres del aluminio en el tetraedro.<sup>22</sup>

La formación de estos sialatos (silico-oxo-aluminatos) de la red, compuestos de tetraedros  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4$  unidos mediante átomos de oxígeno, se basa en la siguiente fórmula empírica:<sup>23-24</sup>



Dónde:

- z: es un valor entero: 1, 2 o 3
- M es un catión monovalente
- n: es el grado de policondensación
- w: el número de moléculas de agua asociadas

Según el valor de z, diferenciamos entre las diferentes redes posibles, siendo z=1 polisiliato, z=2 poli (siliato-siloxo) y z=3 poli (sialato-disiloxo)

Durante la geopolimerización los cationes monovalentes se introducen en los intersticios y cuando el gel se va endureciendo las partículas que se encontraban separadas de aluminio y silicio se unen,

creando una matriz con las propiedades anteriormente expuestas, en especial, las relativas al buen comportamiento mecánico.

El proceso de geopolimerización consta, básicamente, de 4 etapas: <sup>25</sup>

1. Se disuelve la parte amorfa del aluminosilicato, con lo que el silicio y el aluminio se disuelven en la solución alcalina. Se consume  $H_2O$  durante el proceso a la vez que se forman pequeños monómeros de aluminato y silicato, mediante iones hidroxilo, a la vez que se reorganizan y dispersan los iones.
2. Cuando los monómeros están en la solución acuosa, se forma una mezcla de aluminatos, silicatos, que pueden proceder a su vez de la solución activadora, y aluminosilicatos, creándose los primeros oligómeros de aluminosilicatos.
3. Cuando se ha formado el gel geopolimérico, se produce la recolocación de los mismos a la vez que surgen las cadenas geopoliméricas y con ellas la estructura del material.
4. Policondensación de las partes solubles y formación de los productos hidratados, que acaba con el endurecimiento.

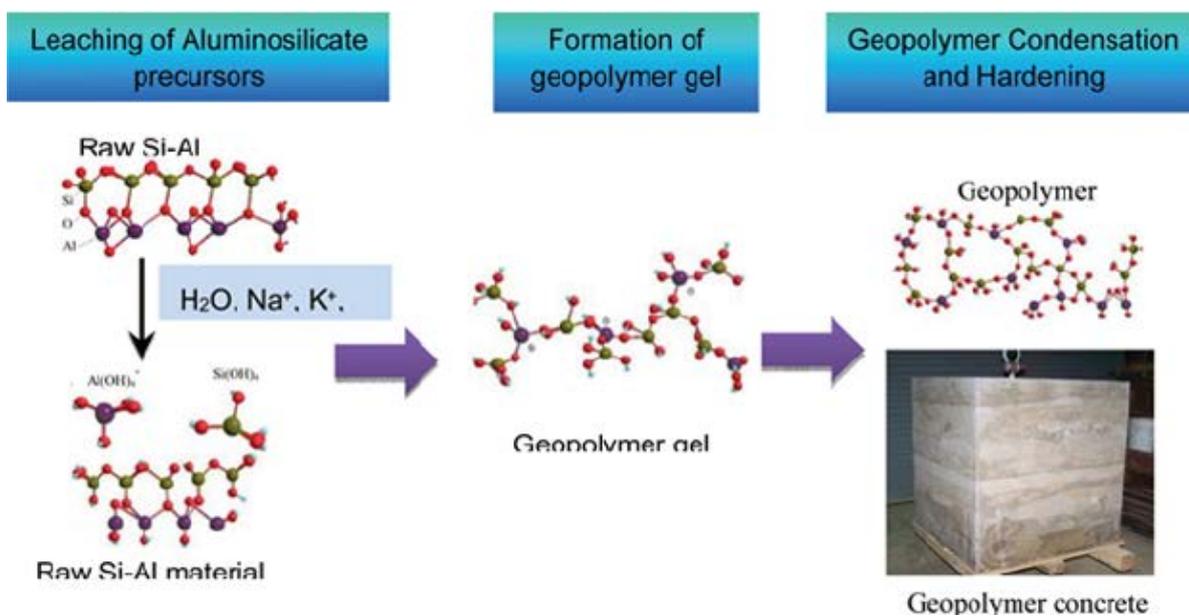


Fig 5. Diagrama esquemático del proceso de polimerización. <sup>18</sup>

A través del curado en horno o en aire, los materiales resultantes de estas reacciones presentan una estructura amorfa tridimensional. La solución activadora consiste generalmente en una solución de hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) y de una solución de silicato de sodio ( $Na_2SiO_3$ ). La fuente de aluminosilicato, por lo general, se encuentra molida y presenta un tamaño de partícula dentro del rango de los 1 a los 30 micrones, además de tener una proporción significativa de  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  contenidos en fases amorfas.

Los geopolímeros poseen una amplia variedad de propiedades y características como son su alta resistencia mecánica, resistencia al fuego, resistencia a los ácidos, baja conductividad térmica y rápidos tiempos de fraguado, dependiendo de las materias primas utilizadas, las combinaciones de las mismas y las condiciones de fabricación. Aunque no todos los geopolímeros poseen todas las

propiedades citadas, el conocimiento alcanzado permite definir unas formulaciones en las condiciones adecuadas para obtener las propiedades idóneas para una aplicación específica. Todas estas características, hacen que los geopolímeros representen una potencial alternativa al hormigón de cemento, más aún por su comportamiento a largo plazo y bajo condiciones agresivas.

La producción de geopolímeros llega a generar alrededor de un 80% menos de CO<sub>2</sub> que el cemento Portland<sup>26</sup> y los costes de producción son relativamente bajos<sup>27</sup>. Sin embargo, la desconfianza de la industria cementera a nuevos productos no han permitido su implantación, ya que aun con un coste medioambiental alto, el cemento portland tiene costes de producción muy bajos, además de no ser necesaria una tecnología cara.

Todas las propiedades de los geopolímeros dependen fundamentalmente del proceso de geopolimerización, de la relación Si/Al, del aluminosilicato utilizado como precursor y de la temperatura; Davidovits fabricó geopolímeros a partir de caolín utilizando diversas temperaturas: 500, 650, 700 y 750°C, y concluyó que el óptimo se encontraba en 750°C<sup>28</sup>.

Otras investigaciones afirman que aumentar los tiempos de curado a altas temperaturas, tienden a dañar internamente la estructura, lo que podría deberse a la necesidad de mantener pequeñas cantidades de humedad, que ayuden a eliminar la formación de grietas.<sup>29</sup> Mientras que otros estudios referidos al agua, indican que ésta no pasa a formar parte de la estructura en sí, si no que queda encerrada en ella, con lo que se forman cavidades, es decir, se generan poros. Esto se debe a que el agua modifica las uniones entre partículas que forman el gel geopolimérico y genera una reorganización estructural.<sup>30-31</sup> En contraposición, el curado prolongado a temperatura ambiente, ayudaría a un desarrollo de una resistencia mejor, teniendo en cuenta que el curado inicial a temperaturas superiores a 50-80 °C, no aumenta la resistencia a compresión que se alcanza a temperatura ambiente.<sup>29</sup>

Con respecto al tiempo de curado, es necesario un tiempo de fraguado adecuado para conseguir una durabilidad adecuada, ya que es necesario para el transporte, ordenamiento y polimerización de los monómeros.<sup>32</sup>

Los materiales geopoliméricos tienen una amplia gama de aplicaciones en el campo de las industrias como el automóvil y el aeroespacial, las fundiciones no ferrosas y metalúrgicas, y las industrias del plástico. Pero su principal aplicación es ser utilizado como sustituto del cemento Portland (CEM) para el encapsulamiento de desechos, paneles resistentes al fuego y cementos refractarios.<sup>16</sup> El uso de estos nuevos materiales inorgánicos como sustitutos de los cementos tradicionales, plásticos y cerámicos permite un crecimiento sostenible gracias a la reducción de emisiones de gases contaminantes y a la disminución del consumo energético y de recursos naturales.

## **1.6 NECESIDAD DE VIVIENDAS EN PAÍSES EN DESARROLLO**

La población urbana ha aumentado significativamente en la segunda mitad del siglo XX y en la actualidad experimenta un incremento de unos 60 millones anuales, casi todo él, en los países en vías de desarrollo. Dicho crecimiento se espera que continúe e incluso se acelere en el futuro, de modo que para el año 2025 las ciudades albergarán a más de dos tercios de la humanidad.

En tan solo 65 años, señala la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo (CMMA),<sup>33</sup> “la población urbana de los países en desarrollo se ha *decuplicado*”. Si en 1900 solo un 10% de la población mundial vivía en ciudades, 2007 fue el primer año de la historia en que hubo más personas viviendo en áreas urbanas que en el campo, según señala el informe de Naciones Unidas “*UN- habitat: el estado de las ciudades 2006-2007*”<sup>34</sup>, añadiendo que en 2030, si se continúa con el actual ritmo de crecimiento, de una población de unos 8100 millones de habitantes, más de 5000 vivirán en ciudades. Una tendencia confirmada así mismo por los resultados del estudio de la London School of Economics: “*The Urban Age*”,<sup>35</sup> en el que se señala que el estallido demográfico urbano es un reto sin precedentes para la sociedad del siglo XXI, previendo que el 75% de la población vivirá en un área urbana en el año 2050.

El rápido crecimiento de la población urbana se debe en la mayoría de las urbes latinoamericanas al crecimiento demográfico natural, mientras que en las africanas, a la emigración del campo a la ciudad. Dicho desplazamiento es el causante de un 40% del aumento de la población urbana motivado por las dificultades con las que se encuentran los campesinos, expectativas de una mejora de empleo, acceso a los servicios públicos básicos como la salud y la educación y mejora del nivel de vida. Además, algunas de las migraciones se deben a causas forzosas, como puede ser, catástrofes naturales o conflictos armados y emergencias complejas donde se pretende migrar en busca de seguridad física.

De este modo, una buena parte de la población de las ciudades de los países en desarrollo, e incluso determinados sectores urbanos excluidos en las ciudades de los países desarrollados, el llamado cuarto mundo, se ven afectados por problemas como la pobreza, el desempleo, las viviendas precarias (frecuentemente en asentamientos ilegales sobre los que pende la amenaza del desalojo forzoso), la falta de servicios de agua y saneamientos y el hacinamiento en condiciones de insalubridad. Se estima que en 1996 alrededor de 600 millones de habitantes de zonas urbanas no podían satisfacer de forma adecuada sus necesidades básicas de vivienda, empleo, agua y atención sanitaria.

La cooperación para el desarrollo ha implementado durante las últimas décadas programas y proyectos de desarrollo urbano en barrios pobres, una de las áreas de intervención según la agencia alemana de cooperación técnica GTZ<sup>36</sup>, es la construcción de viviendas debido a que, frecuentemente, las viviendas en los arrabales son chabolas o favelas en muy malas condiciones. La construcción de casas dignas provoca una mejora de los barrios y de la calidad de vida de las familias.

Los proyectos de desarrollo urbano suelen consistir en la autoayuda, donde cada familia contribuye en forma de trabajo no retribuido a cambio de las prestaciones proporcionadas por los gestores del proyecto. Esto permite una participación de la población local y abarata sus costes. Otro factor importante para este tipo de proyectos es la utilización de materiales de bajo coste, donde se pretende construir con materiales simples, tradicionales y con buena durabilidad; materiales autóctonos que reducen la contaminación y abaratan los costes finales de la obra garantizando una buena calidad de viviendas a coste reducido.

En el caso de Colombia, por ejemplo, podemos conocer el porcentaje de población que no ha logrado cubrir las necesidades mínimas básicas según la fuente DANE (Departamento

Administrativo Nacional de Estadística)<sup>37</sup> mediante las Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI). De esta forma, conocemos el porcentaje de población que no ha logrado satisfacer al menos 1 de las cinco necesidades definidas como básicas (vivienda inadecuada, vivienda sin servicios, hacinamiento crítico, inasistencia escolar y alta dependencia económica). Considera como pobres las personas y los hogares que tienen insatisfecha una de estas necesidades básicas y en miseria o extrema pobreza, las que tienen dos o más sin satisfacer.

Como se puede apreciar en la tabla 2 donde se especifican datos relativos a diferentes ciudades de Colombia, a fecha 30 de julio del 2010 un 27,78% de la población total nacional del país no tiene sus necesidades básicas satisfechas, lo que indica, que viven en un determinado grado de pobreza. Las poblaciones más implicadas en este porcentaje son Montería, Cartagena y Cucuta, seguida de Barranquilla, ciudad en la que nos centraremos en el presente trabajo.

Municipio	Total Censo 1993	Total Censo 2005	Total a 30 de julio 2010
<b>BOGOTA, D.C.</b>	17,28	9,16	9,2
<b>MEDELLIN</b>	16,08	12,17	12,42
<b>CALI</b>	20,64	11,01	11,01
<b>BARRANQUILLA</b>	27,76	17,69	17,72
<b>CARTAGENA</b>	33,07	26,16	26,01
<b>CUCUTA</b>	30,86	23,15	23,24
<b>BUCARAMANGA</b>	17,86	11,31	11,55
<b>IBAGUE</b>	21,97	16,2	16,23
<b>PEREIRA</b>	22,74	13,01	13,37
<b>VILLAVICENCIO</b>	25,31	16,77	17,07
<b>PASTO</b>	26,6	16,65	16,2
<b>MONTERIA</b>	49,72	44,5	44,51
<b>MANIZALES</b>	15,58	9,97	10,03
<b>TOTAL NACIONAL</b>		27,63	27,78

Tabla 3. Porcentaje de Personas en NBI (%) Necesidades Básicas Insatisfechas total  
Fuente: DANE<sup>37</sup>

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030<sup>38</sup> para el Desarrollo Sostenible entraron en vigor oficialmente el 1 de enero de 2016. Con estos nuevos Objetivos de aplicación universal, en los próximos 15 años los países deberían intensificar los esfuerzos para poner fin a la pobreza en todas sus formas. Eso incluye, entre otras cosas, disminuir la contaminación para mitigar el cambio climático, pero también asegurar una vivienda digna para personas actualmente ubicadas en asentamientos precarios. Esta mejora implica una mayor durabilidad de las viviendas. En el contexto de países en desarrollo se hace imprescindible la construcción de viviendas con el menor coste económico y medioambiental posible. En este sentido, el desarrollo de los conglomerantes de activación alcalina (o geopolímeros) puede constituir una interesante y ventajosa alternativa, ya que se puede garantizar un material de elevado desempeño mecánico y de prolongada vida útil a un bajo coste.

La fabricación de bloques de suelo estabilizado con geopolímeros preparados a partir de materiales residuales puede constituir una solución ideal para la construcción de viviendas dignas en países en desarrollo con un bajo coste tanto económico como medioambiental.

## **2. OBJETIVO DEL TRABAJO**

El objetivo del trabajo es realizar el cálculo de la Huella de Carbono de bloques de suelo estabilizado con geopolímeros preparados con un precursor a base de residuo de catalizador de craqueo catalítico del petróleo (FCC) y una disolución activadora preparada por mezcla de hidróxido sódico y ceniza de cáscara de arroz (CCA), comparando el resultado con el que proporcionaría la fabricación de bloques de suelo estabilizado con cemento Portland, y así demostrar la mejora medioambiental de la utilización del conglomerante de activación alcalina. Se realizará el cálculo referido a un contexto de países en desarrollo, concretamente para el distrito de Barranquilla (Colombia), a fin de establecer la aplicación de estos bloques para la fabricación de viviendas de bajo coste en este país.

Los resultados del cálculo se relacionarán con otras propiedades de interés en lo que se refiere a la construcción en este contexto, concretamente la resistencia mecánica del material resultante, y por otro lado, el coste económico. De esta forma, se pretende demostrar la viabilidad de estos materiales para conseguir el adecuado compromiso entre un mínimo impacto ambiental, un bajo coste y unas buenas prestaciones del mismo.

En este trabajo, nos hemos centrado en la ciudad de Barranquilla (Colombia), donde hay barrios que no reúnen todas las necesidades básicas y se encuentran en una situación bastante precaria con una gran necesidad de viviendas dignas e importante nivel de pobreza.

## **3. LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA**

Algunos de los materiales utilizados desde el inicio de la construcción eran el lodo, grumos de barro, piedras, madera y fibras naturales, que corresponden con sistemas constructivos tradicionales y dignos. La implementación de los materiales dependía del lugar en el cual se realizaba la construcción, pero siempre se utilizaba la tierra o el barro, cuya granulometría y estado de humedad determina el sistema constructivo.

Los bloques de tierra comprimida (BTC) son bloques de construcción uniformes crudos que se obtiene al mezclar tierra, arena y agua en las proporciones adecuadas, pudiendo además utilizarse materiales estabilizantes como cal, cemento o arcilla, y luego someter la mezcla a compresión en una máquina compactadora. Surgen de la unión de dos técnicas básicas en la historia de la construcción; los bloques de adobe y los muros de tierra compactada. De los bloques de adobe se recoge el molde y de los muros de tierra compactada la idea de la compactación.

Los BTC no son tóxicos, son amigables con el medio ambiente, renovables, aislantes del sonido, a prueba de fuego y de excelente acabado superficial. Se pueden utilizar para la cimentación, para paredes, techos y otros componentes estructurales, es decir, hasta en un 85% de la construcción.

Se fabrican con una máquina de compresión móvil; la tierra fértil de la superficie se aparta para que la capa de arcilla inferior se seque por el sol y el viento, y luego se pulveriza. Seguidamente, se humedece y se mezcla con arena y tras unas semanas de secado, la mezcla esta lista para introducirse en la máquina de compresión y realizar bloques uniformes.

Al no estar los bloques de tierra cocidos, conservan su propiedad de regulación de la humedad; y la humedad relativa que se mantiene en un interior de arcilla evita la formación de hongos.

Se trata de un proceso de producción que ahorra energía y tiene unas emisiones de CO<sub>2</sub> nulas; se ahorra energía porque un muro de arcilla sólido es capaz de almacenar calor y energía solar, para luego liberarla en forma de calor radiado cuando la temperatura caiga.

Con el paso del tiempo se han mejorado las técnicas constructivas con tierra, realizando estabilizaciones e implementando el uso de maquinaria y herramienta mecánica para elaborar bloques de tierra comprimida, y así obtener mayor rendimiento.

La máquina utilizada para la compactación es conocida como prensa o bloquera; la más conocida es la CINVARAM (Fig 5), que tiene una caja metálica de 16 cm de alto, 29 cm de largo y 14 cm de ancho. Se compone también de una barra metálica o palanca, la cual es accionada por un operador humano.<sup>39</sup>

Para realizar un bloque se debe preparar el material, abrir la caja e introducir la tierra estabilizada. La caja es cerrada para poner la barra metálica, se aplica la presión necesaria hasta que la barra baja. Posteriormente el bloque es sacado del molde y trasladado para el curado o secado, en el que puede durar de dos días a una semana, dependiendo del contenido de humedad que presente el bloque luego de la compactación. Los bloques presentan diversas características según su elaboración, ya que la máquina facilita el empleo de moldes; pueden ser perforados, lo cual los hace más ligeros, teniendo la posibilidad de reforzarlos; también pueden presentar curvaturas, para ser utilizados estructural y arquitectónicamente.



Fig. 6 Imágenes de una prensa CINVARAM

## 4. GEOPOLÍMERO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LOS BLOQUES

En el presente trabajo se han considerado residuos disponibles en un contexto de subdesarrollo como material precursor y activador potenciando las ventajas medioambientales y económicas de los geopolímeros para la estabilización de bloques.

### 4.1 MATERIAL PRECURSOR

Como material precursor se ha utilizado el residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC); material de base silicoaluminosa y estructura zeolítica que se usa en las refinerías de petróleo. El proceso FCC se lleva a cabo para obtener gasolina de mayor octanaje a través de la ruptura de las cadenas largas de moléculas de hidrocarburos. Cuando el catalizador de FCC pierde sus propiedades catalíticas (se convierte en "gastado"), se sustituye y el residuo de catalizador desactivado se desecha y se trata como un residuo inerte.<sup>40</sup>

Se han estado estudiando formas de utilizar este residuo llegando a conclusiones muy interesantes como la aplicación de un material alternativo de cemento suplementario para la producción de cementos mezclados consiguiendo producir morteros y hormigones de cemento Portland de alto rendimiento.<sup>41</sup>

Se ha demostrado que los geopolímeros pueden producirse a partir de precursores de aluminosilicatos, tales como cenizas volcánicas<sup>42</sup> y minerales naturales,<sup>43</sup> cuya composición es rica en sílice y alúmina presentes en el sólido (generalmente en estado amorfo). Estos precursores se disuelven fácilmente en un medio alcalino, promoviendo la posterior policondensación de la especie Al y Si para formar un producto endurecido.<sup>44</sup>

Un estudio realizado por J.J. Trocheza, R. Mejía de Gutiérrez, J. Rivera y S.A. Bernal demuestra el buen funcionamiento del FCC como material precursor para la preparación de un geopolímero<sup>45</sup>. Utiliza un catalizador de craqueo catalítico de fluido agotado (FCC) de una compañía petrolera colombiana. Antes de la activación química, el FCC se molió durante 5 horas, usando un molino de bolas. El polvo resultante tenía un peso específico de 2630 kg /m<sup>3</sup> y un diámetro medio de 16,8 µm. La distribución del tamaño de partícula fue: 10% por debajo de 2,46 µm, 50% por debajo de 13,25 µm y 90% por debajo de 37,44 µm. Su composición química, determinada por fluorescencia de rayos X, se muestra en la siguiente tabla:

Component	mass %
SiO <sub>2</sub>	48,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,91
CaO	0,22
MgO	0,13
K <sub>2</sub> O	0,09
TiO <sub>2</sub>	0,85
LOI (at 1000°C)	2,19

Tabla 4. Composición química del FCC<sup>45</sup>

En el presente trabajo, vamos a considerar un residuo de catalizador gastado FCC de Colombia como fuente de aluminosilicato en la preparación de los morteros compuestos por geopolímeros y, para que adquiera resistencia, será necesario activarlo mediante una disolución alcalina.

## 4.2 DISOLUCIÓN ACTIVADORA

Es habitual utilizar como material activador en la preparación de conglomerantes activados alcalinamente, mezclas de silicatos solubles y soluciones alcalinas. Los activadores más efectivos y utilizados son los que se componen de NaOH y de silicato de sodio.<sup>46, 47</sup>

La fabricación del silicato de sodio implica el consumo de grandes cantidades de energía, ya que son necesarias para su formación temperaturas que oscilan en torno a 1300 y 1500°C y la emisión de grandes cantidades de CO<sub>2</sub> como producto secundario debido a la calcinación del carbonato sódico (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y del cuarzo (SiO<sub>2</sub>)<sup>48, 49</sup>.

Este incremento sustancial de la energía involucrada en conglomerantes activados con soluciones de silicato, reduce considerablemente su sostenibilidad, por lo que se están investigando otras fuentes de sílice como la ceniza de cáscara de arroz (CCA) para la preparación del activador alcalino, lo que abarata los costes y reduce la contaminación medioambiental.<sup>50</sup>

La cáscara de arroz es un residuo agroindustrial que se genera en el proceso de molienda o trilla de arroz; dicho residuo se quema, aprovechando su poder calorífico para otras finalidades, obteniéndose un residuo: la ceniza de cáscara de arroz (CCA), rica en sílice en estado fundamentalmente amorfo.

Aunque la composición de ceniza de cáscara de arroz varíe según el origen de la misma, hay ciertos aspectos generales como la alta cantidad de sílice reactiva, superior al 80% por lo general y la baja cantidad de alúmina, inferior al 1%.

Podemos comprobar diferentes composiciones en la tabla mostrada a continuación:

Temperaturas / Tiempos	LOI	% Peso									
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
450 °C / 2 horas	3,49	85,88	0,47	0	1,12	0,45	1,24	1,15	4,1	0,34	0,091
850 °C / 2 horas	1,84	87,72	0,4	0	1,43	0,36	1,25	1,11	3,96	0,3	0,091

Tabla 5. Composiciones típicas de la ceniza de cáscara de arroz.<sup>51</sup>

Parece pues razonable pensar que la ceniza de cáscara de arroz pueda ser una fuente muy interesante de sílice y que, mediante ataque alcalino de la misma, se pueda obtener una solución activadora que ayude a la formación de geopolímeros.

Para el siguiente trabajo, hemos considerado una mezcla de ceniza de cáscara de arroz (CCA) e hidróxido sódico (NaOH) como activador alcalino diluido en agua; el NaOH es capaz de disolver la sílice (SiO<sub>2</sub>) contenida en la ceniza de cáscara de arroz (CCA) y proporcionar silicato solubilizado necesario para reaccionar con el material precursor (el FCC).

La mezcla de hidróxido sódico (NaOH) con el agua libera calor, el cual, puede ser utilizado para facilitar la disolución de la sílice de la ceniza de cáscara de arroz (CCA).

## **5. PARTE EXPERIMENTAL**

### **5.1 PLANTEAMIENTO DEL CÁLCULO**

Para realizar el cálculo de la Huella de Carbono, hemos considerado 3 preparados diferentes de bloques de suelo estabilizado para realizar una posterior comparativa tanto económica como ambiental. Dichos preparados son:

1. Suelo sin estabilizar  
(Tierra + agua)
2. Suelo estabilizado con cemento Portland  
(Agua + cemento Portland + tierra)
3. Suelo estabilizado con geopolímero  
(Agua + NaOH + CCA + FCC + tierra)

Esta mezcla se realiza a partir de FCC como precursor y NaOH + CCA como disolución activadora.

Analizaremos las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en cada mezcla de suelo teniendo en cuenta las emisiones por fabricación de cada uno de sus componentes, las emisiones por transporte de los mismos y las amasadas. También haremos una estimación económica de cada preparado y las compararemos para ver la relación calidad - precio en función de las prestaciones mecánicas de cada estabilizante.

Con respecto al curado, se considera un curado a temperatura ambiente, por lo tanto, las emisiones asociadas a esta etapa son iguales a cero en todos los casos.

### **5.2 MATERIALES CONSIDERADOS**

Como ya hemos mencionado anteriormente, realizaremos el cálculo en un contexto de países en desarrollo; en concreto nos situamos en Barranquilla (Colombia). Por ello, se ha supuesto que todos los materiales considerados en este trabajo se han obtenido en ciudades cercanas a Barranquilla minimizando al máximo los costes de transporte.

#### **5.2.1 TIERRA**

La tierra utilizada en cada mezcla la obtenemos de forma manual en Barranquilla, en el mismo lugar de su utilización; en lugar de ser suministrada por una empresa de áridos, lo cual habría aumentado el coste final de los bloques y la emisión de CO<sub>2</sub> provocada por el transporte de la misma.

La tierra será previamente tratada y tamizada manualmente eliminando los áridos muy gruesos que podrían dificultar la elaboración de los bloques de tierra comprimida; además, el proceso de secado será al aire.

Por todo ello, la emisión de CO<sub>2</sub> producida por la tierra en todos los casos será nula.

### **5.2.2 AGUA**

El agua utilizada proviene de la red de abastecimiento de agua potable “Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P. (Triple A)”.

Al ser suministrada en Barranquilla, se considera que no tendrá emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **5.2.3 CEMENTO**

En el caso del cemento, se ha propuesto varias opciones para ver cuál de todas sale más rentable y tiene una emisión de CO<sub>2</sub> más reducida según la distancia de la empresa que nos suministra el material a Barranquilla.

Por un lado, se estudia la opción de obtener cemento Portland Tipo I de la empresa Cementos Argos situada en Medellín.

Otra de las opciones, es obtener Cemento Gris Tipo I de la empresa Cemex Colombia situada en Bogotá.

Los datos de las emisiones de la fabricación del cemento los tomaremos del trabajo de Gjorv (2003),<sup>52</sup> que son 1 Tonelada de CO<sub>2</sub> / Tonelada cemento portland, o lo que es lo mismo, 1 kg CO<sub>2</sub>/kg de cemento.

Consideraremos un cemento de tipo CEM-I, en el que más de 95% es clínker de cemento Portland (si fuera un cemento con adiciones minerales, el valor de emisiones sería más bajo).

### **5.2.4 FCC**

El FCC utilizado como precursor de la activación alcalina se trata, como ya se comentó anteriormente, de un material silicoaluminoso de composición parecida al metacaolín, con predominio de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

El catalizador de craqueo catalítico (FCC) considerado en este estudio lo obtendremos de Barrancabermeja ya preparado; el FCC que se produce allí es fino y no es necesario molerlo ni tamizarlo.

Al ser un residuo, únicamente consideraremos las emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte, siendo nulas las emisiones por fabricación.

### **5.2.5 CCA**

La Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA) se utilizó como fuente de sílice para, junto con hidróxido sódico, trabajar como activador alcalino.

Debido a que en Barranquilla se produce arroz y la ceniza de cáscara es un residuo que es innecesario molerlo ni tamizarlo, se considerará una emisión igual a cero tanto en obtención como en transporte del mismo.

### **5.2.6 NaOH**

Para el caso del Hidróxido sódico, vamos a estudiar varias opciones para ver cuál de todas sale más rentable y tiene una emisión de CO<sub>2</sub> más reducida con respecto a las emisiones por transporte.

Una de las opciones es obtener el NaOH en la empresa “Químicos Campota” con sede en Bogotá, y la otra opción sería obtenerlo de la empresa “Quimpac de Colombia S.A.” situado en Cali.

Además, conocemos el factor de conversión para calcular las emisiones por fabricación del NaOH, obtenido del trabajo de Cristina Catalán "Huella de carbono en hormigones geopoliméricos: estudio de la contribución de la disolución activante alcalina" <sup>53</sup>; este valor es 1,12 kg de CO<sub>2</sub>/ kg de NaOH.

## **5.3 EQUIPOS UTILIZADOS**

### **5.3.1 AMASADORA**

En la fabricación de bloques se consideró la utilización de una hormigonera Ibertest modelo M100 de eje vertical con tambor giratorio y una capacidad de 100 litros:



Fig. 7 Amasadora planetaria Ibertest M100 <sup>54</sup>

Todas las amasadas se realizan de forma lenta a 930 rpm, por lo que, para los cálculos usaremos una potencia de amasada de 1,10 kW con un tiempo de amasado de 5 min. <sup>54</sup>

### 5.3.2 MÁQUINA PARA LA PREPARACIÓN DE BLOQUES

Para la fabricación de los bloques de tierra comprimida se utilizó una prensa CINVA-RAM. La prensa CINVA-RAM es una máquina sencilla, portátil, de bajo coste, para hacer bloques destinados a la construcción y baldosines usando tierra como materia prima. La prensa, hecha completamente de acero, tiene una caja molde en la cual un pistón operado a mano, comprime la tierra ligeramente húmeda, o bien, una mezcla de tierra y un estabilizante. Su funcionamiento se basa en la aplicación manual de una fuerza de presión sobre un molde lleno de tierra, para lo que se utiliza el principio físico de las palancas: a mayor longitud del brazo de palanca produce bloques de calidad superior, más densos.

La prensa fue desarrollada como una herramienta para programas de auto-ayuda, o para usarla en pequeñas construcciones individuales. Fue diseñada por Raúl Ramírez, un ingeniero, en el Centro de Habitación Inter-Americano (CINVA), de la organización de Estados Americanos en Bogotá, Colombia y puede producir un promedio de 300 a 500 bloques por día, trabajando 2 personas por 8 horas.

Esta prensa tiene algunas ventajas como:

- Los bloques son fáciles de hacer; pueden ser sacados de la prensa inmediatamente y amontonados para su proceso de curación sin necesidad de usar paleta.
- El coste del material es muy reducido ya que la mayor parte de la materia prima proviene del propio terreno.
- Se evitan costes de transporte, ya que la prensa es portátil y los bloques son hechos cerca del lugar de construcción.

- Los bloques con esta máquina pueden ser de superior calidad que los de adobe y tierra apisonada que fueron usados en construcciones que hoy tienen 100 años y aún están en buenas condiciones
- Los bloques se manejan fácilmente.
- Los bloques no necesitan ser horneados, puesto que el proceso de curación es natural.
- La prensa puede hacer varias formas de bloque para uso en arcos, bóvedas, domos y otras construcciones; poniendo insertos de forma en el interior del molde.



Fig. 8 Máquina CINVA-RAM utilizada para realizar los bloques. <sup>54</sup>

Las especificaciones técnicas de la prensa CINVA-RAM se muestran a continuación:

Peso	67 kg
Altura y ancho de la base	25cm x 41cm x 51cm
Aplicación de fuerza a la palanca	36,5 kg
Presión producida por esta fuerza	18000 kg
Fuerza de resistencia a la compresión	280-560 kg/m <sup>2</sup>
Tamaño efectivo del bloque	30cm x 15cm x 10cm
Promedio de bloques que pueden ser hechos por dos personas al día	300-500
Promedio de bloques necesarios para una casa de dos cuartos	2500

Tabla 6. Características técnicas de la prensa CINVA-RAM <sup>55</sup>

### 5.3.3 CAMIÓN DE TRANSPORTE

Según la clasificación que realiza el sistema de Planificación de Alternativas Energéticas de Largo Alcance (LEAP) y de acuerdo con lo establecido en el modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE), se considera vehículo mediano en el caso de camión, a los vehículos con un peso de 14000 a 33000 lb. En caso de Bogotá, corresponden a Busetas, que tienen un motor con cilindraje entre 3000 cc y 6000 cc.

El camión escogido para transportar los materiales al lugar donde se van a realizar los bloques en Barranquilla será un camión diesel de tamaño mediano de 15 Toneladas.

Según la base de datos de las tasas de emisión utilizados en el modelo IVE, el factor de emisión de CO<sub>2</sub> para dicho camión es 0,463 kg CO<sub>2</sub>/ km. <sup>56</sup>

CAMIÓN TRANSPORTE	
Tipo	Mediano
Combustible	Diésel
Carga máx (kg)	15000
FEC (kg CO <sub>2</sub> /km)	0,4632

### 5.4 DOSIFICACIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Los datos referentes a las dosificaciones de los materiales se consideran los obtenidos en el Proyecto Final de Carrera “Estudio para la estabilización de bloques de tierra mediante la utilización de geopolímeros a partir de residuos. Aplicación para viviendas de bajo coste en Barranquilla (Colombia)” realizado por Marina Alamán Burguet<sup>54</sup>, donde se realizaron los ensayos correspondientes que determinaron las dosificaciones óptimas que vamos a utilizar en nuestro cálculo.

#### 5.4.1 BLOQUES DE SUELO ESTABILIZADO CON GEOPOLÍMERO

Se hicieron los cálculos correspondientes para 21 bloques aproximadamente. Para una cantidad de 157,5 kg de suelo con el 1,7% de humedad la dosificación del activador fue la siguiente:

- Agua: 20 L
- NaOH: 6,81 kg
- CCA: 6,62 kg

Una vez preparadas las cantidades correspondientes, se procede a la elaboración de la solución activadora.

Recordemos que el geopolímero se obtiene mediante la reacción química de un precursor y un activador; en este caso utilizaremos el residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC) como precursor y la mezcla de NaOH, ceniza de cáscara de arroz y agua como disolución activadora.

El procedimiento llevado a cabo para la preparación de la mezcla es el siguiente:

- Primero se mezcla el NaOH y la ceniza de cáscara de arroz (CCA) en seco.
- A continuación se añade agua y se agita la mezcla manualmente en repetidas ocasiones para homogeneizar la preparación, ya que, la agitación favorece la disolución de la sílice amorfa de la CCA evitando que se decante.
- Después se coloca la disolución activadora en un recipiente aislado térmicamente del exterior durante el tiempo necesario para mantener el calor liberado por la reacción anterior.

Por razones económicas y teniendo en cuenta que este trabajo se hace en un entorno en desarrollo y, por lo tanto, con materiales de bajo coste, consideraremos un electrodoméstico usado de origen residual (nevera o lavavajillas) como recipiente aislado térmicamente donde mantendremos la disolución activadora por unos 2 días.

Mediante este sistema se aprovecha el calor de hidratación del NaOH, que eleva la temperatura de la mezcla hasta 90°C facilitando la disolución de la sílice y la formación del silicato sódico.

Una vez preparada la disolución activadora, se pesan 15,75 kg de FCC que actuarán como precursor para añadir a la mezcla.

Teniendo todos los materiales ya preparados, se procede al amasado de los bloques. Hay que tener en cuenta que la capacidad de la amasadora es de 100 L, por lo que, se deben realizar 2 amasadas.

Con todo esto, se obtiene que la dosificación final de los materiales para cada amasada es la siguiente:

<b>DOSIFICACIÓN MEZCLA GEOPOLÍMERO (kg)</b>	
Agua	10
NaOH	3,4
CCA	3,31
FCC	7,88
Tierra	78,75
<b>TOTAL</b>	<b>103,34</b>

Tabla 7. Dosificación del geopolímero por amasada

El procedimiento de amasado se realiza de la siguiente forma:

- a) Se adicionan 78,75 kg de suelo y se homogeneiza la mezcla haciendo funcionar la amasadora
- b) Posteriormente se adicionan poco a poco 7,88 kg de FCC usado, manteniendo la amasadora en marcha hasta una completa homogeneización de la muestra.
- c) Finalmente se adiciona el activador alcalino y se amasa durante unos minutos la mezcla hasta una completa homogeneización.

d) Ya tenemos la mezcla homogénea preparada para realizar los bloques.



Fig. 9 Proceso de amasado de los bloques estabilizados con geopolímero.<sup>54</sup>

#### 5.4.2 BLOQUES DE SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO PORTLAND

En el caso de los bloques estabilizados con cemento, el procedimiento es similar al utilizado en los bloques estabilizados con geopolímero.

Para la realización del amasado, se utilizó la misma amasadora planetaria con capacidad de 100 L que en los bloques estabilizados con geopolímero. Por este motivo también se decidió realizar el amasado en dos tandas.

Las dosificaciones finales de los materiales para cada amasada son las siguientes:

DOSIFICACIÓN MEZCLA CON CEMENTO PORTLAND (kg)	
Agua	5,625
Cemento	7,88
Tierra	81,45
<b>TOTAL</b>	<b>94,955</b>

Tabla 8. Dosificación del cemento por amasada

El procedimiento de amasado se detalla a continuación:

- a) En primer lugar se homogeneiza el suelo
- b) Se añade el cemento y se mezcla bien con el suelo en seco

c) Finalmente se añade el agua, amasando durante varios minutos hasta una completa homogeneización.

d) Ya tenemos la mezcla homogénea preparada para realizar los bloques.



Fig. 10 Proceso de amasado de los bloques estabilizados con cemento.<sup>54</sup>

### 5.4.3 BLOQUES DE SUELO SIN ESTABILIZAR

Para los bloques de suelo sin estabilizar, su procedimiento es similar a los 2 anteriores pero en este caso, únicamente mezclamos tierra y agua. Las dosificaciones finales de los materiales para cada amasada son las siguientes:

DOSIFICACIÓN MEZCLA CON TIERRA (kg)	
Agua	8,47
Tierra	100
<b>TOTAL</b>	<b>108,47</b>

Tabla 9. Dosificación de la tierra por amasada

En este caso, el proceso de amasado sería manual.

### 5.5 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

Los cálculos que se van a realizar en el presente trabajo, corresponden a 3 preparados diferentes.

Como las mezclas se realizan en una amasadora planetaria de capacidad 100 L, vamos a realizar 2 amasadas.

Los datos proporcionados de cada preparado se dan por amasada y se pueden observar en las siguientes tablas:

### Preparado 1.

DOSIFICACIÓN MEZCLA GEOPOLÍMERO (kg)	
Agua	10
NaOH	3,4
CCA	3,31
FCC	7,88
Tierra	78,75
<b>TOTAL</b>	<b>103,34</b>

### Preparado 2.

DOSIFICACIÓN MEZCLA CON CEMENTO PORTLAND (kg)	
Agua	5,625
Cemento	7,88
Tierra	81,45
<b>TOTAL</b>	<b>94,955</b>

### Preparado 3.

DOSIFICACIÓN MEZCLA CON TIERRA (kg)	
Agua	8,47
Tierra	100
<b>TOTAL</b>	<b>108,47</b>

Para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> hemos usado la siguiente ecuación (1) del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) para cada material:<sup>57</sup>

$$\text{Emisiones} = \text{AD} * \text{FEC} \quad (1)$$

Dónde - AD: datos sobre la actividad humana  
- FEC: Factor de Emisión de Carbono

Vamos a desglosar los cálculos por partes y haremos un resumen global comparando los 3 preparados y analizando las características destacadas de cada uno de ellos.

Estas partes se dividen en:

- ✓ Cálculo de emisiones por fabricación, donde se calculan las emisiones que provienen de la producción de cada material. Las obtendremos por separado de cada una de ellas y calcularemos el valor global de cada preparado.
- ✓ Cálculo de emisiones por transporte, en este apartado calculamos las emisiones producidas por el transporte del material al lugar donde vamos a realizar los bloques, que en nuestro caso es en Barranquilla. Para ello, debemos conocer la distancia en km de la empresa que nos suministra cada material a Barranquilla. En algunos casos,

consideramos que el material lo podemos obtener de 2 empresas distintas, en este caso, consideramos las dos opciones y estudiamos cuál sería más favorable.

- ✓ Cálculo de emisiones por amasado, donde se obtiene la emisión que provoca la amasadora al mezclar los materiales. Ésta depende del tiempo de amasado y la potencia principalmente.

Los resultados finales los obtendremos en kg de CO<sub>2</sub> por amasada, por kg totales, por bloque y por m<sup>3</sup> y MPa.

## 5.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- ✓ Cálculo de emisiones por fabricación

Siguiendo la fórmula (1), multiplicaremos el factor de emisión de carbono (FEC) de cada material por los kg de material empleados.

Tanto el agua como la tierra son materias primas que obtenemos directamente y no necesitan tratamiento de ningún tipo, por lo que, las emisiones por fabricación de ambas son nulas.

Los resultados son los siguientes:

### Preparado 1. Geopolímero

Agua	
kg empleados	10 kg
FEC	0 kg CO <sub>2</sub> / kg Agua
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>0 kg CO<sub>2</sub></b>

NaOH	
kg empleados	3,4 kg
FEC	1,12 kg CO <sub>2</sub> / kg NaOH
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>3,808 kg CO<sub>2</sub></b>

CCA	
kg empleados	3,31 kg
FEC	0 kg CO <sub>2</sub> / kg CCA
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>0 kg CO<sub>2</sub></b>

FCC	
kg empleados	7,88 kg
FEC	0 kg CO <sub>2</sub> / kg FCC
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>0 kg CO<sub>2</sub></b>

<b>Tierra</b>	
kg empleados	78,75 kg
FEC	0 kg CO <sub>2</sub> / kg Tierra
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>0 kg CO<sub>2</sub></b>

Tanto la CCA como el FCC son residuos, por tanto, las emisiones asociadas a estos materiales son iguales a 0. De esta forma, sumando todas las contribuciones en la emisión de CO<sub>2</sub> por la fabricación de estos materiales obtenemos un valor de 3,808 kg de CO<sub>2</sub>, que será debida únicamente a la producción de NaOH, ya que el resto de materiales o bien son materias primas obtenidas directamente (agua y tierra), o bien son materiales residuales como (CCA y FCC), y por tanto en ambos casos, no hay contribución a las emisiones totales de CO<sub>2</sub>.

### **Preparado 2. Cemento Portland**

<b>Agua</b>	
kg empleados	5,625 kg
FEC	0 kg CO <sub>2</sub> / kg Agua
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>0 kg CO<sub>2</sub></b>

<b>Cemento</b>	
kg empleados	7,88 kg
FEC	1 kg CO <sub>2</sub> / Cemento
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>7,88 kg CO<sub>2</sub></b>

<b>Tierra</b>	
kg empleados	81,45 kg
FEC	0 kg CO <sub>2</sub> / kg Tierra
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>0 kg CO<sub>2</sub></b>

Con todos estos datos, podemos obtener que los bloques de suelo estabilizado con cemento tienen asociadas unas emisiones de CO<sub>2</sub> por fabricación correspondiente de 7,88 kg de CO<sub>2</sub> debidas únicamente al cemento Portland.

### **Preparado 3. Tierra**

<b>Agua</b>	
kg empleados	8,47 kg
FEC	0 kg CO <sub>2</sub> / kg Agua
<b>Emisiones por fabricación</b>	<b>0 kg CO<sub>2</sub></b>

Tierra	
kg empleados	100 kg
FEC	0 kg CO <sub>2</sub> / kg Tierra
Emisiones por fabricación	<b>0 kg CO<sub>2</sub></b>

En el caso de los bloques de suelo estabilizado con tierra, las emisiones de CO<sub>2</sub> por su fabricación serían nulas.

### ✓ Cálculo de emisiones por transporte

Los vehículos utilizados en el transporte de los productos pueden variar ligeramente, pero nosotros hemos considerado que llegan al lugar donde se realizan los bloques en camiones medianos aunque desconocemos la marca y modelo de los mismos.

En el cálculo asociado al transporte, deberemos tener en cuenta la carga neta que puede transportar este vehículo, para así poder calcular posteriormente la parte proporcional de emisiones asociadas a la cantidad de producto que nosotros utilizamos en la preparación de nuestras mezclas. La incorporación de los datos de las emisiones asociadas al transporte de los productos desde sus lugares de origen hasta el lugar donde se va a realizar la mezcla implica conocer la ubicación de estos y los km que hay de distancia.

En la tabla siguiente podemos ver todos los datos del camión que hemos seleccionado para el transporte de los materiales:

CAMIÓN TRANSPORTE	
Tipo	Mediano
Combustible	Diésel
Carga máx (kg)	15000
FEC (kg CO <sub>2</sub> /km)	0,4632

Es importante tener en cuenta que, según la norma PAS2050 de Verificación de la Huella de Carbono<sup>58</sup>, al considerar el transporte en el análisis del ciclo de vida de los productos, hay que contar la ida y la vuelta del vehículo. Por tanto, todas estas distancias tendrán que multiplicarse por 2 a la hora de hacer los cálculos.

Por tanto, el cálculo de las emisiones por transporte de cada material queda de la siguiente manera:

$$\text{Emisión por transporte} = \frac{\text{Distancia del material (km)} * 2 * \text{kg del material} * \text{FEC camión}}{\text{Carga máx (kg)}} \quad (2)$$

Los resultados son los siguientes:

## Preparado 1. Geopolímero

En el caso del NaOH, hay 2 empresas que nos pueden proporcionar dicho material, por lo tanto dividiremos los cálculos en 2 apartados:

- A) Químicos Campota con sede en Bogotá
- B) Quimpac de Colombia S.A. situado en Cali.

De esta forma, estudiaremos ambas opciones.

NaOH		
kg empleados		3,4 kg
Carga máx (kg)		15000
FEC (kg CO <sub>2</sub> /km)		0,4632 kg CO <sub>2</sub>
Distancia Cali - Barranquilla		1253 km
Distancia Bogotá - Barranquilla		1003 km
Emisiones por transporte	A) Cali - Barranquilla	0,263109952 kg CO <sub>2</sub>
	B) Bogotá - Barranquilla	0,210613952 kg CO <sub>2</sub>

Según los cálculos, si utilizamos el NaOH de Químicos Campota situado en Bogotá, produciremos menor cantidad de emisiones que si utilizamos el de la empresa situada en Cali (aunque no es una diferencia notable), produciéndose 0,2106 kg de CO<sub>2</sub> por transporte desde Bogotá.

FCC	
kg empleados	7,88 kg
Carga máx (kg)	15000
FEC (kg CO <sub>2</sub> /km)	0,4632
Distancia Barracabermeja - Barranquilla	606 km
<b>Emisiones por transporte</b>	<b>0,2949212 kg CO<sub>2</sub></b>

Ya que en la ciudad de Barranquilla se produce arroz, podemos obtener de allí mismo nuestro residuo de CCA. La tierra utilizada, también la podemos obtener en la misma ciudad, reduciendo a 0 las emisiones por transporte asociadas a dichos materiales.

Con todos estos datos, podemos obtener que los bloques de suelo estabilizado con geopolímero, tienen unas emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte correspondientes a:

Opción A), obteniendo el NaOH desde Cali = 0,558031245 kg de CO<sub>2</sub>

Opción B), obteniendo el NaOH desde Bogotá = 0,505535245 kg de CO<sub>2</sub>

## Preparado 2. Cemento Portland

En el caso del cemento, hay 2 empresas que nos pueden proporcionar dicho material, por tanto dividiremos los cálculos en 2 apartados:

- A) Cementos Argos con sede en Medellín
- B) Cemex Colombia situado en Bogotá.

Así, estudiaremos ambas opciones.

Cemento		
kg empleados		7,88 kg
Carga máx (kg)		15000
FEC (kg CO <sub>2</sub> /km)		0,4632 kg CO <sub>2</sub>
Distancia Medellín - Barranquilla		705 km
Distancia Bogotá - Barranquilla		1003 km
Emisiones por transporte	A) Medellín - Barranquilla	0,343101504 kg CO <sub>2</sub>
	B) Bogotá - Barranquilla	0,488128806 kg CO <sub>2</sub>

Según los cálculos, si utilizamos el Cemento de la empresa Cementos Argos situado en Medellín, se producirá una cantidad de emisiones más reducida que si utilizamos el de la empresa situada en Bogotá, produciéndose 0,3431 kg de CO<sub>2</sub> por transporte desde Medellín.

Con todos estos datos, podemos obtener que los bloques de suelo estabilizado con cemento tienen unas emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte correspondientes a:

Opción A), obteniendo el cemento desde Medellín = 0,343101504 kg de CO<sub>2</sub>

Opción B), obteniendo el cemento desde Bogotá = 0,488128806 kg de CO<sub>2</sub>

### Preparado 3. Tierra

En el caso de los bloques de suelo estabilizado con tierra, la emisión de CO<sub>2</sub> por transporte, al igual que por fabricación, sería nula.

#### ✓ Cálculo de emisiones por cada amasada

Para este apartado, hemos considerado dos posibilidades: que los materiales se amasan manualmente o que se mezclan en la misma amasadora; es por ello que las emisiones de CO<sub>2</sub> por amasada serán las mismas para todas las mezclas.

Conocemos los datos de la amasadora, cada amasada tiene una duración de 5 min a una potencia de 1,1 kW. Debido a que la amasadora tiene una capacidad de 100 L se realizarán 2 amasadas.

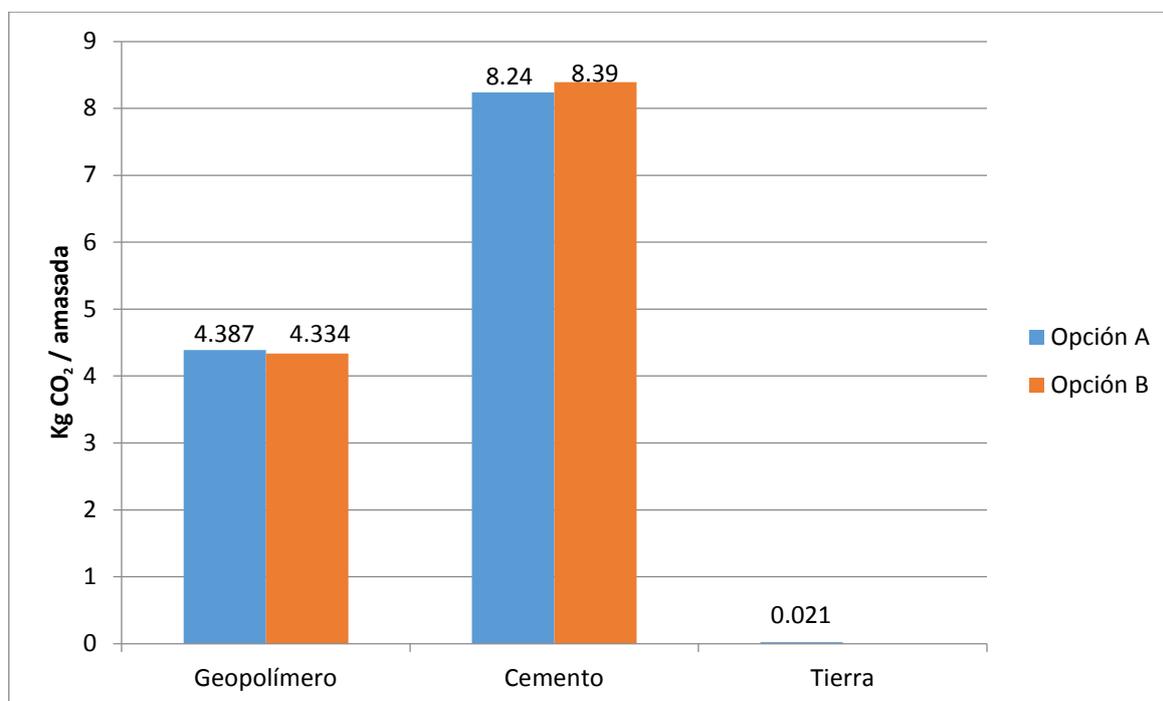
Para calcular las emisiones producidas, multiplicaremos el tiempo en horas por la potencia y por el FEC de la amasadora, el resultado podemos verlo en el siguiente cuadro:

Amasado	
FEC	0,23 kg CO <sub>2</sub> /kWh
Tiempo	5 min
Potencia	1,1 kW
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub></b>	<b>0,021083333 kg CO<sub>2</sub></b>

✓ **Resumen**

A continuación, podemos ver un cuadro resumen con todos los resultados obtenidos anteriormente:

<b>Preparado 1. Geopolímeros</b>	Amasado manual	Emisiones por fabricación	3,808 kg de CO <sub>2</sub>	<b>Total</b> A) 4,366 kg de CO <sub>2</sub> B) 4,313 kg de CO <sub>2</sub>
		Emisiones por transporte	A) 0,5580 kg de CO <sub>2</sub> B) 0,5055 kg de CO <sub>2</sub>	
	Con amasadora			<b>Total</b> A) 4,387 kg de CO <sub>2</sub> B) 4,334 kg de CO <sub>2</sub>
<b>Preparado 2. Cemento</b>	Amasado manual	Emisiones por fabricación	7,88 kg de CO <sub>2</sub>	<b>Total</b> A) 8,223 kg de CO <sub>2</sub> B) 8,368 kg de CO <sub>2</sub>
		Emisiones por transporte	A) 0,3431 kg de CO <sub>2</sub> B) 0,4881 kg de CO <sub>2</sub>	
	Con amasadora			<b>Total</b> A) 8,244 kg de CO <sub>2</sub> B) 8,389 kg de CO <sub>2</sub>
<b>Preparado 3. Tierra</b>	Amasado manual	Emisiones por fabricación	0 kg de CO <sub>2</sub>	<b>Total 0 kg de CO<sub>2</sub></b>
		Emisiones por transporte	0 kg de CO <sub>2</sub>	
	Con amasadora			<b>Total 0,0210 kg de CO<sub>2</sub></b>



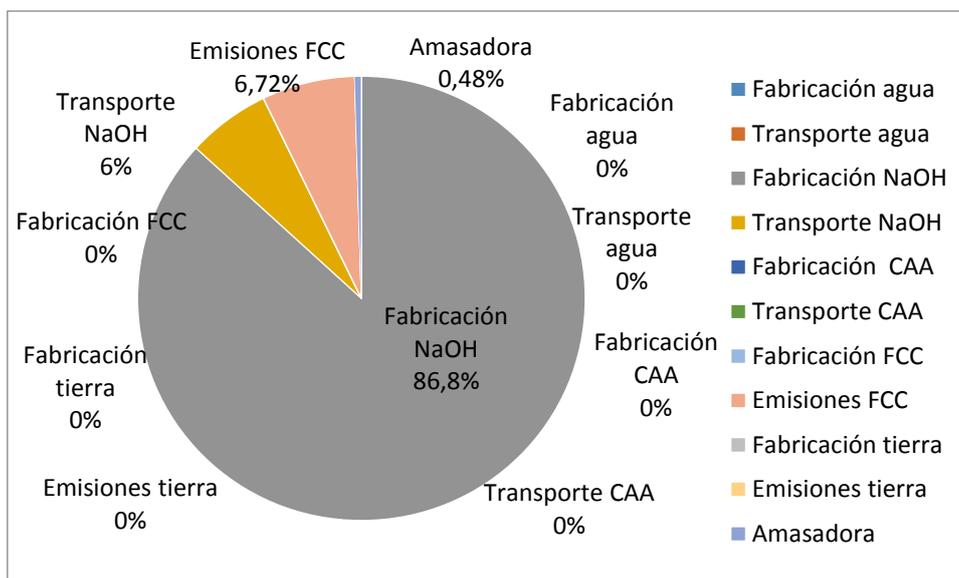
Gráfica 1. Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> por amasada (considerando amasado mecánico)

En el cuadro resumen, se puede apreciar con claridad que las emisiones de CO<sub>2</sub> más elevadas, son las producidas por la fabricación del material en comparación con las emisiones por transporte; además, no hay una diferencia significativa a la hora de realizar un amasado manual o con amasadora, ya que ésta última apenas produce emisiones considerables.

Tanto en el cuadro resumen como en la gráfica 1, podemos ver que la procedencia del material, no tiene una gran importancia en las emisiones finales del preparado.

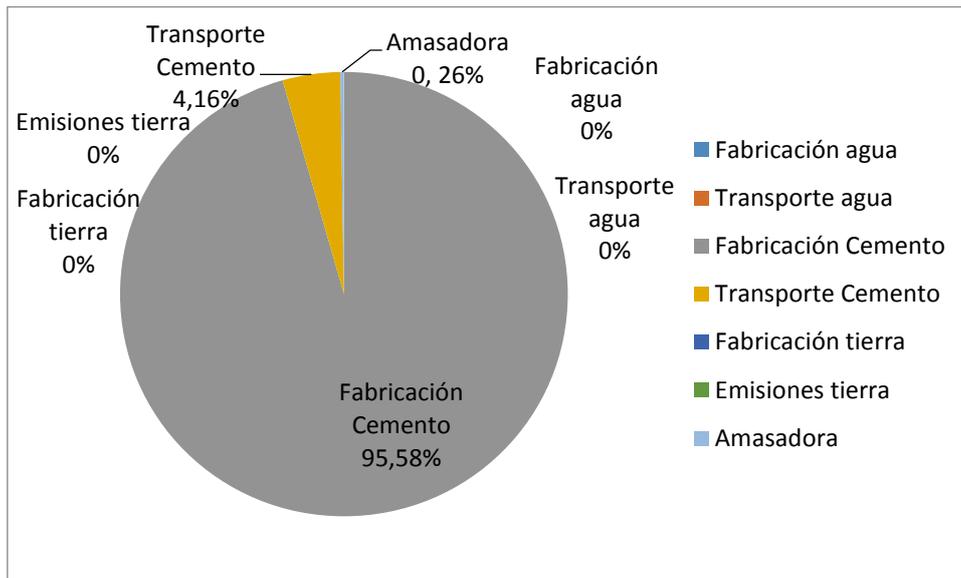
Por último, es destacable la gran diferencia que hay entre las emisiones totales producidas por el preparado de geopolímero y el de cemento Portland, siendo las de este último aproximadamente el doble que las generadas por el primero, como se aprecia en la gráfica 1. Esto quiere decir, que si utilizamos bloques estabilizados con geopolímero en lugar de cemento Portland, podemos reducir hasta la mitad las emisiones de CO<sub>2</sub>, favoreciendo a gran escala la sostenibilidad del medioambiente.

Debido a que el objetivo del estudio es realizar la comparativa ambiental entre el preparado con geopolímero y el preparado con cemento Portland, vamos a analizar el grado de influencia que tiene cada etapa (fabricación de los materiales, transporte y amasada) en ambos preparados. Para compararlos, hemos seleccionado las opciones donde las emisiones son más reducidas y se ha representado un gráfico para cada preparado, indicando el porcentaje de emisiones de cada proceso.



Gráfica 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> con geopolímero (opción B)

Como podemos ver en la gráfica 2, en el caso del geopolímero, la fabricación del NaOH es el proceso que más emisiones produce a la atmósfera, exactamente un 86,8% del total. Por tanto, prácticamente todo el peso recae en la producción de NaOH. El resto de procesos tienen un porcentaje bastante reducido que va del 0 al 7%.



Gráfica 3. Emisiones de CO<sub>2</sub> con cemento (opción A)

En el caso de la gráfica 3, se aprecia claramente que el cemento Portland es el material más contaminante. Sus emisiones asociadas están en torno al 95,5% del total y su transporte tiene un porcentaje de 4,16%. Prácticamente, es el material único que emite CO<sub>2</sub> en este preparado, lo que nos hace pensar que, si sustituimos este material por otro menos contaminante, reducimos considerablemente las emisiones de CO<sub>2</sub>.

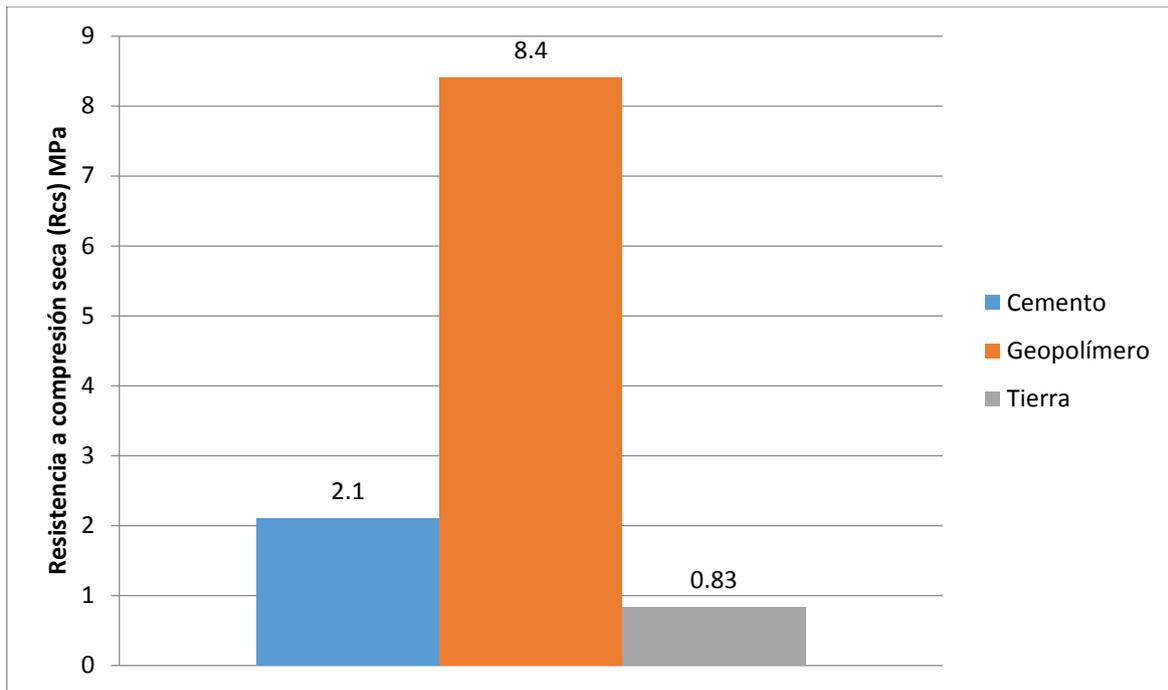
A continuación, hemos relacionado estos resultados con otras propiedades de interés para hacer un estudio más completo y demostrar la viabilidad de estos materiales para conseguir el adecuado compromiso entre bajo coste y buenas prestaciones del mismo.

Como ya sabemos, se han realizado los cálculos para 21 bloques que son 157,5 kg de suelo. Con estos datos podemos calcular la masa y el volumen del bloque:

Masa = 7,5 kg

Volumen = 4,725 m<sup>3</sup>

Además, conocemos la Resistencia a compresión seca (Rcs) de los bloques de cada preparado, que se representan en la gráfica 4:



Gráfica 4. Resistencia a compresión (MPa) de cada preparado<sup>54</sup>

En referencia a la resistencia a compresión seca, según la normativa colombiana NTC5324 centrada exclusivamente en bloques de suelo cemento (BSC), se distinguen tres clases: BSC20 (=2 MPa), BSC40 (=4 MPa) y BSC60 (=6 MPa). Así pues, los bloques de suelo comprimido estabilizados con cemento Pórtland cumplirían los estándares requeridos para BSC20 y los bloques estabilizados con geopolímero, estarían por encima de las exigencias requeridas para BSC60, la clase que requiere mayor resistencia.<sup>54</sup>

Podemos ver en la gráfica 4, que el geopolímero tiene una gran resistencia a compresión seca, lo que nos indica que tiene muy buenas prestaciones mecánicas. Si nos fijamos en los valores, podemos observar cómo la resistencia a compresión seca del geopolímero es aproximadamente 4 veces superior al del cemento. Aunque ambos preparados son aptos para la estabilización de bloques, el geopolímero es, con diferencia, el más resistente.

Con los datos obtenidos anteriormente, vamos a calcular para cada preparado:

- kg CO<sub>2</sub> por kg de material: dividiendo los kg de CO<sub>2</sub> por amasada con amasadora entre los kg totales de material utilizado para la mezcla.
- kg CO<sub>2</sub> por bloques: multiplicando los kg CO<sub>2</sub> por kg de material por la masa del bloque (7,5 kg).
- kg CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> y MPa (secos): se calcula dividiendo los kg CO<sub>2</sub> por bloques, entre la multiplicación del volumen del bloque (4,725 m<sup>3</sup>) por la resistencia a compresión seca del preparado.

Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

### Preparado 1. Geopolímero

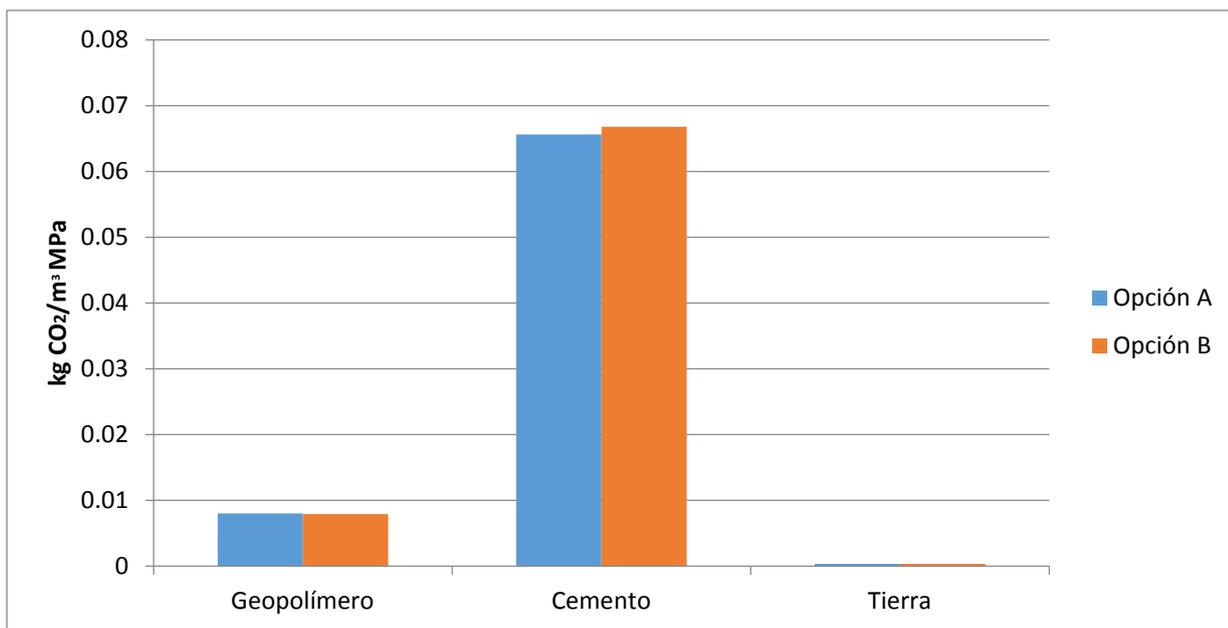
RESULTADOS		
kg CO <sub>2</sub> por amasada (manual)	A)	4,366031245
	B)	4,313535245
kg CO <sub>2</sub> por amasada (con amasadora)	A)	4,387114578
	B)	4,334618578
kg CO <sub>2</sub> por kg	A)	0,042453209
	B)	0,041945216
kg CO <sub>2</sub> por bloque	A)	0,318399065
	B)	0,314589117
kg CO <sub>2</sub> por m <sup>3</sup> y MPa (seco)	A)	0,008022148
	B)	0,007926756

### Preparado 2. Cemento

RESULTADOS		
kg CO <sub>2</sub> por amasada (manual)	A)	8,223101504
	B)	8,223101504
kg CO <sub>2</sub> por amasada (con amasadora)	A)	8,244184837
	B)	8,38921214
kg CO <sub>2</sub> por kg	A)	0,086822019
	B)	0,088349346
kg CO <sub>2</sub> por bloque	A)	0,651165144
	B)	0,662620094
kg CO <sub>2</sub> por m <sup>3</sup> y MPa (seco)	A)	0,065625109
	B)	0,066779551

### Preparado 3. Tierra

RESULTADOS		
kg CO <sub>2</sub> por amasada (manual)	A)	<b>0</b>
	B)	<b>0</b>
kg CO <sub>2</sub> por amasada (con amasadora)	A)	0,021083333
	B)	0,021083333
kg CO <sub>2</sub> por kg	A)	0,00019437
	B)	0,00019437
kg CO <sub>2</sub> por bloque	A)	0,001457776
	B)	0,001457776
kg CO <sub>2</sub> por m <sup>3</sup> y MPa (seco)	A)	0,000371716
	B)	0,000371716



Gráfica 5. Comparación de kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> MPa emitidos por cada tipo de bloques.

Aunque el preparado con tierra tenga emisiones de CO<sub>2</sub> prácticamente nulas, la resistencia a compresión es muy reducida. Por tanto, para la realización de viviendas en la ciudad de Barranquilla, podemos considerar viables los bloques de suelo estabilizado con geopolímero y con cemento Portland.

En la gráfica 5 podemos ver claramente cómo la relación entre kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> MPa del geopolímero es mucho más reducida que la del cemento Portland, lo que nos indica que el geopolímero tiene unas emisiones de CO<sub>2</sub> menores que el cemento para la misma resistencia adquirida por los bloques. Por tanto, el preparado con geopolímero, tiene un mejor comportamiento medioambiental y mecánico.

Para finalizar, se ha realizado una estimación del coste económico de cada preparado, calculando el precio por material y transporte del mismo. Se presentan los resultados en euros por kg de material total del preparado y por la resistencia mecánica del mismo.

En los cálculos por transporte, hemos considerado una estimación promedio de las distancias de donde provienen los materiales que podían suministrar varias empresas.

Es importante añadir que, en el caso del NaOH, no nos ha sido posible encontrar el precio al por mayor de una suministradora de Colombia, por lo que hemos tenido que utilizar un precio considerando que este material ha sido adquirido a un minorista, lo cuál no sería la situación real para los consumidores de una población de bajo estatus económico de Barranquilla. Esto se ha traducido en que el resultado obtenido para el precio total de los bloques de tierra estabilizada con geopolímero haya sido más elevado del que supondría el caso real, que sería más reducido.

Todos los datos utilizados en estos cálculos, son datos actuales de Colombia proporcionados amablemente por el profesor Silvio Delvasto Arjona, residente en dicho país.

PRECIOS (€)	
Agua	0,427 € / m <sup>3</sup>
NaOH	0,7488 € / kg
Cemento	0,1768 € / kg
Diesel	0,62 € / L

Tabla 10. Precios de los materiales considerados en el cálculo.

✓ Cálculo económico de los materiales

**Preparado 1. Geopolímero**

- Agua. Se calcula multiplicando los kg de agua (tabla 7) por el precio del agua (tabla 10) y dividiendo por 1000 kg que pesa un m<sup>3</sup> :

$$\frac{10 \text{ kg} * 0,425 \text{ €/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,0043\text{€ por amasada} \quad (3)$$

- NaOH. Se calcula multiplicando los kg de NaOH (tabla 7) por el precio del NaOH (tabla 10):

$$3,4 \text{ kg} * 0,7488 \text{ € / kg} = 2,55 \text{ € por amasada} \quad (4)$$

Sumando el precio de ambos materiales, obtenemos 2,5543 € / amasada.

Para obtener el resultado por kg, dividimos los 2,5543 € por amasada entre 103,34 kg totales de materiales (tabla 7), obteniendo **0,0247 € / kg de material total de geopolímero.**

**Preparado 2. Cemento**

- Agua. Se calcula multiplicando los kg de agua (tabla 8) por el precio del agua (tabla 10) y dividiendo por 1000 kg que pesa un m<sup>3</sup> :

$$\frac{5,625 \text{ kg} * 0,425 \text{ €/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,0024 \text{ € por amasada} \quad (5)$$

- Cemento. Se calcula multiplicando los kg de NaOH (tabla 8) por el precio del cemento (tabla 10):

$$7,88 \text{ kg} * 0,1768 \text{ € / kg} = 1,3932 \text{ € por amasada} \quad (6)$$

Sumando el precio de ambos materiales, obtenemos 1,3955 € / amasada.

Para obtener el resultado por kg dividimos los 1,3955 € por amasada, entre 94,955 kg totales de materiales (tabla 7), obteniendo **0,0147 € / kg de material total de cemento.**

✓ **Cálculo económico del transporte**

Para los cálculos referidos al transporte, hemos considerado que el consumo de nuestro camión es de 32 L por cada 100 km recorridos. Hay que tener en cuenta que hay que multiplicar por 2 los km, ya que el camión debe hacer un trayecto de ida y otro de vuelta.

**Preparado 1. Geopolímero**

- NaOH. Hacemos una estimación promedio desde Barranquilla hasta Cali/ Bogotá considerando una distancia de 1100 km. Considerando que el camión consume 32 L por cada 100 km recorridos, calculamos cuanto consume en los 1100 km que recorre para obtener el NaOH con una relación de proporcionalidad:

$$\frac{1100 \text{ km} * 32\text{L}}{100 \text{ km}} = 352 \text{ L} \quad (7)$$

Como hemos dicho anteriormente, hay que considerar que el camión realiza el trayecto de ida y vuelta, por tanto multiplicamos el resultado obtenido en la ecuación (7) por 2, siendo el resultado 704 L.

Teniendo en cuenta la cantidad de material que lleva nuestro camión y su carga máxima obtenemos:

$$\frac{704 \text{ L} * 3,4\text{kg}}{15000 \text{ kg}} = 0,16 \text{ L} \quad (8)$$

Para saber el consumo en euros, multiplicamos los 0,16 L obtenidos en la ecuación (8) por 0,62 € que vale el litro, obtenemos que el precio por amasada es 0,1 €/L.

Para obtener el resultado por kg, dividimos los 0,1 € / L entre 103,34 kg totales de materiales (tabla 7), **obteniendo 0,000968 € / kg por transportar el NaOH.**

- FCC. Este material lo obtenemos desde Barrancabermeja, sabiendo que la distancia a Barranquilla es de 600 km, realizamos los cálculos de la misma forma que hemos hecho en el caso del NaOH. Considerando que el camión consume 32L por cada 100 km recorridos, calculamos cuanto consume en los 600 km que recorre para obtener el FCC con una relación de proporcionalidad:

$$\frac{600 \text{ km} * 32\text{L}}{100 \text{ km}} = 190 \text{ L} \quad (9)$$

Debido que el camión realiza el trayecto de ida y vuelta, multiplicamos el resultado obtenido en la ecuación (9) por 2, siendo el resultado 384 L.

Teniendo en cuenta la cantidad de material necesario para la preparación de los bloques y la carga máxima que lleva nuestro camión, calculamos el consumo de combustible que le corresponde a dicha cantidad, de manera que obtenemos: (10)

$$\frac{384 \text{ L} * 7,88\text{kg}}{15000 \text{ kg}} = 0,2 \text{ L}$$

Para saber el consumo en euros, multiplicamos los 0,2 L obtenidos en la ecuación (10) por 0,62 € que vale el litro de combustible diesel del camión, obtenemos que el precio por amasada es 0,125 €/L.

Para obtener el resultado por kg, dividimos los 0,125 € / L entre 103,34 kg totales de materiales (tabla 7), **obteniendo 0,00121 € / kg por transportar el FCC.**

## Preparado 2. Cemento

- Cemento. Hacemos una estimación promedio desde Barranquilla hasta Medellín/ Bogotá considerando una distancia de 850 km. Considerando que el camión consume 32 L por cada 100 km recorridos, calculamos cuanto consume en los 850 km que recorre para obtener el cemento con una relación de proporcionalidad:

$$\frac{850 \text{ km} * 32\text{L}}{100 \text{ km}} = 272 \text{ L} \quad (11)$$

Como hemos dicho anteriormente, hay que considerar que el camión realiza el trayecto de ida y vuelta, por tanto, multiplicamos el resultado obtenido en la ecuación (7) por 2, siendo el resultado 544 L.

Teniendo en cuenta la cantidad de material necesario para la preparación de los bloques y la carga máxima que lleva nuestro camión, calculamos el consumo de combustible que le corresponde a dicha cantidad, de manera que obtenemos: (10)

$$\frac{544 \text{ L} * 7,88\text{kg}}{15000 \text{ kg}} = 0,2858 \text{ L}$$

Para saber el consumo en euros, multiplicamos los 0,2858 L obtenidos en la ecuación (12) por 0,62 € que vale el litro, obtenemos que el precio por amasada es 0,177 €/L.

Para obtener el resultado por kg, dividimos los 0,177 € / L entre 94,955 kg totales de materiales (tabla 7), **obteniendo 0,001864 € / kg por transportar el cemento.**

✓ **Cálculo económico total de cada preparado**

Una vez ya tenemos todos los precios por kg de material transportado, los sumamos para poder calcular el precio en función de las prestaciones mecánicas de cada material y comparar ambos resultados:

Geopolímero	
<b>Material</b>	0,0247 € / kg material total
<b>Transporte</b>	0,00968 € / kg material NaOH 0,00121 € / kg material FCC
<b>Total</b>	<b>0,0269 € / kg</b>

Cemento	
<b>Material</b>	0,0147 € / kg material total
<b>Transporte</b>	0,001864 € / kg material cemento
<b>Total</b>	<b>0,0166 € / kg</b>

Para obtener los precios en € / m<sup>3</sup> MPa de cada preparado, utilizaremos la masa y el volumen del bloque y la resistencia a compresión seca de cada mezcla, y así comparar ambos precios en función de las prestaciones mecánicas que nos aportan. Con todo esto, obtenemos:

**Preparado 1. Geopolímero**

$$\frac{0,0269 \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}}\right) * 7,5 \text{ (kg)}}{4,725(\text{m}^3) * 8,4(\text{MPa})} = 0,005 \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^3\text{MPa}}\right) \quad (13)$$

**Preparado 2. Cemento**

$$\frac{0,0166 \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}}\right) * 7,5 \text{ (kg)}}{4,725(\text{m}^3) * 2,1(\text{MPa})} = 0,0125 \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^3\text{MPa}}\right) \quad (14)$$

Por tanto los resultados finales quedan de la siguiente manera:

PRECIO	
Geopolímero	Cemento
0,0269 € / kg	0,0166 € / kg
0,005 € / m <sup>3</sup> MPa	0,0125 € / m <sup>3</sup> MPa

Tabla 11. Precio de cada preparado.

Como se puede apreciar en la tabla 11, si comparamos el precio por kg de material, el preparado con geopolímero resultaría más caro. Esto se debe a que el NaOH tiene un precio elevado y encarece el precio de la mezcla final. Hay que tener en cuenta, como hemos comentado antes, que los datos del precio del NaOH corresponden a un minorista de productos químicos, ya que no ha sido posible obtenerlos de un mayorista, lo que se asemejaría más a un caso real y disminuirían los costes.

Por otro lado, comparando los costes por m<sup>3</sup> y MPa, el cemento resulta ser la mezcla más cara. Por tanto, aunque ambos son aptos para su utilización, el geopolímero nos garantiza una mayor resistencia mecánica a un precio más económico, es decir es mejor en cuanto a la relación calidad-precio.

## 5.7 CONCLUSIONES

Como hemos podido comprobar en este trabajo, la utilización de un conglomerante de activación alcalina, compuesto en su mayor parte por materiales residuales, concretamente un residuo de catalizador de craqueo catalítico del petróleo (FCC) y un residuo agrícola, la ceniza de cáscara de arroz (CCA) disminuye considerablemente la Huella de Carbono con respecto al cemento Portland en la fabricación de bloques de tierra estabilizada.

La utilización de la CCA como fuente de sílice amorfa en este caso, para la preparación de la disolución activadora, es una excelente opción, ya que, no solo ayuda a la sostenibilidad del medio ambiente, sino que, supone una gran ventaja para países en desarrollo que tienen una elevada producción de arroz.

En estos lugares, adquirir cemento puede ser inviable económicamente, un conglomerante de geopolímero de las características descritas en este trabajo puede ser una buena alternativa, ya que, se ha demostrado que tiene una resistencia suficiente para su utilización como sustituto del cemento.

La alternativa de utilización de ecomateriales que respeten el medio ambiente y además abaraten los costes de las construcciones en países en desarrollo donde la economía es un problema a la hora de edificar y hay zonas donde son necesarias viviendas dignas, es un aspecto fundamental.

La fabricación del cemento Portland conlleva unas elevadas emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que la utilización del geopolímero preparado con FCC como material precursor y la mezcla CCA+disolución de NaOH como activador, proporciona un conglomerante con unas emisiones asociadas, en el caso objeto de este estudio, prácticamente la mitad de las asociadas a los bloques estabilizados con cemento Portland; esta es la principal conclusión derivada de este estudio y demuestra la gran ventaja de utilizar geopolímeros frente al cemento Portland ordinario.

Además, hemos podido comprobar que la contaminación más elevada corresponde a la fabricación de los materiales, sobre todo del cemento, frente a otras variables, como por ejemplo el proceso de amasado mecánico o el transporte.

Tengamos en cuenta que podremos reducir las emisiones siempre y cuando utilicemos los recursos más cercanos, minimizando las emisiones por transporte y fomentando la industria local.

Por otra parte, fijándonos en las prestaciones de los materiales, aunque el preparado con tierra tenga unas emisiones prácticamente nulas, no es un material suficientemente resistente. En cambio, los preparados de geopolímero y cemento tienen unas resistencias a compresión perfectamente aceptables para la fabricación de bloques para la construcción de viviendas. Incluso hemos podido comprobar que el geopolímero tiene una resistencia a compresión superior al cemento Portland para este caso.

Esta característica, unida al hecho de que las emisiones de CO<sub>2</sub> del conglomerante geopolimérico son inferiores a las del cemento, hacen que la relación kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> MPa para el geopolímero sea inferior a la del cemento, lo cual es un índice de su mayor sostenibilidad para unas prestaciones mecánicas equivalentes.

Por otro lado, si comparamos el precio de ambos preparados en función de las prestaciones mecánicas que nos aportan, el geopolímero tiene un coste más reducido, obteniendo una mejor relación calidad-precio, importante factor en el contexto de países en desarrollo.

Con todo esto, podemos considerar que el preparado de geopolímero podría ser la opción más adecuada para conseguir un óptimo resultado en el binomio sostenibilidad-prestaciones mecánicas y utilizarlo en un país en desarrollo como puede ser Colombia. No obstante no debemos olvidar que si bien el coste económico por MPa es inferior para el suelo estabilizado con geopolímero en valores absolutos, sin tener en cuenta la resistencia mecánica, el coste sería inferior para el bloque estabilizado con cemento Portland. Este hecho podría influir en la decisión de los potenciales consumidores inclinando la balanza a favor del uso del cemento Portland como estabilizante de los bloques de suelo.

Este trabajo ha demostrado que la Huella de Carbono para la fabricación de bloques de suelo estabilizado se puede reducir hasta aproximadamente la mitad utilizando un geopolímero preparado a partir de materiales residuales comparada con la proporcionada cuando se éstos se fabrican utilizando cemento Portland. Asimismo, se ha demostrado que el índice: kg de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> y MPa es más favorable (menor) para el caso del conglomerante de activación alcalina que para el cemento Portland, lo que indica su mayor sostenibilidad relacionada con sus prestaciones mecánicas. Finalmente, el coste económico es también más favorable para el caso del geopolímero que para el cemento Portland, si bien habría que contemplar el escenario comentado en el párrafo anterior.. Por todo ello, con las limitaciones comentadas, podríamos considerar que la alternativa propuesta podría ser adecuada para su utilización en países en desarrollo.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

1. Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*, 1999; 37:173-99.
2. Zampatti M. F., Antropoceno: una nueva huella en el registro geológico. *Mito-Revista Cultural*, nº 30. Publicado el 29 de febrero de 2016.

3. Zakarya G.Y., Mostefa B., Abbas S.M., Seghir G.M. Factors Affecting CO<sub>2</sub> Emissions in the BRICS Countries: A Panel Data Analysis. *Procedia Economics and Finance*, 2015; 26:114-125.
4. [https://elpais.com/sociedad/2014/06/03/actualidad/1401798742\\_648544.html](https://elpais.com/sociedad/2014/06/03/actualidad/1401798742_648544.html) (consultado en julio de 2017)
5. United Nations Treaty collection. Status of Treaties. Chapter XVII 7.d. [https://treaties.un.org/pages/ParticipationStatus.aspx?clang=\\_en](https://treaties.un.org/pages/ParticipationStatus.aspx?clang=_en) (Consultado en julio de 2017).
6. Aristizábal Hernández J. D. and Luengas Pinzón C., Emission reduction from cement industry by using fuel wood energy plantations, 2010, 5–7.
7. Junnila, S.; Horvath, A. and Guggemos, A.A. Life-cycle environmental effects of an office building. *Journal of Infrastructure Systems*, 2003; 9, no. 4:157-166. ISSN 1076-0342.
8. Habert, G.; Billard, C.; Rossi, P.; Chen, C.; Roussel, N. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cem. Concr. Res.* 2010; 40:820–826.
9. Purnell, P. The carbon footprint of reinforced concrete. *Advances in Cement Research*, 2013; 25 [1] : 1–7.
10. Justnes H. Alternative low-CO<sub>2</sub> “green” clinkering processes, 2012; 74:83-99.
11. Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. Sustainable cement production—present and future, 2011; 41 [7]:642–650.
12. <http://www.ecosur.org/index.php/ecomateriales>. (consultado en agosto de 2017)
13. Baca L. F. G., *Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva*. Apuntes, 2007; 20 (2):182–201.
14. Corral J. T., El suelo cemento como material de construcción, *Ciencia y Sociedad*, 2008; XXXIII (4):520–571.
15. Espuna J., García V., Roux R. S., Fuentes C. A., and Aranda Y., El suelo cemento como material de construcción, la arquitectura con tierra y su variabilidad de experiencias en construcción con tierra, *Construcción con Tierra*, 2008; 2:21–27.
16. Davidovits J. *Geopolymer: Chemistry and Applications*. 4<sup>a</sup> ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2015.
17. Davidovits J. Geopolymeric reactions in archaeological cements and in modern blended cements. En: Davidovits, J., Orlinski, J. (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88*, vol. 1, Compiègne, Francia, 1–3 de junio, 1988: 93–106.
18. Brito M.E., Darrel Case E., Kriven W.M., Salem J.A., D. Zhu. American Ceramic Society. *Developments in porous, biological and geopolymer ceramics : a collection of papers presented at the 31st International Conference on Advanced Ceramics and Composites*, January 21-21, 2007, Daytona Beach, Florida.

19. Rao F., Liu Q. Geopolymerization and Its Potential Application in Mine Tailings Consolidation: A Review, 2016;47 (6).
20. Davidovits J. Chemistry of geopolymeric systems, Terminology. In Geopolymer 99' Second International Conference, Saint-Quentin, France, 1999:9-39.
21. Instituto del geopolímero. <https://www.geopolymer.org/science/scientific-means-of-investigation/> (Consultado el 14/04/16).
22. Van Deventer J.S.J., Provis J.L., Duxson P., Lukey G.C. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. Journal of Hazardous Materials 2007; A139 (3): 506-513.
23. Shi C. and Fernández-Jiménez A., Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements, 2006; 137(3): 1656-1663
24. Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A. and van Deventer J. S. J., Geopolymer technology: the current state of the art, SpringerLink, 2006.
25. Olivia M. and Nikraz H., Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, 2012; 36:191-198.
26. Provis J.L., Duxson P. and van Deventer J. S. J., Geopolymer technology and the search for a low-CO<sub>2</sub> alternative to concrete, In AIChE Annual Meeting, Salt Lake City, United States, American Institute of Chemical Engineers, November 4-9, 2007.
27. Bell J.L., Gordon M., Kriven W.M. Use of geopolymeric cements as a refractory adhesive for metal and ceramic joints. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2005; 26 (3):407-413.
28. Davidovits J. and Davidovics M. Geopolymer room temperature ceramic matrix for composites, Ceram. Eng. Sci. Proc. 1988; 9:842-853.
29. Khalil M.Y., Merz E. Immobilization of intermediate-level wastes in geopolymers. Journal of Nuclear Materials, 1994; 211:141-148.
30. Frizon F. and Jousset Dubien C., (Patent publication no. US2010 0222204 A1, 2010,E. Prud'homme, P. Michaud, E. Joussein, J. M. Clacens and S. Rossignol), J. Non-Cryst. Solids, 2011; 357:1270-1278.
31. Steins P., Poulesquen A., Diat O. and Frizon F., Langmuir, 2012; 28: 8502-8510.
32. Rapazote J. G., Laginhas C., Teixeira-Pinto A. Development of building materials through alkaline activation of construction and demolition waste (CDW)-Resistance to acid attack. Advances in Science and Technology 2011; 69: 159-163.
33. COMISIÓN MUNDIAL DEL MEDIO AMBIENTE Y DEL DESARROLLO. Nuestro Futuro Común. Madrid: Alianza. 1988.
34. <http://www.oei.es/historico/decada/accion.php?accion=15> (Consultado en agosto del 2017)
35. BURDET R. and SUDJIC D. The Endless City. London: Phaidon. 2008.

36. GTZ , Mejoramiento de barrios. Indicaciones para la orientación de género. Orientación de Género, nº 2, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, División 425, Programas supra-sectoriales de desarrollo urbano y rural, Eschborn, Alemania, 1996.
37. DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) de Colombia.  
<http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi> (Consultado en agosto del 2017)
38. Agenda 2030, <http://agenda2030.mx/> (Consultado en agosto del 2017)
39. Arteaga Medina K.T., Medina O.U., Gutiérrez Junco O.J. Bloque de tierra comprimida como material constructivo, 2011, Vol. 20, Nº. 31, págs. 55-68.
40. Zornoza-Gómez E., El papel del catalizador usado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico en el proceso de corrosión de armaduras de hormigón. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de Valencia: Valencia-España. 2007; 328.
41. Payá J., Monzó J., Borrachero M.V. Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R): An excellent mineral byproduct for improving early-strength development of cement mixtures. Cem. Concr. Res. 1999; 29(11):1773–1779.
42. Shi C., Day R.L. Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans. Cem. Concr. Res. 1993; 23 (6):1389–1396.
43. Xu H., van Deventer J.S.J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. Int. J. Miner. Proc. 2000; 59 (3):247–266.
44. Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., van Deventer J.S.J. Geopolymer technology: The current state of the art. J. Mater. Sci. 2007; 42 (9):2917–2933.
45. Trocheza J.J., Mejía de Gutiérrez R., Rivera J., Bernal S.A.. Synthesis of geopolymer from spent FCC: Effect of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  molar ratios. 2015, Vol. 65, Issue 317
46. Provis J.L. and van Deventer J.S.J., Eds., Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Woodhead Publishing Limited, 2009.
47. Torres-Carrasco M. and Puertas F., Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation, Journal of Cleaner Production, 2015; 90: 397–408.
48. Brykov A. S. and Korneev V. I., Production and usage of powdered alkali metal silicate hydrates, Metallurgist, 2009; 52 (11–12):648–652..
49. Deabriges J., Process for the manufacture of sodium silicate, United States Patent. 4, 336,235. 1982.
50. Bouzón N., Payá J., Borrachero M.V., Soriano L., Tashima M.M., Monzó J., Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders, Materials Letters 2014; 115:72–74.
51. Bejarano J., Garzón C., Mejía de Gutiérrez R., Delvasto S., and Gordillo M., Obtención de soluciones de silicato de sodio a partir de cenizas de cascarilla de arroz. II Simposio

Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción, Valencia, 2010.

52. Gjorv, O.E.. Durability Design and Construction Quality. Proceedings of the International Conference ICACS 2003 on Advances in Concrete and Structures. Xuzhou, Jiangsu, China. Ed. Ying-shu Yuan, Surendra P. Shah y Heng-lin Lu, Rilem Proceedings PRO32. Septiembre, 2003:309-320.

53. Catalán Montaner C., huella de carbono en hormigones geopoliméricos: Estudio de la contribución de la disolución activante alcalina. TFM, UPV, Junio 2012.

54. Alamán Burguet M., Estudio para la estabilización de bloques de tierra mediante la utilización de geopolímeros a partir de residuos. Aplicación para viviendas de bajo coste en Barranquilla (Colombia). PFC, UPV, Nov. 2014.

55. Voluntarios en Asistencia Técnica (VITA), Fabricación de bloques de construcción con la prensa CINVA, 1977.

56. Guzmán Ramos L.E., Proyección de emisiones vehiculares en Bogotá D.C., a 2050 usando como año base el año 2008, TFM, 2014.

57. IPCC, UN, Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, cap. 1

58. PAS 2050:2011, Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. BSI, 389 Chiswick High Road, London W4 4AL, United Kingdom, 2011.