

Aggregate particle size interrelations and case study in concrete using white ordinary Portland cement

Interrelaciones de tamaño de partículas de agregados y su estudio en el caso concreto utilizando cemento Portland blanco ordinario

Manuela Castañeda-Montoya¹
Juan Manuel Velez-Restrepo²
Henry Colorado-Lopera³

¹ Universidad de Antioquia (Colombia). Correo electrónico: manuela.castanedam@udea.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6300-0265>

² Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: jmvelez@unal.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1676-4286>

³ Universidad de Antioquia (Colombia). Correo electrónico: henry.colorado@udea.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4948-0482>

Recibido: 26-08-2019 Aceptado: 15-04-2020

Cómo citar: Castañeda-Montoya, Manuela; Velez-Restrepo, Juan; Colorado-Lopera, Henry (2020). Aggregate particle size interrelations and case study in concrete using white ordinary Portland cement. *Informador Técnico*, 84(2), 114-132.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2369>

Abstract

The size distribution, the gradation and the type of aggregates are factors of great relevance for the design of mixtures in concrete and construction materials in general since these allow us to obtain information on the voids contents, module fineness, bulk density, and mechanical performance that certain aggregate mixtures will present. In the present work, different mixtures of aggregates were made using three types of raw materials: fine sand, coarse sand, and 3/8" aggregate, for which their mineralogical composition was evaluated using X-ray diffraction, the chemical composition using X-ray fluorescence, and its macroscopic structure using optical microscopy. Sixty-six mixture formulations were made, to which variables such as fineness modulus, particle size distribution, void content, and density were evaluated. These data were represented in ternary diagrams. From the gradation studies carried out, six formulations were selected based on the type of aggregate used and the content of voids. With this selection, concrete specimens were made, which were subjected to compression tests, finding that the mixture A 22, with 17 % of voids generated a compressive strength of 22 MPa. The results obtained can be used not only in applications such as zero-set concrete, concrete block masonry, or regular concretes, but also in asphalt pavements, ceramic materials obtained by sintering, and particle-reinforced composite materials.

Keywords: particulate reinforced composites; aggregates; size distribution; gradation; particle packing; Portland cement.

Resumen

La distribución de tamaño, las interrelaciones de gradación y el tipo de agregados, son factores de gran relevancia para el diseño de mezclas en concretos y en materiales de construcción en general, debido a que estos nos permiten obtener información sobre el porcentaje de vacíos, módulo de finura, densidad aparente y el rendimiento mecánico que presentarán determinadas mezclas de agregados. En el presente trabajo se realizaron diferentes mezclas de agregados utilizando tres tipos de materias primas con diferentes granulometrías: arena fina, arena gruesa y agregado de 3/8", para las cuales se evaluó su composición mineralógica mediante

difracción de rayos X, la composición química empleando fluorescencia de rayos X, y su estructura macroscópica mediante microscopía óptica. Se realizaron 66 mezclas, a las cuales se les evaluaron variables como módulo de finura, distribución de tamaño de partícula, contenido de vacíos y densidad. Estos datos se representaron en diagramas ternarios. De los estudios de gradación realizados, se seleccionaron seis formulaciones en función del tipo de agregado utilizado y el contenido de vacíos. Con esta selección, se realizaron probetas de concreto, las cuales fueron sometidas a pruebas de compresión, encontrando que por ejemplo para la mezcla A 22 que con un porcentaje de vacíos de 17 % generó una resistencia a la compresión de 22 MPa. Los resultados obtenidos se pueden usar no solo en aplicaciones tales como concretos con cero asentamiento, mampostería de bloques de hormigón o en los hormigones regulares, sino además en pavimentos asfálticos, materiales cerámicos obtenidos por sinterizado, y materiales compuestos reforzados con partículas.

Palabras clave: compuestos reforzados con partículas; agregados; distribución de tamaño; gradación; embalaje de partículas; Cemento Portland.

1. Introduction

Public policies and other government's strategies worldwide for the sustainability that decrease the negative environmental impacts of human activities, by a more efficient energy consumption and materials utilization, face serious challenges because they put in a competition environment, economy, food, and energy (Pimentel *et al.*, 1976; Pimentel; Pimentel, 2007; Meadows; Meadows; Randers, 1992). Circular economy (Ning, 2001; Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016) put into consideration a new paradigm for offer and demand in which materials design plays from the beginning a significant role in the entire process efficiency: new materials with minimal to zero waste. Diverse strategies from materials technology have been proposed to give solutions to some of the above problems, such as materials substitution, increasing product lifetime, product design with few materials (dematerialization), the reusing of materials and components, and recycling (Wang *et al.*, 2019). However, some of these methods have not been successful for economic, legal, and social reasons (Allwood; Ashby; Gutowski; Worrell, 2013). Therefore, one of the main challenges for science and engineering is the optimization of materials via microstructural characterization and materials selection tailored for specific or multifunctional applications (Jiao, 2014).

Nowadays many solid materials used in engineering are fabricated or composed of particles with very wide heterogeneous characteristics such as multiples particle sizes, shapes, and chemical compositions. As a consequence of that, many of these fabricated materials are very heterogeneous in properties. These types of particulate materials are used in important sectors like food (Bayram, 2005), mining (Kandhal; Khatri; Motter, 1992), and construction and infrastructure (Alexander; Mindess, 2010). Also, particulate materials are used from nano (Wang *et al.*, 2012; Colorado; Hiel; Hahn, 2010; Gu *et al.*, 2013), micro and macro scales (Yan *et al.*, 2009; Quiroga; Fowler, 2003; Colorado; Garcia; Buchely, 2016; De-Larrard; Sedran, 1994; Colorado; Yang, 2014). In particulate based materials systems as those described before, properties are the summary of the individual contribution of each particle and by their packing situation in the mix as well (White; Walton, 1937).

The packing mechanisms for solid particle materials are essential for the understanding and optimization of products and processing in industries such as concrete, powder metallurgy, ceramics, granular fertilizers, pharmaceuticals, composite materials, and welding. This topic has increased the number of publications and research that includes fundamental research (including physical and mathematical approaches), and extensive industrial experimentation (Sobolev; Amirjanov, 2004a; Dewar, 1997). The packing density of a granular mix is a function of the shape and size of the dispersed solid particles (Brouwers, 2006; Smith; Midha, 1997). The physical-chemical properties of materials constituted by granulated particles are determined by a complex combination of factors such as the particle sizes, particle shapes, surface texture, chemical compositions, and particle packing (Herrmann; Mahmoodi; Wackenhut, 2003; Kolonko; Raschdorf; Wäsch, 2010). It is generally

accepted that the packing optimization can produce the strongest materials, with the highest modulus of elasticity, shrinkage, and creep performance (Gil; Khayat; Tutikian 2019). In general, all these advantages are connected with a sustainable process. Thus, packing and gradation optimization are from the biggest interest in both industry and science.

In the search for the ideal packing model for concretes, several methods have been developed, such as Fuller (Gong; Zhang; Wang; Zong; Lu, 2015), Shilston (Shilstone, 1990), and ACI (Oh; Lee; Kim; Lee, 1999). Although they are mostly based on the maximum packing density or minimum void contents, the comparison is difficult to establish among them because they start with different parameters and for some of them, few and not comparable data is available. Therefore, the fact that there is a good number of models reveals that there is a complex problem still far from being solved. The perfect packing model has been a subject with a long history (Weaire; Aste, 2008), studied for even more general systems than when concrete is considered with all their complex materials mix with cement, water, aggregates, and pozzolanic components. When just the aggregates or particles are considered, the studied problem can be implemented either in ceramics, concrete, or other granular materials (Herrmann; Mahmoodi; Wackenhut, 2003). Polydisperse granular and other models are known to give maximum packing densities fundamentally studied in very simple particles shapes (Herrmann; Mahmoodi; Wackenhut, 2003; Kolonko; Raschdorf; Wäsch, 2010; Brouwers, 2006; Sobolev; Amirjanov, 2004b), with theoretical models (Herrmann; Mahmoodi; Wackenhut, 2003; Kolonko; Raschdorf; Wäsch, 2010; Brouwers, 2006; Sobolev; Amirjanov, 2004b), when large and small particles are added not carefully in the mix, and then being a potential source of problems such as voids and segregation. In a real mix, controlling the exact particle size distribution is not possible, when we consider large scale engineering applications with billions of different particles. Further models for irregular particle shapes have been proposed as well (Smith; Midha, 1997).

Today, multiple concrete applications in the construction and infrastructure industry require the development of methods and procedures to predict and optimize their properties and part performance from the raw materials and components. The empirical and experimental optimization of compositions (mix design) is a complex challenge due to the wide particle size distribution in the mix, from values of 1 μm (such as cement and additives) to 10 mm (such as sand, fillers, and aggregates) (De-Larrard; Sedran, 2002; Hüskén; Brouwers, 2008). Mix design aims to produce a material that meets the required performance for a given application, such as the number of mineral aggregates that optimize the density for a given compressive strength. A high aggregate packing density can promote a high compressive strength (Jones; Zheng; Newlands, 2002) and a decrease in the cement consumption, which clearly decreases the final product and is more environmentally friendly as well. In many companies, such as in a concrete block masonry plant, the most common procedure for a mix is to produce some trial mixtures with different cement contents, using the typical low technology apparatus available in a block plant, which can be tested for compression strength. In the last century, several models for mix design have been used extensively in diverse materials and systems (Shen; Yu, 2011; De-Larrard, 1999; Su; Hsu; Chai, 2001; Sobolev, 2004).

In this paper, a very simple experimental method using three types of aggregates as raw materials were used (sand, coarse sand, and 3/8" aggregates) to study the effect of aggregate type and gradation interrelations in properties as voids contents and fineness modulus is presented. Fineness modulus, particle size distribution, relative and apparent densities, void contents, and optical microscope images were obtained for all the aggregate combinations investigated.

2. Description of the problem

As described earlier in the introduction, the packing of a particulate material allows knowing other physical characteristics in the construction or composite materials, which enable the characterization and optimization of a process. In the case of construction materials such as concrete, the mixture of different size distributions

of aggregates present different packings, which when quantified makes it possible to have a notion of bulk density, percentage of voids or mechanical performance that goes to present the already formed material, for which, the packaging research, form, and other characteristics of the solid materials represent a tool of great importance for the industry. Thus, it can mean infinite advantages concerning the transport, manufacture, and performance of a material, which is directly related to the profitability and efficiency of the process.

3. Methodology

All materials used in this research were mineral aggregates supplied by Conasfaltos S.A. from Colombia: fine sand, coarse sand, and 3/8" aggregates, which were analyzed and used following the experimental design summarized in Table 1. In these experiments, the factors are the aggregates contents and aggregate types; while the response variables are void contents, fineness modulus, apparent density, compressive strength, and compressive strength. These raw aggregates were characterized by gradation experiments (sieve analysis). Aggregates are from Alluvial deposit, with 56.3 % of potentially alkali reactive aggregates: 9.4 % of quartzite fragments and 4.6 % to highly reactive chert fragments. 42.3 % correspond to fragments of silicified amphibolites and andesites, which are considered moderately to weakly reactive with alkali-silica. The content of non-reactive constituents is an average of 43.7 %.

Aggregates were combined with mechanical mixing. Subsequently, fineness modulus was determined by using the standard ASTM C136/C136M - 05. Figure 1a shows a representation in a ternary phase diagram of all samples studied in this research, corresponding to materials combinations confirmed just by the raw aggregates mentioned above (Table 1), placed in the ternary diagram on the corners. The mix of two aggregate types in the diagram is located in the exterior lines (axis) of the diagram, and the mix of three components is found inside the diagram, inside the triangle. For all experiments, aggregates were dried in a furnace at 100 °C for 1 day to remove all the unbounded water.

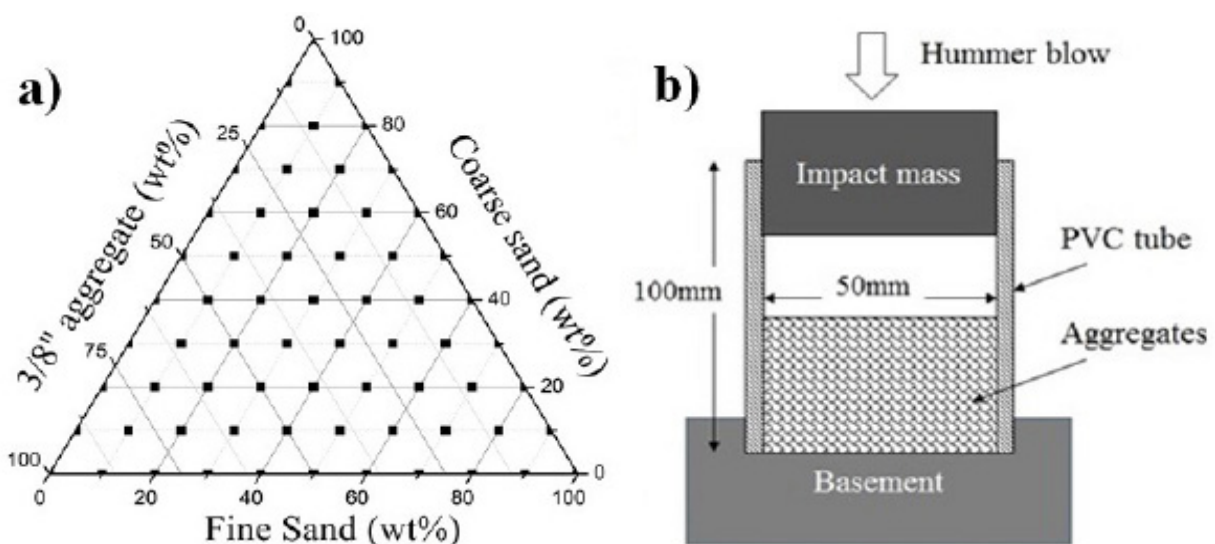


Figure 1. **a)** Ternary diagram showing all sampling from pure to combinations of the different aggregates used this research, **b)** schematic representation of the compaction experiment conducted
Source: own.

Samples were compacted in a tamping rod device represented in Figure 1b, which shows a schematic image of the compaction experiment conducted over the aggregates. Following the procedure from the ASTM C29/C29M-17, with the container first at 1/3, then at 2/3, and finally full of aggregates, samples were submitted to a total of 25 hammer impacts as represented in Figure 1b. By comparing the weight before and after the

compaction procedure as described before, the aggregate's weight and its volume were determined, and thus, its voids contents and apparent density were established for each sample. Relative density tests were estimated under the ASTM C128-15 and ASTM C127-15 standards. Apparent density and voids contents in the aggregates were tested as well in all samples, following the ASTM C29/C29M-17 standard. In addition to gradation tests, particle size distribution was investigated using optical microscopy images processed with the Image-J software for image digital analysis. 50 images were taken for each aggregate size. Particle size was the average of two different measurements over each particle. Several of these results were finally plotted in ternary diagrams or combined to establish interrelations among them.

Table 1.

Experimental design for a combination of the different aggregates

Sample Name	Aggregates			Sample Name	Aggregates		
	Fine sand	Coarse Sand	3/8"		Fine sand	Coarse sand	3/8"
A1	80	10	10	A34	10	30	60
A2	70	20	10	A35	10	50	40
A3	70	10	20	A36	10	40	50
A4	60	30	10	A37	10	0	90
A5	60	10	30	A38	20	0	80
A6	60	20	20	A39	30	0	70
A7	50	10	40	A40	40	0	60
A8	50	40	10	A41	50	0	50
A9	50	30	20	A42	60	0	40
A10	50	20	30	A43	70	0	30
A11	40	50	10	A44	80	0	20
A12	40	10	50	A45	90	0	10
A13	40	40	20	A46	10	90	0
A14	40	20	40	A47	20	80	0
A15	40	30	30	A48	30	70	0
A16	30	60	10	A49	40	60	0
A17	30	10	60	A50	50	50	0
A18	30	50	20	A51	60	40	0
A19	30	20	50	A52	70	30	0
A20	30	40	30	A53	80	20	0
A21	30	30	40	A54	90	10	0
A22	20	70	10	A55	0	10	90
A23	20	10	70	A56	0	20	80
A24	20	60	20	A57	0	30	70
A25	20	20	60	A58	0	40	60
A26	20	50	30	A59	0	50	50
A27	20	30	50	A60	0	60	40
A28	20	40	40	A61	0	70	30
A29	10	80	10	A62	0	80	20
A30	10	10	80	A63	0	90	10
A31	10	70	20	A64	0	0	100
A32	10	20	70	A65	0	100	0
A33	10	60	30	A66	100	0	0

Source: own.

XRD characterization for the aggregates was conducted in an X'Pert PRO diffractometer with Cu K α radiation of 1.5406 Å). Random samples were selected and mixed with residual powder from the aggregate batch and then all mixed and ground manually in a mortar until the ultra-fine powder was obtained. The scanning was performed with between 10 and 80°, with a step size of 0.02°. X-ray fluorescence (XRF) for oxides identification was conducted in an ARL 8680 apparatus following the ASTM C114-03 Test. Powders were dried at 105 °C before the test. Loss of ignition was determined at 1000 °C by thermogravimetric analysis (TGA) in a Perkin Elmer Instruments Pyris Diamond TG/DTA equipment, with a temperature ramp of 10 °C/min, and a nitrogen flux of 0.06 L/min.

White Ordinary Portland Cement (WOPC) from a local manufacturer from Colombia (with max. 6.0 wt % MgO, and max. 3.5 wt % SO₃) was used in combination aggregates. Samples based on the of aggregate combinations A14, A22, A34, Ag4, A65, and A66, were selected among all other samples not only to be tested in compression tests but also to have samples with low, medium, and high values of voids contents samples and see the effect as cement paste matrix fill all this space in mechanical properties. As a binder, Ordinary Portland cement was used for the manufacturing of the samples, see Table 2, with a ratio W/C = 0.4 and with 40 wt % of a combination of aggregates (A14, A22, A34, A64, A66, and A65 from Table 1). The cylindrical samples were cured for 28 days in a container closed to air contact. Thereafter, samples were airdried by three days and tested for compression tests. Compression tests were conducted in a Shimadzu universal testing machine. A set of 5 samples was tested for each of the combinations, at a crosshead speed of 1 mm/min.

Table 2.

Composition of concrete samples for compression testing

Sample mixtures of aggregates (see Table 1)	Mixtures of aggregates (wt %)	Portland cement (wt %)	Ratio W/C
A14	40	60	0.4
A22	40	60	0.4
A34	40	60	0.4
A64	40	60	0.4
A65	40	60	0.4
A66	40	60	0.4

Source: own.

4. Results and discussion

Aggregates were observed by optical microscopy as presented in Figure 2. These aggregates were obtained from a quarry located in Bello, Colombia. These aggregates show both irregular and sharp edges.

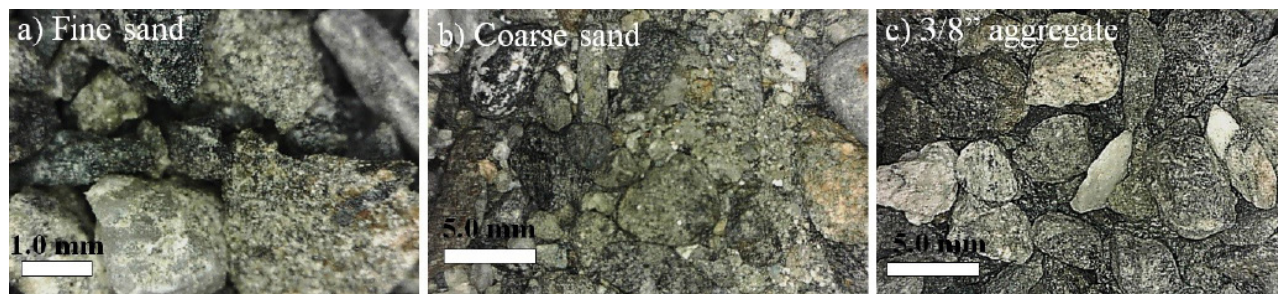


Figure 2. Optical microscopy images from aggregates used in this research

Source: own.

The XRF results summarized in Table 3 show that most of the materials are in the form of silicon and aluminum oxides. Calcium and iron oxides were also significant amounts. The loss of ignition (LOI) of 3.7 wt % shows the volatile materials are quite low. On the other hand, Figure 3. summarizes XRD results, the technique only able to reveal the crystalline phases from the aggregates sample. Therefore, quartz (SiO_2), Calcite (CaCO_3), hematite (Fe_2O_3), and alumina (Al_2O_3), were found in 71, 23, 5.5 and 0.5 wt % respectively.

Table 3.

X-ray diffraction results over the steel dust, with loss of ignition of 3.7 %

Compound	SiO2	Al2O3	CaO	Fe2O3	MgO	Na2O	TiO2	LOI
Wt %	53.2	18.0	9.6	8.4	3.9	1.9	0.7	3.7

Source: own.

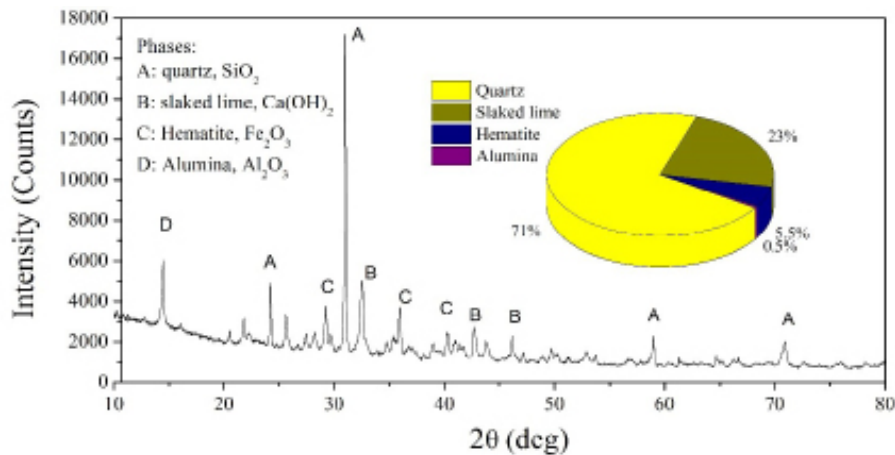


Figure 3. X-ray diffraction from the aggregates used in this research

Source: own.

From multiple optical microscopy images at different magnifications, like those shown in Figure 2, particle size distribution curves were obtained, see Figure 4 a, b and c are particle size distributions for fine, coarse, and 3/8" aggregates. Fine and 3/8" aggregates curves have a closer approach to ideal normal distributions when compared with coarse aggregates. The mean and standard deviation results are summarized in Figure 4d. The curve has a perfect parabolic trend and the equation is displayed in the image. The increase in the standard deviation for coarse aggregate could be associated with distribution type.

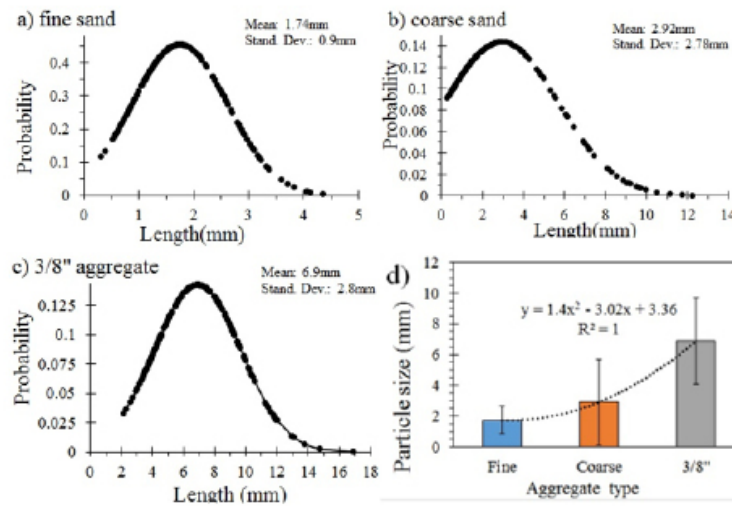


Figure 4. The particle size distributions for fine, coarse, and 3/8" aggregates are presented in Figura 4 (a), (b), (c), and (d) summary of results

Source: own.

Figure 5 shows the results for sieve dosing experiments corresponding to each of the raw aggregate investigated. Figure 5a for fine sand aggregate shows a sieve distribution towards the left side, which are the smallest sizes, with all the particles between 0 and 5 mm and a retained peak at 1.9 mm sieve size. Figure 5b for coarse sand aggregate is also charged toward the left side, although two peaks seem to appear near 1 and 4 mm of retained contents.

This is due to several particle size distributions having significant influence in the mix. Figure 5c corresponds to the sieve dosing for 3/8" aggregates, which shows the most symmetric curve of the three groups of aggregates, with a peak at 5.5 mm sieve size. Figure 5d summarizes the main sieve peak positions and their corresponding retained value. Secondary peaks were not plotted. As expected, as the particle size increases from fine sand to 3/8" aggregate, the sieve peak position increases as well. In the case of the retained contents, both sand and coarse sands have similar values for the peak, although the coarse sand has a clear secondary peak not included here, differently from the 3/8" aggregate that triple these values.

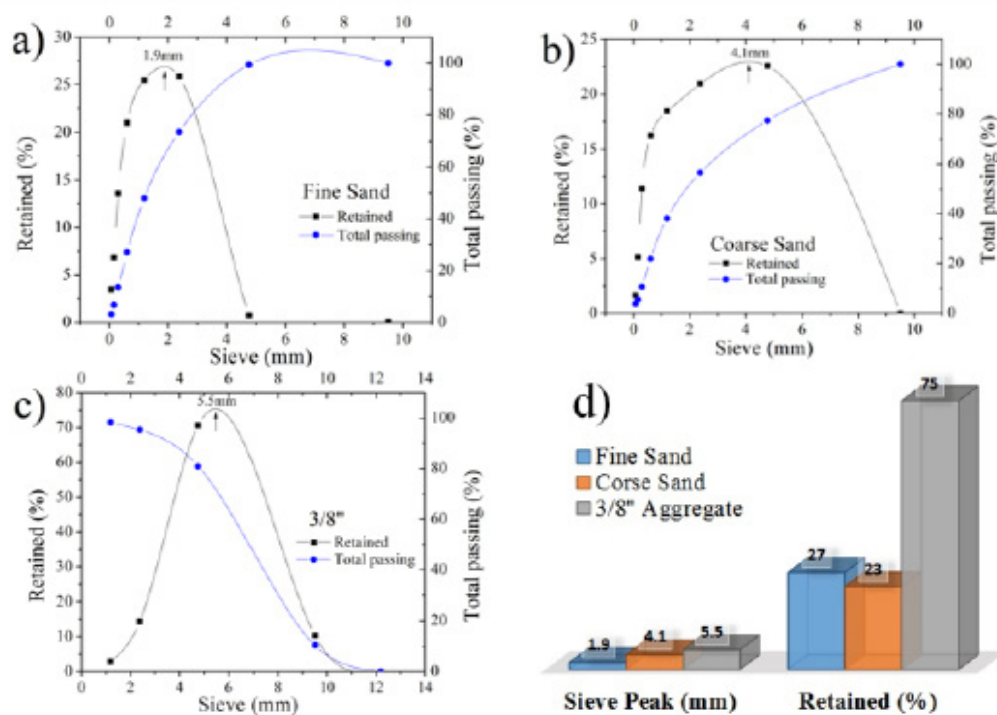


Figure 5. Sieve dosing experiments for aggregates used in this research

Source: own.

In the concrete manufacturing, it is typical to find up to two, three or more types of aggregates used to decrease the amount of cement used in the mixture, controlling the volumetric changes and increasing mechanical strength to the material. Thus, the results obtained for the percentage of voids for all the mixtures were analyzed in two parts. First, the behavior was observed for the mixtures with two types of aggregates (Figure 6). Second, a global analysis was performed (Figure 7) concerning the contents of the void, which appear in mixtures of 1,2 and 3 types of aggregates.

Figure 6 summarizes results for voids contents for a mix of three aggregate types: a) mixing of fine sand and 3/8" aggregates, b) mixing of fine sand and coarse sand aggregates, and c) mixing of coarse sand and 3/8" aggregates. All curves were fitted with polynomial equations, which showed that the combinations among fine sand and 3/8" aggregates and coarse sand and 3/8" aggregates correlate 1.0.

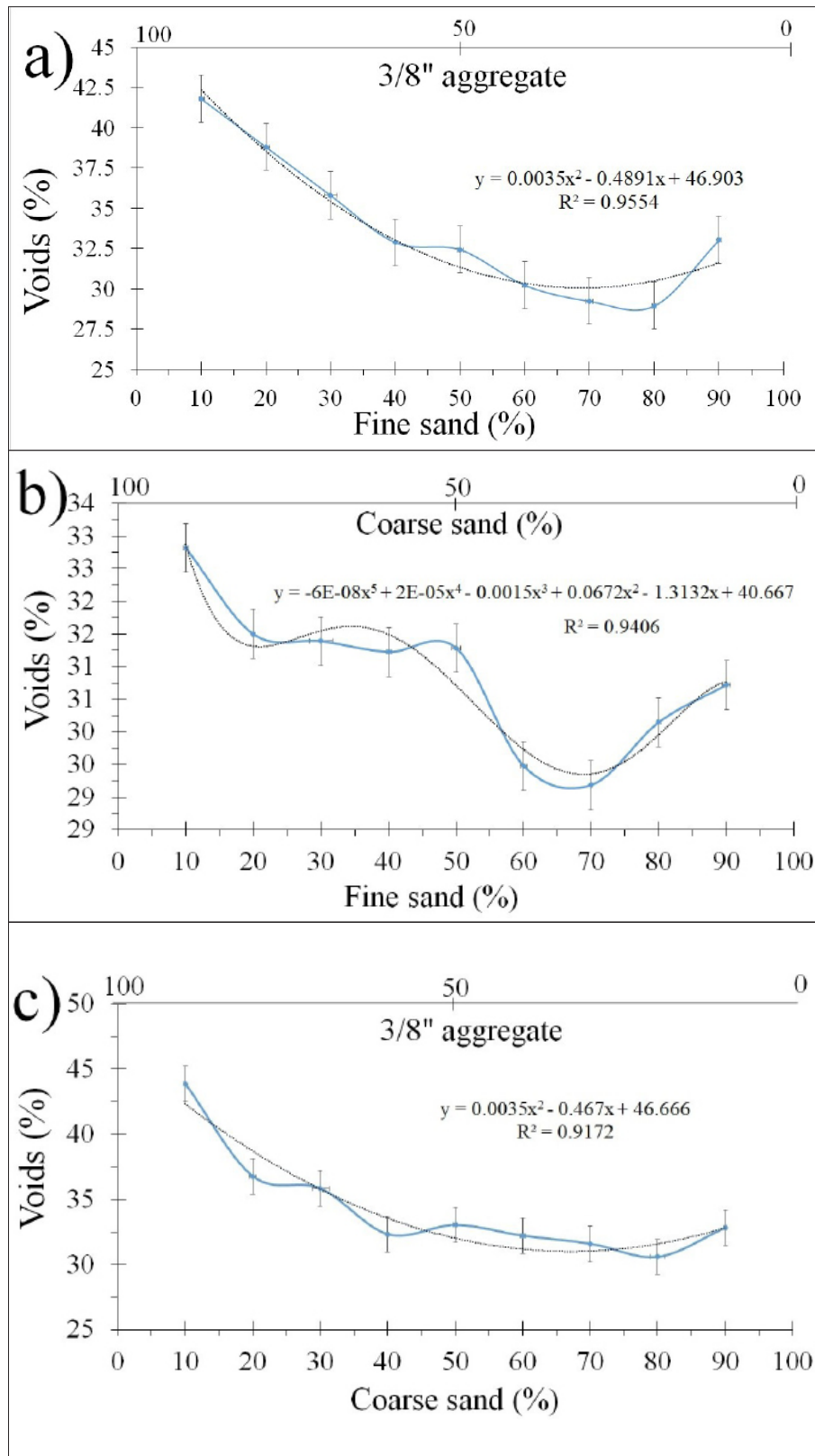


Figure 6. Voids contents for **a)** mixing of fine and 3/8" aggregates, **b)** mixing of fine and coarse aggregates, **c)** mixing of coarse and 3/8" aggregates

Source: own.

With all the experiments conducted, several ternary diagrams were constructed. Figure 7 is a ternary diagram for void contents of the three types of aggregates, with the highest void contents when the combinations go towards the mix of fine sand and 3/8" aggregates. The lowest voids contents appeared in several separate spot areas, which evidence the complex interrelations among different particle size distributions interacting in a multivariable material or system.

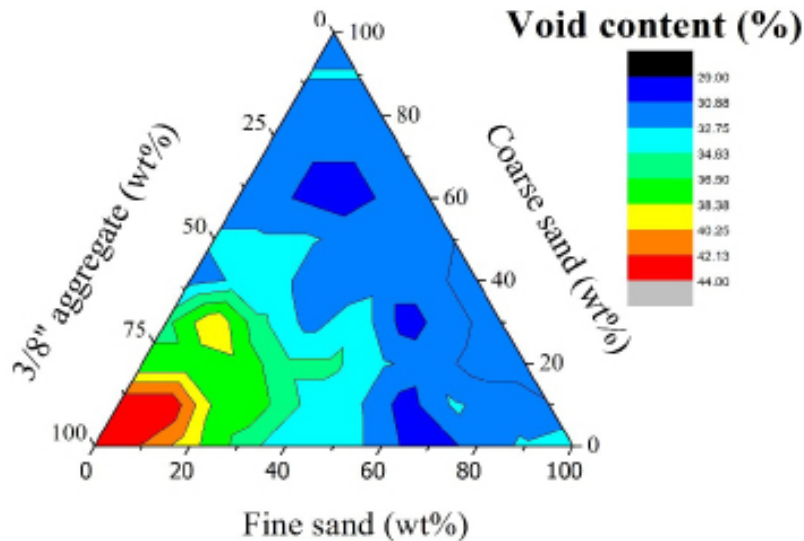


Figure 7. Ternary diagram for void contents of the three types of aggregates
Source: own.

On the other hand, the fineness modulus from Figure 8 showed a clear trend from right to left of the diagram, corresponding to the combination of coarse-fine sand aggregates, and the combination fine sand-3/8" aggregates, respectively. Therefore, the combination of coarse sand-3/8" aggregates have a less significant impact on the fineness modulus than the other combinations.

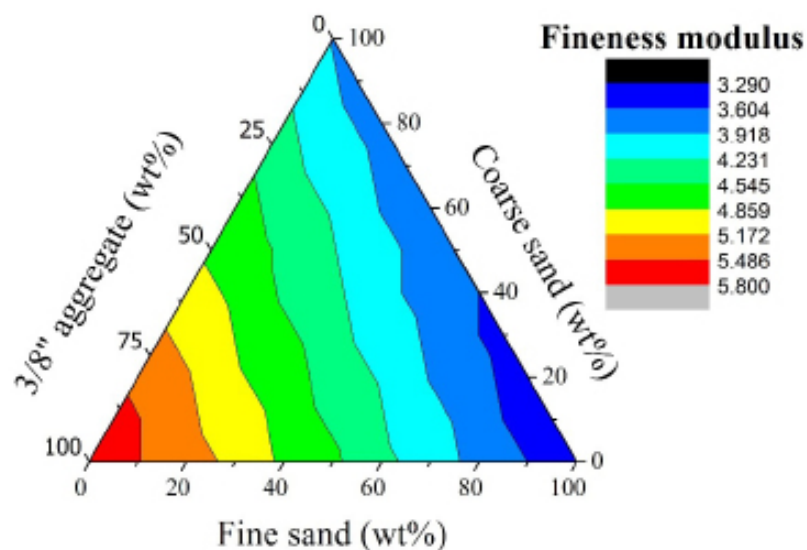


Figure 8. Ternary diagram for fineness modulus of the three types of aggregates
Source: own.

Finally, Figure 9 is a ternary diagram for bulk density. There are separated spots for high densities and a sole spot for the lowest density on the fine sand-3/8" aggregates combination.

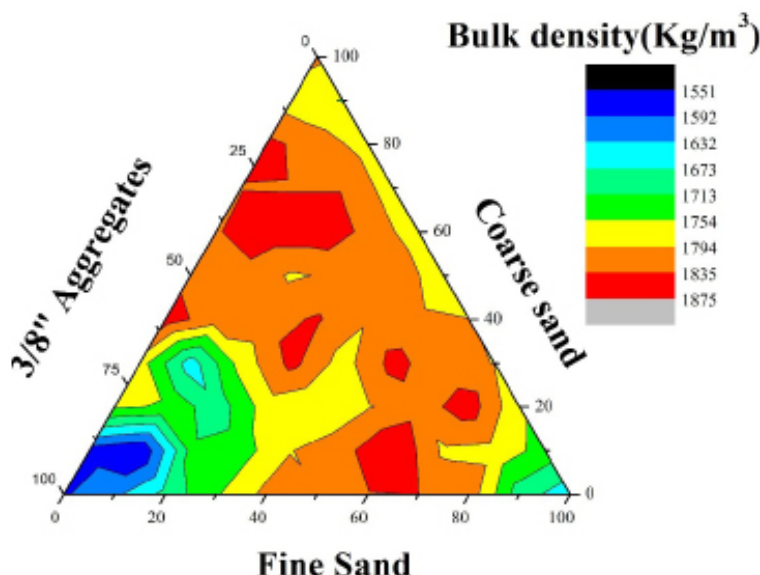


Figure 9. Ternary diagram for bulk density of the three types of aggregates
Source: own.

Figure 10 shows compression test results for six selected formulations of the aggregate combinations, nominated to have diverse spectra of results. The graph shows the cement paste content in volume, which approximately corresponds to the contents of the void of the aggregate mixed studied before without any filling cement paste. Samples' results in this image appeared in terms of the cement paste contents, from the highest to the lowest value. There is not a clear trend until we analyze in detail the results regarding the aggregate type. If we just consider the samples with only one aggregate type (A64 for fine sand, A65 for coarse sand, and A66 for 3/8"), as shown in Figure 10 b, it is clear that there is an aggregate type that maximized the compressive strength.

In this case corresponded to samples A65, with a particle size mean value of 2.9 mm given by the tests summarized in Figure 4 b. In this case, samples with higher compressive strength showed the minimum amount of cement paste by volume, which can be explained as a consequence of the particle distribution itself, which more likely allows particle to particle interact in the concrete and therefore when the material is subject to compression tests, these particles are quite well connected and thus then the main contribution to the composite is by their particle to particle compression. This can be also inferred from the distribution itself. When we compare the same graph (see Figure 4 a, b, and c), the corresponding distribution to sample A65 is less symmetrical and more concentrated in the largest values, which is associated with less variable particle sizes. For the other two samples (A64 and A66), both the shape of the particle size distribution (see Figures 4a and c) and compressive strength values were very similar.

Thus, from Figure 10 a, from the three samples that use a combination of the three aggregates used in this research (A14, A33, and A34), it is observed that samples A22 has the larger amount of aggregate coarse sand, which is related to results previously described for sample A65. From the other two samples, A34 had better compressive strength than A14 which can be related to bigger particle size for sample A14, show the complexity of these samples and the multi-parameter involved just by combining a particle size distribution with cement paste, in the case of these three samples which contain a combination of aggregates (A14, A33, and A34), the sample with the highest compressive strength was the one with the highest cement paste used, which is not correlated with the trend revealed in Figure 10 b.

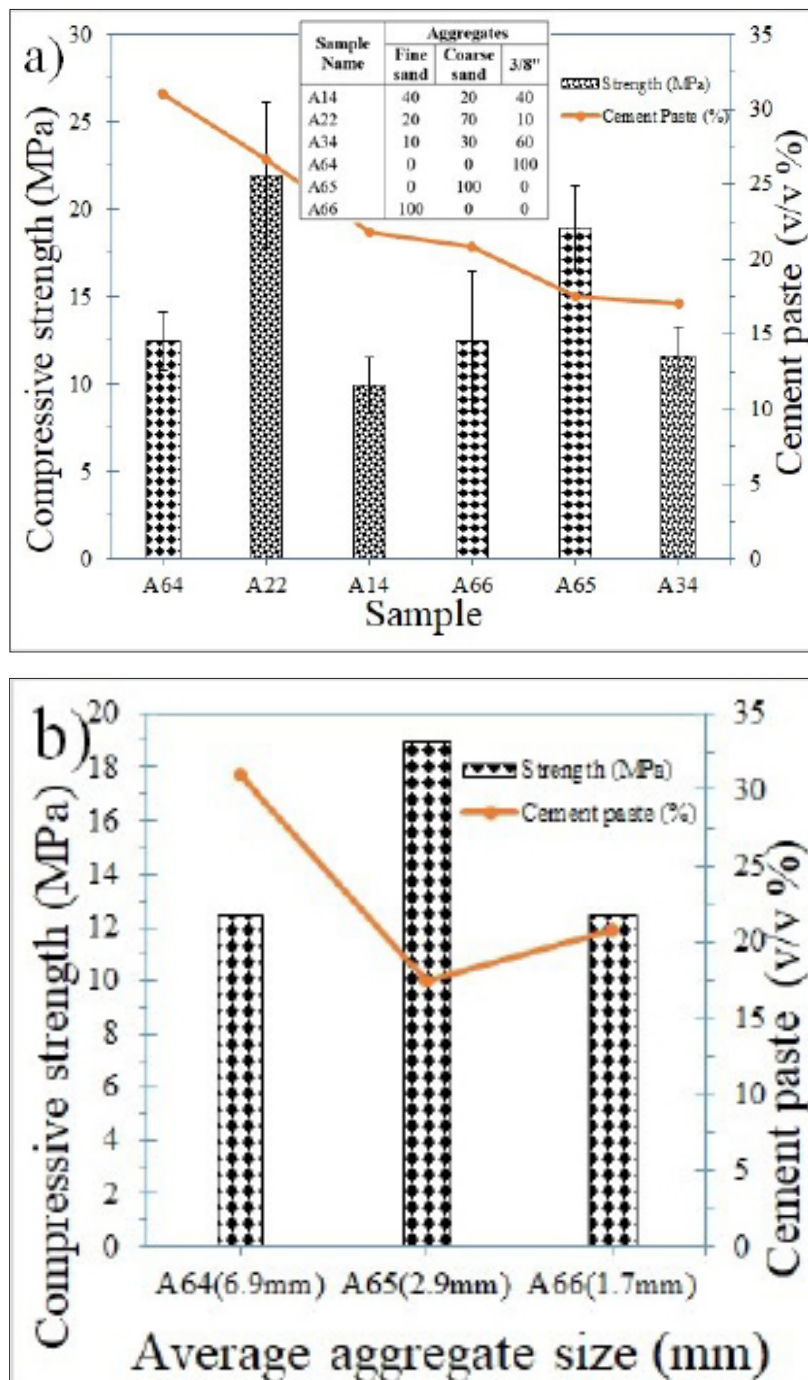


Figure 10. Compressive strength for some selected compositions
Source: own.

5. Discussion

The procedure showed in this research is very simple, inexpensive, and effective for studying any type of solid particle system where the mix design, gradation, or particle size distribution is important for determining other derived properties. This process can be easily conducted in companies that process these materials worldwide, which knowledge can lead in a very well know effect on reducing cement and other binding materials, therefore decreasing production costs (Lindquist *et al.*, 2015), water demand (Damtoft *et al.*, 2008), and CO₂ released to air

(Worrell *et al.*, 2001). Also, the optimization of gradation to an ever best-compacted mix of aggregates, open up more even ultra-high and ultra-strong performance materials and buildings (De-Larrard; Sedran, 1994). One of the possibilities is the way the aggregate industry works with supplying aggregates to other companies or for their projects, as a new business model can appear if they supply specific gradation formulations for each client, which certainly can be achieved with the proposed and simple method of this research.

The chemical analysis conducted by XRF and XRD is very complementary. While the quartz (SiO_2) and hematite (Fe_2O_3) contents are very acceptable in terms of the contents and say these two phases are very crystalline as confirmed by XRD, the results showing lime (CaO), calcite (CaCO_3), and alumina (Al_2O_3) seem to be a different case. When compared the alumina contents obtained with XRF is low concerning XRD. This is associated with alumina participating mainly as part of amorphous compounds, such as the typical calcium-aluminates and aluminosilicates, typically found in Colombia. In the case of calcite, carbon is difficult to detect by XRF, and thus XRD here was very important to determine the presence of this very common compound in aggregates (West, 2001).

In the case of the contents of the void, the ternary diagram plots show areas where the manufacturer can easily incorporate a specific particle distribution that either fills the mix to reduce voids and optimize compressive or density, or either prepare a mix to generate a particular void size contents such in the case of porous Portland cement (Chindaprasirt *et al.*, 2008) or asphalt concretes (Goh; You, 2011), or in the case of concrete block with high compressive strength (Sukontasukkul; Chaikaew, 2006). In case of filling voids, there is a great opportunity in adding multiple available ceramic wastes that have very specific particle distributions (Loaiza; Cifuentes; Colorado, 2017; Colorado; Colorado, 2016; Haibin; Zhenling, 2010; Colorado; Yuan; Guo; Juanri; Yang 2014). Moreover, the current investigation is part of a national strategy not only for the company involved but also for the government in implementing strategies such as the need of a new model in the circular economy in Colombia (Colorado; Echeverry; Colorado, 2019; Ordóñez; Echeverry; Colorado, 2019) and company-universities sustainable projects (Agudelo; Cifuentes; Colorado, 2019).

Concerning the gradation and particle size distribution tests, they show to be very complementary, and in fact, the summary results from Figure 4d and Figure 5d show an increasing trend when particle and sieve sizes increases as the aggregate size increases. Moreover, in the case of sieve results for coarse fine aggregate two peaks appeared contributing to the curve, which has been associated with two significant particle sizes competing in the mix. This behavior was not observed for the fine sand and 3/8" aggregate types, this is for the smaller and greater particle size for the coarse sand aggregate, which suggests this coarse sand has some elements characteristics of the other two aggregates gradations. This observation is also shown in the voids contents curves from Figure 6, where the combination curves revealed that coarse sand has a stronger effect in changing the ideal smooth combination curve, as it is observed when it compared the fine sand and 3/8" aggregates having the smoother curve when no coarse sand was involved.

Figure 7 show some spots that minimized voids' contents. For a combination of 3/8"-fine sand- coarse sand, the respective combinations these materials in wt % such as 20-20-60, 20-50-30, and 20-70-10, can be obtained from the diagram. Thus, a combination with 20 wt % of 3/8" aggregates is a beginning for obtaining a gradation with minimal voids, for the materials used in this research. For fine and coarse sand combinations, we can conclude that a difference between 1.7 and 7 times between these two aggregates is also good for a mix of aggregates with low void content. On the other hand, also from Figure 7, in general, a mix with the highest void contents can be obtained when 3/8" aggregates are more than 90 wt %, fine sand less than 10 wt %, and coarse sand is less than 15 wt %.

Regarding the compressive strength values summarized in Figure 10, some general results can be very useful for the materials used. The first one is the fact that using the coarse sand with cement paste produced the best results, in both cases, just for cement paste-coarse sand samples, and for cement paste with a combination

of fine sand, coarse sand, and 3/8" aggregate types. The second important result is that depending on the aggregate type and the shape or type of the particle distribution, very diverse concrete materials can be tailored for different applications. Finally, it is also important to mention that many parameters and variables are involved in this problem, which is evidenced by the very diverse particles sizes and shapes used (even when using just one type of aggregate type), which make results not only hard to generalize in cases the aggregate is changed, but also difficult to extrapolate to different manufacturing conditions. Therefore, it is clear that this study is recommended to be conducted for each aggregate source, as not only the chemistry (such as reactivity, pH) but also the morphology varies a lot even for the same sample.

The present study highly motivated by collaborative results with a local Company, who is leading innovative but simple procedures to find not only value to its aggregates and other particulate building materials, but also, able to be implemented in its Research and Development department. Thus, different matrix materials such as phosphates (Colorado; Yang, 2014; Colorado *et al.*, 2011), geopolymers (Colorado; Hahn; Hiel, 2011), high-performance resins (Colorado *et al.*, 2014; Bell; Driemeyer; Kriven, 2009), and complex aggregate-solid waste composites (Bekir; Bilir, 2009), can be optimized upon the correct use of their particle reinforcements. Further developments for smaller particle such in nanocomposites (Guo *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2006; Hussan; Hojjayi; Okamoto; Gorga, 2006) will require more research as the interfacial forces are very large but an investigation is very open particularly for the particle reinforcement point of view.

6. Conclusions

The aggregate type and gradation interrelations using sieve tests and particle size distributions as were studied in this research allowed to specifically know the region where void contents are maximum and minimum by different ways, first by combining materials by two, then, by combining materials by three in a ternary phase diagram. Also, fineness modulus and density were investigated. The combination aggregates that maximizes voids' contents can be obtained for 3/8" aggregates more than 90 wt%, fine sand less than 10 wt %, and coarse sand is less than 15 wt %. For minimal void contents, several combinations worked well as explained before, which reveals the complex nature of particle and gradation interrelations in determining properties of a mix. Compression tests showed a very complex structure-property relation when the aggregate formulation is changed in concrete, and therefore it is very important to conduct similar studies any time the application requires it. Even in the case of waste and nature fiber particulate based composites can be optimized via particle size distribution as was shown in this research.

7. Acknowledgments

The authors want to thank CONASFALTOS S.A. for kindly supplying all materials for this research and useful discussion.

Referencias

- Agudelo, Guillian; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry (2019). Ground tire rubber and bitumen with wax and its application in a real highway. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1048–1061.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.353>
- ASTM International. (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ASTM C136/C136M). West Conshohocken, PA, 2019.

- ASTM International. (2017). Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate (ASTM C29/C29M-17). West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM International. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C128-15). West Conshohocken, PA, 2015.
- ASTM International. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (ASTM C127-15). West Conshohocken, PA, 2015.
- ASTM International. (2018). Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement (ASTM C114-03). West Conshohocken, PA, 2018.
- Alexander, Mark; Mindess, Sidney (2010). *Aggregates in concrete*. EE.UU: CRC Press.
- Allwood, Julian; Ashby, Michael; Gutowski, Timothy; Worrell, Ernst (2013). Material efficiency: providing material services with less material production. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 371 (1986).
<https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0496>
- Bayram, Mustafa (2005). Determination of the sphericity of granular food materials. *Journal of Food Engineering*, 68(3), 385–390.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.014>
- Bekir, Iker; Bilir, Turhan (2009). Analysis of Rubberized Concrete as a Three-phase Composite Material. *Journal of Composite materials*, 43(11), 1251–1263. <https://doi.org/10.1177/0021998308104226>
- Bell, Jonathan; Driemeyer, Patrick; Kriven, Waltraud (2009). Formation of ceramics from metakaolin-based geopolymers. Part II: K-based geopolymer. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(3), 607–615.
<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02922.x>
- Brouwers, H. (2006). Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. *Physical Review E*, 74(3), 031309.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.031309>
- Chindaprasirt, Jarin; Hatanaka, Shigemitsu; Chareerat, Thanudkij; Naoki, Mishima; Yuasa, Yukihiisa (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 22(5), 894–901.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007>
- West, G.; Fookes, P.; Lay, J.; Sims, I.; Smith, M.; Collis, L. (2001). *Aggregates : sand, gravel, and crushed rock aggregates for construction purposes*. Londres, Inglaterra: Geological Society of London.
- Colorado, Diana; Echeverry, Gloria; Colorado, Henry (2019). Logistics as an essential area for the developing of the solid waste management in Colombia. *Informador Técnico*, 83(2), 69–92.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2065>
- Colorado, Henry; Colorado, Sergio (2016). Advanced Science. In: Kirchain, Randolph et al., (Eds). *Portland Cement with Battery Waste Contents* (pp. 77-84). EE.UU: Advanced Science.
- Colorado, Henry; Hiel, Clement; Hahn, H. T. (2010). Influence of Particle Size Distribution of Wollastonite on the Mechanical Properties of CBPCs (Chemically Bonded Phosphate Ceramics). In *Processing and Properties of Advanced Ceramics and Composites III*, 225, 85–98.
[doi:10.1002/9781118144442.ch8](https://doi.org/10.1002/9781118144442.ch8)

- Colorado, Henry; Yang, Jenn-Ming (2014). U.S. Patent No. 8,911,548. EE.UU. University of California.
- Colorado, Henry; Yuan, Wey; Guo, Zhanhu; Juanri, Juanri; Yang, Jenn-Ming (2014). Poly-dicyclopentadiene-wollastonite composites toward structural applications. *Journal of Composite Materials*, 48(16), 2023-2031. <https://doi.org/10.1177/0021998313494098>
- Colorado, Henry; Hiel, Clement; Hahn, H. T.; Yang, J. M.; Pleitt, J.; Castaño, Carlos (2011). Wollastonite-based chemically bonded phosphate ceramic composites. *Journal of Nuclear Materials*, 425(1-3), 197-204. [doi:10.1016/j.jnucmat.2011.08.043](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.08.043)
- Colorado, Henry; Hahn, H. T.; Hiel, Clement (2011). Pultruded glass fiber- and pultruded carbon fiber-reinforced chemically bonded phosphate ceramics. *Journal of Composite Materials*, 45(23), 2391-2399. <https://doi.org/10.1177/0021998311401090>
- Colorado, Henry; Garcia, Edwin; Buchely, M. F. (2016). White Ordinary Portland Cement blended with superfine steel dust with high zinc oxide contents. *Construction and Building Materials*, 112, 816-824. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.201>
- Damtoft, Jesper; Lukasik, J.; Herfort, Duncan; Sorrentino, Danielle; Gartner, Ellis (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>
- De-Larrard, François; Sedran, Thierry (2002). Mixture-proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 32, 1699-1704. [doi:10.1016/S0008-8846\(02\)00861-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00861-X)
- Dewar, Joseph (1997). *Development of a theory of particle mixtures and its application to aggregates, mortars and concretes* (tesis doctoral). University of London. Londres, Inglaterra.
- Ghisellini, Patrizia; Cialani, Catia; Ulgiati, Sergio (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gil, Augusto; Khayat, Kamal; Tutikian, Bernardo (2019). An experimental approach to design self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 229, 116939. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116939>
- Goh, Shu; You, Zhanping (2011). Mechanical properties of porous asphalt pavement materials with warm mix asphalt and RAP. *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), 90-97. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE)
- Gong, Chenchen; Zhang, Jie; Wang, Shoude; Zong, Wen; Lu, Lingchao (2015). Effect of aggregate gradation with fuller distribution on properties of sulphoaluminate cement concrete. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 30(5), 1029-1035. <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1268-5>
- Gu, Hongbo; Guo, Jiang; He, Qingliang; Tadakamalla, Sruthi; Zhang, Xi; Yan, Xingru; Huang, Yudong; Colorado, Henry; Wei, Suying; Guo, Zhanhu (2013). Flame-Retardant Epoxy Resin Nanocomposites Reinforced with Polyaniline-Stabilized Silica Nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(23), 7718-7728. <https://doi.org/10.1021/ie400275n>

- Guo, Zhanhu; Lei, Kenny; Li, Yutong; Ng, Ho; Prikhodko, Sergy; Hahn, Thomas (2008). Fabrication and characterization of iron oxide nanoparticles reinforced vinyl-ester resin nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 68(6), 1513–1520.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.018>
- Guo, Zhanhu; Pereira, Tony; Choi, Oyoung; Wang, Ying; Hahn, Thomas (2006). Surface functionalized alumina nanoparticle filled polymeric nanocomposites with enhanced mechanical properties. *Journal of Materials Chemistry*, 16(27), 2800–2808.
<https://doi.org/10.1039/b603020c>
- Haibin, Liu; Zhenling, Liu (2010). Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1331–1340.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.05.005>
- Herrmann, Hans; Mahmoodi, Baram; Wackenhut, Martin (2003). Searching for the perfect packing. *Physica a: Statistical Mechanics and Its Applications*, 330(1–2), 77–82.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2003.08.023>
- Hüsken, Götz; Brouwers, H. J. H. (2008). A new mix design concept for earth-moist concrete: a theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*, 38(10), 1246–1259.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.04.002>
- Hussan, Farzana; Hojjayi, Mehdi; Okamoto, Masami; Gorga, Russell (2006). Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview. *Journal of Composite Materials*, 40, 1511–1575.
[doi:10.1177/0021998306067321](https://doi.org/10.1177/0021998306067321)
- Jiao, Yang (2014). Three-dimensional heterogeneous material microstructure reconstruction from limited morphological information via stochastic optimization. *AIMS Materials Science*, 1(1), 28–40.
<https://doi.org/10.3934/matricsci.2014.1.28>
- Jones, Martyn; Zheng, Li; Newlands, Moray (2002). Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio. *Materials and Structures*, 34(249), 301–309.
[doi:10.1007/BF02482136](https://doi.org/10.1007/BF02482136)
- Kandhal, Prithvi; Khatri, Maqbool; Motter, John (1992). Evaluation of particle shape and texture of mineral aggregates and their blends. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions*, 61(92), 217–240.
- Kolonko, Michael; Raschdorf, Steffen; Wäsch, Dominic (2010). A hierarchical approach to simulate the packing density of particle mixtures on a computer. *Granular Matter*, 12(6), 629–643.
<https://doi.org/10.1007/s10035-010-0216-5>
- De-Larrard, François; Sedran, Thierry (1994). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 997–1009.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- Larrard, Francois. (1999). *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. EE.UU.: CRC Press.
- Lindquist, Will; Darwin, David; Browning, JoAnn; McLeod, Heather; Yuan, Jiqui; Reynolds, Diane (2015).

- Implementation of concrete aggregate optimization. *Construction and Building Materials*, 74, 49–56.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.027>
- Loaiza, Alexandra; Cifuentes, Sergio; Colorado, Henry (2017). Asphalt modified with superfine electric arc furnace steel dust (EAF dust) with high zinc oxide content. *Construction and Building Materials*, 145, 538–547.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.050>
- Meadows, Donella; Meadows, Dennis; Randers, Jorge (1992). *Beyond the limits: global collapse or a sustainable future*. Vermont, EE.UU: Chelsea Green Pub.
- Ning, Duan (2001). Cleaner production, eco-industry and circular economy. *Research of Environmental Sciences*. 6. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-HJKX200106000.htm
- Oh, J. W.; Lee, I. W.; Kim, J. T.; Lee, G. W. (1999). Application of neural networks for proportioning of concrete. *ACI Materials Journal*, 1, 61–67.
- Ordóñez, Edison; Echeverry, Gloria; Colorado, Henry (2019). Engineering and economics of the hazardous wastes in Colombia : the need of a circular economy model. *Informador Técnico*, 83(2), 63–81.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2041>
- Pimentel, David; Pimentel, Marcia (2007). *Food, Energy, and Society*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420046687>
- Pimentel, David; Terhune, Eleonor; Dyson-Hudson, Rada; Rochereau, Stephen; Samis, Robert; Smith, Eric; Denman, Daniel; Reifschneider, David; Shepard, Michael (1976). *Land Degradation : Effects on Food and Energy Resources*. *SCIENCE*, 194 (4261), 149–155.
[doi: 10.1126/science.194.4261.149](https://doi.org/10.1126/science.194.4261.149)
- Quiroga, Pedro; Fowler, David (2003). *The effects of aggregates characteristics on the performance of portland cement concrete* (tesis de pregrado). University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Shen, Shihui; Yu, Huanan (2011). Characterize packing of aggregate particles for paving materials: Particle size impact. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1362–1368.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.008>
- Shilstone, J. M. (1990). Concrete Mixture optimization. *Concrete International*, 12(6), 33–39.
<http://worldcat.org/oclc/4163061>
- Smith, Lyndon; Midha, Prem (1997). Computer simulation of morphology and packing behaviour of irregular particles, for predicting apparent powder densities. *Computational Materials Science*, 7(4), 377–383.
[https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(97\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(97)00003-7)
- Sobolev, Konstantin (2004). The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 901–907.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.09.002>
- Sobolev, Konstantin; Amirjanov, Adil (2004a). A simulation model of the dense packing of particulate materials. *Advanced Powder Technology*, 15(3), 365–376.
<https://doi.org/10.1163/156855204774150154>

- Sobolev, Konstantin; Amirjanov, Adil (2004b). The development of a simulation model of the dense packing of large particulate assemblies. *Powder Technology*, 141(1–2), 155–160.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.02.013>
- Su, Nan; Hsu, Kung-Chung; Chai, His-Wen (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1799–1807.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00566-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00566-X)
- Sukontasukkul, Piti; Chaikaew, Chalermphol (2006). Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 20(7), 450–457.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.040>
- Wang, Xinpeng; Yu, Rui; Shui, Zhonghe; Song, Qiulei; Liu, Zhen; Bao, Ming; Liu, Zhijie; Wu, Shuo (2019). Optimized treatment of recycled construction and demolition waste in developing sustainable ultra-high performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, 221, 805–816.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.201>
- Wang, Zhe; Colorado, Henry; Guo, Zhan-Hu; Kim, Hansang; Park, Cho-Long; Hahn, Tomas; Lee, Sang-Gi; Lee, Kun-Hong; Shang, Yu-Qin (2012). Effective functionalization of carbon nanotubes for bisphenol F epoxy matrix composites. *Materials Research*, 15(4), 510–516.
<https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000092>
- Weaire, Denis; Aste, Tomaso (2008). *The Pursuit of Perfect Packing*. EE.UU: CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420068184>
- White, H.; Walton, S. (1937). Particle packing and particle shape. *Journal of the America Ceramic Society*, 20(1-2), 155-166.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1937.tb19882.x>
- Worrell, Ernst; Price, Lynn; Martin, Nathan; Hendriks, Chris; Meida, Leticia (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1), 303–329.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Yan, Yan; Zhang, Zhibing; Stokes, Jason; Zhou, Qingzhu; Ma, Guanghui; Adams, Michael (2009). Mechanical characterization of agarose micro-particles with a narrow size distribution. *Powder Technology*, 192(1), 122–130.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.12.006>

Desarrollo de habilidades creativas de los estudiantes como consecuencia del uso de herramientas TIC

Development of creative skills of students as a result of the use of ICT tools

Camilo García-Espinosa¹
Jorge Gómez-Angarita²

¹ Universidad Autónoma de Manizales (Colombia). Correo electrónico: camilo.garciae@autonoma.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1125-2719>

² Universidad Autónoma de Manizales (Colombia). Correo electrónico: jigomez@autonoma.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8494-6781>

Recibido: 04-12-2019 Aceptado: 24-04-2020

Cómo citar: García-Espinosa, Camilo; Gómez-Angarita, Jorge (2020). Desarrollo de habilidades creativas de los estudiantes como consecuencia del uso de herramientas TIC. *Informador Técnico*, 84(2), 133-154.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2547>

Resumen

La siguiente investigación cuasi experimental de orden cuantitativo, descriptivo y comparativo tiene como objetivo establecer la existencia relacional (estado, factores y diferencias significativas) entre el uso de una herramienta TIC de modelado CAD 3D y las habilidades creativas desarrolladas por los estudiantes del programa de formación Tecnólogo en Mantenimiento Mecatrónico de Automotores del SENA. Se estableció una muestra compuesta por dos grupos (Experimental y Control) con una prueba previa (Pretest ECG), seguido del estímulo o tratamiento al grupo experimental (Intervención modelado CAD 3D) y el grupo control sin estímulo. Finalmente se realizó una prueba posterior (Postest ECG). De acuerdo con los indicadores evaluados por el instrumento ECG, los sujetos que trabajaron con el modelado CAD 3D desarrollaron las habilidades creativas asociadas a los indicadores evaluados: elaboración (El), conectividad temática (Ct), conectividad expansiva (Ce), fantasía (Fa), habilidad gráfica (Hg), sentido del humor (Sh) y fluidez gráfica (Fg). El puntaje total (Pt), no es considerado como un indicador de habilidad gráfica del ECG, pero brinda una perspectiva holística de los resultados obtenidos de las pruebas, donde se pudo apreciar un aumento en la media, indicando que el uso del modelado CAD 3D desarrolla habilidades creativas en los individuos.

Palabras clave: creatividad, diseño; modelado sólido; CAD 3D; ambientes creativos; innovación; relación.

Abstract

The following quasi-experimental research of quantitative, descriptive and comparative order aims to establish the relational existence (status, factors and significant differences) between the use of a 3D CAD modeling ICT tool and the creative skills developed by students of the SENA Mechatronic Automotive Maintenance Technologist training program. A sample composed of two groups (Experimental and Control) was established with a previous test (Pretest ECG), followed by stimulation or treatment to the Experimental group (3D CAD modeling intervention) and to the Control Group without stimulus. A subsequent test (Postest ECG) was finally performed. According to the evaluated indicators by the ECG

instrument, the subjects who worked with 3D CAD modeling developed the creative skills associated with the evaluated indicators: elaboration (El), thematic connectivity (Ct), expansive connectivity (Ce), fantasy (Fa), graphic ability (Hg), sense of humor (Sh) and graphic fluidity (Fg). The total score (Pt), is not considered as an indicator of ECG's graphical ability, but provides a holistic perspective of the results obtained from the tests, where an increase in the mean could be seen, indicating that the use of 3D CAD modeling develops creative skills in individuals.

Keywords: creativity; design; solid modeling; 3D CAD; creative environments; innovation; relationship.

1. Introducción

La identificación de aspectos que desarrollen la creatividad en los estudiantes es necesaria para entender las complejas tareas que emergen en el ingenio creador del individuo, en los actuales escenarios educativos que reclaman por una enseñanza renovada, con tinturas de "creatividad" y con matices transdisciplinarios (De la Torre, 2009). Es así como la herramienta TIC de modelado CAD 3D puede ser una herramienta de estrategia creativa, que establece cómo comunicar lo que se va a decir mediante un mensaje representado por medio del dibujo tridimensional digital, llevando a que el estudiante construya los conocimientos y desarrolle las habilidades orientadas por el docente. Esta razón justifica la necesidad de investigar la existencia relacional entre el modelado CAD 3D y las habilidades creativas desarrolladas en estudiantes de nivel tecnológico del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA en el Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (Colombia). Consecuentemente, se ha generado la pregunta de investigación: ¿Desarrollan los estudiantes de nivel tecnológico del SENA habilidades creativas como consecuencia de su trabajo con la herramienta TIC de modelado CAD 3D?

Scrivener; Stones y Cassidy (citados en Bonnardel; Zenasni, 2010), afirman que el modelado CAD generalmente obliga a los diseñadores a generar representaciones externas tempranas del objeto representado, utilizando elementos altamente estructurados, los cuales no corresponden a un proceso de creación espontáneo. Whitefield (1986) sugiere que los sistemas CAD ejercen una influencia negativa en el diseño creativo, de hecho, afirma que los estudiantes en el modelado CAD requieren de mayor conocimiento centrado más en el uso de la tecnología computacional que en la tarea de diseño creativo, arrojando dudas sobre la afirmación de que el CAD le brinda al diseñador la libertad de ser más creativo en comparación con métodos de diseño manual. Por otra parte, autores como Mustáamal, Norman, Jabor y Buntat (2012), Lieu y Sorby (2011), Sönmez (2013), Cho (2016), Lee y Yan (2016) entre otros, establecen que en diferentes disciplinas universitarias (no existen estudios sobre estos aspectos en carreras técnicas) el uso de herramientas CAD pueden potenciar las habilidades creativas de los estudiantes o diseñadores. Es claro que, sin tener en cuenta demasiados antecedentes, se presentan las dos posturas o hipótesis de la investigación. La primera es aquella cuyos autores afirman que el Diseño Asistido por Computador (CAD), no obliga a los individuos al uso de estructuras complejas del pensamiento, y que por ende no existe un desarrollo de la creatividad. La segunda postura es aquella cuyos autores afirman que el Diseño Asistido por Computador (CAD), obliga a los individuos al uso de estructuras complejas del pensamiento, y que por ende existe un desarrollo de la creatividad.

2. Marco teórico

Con base en la propuesta del proyecto, los antecedentes y demás información consultada, es conveniente establecer las principales vertientes teóricas que conforman la investigación, basados en el modelo propuesto de la Figura 1 corresponderán a cada uno de los temas principales del marco teórico, los cuales son: creatividad, pensamiento y desarrollo humano, y educación. Cada una de éstas van convergiendo hasta centrarse en el desarrollo de las habilidades creativas de los estudiantes como consecuencia de su trabajo con el modelado CAD 3D (García, 2019).



Figura 1. Modelo para el desarrollo del marco teórico
Fuente: García (2019).

2.1. Pensamiento y desarrollo humano

Los procesos cognitivos asociados al desarrollo humano son las capacidades que el individuo va adquiriendo para conocer y controlar el medio en el que va a vivir. El desarrollo cognitivo implica la potenciación de la inteligencia, la cual está muy relacionada con otras funciones mentales que son atención, memoria, pensamiento y percepción (Ovejero, 2013). Piaget (citado en Ovejero, 2013) lo explica a través de los procesos mentales, centrándose en que el desarrollo posee las funciones de la organización (procesos psicológicos organizados en sistemas coherentes) y la adaptación (asimilación, acomodación, ajuste o modificación de nuevas experiencias a los esquemas existentes).

La percepción parte de la recepción del estímulo sensorial de los objetos y sus características, luego, les brinda significado. La percepción visual tiene como propósito localizar y dilucidar la naturaleza de los objetos en un espacio tridimensional, de manera que el individuo pueda guiar su conducta por el entorno (Villafañe; Mínguez, 2014). Ovejero (2013) establece que el pensamiento es un proceso cognitivo donde la persona es capaz de analizar, comprender, coordinar ideas, imágenes, conceptos, símbolos, entre otros, para solucionar problemas, razonar y crear. El pensamiento visual fue acuñado por Armheim (1986) que afirma que sus operaciones más importantes provienen en forma directa de la percepción del mundo del individuo (imágenes mentales), en que la visión sirve como sistema sensorial por excelencia que apunta y constituye los procesos cognitivos. Para Lieu y Sorby (2011), el pensamiento visual es el proceso de expandir las ideas creativas utilizando pistas visuales y retroalimentación. Las pistas visuales pueden tomar formas de bosquejos o modelos de computador. A su vez, este tipo de pensamiento hace uso principalmente del lenguaje visual y objetual, y de acuerdo al tipo de materialidad se puede llevar a cabo por imágenes de imágenes, imágenes no icónicas, imágenes icónicas o por objetos, que se perciben por la reconstrucción imaginaria (Valdés de León, 2011).

2.2. Creatividad

La creatividad es tener ideas y comunicarlas (De la Torre, 1991) y atiende a periodos bioculturales del individuo. Con una aproximación cognitiva hacia la creatividad, se habla del término “creatividad de dominio específico” el cual, se refiere a la capacidad del individuo para manifestar habilidades creativas en diferentes áreas o dominios curriculares (Bermejo; Ferrando; Sainz; Soto; Ruiz, 2014).

Autores como Baer (1994), Gardner (2010), Bermejo, Ferrando, Sainz, Soto y Ruiz (2014) argumentan que el desarrollo cognitivo procede por una parte de dominios diferentes del conocimiento y por otra parte de las habilidades y conocimientos que subyacen en el rendimiento en cada dominio o área del conocimiento y no se relacionan con otras de otros dominios. Existen ámbitos de aplicación que ofrecen diversidad y pluralismo en las manifestaciones creativas, entre los que se encuentran las artes plásticas y visuales (De la Torre; Ibañez, 2000). Morea y Sorraire (2005), proponen la creatividad desde dos perspectivas. La primera es la creatividad y artes plásticas y la segunda corresponde a la creatividad y el diseño industrial. En la segunda, la creatividad se estima como un pensamiento asociativo amplio y alternativo que cuenta con la posibilidad de representación y simbolización de modo divergente, aprovechando el conocimiento a través de la estructuración de variadas rutas mentales. La creatividad en el diseño se expresa en la producción de algo, con novedad y coherencia, que dependiendo del contexto puede variar la percepción de innovación, valor, originalidad, novedad, entre otras (Sánchez, 2006).

Para identificar un individuo como creativo, investigadores como Boden, Perkins y Sternberg (citado en Gardner, 2010) sugieren habilidades creativas tales como: identificar problemas y espacios de solución, pistas para llevar resultados, evaluar soluciones alternativas, uso de recursos de tiempo y energía, toma de decisiones y procesos de reflexión sobre los procesos creativos. Miller (2009), Bermejo, Ferrando, Sainz, Soto y Ruiz (2014) establecen habilidades como generación de ideas, pensamiento metafórico y analógico, toma de perspectiva o manipulación de ideas, imaginación, incubación y flujo de ideas. Las investigaciones de Guilford, Löwenfeld y Torrance (citados en Ibañez, 1998) coinciden en algunos rasgos fundamentales, que permiten por una parte diagnosticar las habilidades creativas. Este diagnóstico se lleva a cabo mediante indicadores y factores de la creatividad, que son evaluados con el uso de instrumentos. De la Torre & Ibañez (2000) e Ibañez (1998) abordan cada uno de los factores, que son: sensibilidad para los problemas, fluidez o productividad, flexibilidad mental, originalidad, formulación de hipótesis, redefinir, mejora del producto, establecer relaciones remotas o forzadas, elaboración, síntesis, abstracción, análisis, organización y comunicación, entre otros. Se tienen autores como Guilford, Torrance, Gowan, Yamamoto, entre otros (citados en Ibañez, 1998) que han desarrollado diferentes pruebas que permiten el diagnóstico y evaluación de los indicadores asociados a las habilidades creativas de los individuos.

Dada la naturaleza temática que ha sentado las bases de esta investigación, el uso de los computadores como herramientas de apoyo para el diseño conceptual creativo se ha enfocado hacia los modeladores CAD 3D. Para Chi-Fu y Jerz (citado en Aguilar; López; De las Heras; Gámez, 2014) son herramientas de trabajo en expresión gráfica y desarrollo del pensamiento visual-espacial con sistemas de representación como lenguaje. Existe entonces una taxonomía de los diferentes enfoques para el desarrollo de herramientas de apoyo al diseño conceptual presentado por O'Sullivan (1991); (Chaur, 2004), quienes clasifican en seis categorías, de las cuales se selecciona el enfoque basado en modelos geométricos. Este enfoque busca hacer representaciones geométricas de los detalles críticos del producto, permitiendo rapidez en la presentación de las ideas y posibilidad de representar funciones.

2.3. Educación

Desde la perspectiva de la educación De la Torre y Violant (2006) hacen referencia a la capacidad creativa de los estudiantes como un aspecto de demanda social y educativa, menciona además que la riqueza de un

país comienza a valorarse en términos del potencial innovador y la creatividad ha pasado de ser un atributo individual, a un bien social. Los diseños curriculares de los programas de formación deben constar de una concepción integrada, basada en los aportes de las ciencias sistémicas y ciencias cognitivas, cuyos campos interdisciplinarios proporcionen principios, fundamentos y características para replantear el conocimiento pedagógico frente al aprendizaje, el diseño y organización de la enseñanza. De acuerdo con la escuela constructivista el aprendizaje es un proceso autorregulado de resolución de conflictos cognitivos, que aparecen en el estudiante al enfrentarse al ejercicio de resolución de problemas (De la Torre; Violant, 2006).

Para el Ministerio de Educación Nacional (2008), el técnico profesional, por su formación, está facultado para desempeñarse en ocupaciones de carácter operativo e instrumental; desarrolla competencias relacionadas con la aplicación de conocimientos en un conjunto de actividades laborales, realizadas en diferentes contextos con un alto grado de especificidad; trata casi siempre con operaciones normalizadas o estandarizadas, abordando la teoría más como fundamentación del objeto técnico, que como objeto de estudio. Un tecnólogo desarrolla competencias relacionadas con la aplicación y práctica de conocimientos en un conjunto de actividades laborales más complejas y no rutinarias, y en gran parte de los casos desempeñados en diversos contextos. La teoría cobra más preponderancia y sentido para conceptualizar el objeto tecnológico que le permita visualizar e intervenir en procesos de diseño y mejora. Toda su formación corresponde a prácticas en la gestión de recolección, procesamiento, evaluación y calificación de información para planear, programar y controlar procesos que encuentran en la teoría razones y fundamentos para la creatividad e innovación.

3. Materiales y métodos

3.1. Diseño

Estudio cuasi-experimental de alcance correlacional, cuyo enfoque positivo permitió el tratamiento de la información de orden cuantitativo. De acuerdo con el diseño de la investigación mostrado en la Figura 2, la muestra objeto de estudio estuvo conformada por un grupo experimental y un grupo control. A los dos grupos se les llevó a cabo un Pretest (prueba ECG). Al Grupo Experimental se le realizó un estímulo o tratamiento que corresponde a la enseñanza del modelado CAD 3D (variable independiente) y al Grupo Control no se le realizó intervención. Finalmente, a ambos grupos se les realizó un Postest (prueba ECG) para evaluar las habilidades creativas (variable dependiente), permitiendo realizar inferencias respecto a los cambios presentados como consecuencia del estímulo.

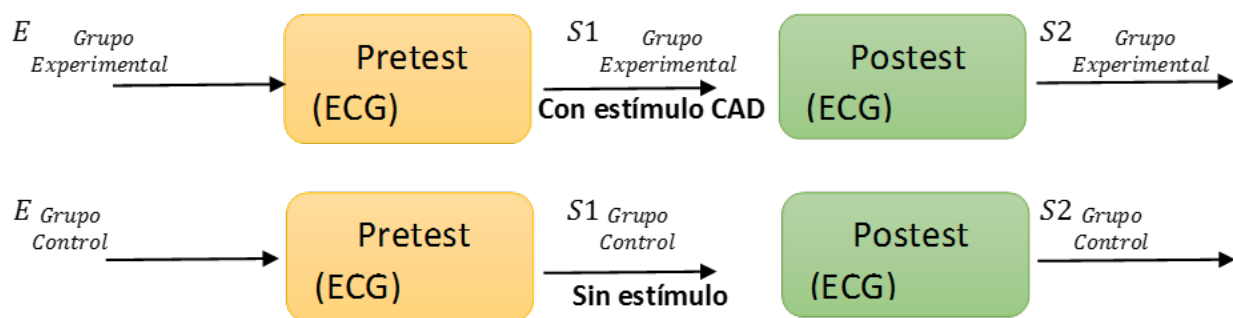


Figura 2. Esquema de Diseño de la investigación
Fuente: García (2019).

3.2. Población y muestra

Esta investigación se llevó a cabo con los aprendices del programa de formación de nivel tecnólogo en Mantenimiento Mecatrónico de Automotores (Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, 2016), del Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial de Dosquebradas (Colombia). Como porción finita de estudiantes nivel tecnológico, el tamaño de la población fue $N=209$ aprendices (Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, 2017), trabajando con un error máximo permisible adoptado del 14 % y con significancia estadística de 10 %. Por muestreo aleatorio simple se determinó una muestra representada por 29 individuos (Grupo control) y 29 individuos (Grupo Experimental) (García, 2019).

3.3. Entorno

Para ajustar la homogeneidad de la muestra, los estudiantes debían cumplir con los siguientes criterios de selección:

- Personas con edades comprendidas entre los 17 y 30 años.
- Que cursen estudios en tecnología en el SENA.
- Que el programa de formación al cual pertenecen los estudiantes no contemple en la estructura curricular del mismo la asignatura de modelado CAD (en este caso el programa de formación en Mantenimiento Mecatrónico de Automotores del SENA Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial de la ciudad de Dosquebradas (Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, 2016).
- Que el programa al cual pertenezca la población seleccionada sea afín al conocimiento y manejo instrumental (característica que permite asegurar una población con intereses en el manejo de las TIC en la especificidad gráfica).
- Que los estudiantes estén matriculados en etapa lectiva del programa.

3.4. Intervenciones

Para evaluar las habilidades creativas en el pretest y postest sobre los sujetos que conforman los grupos experimental y control, se utilizó el instrumento Evaluación de la Creatividad Gráfica (ECG), que corresponde a una prueba psicopedagógica elaborada por De la Torre y Violant (2006), basada en los mismos supuestos teóricos del Test de Abreacción para Evaluar la Creatividad TAEC, que cuenta con confiabilidad para los indicadores por encima del 0,89 y validez externa (De la Torre, 1991). El ECG permite evaluar 11 indicadores asociados a las habilidades creativas de los individuos: resistencia al cierre (Rc), compleción figurativa (Cf), originalidad (Or), elaboración (El), conectividad lineal (Cl), conectividad temática (Ct), conectividad expansiva (Ce), fantasía (Fa), habilidad gráfica (Hg), sentido del humor (Sh), fluidez gráfica (Fg) y puntaje total (Pt). Este último no es un indicador de creatividad, pero permite tener una perspectiva holística de los resultados obtenidos por el individuo y por el grupo.

Para el desarrollo del estímulo en el grupo experimental (variable independiente manipulada) correspondiente al Modelado CAD 3D, el SENA cuenta con insumos importantes para la delimitación legal del proyecto, permitiendo el uso de diferentes modeladores CAD (SENA, 2017), entre los que se ha seleccionado el software de modelado CAD 3D Solidworks®. La intervención ha consistido en una capacitación o formación complementaria, cuya duración fue de aproximadamente 2 meses (40 horas), con una intensidad horaria de 2 sesiones por semana y cada sesión fue de 2 horas. Se seleccionaron módulos o temáticas con el objetivo de que

el estudiante interactúe directamente con técnicas de modelado geométrico tridimensional en Solidworks®, de tal forma que sea coherente con todo lo planteado en el proyecto de investigación con relación única y exclusivamente al modelado CAD 3D. Las sesiones que se llevaron a cabo fueron: modelado de piezas geométricas a partir de croquis, modelado de sólidos con el uso de operaciones extruir saliente, extruir corte, redondeo, chaflán, vaciado, saliente y corte por revolución, recubrir, barrido, simetría, ensamblaje de piezas, y modelado mediante superficies. Cada uno de los módulos se desarrolló de manera interrelacionada, con el uso de retos u objetivos concretos a los estudiantes, para que modelaran piezas o sólidos que bien pueden partir de imágenes o fotos del objeto (reto), imágenes tridimensionales del objeto terminado en Solidworks® o de objetos físicos para que los estudiantes interactúen.

3.5. Análisis estadístico

Se llevó a cabo con la herramienta computacional SPSS® y se dividió en tres etapas:

- Exploración de variables: permite validar que en los resultados obtenidos no se presenten casos perdidos (García, 2019), y se realizó una prueba de independencia de variables con el índice estadístico “chi-cuadrado”, donde se concluye que la prueba no fue estadísticamente significativa (valores de significación asintótica por encima de 0,05), por lo tanto, las variables sí son independientes (Aguayo, 2004). Finalmente se muestra la comparación de datos obtenidos en las pruebas (Tabla 3).
- Estado de las habilidades creativas: mediante el análisis paramétrico de la prueba t se determina si las diferencias entre las medias de los grupos experimental y control son significativas desde un punto de vista estadístico, lo que permitirá identificar el estado de las habilidades creativas de los individuos que trabajan con el modelado CAD 3D.
- Establecer las diferencias significativas: se ha realizado análisis de distribución de frecuencias descriptivas para ambos grupos, con cada uno de los indicadores evaluados en el instrumento ECG, para el grupo control se ha tenido en cuenta el pretest y para el grupo experimental se ha tenido en cuenta el posttest, de esta manera se podrán establecer las diferencias significativas entre las habilidades creativas de los individuos que apropiaron el modelado CAD 3D (grupo experimental), con el grupo control.

4. Resultados

Resultados evaluación de pretest y posttest a los grupos experimental y control.

En la Tabla 1 y la Tabla 2 se pueden apreciar los resultados obtenidos de los indicadores evaluados por el instrumento ECG y para cada uno de los 29 sujetos de los grupos Experimental y Control.

4.1. Comparación de datos

Se llevaron a cabo las siguientes comparaciones mostradas en la Tabla 3:

- Comparación pretest y posttest para grupo experimental.
- Comparación pretest y posttest para grupo control.
- Comparación pretest (grupo experimental) y pretest (grupo control).
- Comparación posttest (grupo experimental) y posttest (grupo control).

Tabla 1.
Resultados Pretest y Posttest grupo Control

#	Pretest evaluación de creatividad gráfica													Posttest evaluación de creatividad gráfica												
	Te	Rc	Cf	Or	El	Cl	Ct	Ce	Fa	Hg	Sh	Fg	Pt	Te	Rc	Cf	Or	El	Cl	Ct	Ce	Fa	Hg	Sh	Fg	Pt
1	26	5	9	3	5	7	8	3	3	3	0	1,77	46	14	6	9	4	7	9	9	9	3	5	0	4,36	61
2	34	2	8	1	1	0	0	0	3	2	0	0,50	17	15	0	9	2	2	2	0	0	3	2	0	1,33	20
3	16	1	6	3	2	4	2	0	3	2	1	1,50	24	16	2	6	1	1	0	0	0	2	1	0	0,81	13
4	27	7	8	2	2	1	0	0	3	2	0	0,93	25	19	6	9	2	2	2	4	0	3	2	2	1,68	32
5	32	1	9	3	2	9	9	9	5	2	2	1,59	51	20	0	9	4	5	6	9	9	3	4	0	2,45	49
6	23	3	9	2	1	0	0	0	3	2	0	0,87	20	22	0	9	3	5	0	0	0	3	3	0	1,05	23
7	32	3	5	2	1	2	0	0	3	2	0	0,56	18	29	3	5	2	4	2	4	0	3	3	0	0,90	26
8	47	1	6	2	2	0	0	0	3	2	0	0,34	16	24	0	5	1	2	0	0	0	3	2	0	0,54	13
9	44	9	1	2	3	0	0	0	3	3	1	0,50	22	25	0	6	2	2	0	0	0	3	3	0	0,64	16
10	48	2	6	2	3	0	0	0	3	3	0	0,40	19	25	2	6	2	2	0	0	0	3	3	0	0,72	18
11	55	5	9	3	3	0	0	0	5	2	1	0,51	28	38	1	9	7	9	4	9	9	7	7	0	1,63	62
12	58	2	9	7	9	9	9	9	7	7	0	1,17	68	39	2	7	8	9	7	9	3	8	8	2	1,62	63
13	49	0	6	4	7	0	6	0	5	3	1	0,65	32	47	7	4	1	1	0	6	0	3	2	1	0,53	25
14	34	7	9	2	1	9	9	9	4	2	0	1,53	52	42	5	7	2	1	0	0	0	3	2	0	0,48	20
15	44	0	8	2	3	0	0	6	3	2	0	0,55	24	41	0	8	2	1	0	0	0	3	3	0	0,41	17
16	55	4	6	3	4	0	3	0	5	3	0	0,51	28	40	0	9	4	5	0	9	9	3	4	3	1,15	46
17	22	2	6	2	3	0	0	0	3	2	0	0,82	18	39	2	9	2	3	0	3	0	3	3	0	0,64	25
18	21	0	6	2	3	5	7	3	3	2	0	1,48	31	38	5	6	3	6	2	6	0	3	6	0	0,97	37
19	40	2	6	3	7	5	6	0	3	4	0	0,90	36	38	3	6	2	7	6	6	0	3	6	0	1,03	39
20	35	2	7	1	2	2	0	0	3	2	0	0,54	19	34	2	9	3	2	0	0	0	3	2	0	0,62	21
21	48	2	6	4	7	4	6	0	5	4	0	0,79	38	30	6	9	5	3	0	6	0	5	4	0	1,27	38
22	13	4	6	1	1	0	0	0	3	2	0	1,31	17	29	3	8	3	3	0	0	0	4	3	0	0,83	24
23	22	2	8	2	1	0	0	0	3	2	0	0,82	18	19	3	9	2	2	0	0	0	4	3	0	1,21	23
24	10	2	9	3	1	0	9	9	3	2	2	4,00	40	16	3	9	2	1	0	9	9	3	3	2	2,56	41
25	10	0	9	2	2	7	9	9	4	2	2	4,60	46	13	0	9	1	1	8	9	9	3	2	0	3,23	42
26	14	0	9	1	1	9	9	9	2	1	0	2,93	41	11	0	6	2	1	4	6	6	4	2	1	2,91	32
27	32	8	5	2	1	3	2	0	2	2	0	0,78	25	10	4	8	1	1	8	9	9	2	1	0	4,30	43
28	13	9	8	2	1	8	8	9	2	2	0	3,77	49	7	7	8	1	1	8	7	6	2	1	0	5,86	41
29	13	8	3	1	1	0	0	0	2	1	0	1,23	16	8	8	5	1	1	0	2	0	2	1	0	2,50	20

Fuente: elaboración propia.

Para las dos primeras comparaciones, el análisis realizado en cada caso corresponde a la prueba t para muestras relacionadas, debido a que en estos casos tanto el pretest como el posttest fue realizado al mismo grupo. Se puede observar que la comparación realizada en el pretest y posttest para el grupo control, no presentó diferencias significativas en los indicadores evaluados, a excepción de la habilidad gráfica (Hg) y en la comparación realizada entre los pretest (grupo experimental) y pretest (grupo control) no se presentaron diferencias significativas en ninguno de los indicadores evaluados. Para las dos últimas comparaciones, se ejecutó el análisis de Prueba t para muestras independientes, puesto que, en estos casos, se comparan los resultados obtenidos en las pruebas de grupos independientes.

Respecto a la comparación realizada en ambos grupos con relación a la prueba posttest (datos de columna derecha de Tabla 3), de acuerdo con Sabino (1980), es posible que las diferencias significativas se hallan presentado por saturación de las pruebas pretest y posttest realizadas al mismo grupo, manifestandose una posible actitud de rechazo progresivo por parte de cada uno de los integrantes de la muestra, esto debido posiblemente a que las personas tiendan a cansarse al ser sometidos a responder varias veces una misma prueba, lo que podría ocasionar respuestas en el posttest con base en lo respondido en el pretest. También se puede presentar sesgo en aquellas personas que obteniendo un muy buen puntaje en el pretest, por cuestiones del azar tienden a disminuir su puntuación. Este caso también se presenta de manera inversa (quienes comienzan con un puntaje bajo, lo elevan en la segunda prueba). Otro aspecto a tener en cuenta, es el periodo transcurrido entre el pretest y el posttest, las personas pueden recordar cómo respondieron en la primera prueba del ECG, creando una falsa apreciación de lo que en realidad son (Hernández; Fernández; Baptista, 2014). En la comparación realizada entre los pretest (grupo experimental) y pretest (grupo control) mostrados en la Tabla 3 no se presentaron diferencias significativas en ninguno de los indicadores evaluados.

Tabla 2.

Pretest y Postest Grupo Experimental

#	Pretest evaluación de creatividad gráfica													Postest evaluación de creatividad gráfica												
	Te	Rc	Cf	Or	El	Cl	Ct	Ce	Fa	Hg	Sh	Fg	Pt	Te	Rc	Cf	Or	El	Cl	Ct	Ce	Fa	Hg	Sh	Fg	Pt
1	37	0	8	1	1	0	0	0	2	2	0	0,38	14	27	1	9	2	4	0	2	3	4	4	0	1,07	29
2	5	9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2,00	10	26	9	6	2	7	0	6	0	4	4	0	1,46	38
3	35	2	9	3	3	2	0	3	2	3	0	0,77	27	24	2	9	3	7	2	7	9	5	5	4	2,21	53
4	31	1	8	5	6	0	0	0	5	4	4	1,06	33	23	3	8	5	7	0	8	6	5	7	4	2,30	55
5	34	0	9	3	3	0	9	9	4	3	0	1,18	40	18	3	9	3	5	6	9	9	7	7	0	3,22	58
6	29	3	4	2	3	4	0	3	2	2	0	0,79	23	15	0	9	2	2	7	8	6	5	3	2	2,93	44
7	36	8	9	7	7	5	9	9	6	5	0	1,81	65	34	4	9	6	7	3	9	9	8	4	0	1,74	59
8	65	7	8	6	5	0	6	0	5	4	0	0,63	41	32	4	8	5	7	0	9	9	7	5	4	1,81	58
9	27	2	8	2	1	2	7	6	3	3	0	1,26	34	29	4	8	3	4	3	4	3	4	4	0	1,28	37
10	33	2	6	2	1	0	3	0	3	3	1	0,64	21	26	2	5	2	4	2	5	0	4	4	0	1,08	28
11	28	2	7	1	1	5	5	3	3	2	0	1,04	29	26	1	8	2	1	0	0	0	4	3	3	0,85	22
12	44	2	9	1	1	0	0	0	3	2	0	0,41	18	26	0	9	1	2	0	0	0	3	3	0	0,69	18
13	32	4	9	1	2	5	5	3	3	3	0	1,09	35	25	1	9	1	3	4	9	9	3	4	0	1,72	43
14	54	1	9	1	4	0	0	0	3	3	0	0,39	21	25	1	7	2	4	0	8	9	3	4	0	1,52	38
15	32	2	9	3	7	3	9	9	4	4	0	1,56	50	25	7	8	3	8	0	9	9	3	7	2	2,24	56
16	10	5	5	2	2	0	0	0	2	3	0	1,90	19	25	7	7	2	4	0	7	9	3	3	0	1,68	42
17	33	1	9	3	1	5	6	6	4	3	0	1,15	38	24	0	9	2	3	2	6	9	4	3	0	1,58	38
18	47	1	8	2	1	7	9	9	3	2	0	0,89	42	24	4	9	4	8	4	9	9	5	7	2	2,54	61
19	18	4	8	1	2	2	6	0	2	2	2	1,61	29	24	1	7	1	2	0	0	0	3	3	0	0,71	17
20	27	8	2	7	7	0	0	0	5	4	2	1,30	35	21	8	8	3	7	0	8	6	7	5	0	2,48	52
21	25	4	6	1	1	0	0	0	2	2	0	0,64	16	22	4	6	1	2	0	5	0	2	2	0	1,00	22
22	47	2	8	2	3	0	0	3	3	3	2	0,55	26	36	2	8	2	2	0	0	6	2	3	0	0,69	25
23	11	2	6	2	2	0	5	0	3	3	0	2,09	23	15	3	6	2	3	0	6	3	4	3	3	2,20	33
24	47	4	8	3	6	4	4	9	5	6	0	1,04	49	25	3	8	1	1	4	5	3	3	3	0	1,24	31
25	35	0	8	2	3	8	8	9	3	3	1	1,29	45	20	2	8	2	5	3	9	9	3	5	4	2,50	50
26	24	5	5	1	2	0	0	0	3	2	0	0,75	18	40	6	5	3	3	2	6	0	3	3	0	0,78	31
27	49	6	4	2	5	0	0	0	3	4	1	0,51	25	10	8	3	2	4	0	0	0	3	4	2	2,60	26
28	35	7	7	3	3	0	0	0	3	2	1	0,74	26	15	7	7	3	4	0	7	6	4	4	3	3,00	45
29	8	2	6	1	1	0	0	0	2	2	0	1,75	14	14	0	7	4	7	5	7	3	4	6	2	3,21	45

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.

Resumen de resultados obtenidos en las comparaciones realizadas

Variable	Pretest-Postest grupo control		Pretest-Postest grupo experimental		Pretest (grupos experimental y control)		Postest (grupos experimental y control)	
	Diferencias significativas		Diferencias significativas		Diferencias significativas		Diferencias significativas	
	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No
TE	x		x			x		x
RC		x		x		x		x
CF		x		x		x		x
OR		x		x		x		x
EL		x	x			x	x	
CL		x		x		x		x
CT		x	x			x		x
CE		x	x			x	x	
FA		x	x			x	x	
HG	x		x			x	x	
SH		x	x			x	x	
FG		x	x			x		x
PT		x	x			x	x	

Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis paramétrico de la prueba t

Los resultados obtenidos del análisis paramétrico de la prueba t (Tabla 4) determinan si las diferencias entre las medias de los grupos experimental y control son significativas desde un punto de vista estadístico. Esto permitió identificar el estado de las habilidades creativas de los individuos que trabajan con el modelado CAD 3D (grupo Experimental). Todos los análisis fueron realizados con un nivel de significancia de 0,05 o porcentaje del intervalo de confianza del 95 %, es decir, que cuando el valor t se calcula mediante el paquete estadístico SPSS®, la significancia bilateral se proporciona como parte de los resultados y debe ser menor a 0,05.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 4, los indicadores que presentaron diferencias estadísticas significativas (significancia bilateral menor a 0,05) fueron: elaboración (El), conectividad temática (Ct), conectividad expansiva (Ce), fantasía (Fa), habilidad gráfica (Hg), sentido del humor (Sh), fluidez gráfica (Fg) y puntaje total (Pt). Por otra parte, se puede apreciar que los indicadores que no presentaron diferencias estadísticas significativas (significancia bilateral mayor a 0,05) fueron: resistencia al cierre (Rc), complección figurativa (Cf), originalidad (Or), conectividad lineal (Cl).

Tabla 4.
Comparación pretest - postest grupo experimental

DIFERENCIAS EMPAREJADAS									
GRUPO DE ESTUDIO		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		T	GL	SIG. (BILATERAL)
					Inferior	Superior			
GRUPO EXPERIMENTAL	Tiempo de elaboración (min) - Pretest - Tiempo de elaboración (min) – Postest	8,34	14,07	2,63	2,99	13,69	3,19	28	0,00
	Resistencia al cierre - Pretest - Resistencia al Cierre – Postest	-0,03	2,14	0,39	-0,85	0,78	-0,08	28	0,93
	Complección Figurativa - Pretest - Complección Figurativa – Postest	-0,58	1,91	0,35	-1,31	0,14	-1,64	28	0,11
	Originalidad - Pretest - Originalidad – Postest	-0,13	1,30	0,24	-0,63	0,35	-0,57	28	0,57
	Elaboración -Pretest - Elaboración – Postest	-1,48	2,45	0,45	-2,41	-0,54	-3,24	28	0,00
	Conectividad Lineal - Pretest - Conectividad Lineal – Postest	0,17	2,42	0,44	-0,74	1,09	0,38	28	0,70
	Conectividad Temática -Pretest - Conectividad Temática – Postest	-2,65	4,01	0,74	-4,18	-1,12	-3,56	28	0,00
	Conectividad Expansiva - Pretest - Conectividad Expansiva – Postest	-2,17	3,75	0,69	-3,59	-0,74	-3,11	28	0,00
	Fantasía - Pretest - Fantasía – Postest	-0,93	1,30	0,24	-1,42	-0,43	-3,83	28	0,00
	Habilidad Gráfica - Pretest - Habilidad Gráfica – Postest	-1,31	1,67	0,31	-1,94	-0,67	-4,22	28	0,00
	Sentido del Humor - Pretest - Sentido del Humor - Postest	-0,72	1,66	0,30	-1,35	-0,09	-2,34	28	0,02
	Fluidez Gráfica - Pretest - Fluidez Gráfica – Postest	-0,72	0,84	0,15	-1,04	-0,40	-4,63	28	0,00
	Puntaje Total - Pretest - Puntaje Total - Postest	-9,86	12,17	2,26	-14,49	-5,23	-4,36	28	0,00

Fuente: elaboración propia.

4.3. Distribución de frecuencias descriptivas

Para establecer las diferencias significativas entre las habilidades creativas de los individuos objeto de investigación que apropiaron el modelado CAD 3D (grupo experimental) con el grupo de control, se ha realizado análisis de distribución de frecuencias descriptivas de ambos grupos, con cada uno de los indicadores evaluados en el instrumento ECG. Para la presente investigación se tuvo en cuenta aquellos indicadores del ECG que

presentaron diferencias estadísticas significativas en el grupo experimental: elaboración (El), conectividad temática (Ct), conectividad expansiva (Ce), fantasía (Fa), habilidad gráfica (Hg), sentido del humor (Sh), fluidez gráfica (Fg) y puntaje total (Pt). Para el grupo control se tuvo en cuenta el pretest y para el grupo experimental se tuvo en cuenta el postest.

Con el uso del modelado CAD 3D, se aumentó la media de 2,76 a 4,38 (Figura 3) para este indicador elaboración (El). De 37,90 % de estudiantes que presentaron una puntuación igual a 1, sólo el 6,90% sigue con esta misma valoración después de trabajar con CAD 3D (Tabla 5). De 3,40 % de los estudiantes que obtuvieron el máximo puntaje (9), con el uso del Modelado CAD 3D se aumentó al 6,90 % (Tabla 5).

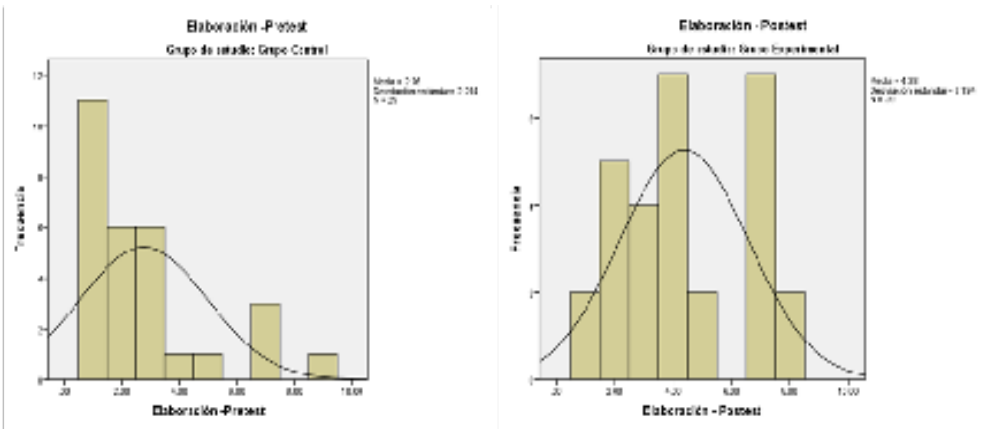


Figura 3. Histogramas Pretest -Postest elaboración (El)
Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.

Frecuencias Pretest-Postest de indicador elaboración (El)

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Grupo Control - Pretest	1	11	37,90	37,90
	2	6	20,70	58,60
	3	6	20,70	79,30
	4	1	3,40	82,80
	5	1	3,40	86,20
	7	3	10,30	96,60
	9	1	3,40	100
	Total	29	100	
Grupo Experimental - Postest	1	2	6,90	6,90
	2	5	17,20	24,10
	3	4	13,80	37,90
	4	7	24,10	62,10
	5	2	6,90	69
	7	7	24,10	93,10
	8	2	6,90	100
	Total	29	100	

Fuente: elaboración propia.

Para la conectividad temática (Ct), el uso del modelado CAD 3D aumentó la media, pasando de 3,52 a 5,79 (Figura 4). Asimismo, la desviación estándar en el grupo que trabajó con el modelado CAD tiene más uniformidad respecto al grupo control. Ahora, del 48,30 % de sujetos que presentaban una valoración igual a 0, con el uso del modelo CAD 3D se ha reducido al 17,20 % (Tabla 6), lo que ha representado una de las grandes diferencias en este indicador. Además, se puede observar cómo el grupo control presentó un porcentaje acumulado de 60 % con puntajes menores o iguales a 6, mientras que el grupo experimental con un 48,30% mostraba una valoración menor o igual 6 en los individuos. Esto indica que, para el grupo experimental, se aumentó la cantidad de sujetos que presentaron puntajes mayores a 6.

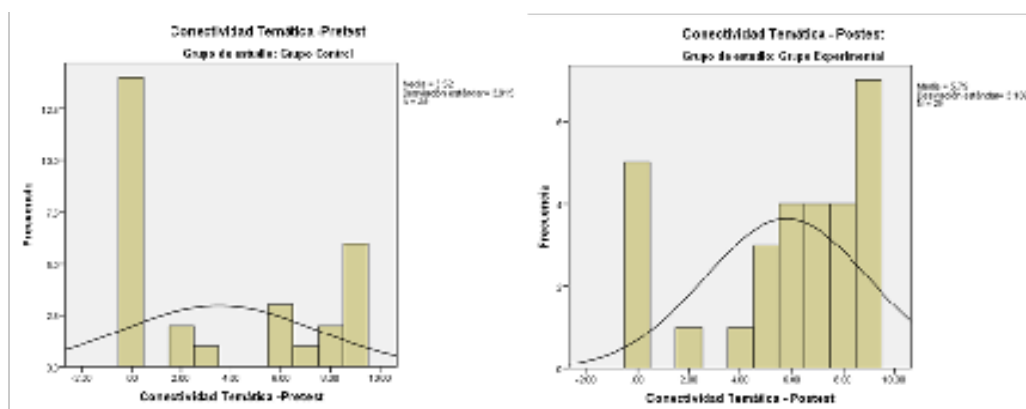


Figura 4. Histogramas Pretest -Posttest conectividad temática (Ct)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.

Frecuencias Pretest-Posttest de indicador conectividad temática (Ct)

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Grupo Control	0	14	48,30	48,30	48,30
	2	2	6,90	6,90	55,20
	3	1	3,40	3,40	58,60
	6	3	10,30	10,30	69
	7	1	3,40	3,40	72,40
	8	2	6,90	6,90	79,30
	9	6	20,70	20,70	100
	Total	29	100	100	
Grupo Experimental	0	5	17,20	17,20	17,20
	2	1	3,40	3,40	20,70
	4	1	3,40	3,40	24,10
	5	3	10,30	10,30	34,50
	6	4	13,80	13,80	48,30
	7	4	13,80	13,80	62,10
	8	4	13,80	13,80	75,90
	9	7	24,10	24,10	100
	Total	29	100	100	

Fuente: elaboración propia.

La conectividad expansiva (Ce), por el uso del modelado CAD 3D presentó un aumento en la media de 2,59 a 4,97 (Figura 5). También, permitió establecer que el 65,50% de los sujetos que presentaban una valoración igual a 0 presentan luego una disminución a 27,60 % (Tabla 7), explicado de otra forma, de 19 sujetos con puntaje igual a 0, después de usar el modelado CAD 3D tan sólo 8 sujetos aún presentan esta misma valoración. Igualmente, se presentó un aumento en los sujetos que tenían una valoración igual a 9, pasando del 24,10 % al 37,90 % (Tabla 7).

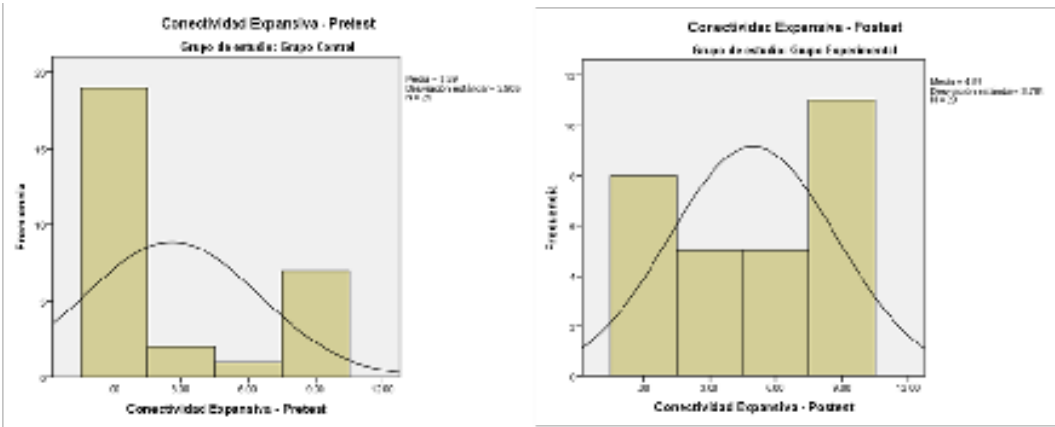


Figura 5. Histogramas Pretest -Posttest conectividad expansiva (Ce)
Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.
Frecuencias Pretest-Posttest indicador conectividad expansiva (Ce)

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Grupo Control	2	4	13,80	13,80	13,80
	3	17	58,60	58,60	72,40
	4	2	6,90	6,90	79,30
	5	5	17,20	17,20	96,60
	7	1	3,40	3,40	100
	Total	29	100	100	
Grupo Experimental	2	2	6,90	6,90	6,90
	3	10	34,50	34,50	41,40
	4	9	31	31	72,40
	5	4	13,80	13,80	86,20
	7	3	10,30	10,30	96,60
	8	1	3,40	3,40	100
	Total	29	100	100	

Fuente: elaboración propia.

Para la fantasía (Fa), se pudo observar un aumento en la media, pasando de 3,41 a 4,10 (Figura 6), en gran parte, gracias a que se aumentó el porcentaje de sujetos que obtuvieron una valoración igual a 4, donde, para el grupo control corresponde al 6,90 %, mientras que para el grupo experimental corresponde al 31 % (Tabla 8). También se observó un aumento en la cantidad de sujetos que presentaron una valoración igual a 7, pasando de 1 a 3 sujetos. Además, a pesar de que la desviación estándar es más uniforme para el grupo control respecto al experimental, se aprecia que, para el primer grupo, se tenía un porcentaje acumulado del 72,40 % con valoración menor o igual a 3, mientras que para el segundo grupo se aprecia como disminuyó este porcentaje hasta el 41,40 % (Tabla 8).

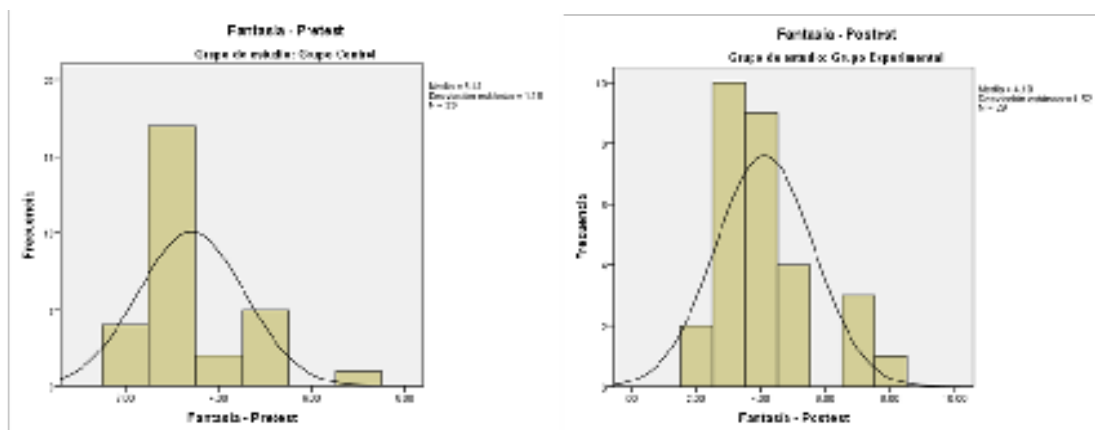


Figura 6. Histogramas Pretest -Posttest fantasía (Fa)
Fuente: elaboración propia.

Tabla 8.

Frecuencias Pretest - Posttest indicador fantasía (Fa)

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Grupo Control	2	4	13,80	13,80	13,80
	3	17	58,60	58,60	72,40
	4	2	6,90	6,90	79,30
	5	5	17,20	17,20	96,60
	7	1	3,40	3,40	100
	Total	29	100	100	
Grupo Experimental	2	2	6,90	6,90	6,90
	3	10	34,50	34,50	41,40
	4	9	31	31	72,40
	5	4	13,80	13,80	86,20
	7	3	10,30	10,30	96,60
	8	1	3,40	3,40	100
	Total	29	100	100	

Fuente: elaboración propia.

La habilidad gráfica (Hg) presentó un aumento considerable en la media, pasando del 2,41 al 4,21 (Figura 7). A pesar de que la desviación estándar es más uniforme para el grupo control respecto al grupo experimental, se puede apreciar cómo el 72,40 % (porcentaje acumulado) de los sujetos del grupo control, presentaba una valoración menor o igual a 2, mientras que para el grupo experimental se redujo esta cifra a tan sólo el 3,40 % de los sujetos (Tabla 9). Además, del 3,40 % de los sujetos que presentaron una valoración igual a 7, gracias al modelado CAD, esta cifra ha aumentado hasta el 13,80 % (Tabla 9).

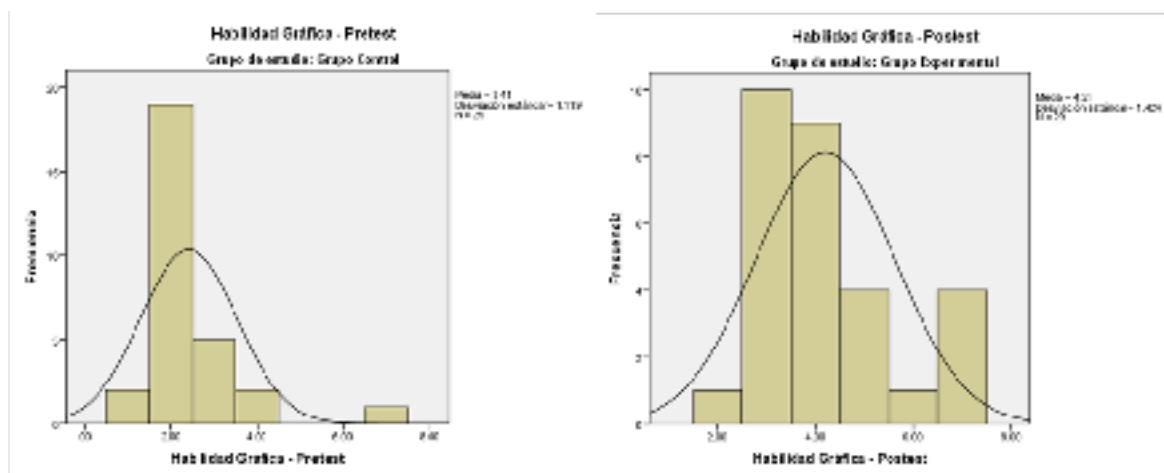


Figura 7. Histogramas Pretest -Posttest habilidad gráfica (Hg).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 9.

Frecuencias Pretest-Posttest para indicador habilidad gráfica (Hg)

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Grupo Control	1	2	6,90	6,90	6,90
	2	19	65,50	65,50	72,40
	3	5	17,2	17,20	89,70
	4	2	6,90	6,90	96,60
	7	1	3,40	3,40	100
	Total	29	100	100	
Grupo Experimental	2	1	3,40	3,40	3,40
	3	10	34,50	34,50	37,90
	4	9	31	31	69
	5	4	13,80	13,80	82,80
	6	1	3,40	3,40	86,20
	7	4	13,80	13,80	100
	Total	29	100	100	

Fuente: elaboración propia.

El sentido del humor (Sh), a pesar de tener medias más bajas respecto a los demás indicadores, presentó diferencias significativas, ya que se observa un aumento en la media desde 0,34 al 1,21 (Figura 8). Mientras que para el grupo Control se tenían un 75,90 % de los sujetos con una valoración igual a 0, para el grupo experimental se aprecia un porcentaje de 58,60 % (Tabla 10). Además, hay un aumento en los sujetos que presentaron una valoración mayor a 2, que para el grupo control corresponde al 0 %, mientras que para el grupo experimental existe un 10,30 % con una valoración de 3 y un 13,80 % con una valoración de 4, presentando un incremento del 24,10 % (Tabla 10).

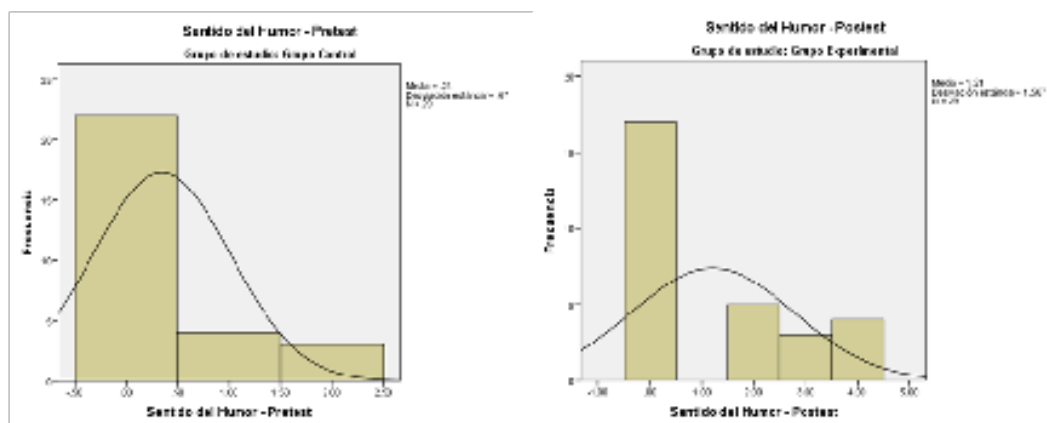


Figura 8. Histogramas Pretest -Posttest sentido del humor (Sh)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10.

Frecuencias Pretest-Posttest para indicador sentido del humor (Sh).

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Válido	Porcentaje Acumulado
Grupo Control	0	22	75,90	75,90	75,90
	1	4	13,80	13,80	89,70
	2	3	10,30	10,30	100
	Total	29	100	100	
Grupo Experimental	0	17	58,60	58,60	58,60
	2	5	17,20	17,20	75,90
	3	3	10,30	10,30	86,20
	4	4	13,80	13,80	100
	Total	29	100	100	

Fuente: elaboración propia.

La fluidez gráfica (Fg) presentó un aumento en la media, desde 1,30 al 1,80. Otro aspecto importante es que la desviación estándar que presentó una mayor uniformidad para el grupo experimental (0,79) respecto al grupo control (1,12) (Figura 9).

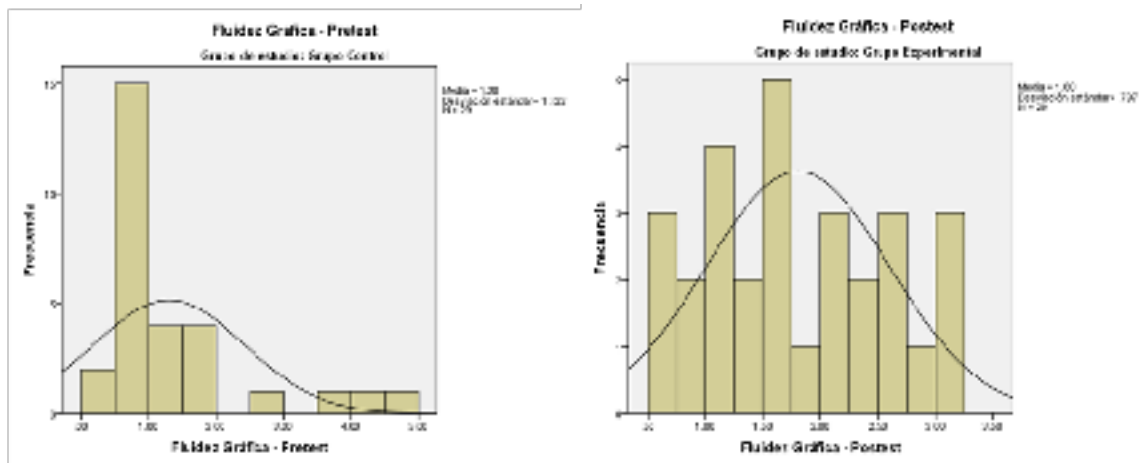


Figura 9. Histogramas Pretest -Posttest fluidez gráfica (Fg)
Fuente: elaboración propia.

A pesar de que no es considerado como un indicador de habilidad gráfica del ECG, el puntaje total (Pt) brinda una perspectiva holística de los resultados de las pruebas ECG aplicados a ambos grupos ya que corresponde a la sumatoria de cada uno de los puntajes obtenidos en los 11 indicadores evaluados. Se puede apreciar como existe un aumento en la media, registrándose un 30,48 para el grupo Control, mientras que para el grupo que utilizó el modelado CAD 3D (grupo experimental) se registra una media de 39,72 (Figura 10). En términos generales esto indica que el uso del modelado CAD 3D estimula positivamente el desarrollo de las habilidades creativas en los individuos

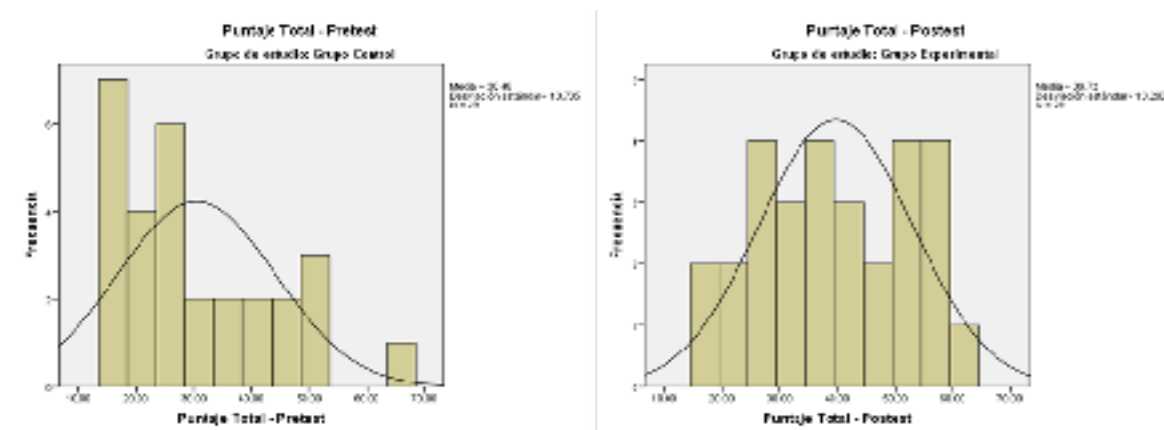


Figura 10. Histogramas Pretest -Posttest puntaje total (Pt)
Fuente: elaboración propia.

5. Discusión

El indicador elaboración (El), está asociado al individuo con capacidades más analíticas y que presta más atención a los elementos secundarios y habilidades para expresar con mayor detalle sus ideas (De la Torre; Violant, 2006). El Modelado CAD 3D aporta herramientas que contribuyen al individuo a poder representar acabados más atractivos, expresivos, estéticos y ricos en sugerencias. Estos acabados suponen más dedicación y esfuerzo. El individuo puede prestar más atención a los elementos secundarios o a los detalles, en otras palabras,

el modelado contribuye a que el sujeto sea más analítico, por lo que mejora su capacidad para la evaluación de alternativas en la solución de problemas (García, 2019).

Respecto a la conectividad temática (Ct), indicador asociado a la capacidad del individuo para representar imaginativamente la escena que quiere dibujar antes de hacerlo, con capacidad de sobrepasar el estímulo más allá de lo que la estructura gráfica sugiere (De la Torre; Violant, 2006) los individuos que trabajan el modelado CAD 3D, de acuerdo con Armheim (1986) integran elementos independientes en una composición, representándose imaginativamente el modelo que se quiere realizar antes de hacerlo y con la capacidad de sobrepasar el estímulo más allá de lo que la estructura gráfica sugiere. Esto permite desarrollar la capacidad creativa de establecer relaciones entre elementos, haciendo referencia a la conexión entre ideas o situaciones previas hacia una nueva situación o problema que se plantee (García, 2019).

Con relación a la conectividad expansiva (Ce), indicador que permite reconocer en el individuo expansión, iniciativa y aceptación de riesgo, cierto grado de inconformismo y tolerancia a lo complejo, disposición para romper limitaciones y bloqueos perceptivos, prejuicios, convencionalismos, marcos de referencia, posibilitando con ello encontrar nuevas soluciones a los problemas (De la Torre; Violant, 2006). El modelado CAD 3D, permite en el individuo encontrar nuevas soluciones a los problemas, desarrollando rasgos propios de las personas creativas tales como la iniciativa, aceptación del riesgo, cierto grado de inconformismo y tolerancia a lo complejo. Esto permite que el individuo encuentre usos, funciones y aplicaciones diferentes a las habituales, ampliando el abanico de posibles soluciones a muchos problemas (García, 2019).

Para la fantasía (Fa), indicador que permite indagar las fronteras del pensamiento divergente (De la Torre; Violant, 2006), sugiere que los individuos que representaron espacialmente objetos mediante el modelado CAD 3D, llevaron la originalidad a sus límites extremos entre la pertinencia de la respuesta y la extravagancia, logrando así dar la mayor cantidad de respuestas posibles sin tener en cuenta la plausibilidad y sin juzgar todas las alternativas generadas, característica de personas altamente creativas (García, 2019).

La habilidad gráfica (Hg), indicador asociado a la capacidad del individuo destacándose en originalidad, conectividad y fluidez (De la Torre; Violant, 2006). El modelado CAD 3D permite que, el individuo posea habilidades mejoradas en su destreza y capacidades para trasladar a lenguaje gráfico las imágenes mentales, donde se tiende también a destacar en originalidad, conectividad y fluidez. El desarrollo de este indicador permite al sujeto mostrar habilidades creativas para generar una gran cantidad de repuestas y soluciones a un problema planteado (García, 2019).

El sentido del humor (Sh), indicador asociado a la capacidad del individuo para generar asociaciones de temas o situaciones independientes (De la Torre; Violant, 2006), con el uso del modelado CAD 3D, el individuo desarrolla facilidades para generar asociaciones independientes unidas inesperadamente gracias a la flexibilidad del pensamiento y el uso de relaciones forzadas. Además, el individuo categoriza las respuestas; los productos, puede responder a una gran variedad de categorías y disciplinas, esto permite que no sólo se ofrezca un argumento, sino muchos y variados (García, 2019).

La fluidez gráfica (Fg), indicador asociado a la facilidad que tienen los individuos para expresar múltiples ideas con un determinado código (De la Torre; Violant, 2006). El modelado CAD 3D mejora en el individuo la capacidad de expresar múltiples ideas con un determinado código, siempre y cuando se encuentre en una habilidad de dominio específico. Como el factor que más influyó en la evaluación de este indicador fue el tiempo, se puede concluir que el uso del modelado CAD 3D, permitió que el grupo evaluado (grupo experimental) mejorara su capacidad en ofrecer mayor flujo de ideas en una menor cantidad de tiempo, generando un trabajo intenso y de carácter creativo en un estado de conciencia enfocada (García, 2019).

Se identifican diferentes factores que desarrollan la creatividad en los individuos con el uso del modelado CAD 3D, tales como el pensamiento y la abstracción visual por las pistas visuales que ofrecen los

modelos 3D, expandiendo ideas creativas a partir de esas pistas, y, que de acuerdo con Villafañe y Mínguez (2014) se dan por el uso de mecanismos mentales tales como exploración activa, completamiento, simplificación, síntesis, corrección, selección y conceptualización. La resolución de problemas se aborda inicialmente a través de las imágenes mentales especialmente de tipo visual en los ejercicios planteados para el modelado CAD 3D, el individuo debe recurrir a dichas imágenes para poder modelar y solucionar el problema que se plantea, partiendo principalmente de un estímulo que se presenta a través del lenguaje visual descrito por Acaso (2009), que puede ser una información gráfica, producto visual, desarrollo plástico, texto icónico, artefacto visual o una representación visual.

6. Conclusiones y recomendaciones

La muestra objeto de estudio estuvo conformada por un grupo experimental y un grupo control, a los dos grupos se les llevó a cabo un pretest (prueba ECG), al grupo experimental se le realizó un estímulo o tratamiento que correspondió a la enseñanza del modelado CAD 3D (variable independiente), y el grupo control sin intervención. Finalmente, a ambos grupos se les realizó un Postest (prueba ECG) que permitió evaluar las habilidades creativas (variable dependiente), lo que ha permitido realizar inferencias respecto a los cambios presentados como consecuencia del estímulo.

Se valida la hipótesis alternativa donde el Diseño Asistido por Computador (CAD), obliga a los individuos al uso de estructuras complejas del pensamiento, y que por ende existe un desarrollo de la creatividad, que de acuerdo con los indicadores evaluados por el instrumento ECG corresponden a:

- Elaboración (El).
- Conectividad temática (Ct).
- Conectividad expansiva (Ce).
- Fantasía (Fa).
- Habilidad gráfica (Hg).
- Sentido del Humor (Sh).
- Fluidez gráfica (Fg).

El puntaje total (Pt), a pesar de que no es considerado como un indicador de habilidad gráfica del ECG, brinda una perspectiva holística de los resultados globales de las pruebas. Se pudo apreciar un aumento en la media. En términos generales, esto indica que el uso del modelado CAD 3D genera desarrollo de manera significativa en habilidades creativas para los individuos.

En los ejercicios planteados para el modelado CAD 3D, el individuo debe recurrir a imágenes mentales especialmente de tipo visual (Armheim, 1986), para poder modelar y solucionar el problema que se plantea, partiendo principalmente de un estímulo que se presenta a través del lenguaje visual que para Acaso (2009) puede ser una información gráfica, producto visual, desarrollo plástico, texto icónico, artefacto visual o una representación visual. El desarrollo de habilidades creativas se ve favorecido cuando en el modelado CAD 3D se hace uso de las representaciones tridimensionales utilizadas en el lenguaje visual propio del programa; dichas representaciones son las herramientas de configuración (tamaño, forma, color, iluminación, textura, etc.) y de organización (composición de técnicas de modelado) las cuales, dan el soporte tridimensional digital a cada uno de los componentes del sólido (Acaso, 2009).

El modelado CAD 3D, como un medio de expresión gráfica, permite la comunicación, intervención, transformación y elaboración sobre un entorno de estudio (objeto), aportando al desarrollo del pensamiento de diseño descrito por Jimenez (1998), quien lo define como un proceso de conceptualización, proyección o un pensamiento productivo develado por la visualización, intuición, imaginación, generación de ideas y creatividad. El modelado CAD 3D permite resolver problemas que requieren información espacial, lo cual

lo logra a través de las imágenes mentales especialmente de tipo visual y se evidencia cuando se pretende distribuir espacios, localizar objetos concretos en lugares precisos, etc. En los ejercicios planteados para el modelado CAD 3D, el individuo debe recurrir a dichas imágenes para poder modelar y solucionar el problema que se plantea, partiendo principalmente de un estímulo que se presenta a través del lenguaje visual descrito por Acaso (2009), que puede ser una información gráfica, producto visual, desarrollo plástico, texto icónico, artefacto visual o una representación visual.

Con el propósito de seguir profundizando en los factores que desarrollen habilidades creativas en los estudiantes, se proponen a continuación una serie de enfoques investigativos:

- De acuerdo con la prueba de Inteligencias múltiples (Sánchez; Andrade, 2014), se puede establecer la relación entre las habilidades creativas que desarrolla el estudiante con el uso del modelado CAD 3D y las inteligencias con puntaje más alto. Esto permitirá identificar factores que desarrollen las habilidades creativas de acuerdo con el tipo de inteligencia. El autor, en su estudio con el uso modelado CAD 3D llevó a cabo la aplicación de pruebas tales como la guía para identificar las inteligencias múltiples de Kertész (citado por: Sánchez González & Andrade Esparza, 2014).
- Otra futura investigación que puede arrojar información valiosa corresponde a identificar los estilos de aprendizaje del individuo (Sánchez; Andrade, 2014), de esta forma se aportará a la identificación de los factores que potencian o coaccionan las habilidades creativas de los estudiantes con el uso del modelado CAD 3D, el autor en el presente proyecto llevó a cabo la prueba de inventario de estilos de aprendizaje de Felder (citado en Sánchez; Andrade, 2014).
- Para corroborar o contrarrestar los resultados obtenidos en esta investigación, se sugiere el uso de otras pruebas diferentes al instrumento ECG para medir las habilidades creativas.
- Se recomienda también abordar el estudio de la percepción visual o espacial (Gutierrez, 1992), para establecer su relación con la apropiación del modelado CAD 3D, aspecto que puede influir directamente en el desarrollo de las habilidades creativas de los individuos.
- Como variables intervinientes se propone identificar los aspectos de nutrición, estado de ánimo, ansiedad y estrés; para poder identificar aspectos de índole externo que estimulen o desestimulen el desarrollo de las habilidades creativas con el uso del modelado CAD 3D.
- Se propone realizar un análisis a los resultados obtenidos en esta investigación, pero desde el enfoque comprensivo (de orden cualitativo).
- Se recomienda continuar profundizando en este tipo de estudios cuyo eje central es el uso de otros modeladores CAD 3D, pero teniendo en cuenta otros modeladores diferentes al Solidworks®.

Referencias

- Acaso, Maria (2009). *El lenguaje visual (1ra ed.)*. Barcelona, España: Ediciones Paidós Ibérica S.A.
- Aguayo, Mariano (2004). Cómo realizar “paso a paso” un contraste de hipótesis con SPSS para Windows y alternativamente con EPIINFO y EPIDAT: (II) Asociación entre una variable cuantitativa y una categórica (Comparación de medias entre dos o más grupos independientes). *Fabis*, 07(02), 1-20.
- Aguilar, M.; López, M.; De las Heras, A.; Gámez, J. (2014). El software de diseño 3D como recurso docente en la clase magistral de expresión gráfica. Caso Estudio: El tetraedro. En: M. Mata (Ed.), *Innovación educativa*

- en las enseñanzas técnicas: Vol. II.* (pp. 1299-1310). Almadén: Ediciones de la Universidad de Castilla - La Mancha.
- Armheim, Rudolf (1986). *El pensamiento visual*. Barcelona: Ediciones Paidós.
- Baer, John (1994). Divergent thinking is not a general trait: A multi-domain training experiment. *Creativity Research Journal*, 7(1), 35-46.
[doi:10.1080/10400419409534507](https://doi.org/10.1080/10400419409534507)
- Bermejo, Rosario; Ferrando, María; Sainz, Marta; Soto, Gloria; Ruiz, María (2014). Procesos cognitivos de la creatividad en estudiantes universitarios. *Educatio Siglo XXI*, 32(2), 41-58.
<https://doi.org/10.6018/j/202151>
- Bonnardel, Nathalie; Zenasni, Franck (2010). The Impact of Technology on Creativity in Design: An Enhancement? *Creativity and Innovation Management*, 19(2), 180-191.
[doi:10.1111/j.1467-8691.2010.00560.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8691.2010.00560.x)
- Chaur; Jairo (2004). *Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa* (tesis de pregrado). Universidad politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Cho, Ji Young (2016). An Investigation of Design Studio Performance in Relation to Creativity, Spatial Ability, and Visual Cognitive Style. *Thinking Skills and Creativity*, 37. 67-78.
<https://doi.org/10.1016/j.tsc.2016.11.006>
- De la Torre, Saturnino (1991). *Evaluación de la creatividad. TAEC, un instrumento de apoyo a la Reforma*. Madrid: Escuela española, S.A.
- De la Torre, Saturnino (2009). La universidad que queremos. Estrategias creativas en el aula universitaria. *Revista Digital Universitaria*, 10(12), 2- 17.
- De la Torre, Saturnino; Ibañez, Ricardo (2000). *Manual de creatividad: aplicaciones educativas*. Barcelona: Ediciones Vivens Vives S.A.
- De la Torre, Saturnino; Violant, Verónica (2006). *Comprender y Evaluar la Creatividad*. Malaga: Algibe, S.L.
- Garcia, Carlos (2019). *Desarrollo de las habilidades creativas de los aprendices del SENA como consecuencia del uso de herramientas TIC* (tesis de maestría). Manizales, Universidad Autónoma de Manizales UAM.
- Gardner, Howard (2010). *Mentes Creativas: Una anatomía de la creatividad*. Barcelona: Paidós Iberica.
- Gutierrez, Angel (1992). Procesos y habilidades en visualización espacial. En *Memorias del Tercer Simposio Internacional sobre Investigación en Educación Matemática: Geometría* (pp. 44-59). México: CINVESTAV.
- Hernández, Roberto; Fernández, Carlos; Baptista, Pilar (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). México D.F: Mc Graw Hill Education.
- Ibañez, Ricardo (1998). *La creatividad diagnóstico, evaluación e investigación*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).
- Jimenez, Luz (1998). *La producción creativa en el diseño. Conocimiento y pensamiento* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Lee, Sangwon; Yan, Jin (2016). The impact of 3D CAD interfaces on user ideation: A comparative analysis using SketchUp and Silhouette. *Design Studies*, 44, 52-76.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.02.001>
- Lieu, Dennis; Sorby, Sheryl (2011). *Dibujo para diseño de ingeniería*. México: Cengage Learning Editores.
- Miller, Angela (2009). *Cognitive processes associated with creativity: Scale development and validation* (tesis doctoral). Ball State University, Indiana.
- Ministerio de Educación Nacional (2008). *Educación técnica y tecnológica para la competitividad*. Bogotá: Ministerio de Educación Nacional.
- Morea, Teresa; Soraire, Maria (2005). Un recurso para mejorar la calidad de la enseñanza. En V. Violant; S. De la Torre (Ed.), *Comprender y evaluar la creatividad* (pp. 427-440). España: Ajibe.
- Musta'amal, Aede; Norman, Eddie; Jabor, Mohd; Buntat, Yahya (2012). Does CAD Really Encourage Creative Behaviors among its Users: A Case Study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 56, 602 – 608.
[doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.694](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.694)
- O'Sullivan, Barry (1999). *Constraint-Aided Conceptual Design* (tesis doctoral), University College Cork, Irlanda.
- Ovejero, Maria (2013). *Desarrollo cognitivo y motor*. Madrid: Macmillan Profesional.
- Sabino, Carlos (1980). *El proceso de investigación*. Bogotá, Colombia: El Cid Editor Ltda.
- Sánchez, Lizbeth; Andrade Rafael (2014). *Inteligencias múltiples y estilos de aprendizaje: diagnóstico y estrategias para su potenciación*. Colombia: Alfaomega Colombiana
- Sánchez, Mauricio (2006). *Diseñar desde el pensamiento analógico por modelos. Desarrollo de la Creatividad*. Bogotá: Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (2017). *Informe de aprendices matriculados en etapa lectiva del programa Mantenimiento Mecatrónico de Automotores*. Dosquebradas, Colombia: SENA.
- Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (2017). *Listado del Licenciamiento del software por parte del SENA*. Dosquebradas. Colombia: SENA.
- Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. (2016). *Diseño curricular del programa de formación Mantenimiento Mecatrónico de Automotores*. Colombia: SENA.
- Sönmez, Murat (2013). Creativity and solid modeling. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 93, 5-10.
[doi: 10.1016/j.sbspro.2013.09.172](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.09.172)
- Valdés de León, Gustavo (2011). *Una molesta introducción al estudio del diseño (1a ed.)*. Buenos Aires: Nobuko.
- Villafañe, Justo; Mínguez, Norberto (2014). *Principios de teoría general de la imagen*. Madrid: Ediciones Pirámide.
- Whitefield, Andy (1986). An Analysis and comparison of knowledge use in designing with and without CAD. In Alison, Smith (Ed.). *Knowledge Engineering and Computer Modelling in CAD* (pp. 89-97). London: Butterworth-Heinemann.

Un lenguaje de modelado para representar visualmente las decisiones de diseño arquitectónico y su *rationale*

A modeling language for visually representing architectural design decisions and their *rationale*

Milton Sánchez-Grueso¹
Julio Hurtado-Alegría²

¹Universidad del Cauca (Colombia). Correo electrónico: sanchezg@unicauca.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2109-4969>

²Universidad del Cauca (Colombia). Correo electrónico: ahurtado@unicauca.edu.co
orcid: <http://orcid.org/0000-0002-2508-0962>

Recibido: 14-01-2020 Aceptado: 30-07-2020

Cómo citar: Sánchez-Grueso, Milton; Hurtado-Alegría, Julio (2020). Un lenguaje de modelado para representar visualmente las decisiones de diseño arquitectónico y su *rationale*. *Informador Técnico*, 84(2), 155-174.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2622>

Resumen

El *rationale* arquitectónico es el conjunto de razones detrás de las decisiones tomadas al diseñar la arquitectura de un sistema de software. Normalmente, dicho *rationale* se queda en las mentes de los diseñadores y demás involucrados en el diseño. Por lo tanto, el razonamiento detrás de las decisiones que sustentan el modelo de arquitectura puede perderse si no se documenta adecuadamente, causando problemas de mantenibilidad en el software. En la práctica, el *rationale* no se documenta o se documenta en medio de las descripciones arquitecturales, lo cual dificulta su comprensión y apoyo a las decisiones posteriores, dentro del desarrollo y mantenimiento de software, lo cual resulta más crítico en el enfoque ágil de desarrollo. Para abordar este problema, en este trabajo se propone un enfoque de documentación que combina el modelado del *rationale*, con foco en las decisiones que se toman en proyectos que utilizan métodos ágiles, con el fin de especificar un lenguaje que fundamente las bases para la construcción de una herramienta que hemos denominado *Decisions and rationale modeling language* (DRML). El lenguaje es evaluado para documentar el *rationale* en el marco del proyecto “Sistema Único de Información Indígena (SUIIN)”, en el contexto de una entidad pública que dentro sus procesos tienen un equipo de trabajo conformado por ingenieros de sistemas, enfocados en el desarrollo de software. Dicha evaluación ha permitido establecer que el enfoque brinda la suficiente expresividad para documentar las decisiones y su *rationale*, sin embargo, presenta limitaciones para escalar el modelado para un número grande de decisiones y sus relaciones.

Palabras clave: *rationale*; arquitectura de software; decisiones de diseño arquitectónico; modelo de decisiones; *rationale* arquitectónico.

Abstract

The architectural *rationale* is the set of reasons behind the decisions made when designing the architecture of a software system. Normally, this *rationale* remains in the minds of designers and others involved in the design. Therefore, the reasoning behind the decisions that underpin the architecture model may be lost if not properly documented, causing maintainability problems in the software. In practice, the *rationale* is not documented or is documented in the middle of the architectural descriptions, which makes it difficult to understand and

support subsequent decisions, within the development and maintenance of software, which is more critical in the agile approach to development. To address this problem, this paper proposes a documentation approach that combines *rationale* modeling with a focus on decisions made in projects that use agile methods, to specify a language that provides the basis for the construction of a tool that we have called DRML (Decisions and *Rationale* Modeling Language). The language is evaluated to document the *rationale* in the framework of the Unique Indigenous Information System (SUIIN, for its acronym in Spanish) project, in the context of a public entity that within its processes has a work team made up of systems engineers focused on software development. This evaluation has established that the approach provides sufficient expressiveness to document the decisions and their *rationale*, however, it has limitations to scale the modeling for a large number of decisions and their relationships.

Keywords: *rationale*; software architecture; architectural design decisions; decision model; architectural *rationale*.

1. Introducción

La arquitectura de software ha sido identificada como un artefacto de gran valor para la evolución de los sistemas de software. Sin embargo, es difícil que las organizaciones de software le encuentren utilidad al documento de arquitectura, porque no lo encuentran lo suficientemente completo, es muy extenso o resulta incomprensible para los diferentes interesados. Por lo anterior, hay una gran distancia entre el valor potencial y el valor real de las arquitecturas de software para las organizaciones. En proyectos ágiles, cambia la forma de diseñar la arquitectura, debido a que no es una actividad de una sola persona, las decisiones de diseño se toman en grupo y se centran en la entrega continua del producto y en poco tiempo. A pesar de esto, los equipos hacen un esfuerzo en combinar prácticas de arquitectura con agilidad, con el fin de obtener productos con calidad y en muy poco tiempo (Lopes; Aquino, 2017). Además, existen problemas durante el diseño de la arquitectura, relacionados con la toma temprana de decisiones de diseño, con un *rationale* limitado y con sesgos cognitivos acerca del problema que se está tratando de resolver, así como el impacto de estas primeras decisiones sobre el resto del desarrollo (van Vliet; Tang, 2016). Alrededor de la arquitectura de software existen mitos y creencias, sustentados por casos de éxito o fracaso, los cuales van desde la cantidad de esfuerzo necesario para la documentación, hasta el tamaño del equipo o las personas responsables de tomar decisiones de diseño arquitectural. La mayoría de las creencias se basan en la idea de que el resultado del proyecto depende en gran medida de los métodos utilizados durante el diseño y la toma de decisiones (van Der Ven; Bosch, 2016). Durante la creación de una arquitectura de software, los arquitectos y los demás interesados toman decisiones. Estas decisiones pueden estar directamente relacionadas con los requisitos funcionales o de calidad. Algunas decisiones de diseño se toman sobre la marcha, de manera más o menos arbitraria, de acuerdo a la experiencia personal, el conocimiento del dominio, las restricciones financieras y la experiencia disponible, entre otros aspectos. Las decisiones, así como las razones de esas decisiones, a menudo no son explícitas por adelantado, son implícitas y, por lo general, permanecen indocumentadas (Roeller; Lago; van Vliet, 2006). Facilitar la trazabilidad bidireccional entre los aspectos de calidad, las decisiones arquitectónicas, el *rationale* y los módulos afectados, incluyendo una perspectiva de código, brinda el apoyo crítico para varias áreas del proceso de ingeniería de software. Una lista incompleta de áreas es el análisis de impacto de cambios, validación de requisitos, preservación arquitectónica, construcción de casos de seguridad y, a largo plazo, el mantenimiento del sistema. Por ejemplo, la práctica ha demostrado que la erosión de la arquitectura ocurre a menudo cuando los desarrolladores realizan cambios en el código, sin comprender completamente las decisiones arquitectónicas subyacentes y las preocupaciones relacionadas con la calidad (Cleland-Huang; Mirakhorli; Czauderna; Wieloch, 2013). Hoy este hecho desafortunadamente es una realidad, ya que la arquitectura de software es definida por muchos como la composición de un conjunto de decisiones de diseño arquitectónico, donde lo que se busca es evitar la evaporación del conocimiento de las decisiones de diseño, ya que se han ido convirtiendo en una parte explícita de la arquitectura. Esto a su vez, muestra el alto costo que tiene el cambio en las arquitecturas de software, lo que evidencia la complejidad de estos cambios y cómo ésta se erosiona durante su evolución. Los problemas se deben a la pérdida del conocimiento. Actualmente, la información sobre las decisiones de diseño arquitecturales queda implícitamente ilustrada, pero

es carente de una representación explícita. En consecuencia, el conocimiento sobre estas decisiones de diseño arquitectónico desaparece. Por ejemplo, durante el diseño, desarrollo, evolución, reutilización e interpretación, el *rationale* de las decisiones tomadas queda fuera del alcance para la nueva toma de decisiones. En el diseño, la principal preocupación es cuál decisión tomar. En desarrollo es importante saber qué y por qué se han tomado ciertas decisiones de diseño. La evolución de la arquitectura tiene que ver con las nuevas decisiones de diseño o eliminar las antiguas para satisfacer los requisitos cambiantes. El reto es hacer esto en armonía con las decisiones de diseño existentes, en particular, entender las razones que llevaron a la toma de estas decisiones (Jansen; Bosch, 2005).

El artículo propone un lenguaje integrado para expresar en forma de modelo las decisiones de diseño arquitectónico, así como el *rationale* que las respalda dentro de un contexto ágil con prácticas de arquitectura de software. Para ello, se ha definido una meta-modelo como sintaxis abstracta y un conjunto de representaciones como sintaxis concreta, para que los arquitectos puedan expresar sus decisiones y el *rationale* detrás de ésta. Además, se usó el meta-modelo del lenguaje en la construcción de una herramienta, con un enfoque de ingeniería dirigida por modelos (MDE por sus siglas en inglés) para facilitar al arquitecto el modelado y su almacenamiento. El lenguaje ha sido evaluado en una prueba piloto en una empresa de software del Suroccidente colombiano, haciendo uso de la herramienta de modelado propuesto. El estudio de caso ha permitido evidenciar que la herramienta permite expresar la mayoría de aspectos relacionados con las decisiones y su *rationale*, así como sus limitaciones para escalar los modelos y relacionar las decisiones de diseño.

2. Marco teórico y estudios previos

Kruchten, Obbink y Stafford (2006) definen la arquitectura de software como la estructura y organización de componentes y subsistemas que pueden interactuar entre sí, con el fin de formar sistemas complejos con una esperanza de vida mucho más alta. Las arquitecturas de software se comprenden de componentes, conectores y restricciones representados mediante diferentes perspectivas, denominadas vistas. Estas vistas proveen una descripción consistente y complementaria de la arquitectura de software, las cuales representan las diferentes preocupaciones de los interesados del software, además de servir como un medio de comunicación de la arquitectura y su razón de ser (Roldán; Gonnet; Leone, 2016).

Los diseñadores de arquitectura de software inevitablemente trabajan con patrones de arquitectura y con tácticas. Los patrones de arquitectura describen la estructura y el comportamiento de alto nivel de los sistemas de software como la solución a múltiples requisitos del sistema, mientras que las tácticas son decisiones de diseño que mejoran los problemas de atributos de calidad individuales. Las tácticas que se implementan en las arquitecturas existentes pueden tener un impacto significativo en los patrones de arquitectura en el sistema. De manera similar, las tácticas que se seleccionan durante el diseño inicial de la arquitectura tienen un impacto significativo en la arquitectura del sistema que se diseñará, especificando qué patrones usar y cómo se deben cambiar para acomodar las tácticas (Harrison; Avgeriou, 2010).

Los atributos de calidad son características que tiene el sistema, como usabilidad, mantenibilidad, rendimiento y confiabilidad. Normalmente, los sistemas tienen múltiples atributos de calidad importantes, y las decisiones tomadas para satisfacer un atributo de calidad particular pueden afectar a otro atributo de calidad. Asimismo, las tácticas son medidas tomadas para mejorar los atributos de calidad. Las tácticas impactan los patrones de arquitectura de varias maneras. En algunos casos, una táctica puede implementarse fácilmente utilizando las mismas estructuras (y comportamiento compatible), como un patrón de arquitectura particular. Por otro lado, una táctica puede requerir cambios significativos en la estructura y el comportamiento del patrón o estructuras y comportamientos completamente nuevos. En este caso, la implementación de la táctica y el mantenimiento futuro del sistema son considerablemente más difíciles y propensos a errores. Las tácticas pueden ser “tiempo de diseño” o enfoques generales de diseño e implementación, como “ocultar información” para mejorar la modificabilidad, o “tácticas de tiempo de ejecución”, que son características dirigidas a un

aspecto particular de un atributo de calidad, como “autenticar usuarios” para mejorar la seguridad (Harrison; Avgeriou, 2010).

Una decisión de diseño arquitectónico es definida como la descripción del conjunto de adiciones, sustracciones y modificaciones a la arquitectura del software, su lógica, reglas de diseño, restricciones de diseño y los requisitos nuevos que traen consigo nuevas decisiones (Jansen; Bosch, 2005). Por su parte, el *rationale* o fundamento arquitectónico se refiere a la justificación de una decisión de diseño arquitectónico. Reynoso (2004) define el *rationale* como la “base subyacente para la arquitectura en términos de restricciones derivadas de los requerimientos del sistema (p.9)”. El *rationale*, como componente de la arquitectura software, se convierte en un punto crítico para diseñarla, describir las decisiones, evolucionarla y tomar nuevas decisiones. Tang, Babar, Gorton y Han (2006) exploran el valor del *rationale* desde el punto de vista del diseño, buscando documentar el conocimiento de fondo con sus decisiones de diseño y reflejar la importancia que tiene para los arquitectos, documentar el *rationale* como alternativa para analizar las decisiones.

Para el diseño y la documentación de la arquitectura software, se hace uso de los lenguajes de definición de arquitecturas (ADL), los cuales proveen elementos para modelar la arquitectura conceptual de un sistema software, distinguiéndola de su implementación. Algunos ADL son genéricos, por ejemplo, el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) y otros específicos al dominio de las aplicaciones. Los más conocidos lenguajes son: acme, aesop y sad (Hernández; Hurtado, 2016). En cuanto a la ingeniería dirigida por modelos (MDE), es un paradigma de desarrollo de software que apunta a elevar el nivel de abstracción, enfocándose en actividades de modelado, en lugar de codificación. Según el paradigma MDE, a partir de un modelo y mediante transformaciones, es posible obtener automáticamente una variedad de artefactos, como nuevos modelos y código, entre otros. En este contexto, el desarrollo de software puede verse como un proceso de transformación, donde los modelos de abstracción de bajo nivel se obtienen automáticamente o semiautomáticamente mediante la transformación de modelos de abstracción de alto nivel (Bucaioni; Cicchetti; Ciccozzi; Mubeen; Sjodin 2017).

Aldrich, Chambers y Notkin (2002) presentan ArchJava, una pequeña extensión Java que integra las especificaciones de arquitectura de software en el código de implementación Java, buscando que la implementación se ajuste a las restricciones arquitectónicas. Para evaluar su enfoque, implementan la extensión a una aplicación de diseño de circuitos, usando un diagrama informal de la arquitectura dibujado a mano, el cual usan como guía para hacer esta arquitectura explícita en el código. Finalmente, concluyen que ArchJava permite a los programadores expresar la estructura arquitectónica para luego ser llenada en la aplicación con código Java. Este trabajo muestra la importancia de poner la arquitectura de manifiesto en el código, pero usa otro enfoque, el de representar las abstracciones. Además, no tiene en cuenta el *rationale* y las decisiones de diseño arquitectónico que no se pueden representar en el código.

Cleland-Huang *et al.* (2013) presentan un enfoque centrado en la arquitectura para hacer seguimiento a las preocupaciones de calidad de las partes interesadas, tales como fiabilidad, disponibilidad, seguridad, integridad, rendimiento, portabilidad, los requisitos arquitectónicamente significativos, las razones de diseño y el código fuente. En la trazabilidad centrada en decisiones (DCT por su sigla en inglés), todos los vínculos de rastreo se centran en decisiones arquitectónicas que incluyen factores tan variados, como plataformas, lenguajes, frameworks, patrones de diseño de alto nivel, mecanismos de comunicación, tácticas arquitectónicas de bajo nivel y estilos arquitectónicos, entre otros. Hoy los sistemas de software están diseñados para satisfacer los requisitos funcionales, así como una amplia escala de intereses de calidad relacionados con los atributos antes mencionados (Bass Clements; Kazman 2003). Por ejemplo, un arquitecto puede decidir abordar una meta de portabilidad mediante el uso de un estricto enfoque en capas, que simplifica el proceso de creación de nuevas interfaces gráficas de usuario (GUIs) específicas de la plataforma, o para lograr una meta de disponibilidad mediante la utilización de la táctica de control para supervisar el estado de salud de un componente crítico, o cumplir una meta de rendimiento a través de la utilización de un conjunto de hilos para administrar recursos compartidos (Cleland-Huang *et al.*, 2013). Facilitar la trazabilidad bidireccional entre las preocupaciones de calidad, las decisiones arquitectónicas, las justificaciones y las áreas pertinentes del código, brinda apoyo crítico

a varias disciplinas del proceso de ingeniería de software (Cleland-Huang *et al.*, 2013). Por ejemplo, la práctica ha demostrado que la erosión de la arquitectura ocurre a menudo, cuando los desarrolladores realizan cambios en el código sin comprender completamente las decisiones arquitectónicas subyacentes y sus preocupaciones relacionadas con la calidad (Cleland-Huang *et al.*, 2013). Los enlaces de rastreo que se utilizan para comunicar las principales decisiones de diseño a nivel arquitectónico van en línea con el enfoque establecido por este trabajo, donde se busca modelar el *rationale* y las decisiones de diseño en un contexto ágil.

Hadar, Sherman, Hadar y Harrison (2013) presentan un estudio de caso que tiene como objetivo, identificar las dificultades que encuentran los arquitectos y otras partes interesadas, cuando documentan la arquitectura en el desarrollo ágil. Los hallazgos muestran que el documento que contiene la especificación de la arquitectura suele ser muy extenso, complejo y, en muchos casos, no es capaz de explicarse así mismo. Con el fin de ajustar la documentación de la arquitectura al enfoque de documentación ligera y mínima de los procesos ágiles, estos autores proponen un documento de especificación más corto, que requiera esfuerzos reducidos de documentación, el cual resulta en una documentación simplificada que es más fácil revisar, actualizar y comunicar. Los documentos de arquitectura, por lo general, suelen ser extensos y complejos, y pueden crecer de decenas a cientos de páginas; que consisten en múltiples documentos que dentro y entre ellos abarcan múltiples conceptos, relaciones, vistas y niveles de abstracción. Jansen, Avgeriou y van Der Ven (2009) identifican una lista de desafíos relacionados con la documentación de arquitectura que se basa en los siguientes tres desafíos: primero, comprensibilidad de los documentos por parte de los arquitectos; segundo, localización del conocimiento relevante de la arquitectura y, tercero, mantener la documentación de la arquitectura actualizada.

Hesse, Kuehlwein, Paech Roehm y Bruegge (2015) hablan de la importancia que tiene para un equipo de desarrollo de software documentar las decisiones de implementación. Cuando se revisa el código durante el mantenimiento, las decisiones detrás de la arquitectura deben entenderse y posiblemente ajustarse a la situación actual. Por lo tanto, el conocimiento de la decisión raramente se documenta volviéndose inaccesible, especialmente, cuando los desarrolladores ya no hacen parte del equipo. Esto obstaculiza el mantenimiento eficaz. Para solucionarlo, los autores han desarrollado un modelo de anotación para el conocimiento y la decisión integrados a través de una herramienta de gestión del conocimiento llamada UNICASE, una extensión de Eclipse que proporciona un modelo para documentar el conocimiento de las decisiones previamente tomadas, pero a nivel de diseño. El enfoque permite a los desarrolladores documentar decisiones dentro del código. En este proyecto se busca de manera similar, documentar las decisiones de diseño arquitectónico a través de la incorporación de un complemento software (plug in) en el ambiente de desarrollo eclipse a nivel de modelado.

Para la estructuración del lenguaje, se han tomado únicamente los elementos de documentación que se consideraron relevantes para el propósito del modelado que involucra las decisiones y su *rationale* para ser aplicado al contexto ágil. Por ello, esta propuesta toma como punto de partida el meta-modelo planteado por Plataniotis, Ma, Proper y de Kinderen (2015). Su principal contribución es un meta-modelo formal que captura el *rationale* y las interrelaciones de las decisiones de diseño; el trabajo de Dorado y Hurtado (2019), donde documentan el *rationale* mediante anotaciones en el código; y la definición realizada en van Der Ven Jansen, Nijhuis y Bosch (2006), quienes proponen integrar el *rationale* y los artefactos arquitectónicos en el concepto de una decisión de diseño, que a su vez combina el *rationale* de la arquitectura de software. El enfoque propuesto por Gilson y Englebert (2011), que considera el modelado de requisitos arquitectónicamente significativos y el modelado de arquitectura, en donde restricciones y requisitos se adjuntan a las construcciones arquitectónicas, y cualquier modificación en el modelo de arquitectura resultante de una decisión tomada desde el modelo de requisitos, se registra como una transformación del modelo. La metodología de Che (2014), que documenta explícitamente las decisiones de diseño arquitectónico, utilizando un enfoque basado en escenarios, abarca una serie de vistas de arquitectura de software para registrar el conocimiento arquitectónico, mediante características centradas en gestionar la evolución de las decisiones de diseño arquitectónico, con el fin de reducir la evaporación del conocimiento asociado. La plantilla propuesta por Dermeval *et al.* (2013), que captura el *rationale* de las decisiones de diseño arquitectónico, relacionando los requisitos funcionales, requisitos de calidad, interesados y *rationale*. Igualmente, el modelo propuesto se basa en el modelo de decisiones planteado

por Manteuffel, Tofan, Koziolk, Goldschmidt y Avgeriou (2014), que sugiere una herramienta soportada en el meta-modelo de la ISO/IEC/IEEE 42010 para documentar decisiones y su conocimiento implícito. Finalmente, es importante tener en cuenta que la toma de decisiones de arquitectura de software no es una actividad individual, sino un proceso grupal, donde las decisiones de diseño arquitectónico son tomadas por grupos de partes interesadas, heterogéneas y dispersas (Malavolta; Muccini; Rekha, 2014).

Se realizó un análisis de los estudios para determinar cuáles de estos tenían mayor relevancia para la investigación en curso, es decir, que brinden elementos conceptuales y teóricos para construir el lenguaje de documentación de *rationale*. La Tabla 1 muestra los estudios que influyeron en la construcción del lenguaje y sus abstracciones más importantes.

Tabla 1.

Trabajos relacionados con el rationale y las decisiones de diseño arquitectónico

Agrupaciones lenguaje DRML	Rationale	Contexto				Consecuencia				Alternativa	Decisión arquitectónica		Justificación			Táctica	Patrón	Estrategia
Elementos por el estudio	R	M	P	C	To	Cn	Pr	Cq		Alt	ADD	D	Qa	BR	QG	T	P	E
(Cleland-Huang et al., 2013)	X										X				X			
(van Der Ven et al., 2006)		X	X	X	X	X	X	X										
(Dermeval et al., 2013)								X		X		X						
(Dorado y Hurtado, 2019)	X	X	X		X	X	X					X	X	X	X	X		X
(Gilson y Englebert, 2011)										X		X						
(Plataniotis et al., 2015)										X		X						
(Harrison; Avgeriou, 2010)												X	X		X	X	X	
(Jansen; Bosch, 2005)		X	X	X	X						X	X						
(Che, 2014)	X				X					X								X
Lenguaje DRML	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 1 se muestra una comparativa de las agrupaciones que propone el lenguaje *decisions and rationale modeling language* (DRML), con respecto a los elementos de documentación que plantea cada uno de los estudios. En la primera fila se observan las principales abstracciones que el lenguaje DRML agrupa mediante constructos explícitos; la segunda fila muestra los elementos de cada una de las propuestas, en ese orden, se comparan y agrupan: *rationale* (R), motivation (M), problem (P), cause (C); trade-off (To), con (Cn), pro (Pr), consequence (Cq); alternative (Alt), architectural design decisions (ADD), decision (D); quality attribute (Qa), business rule (BR), quality goal (QG); tactic (T), architectural pattern (P) y strategy (E). En el lenguaje DRML propuesto algunos elementos son ciudadanos de primera clase, es decir, existen constructos para modelarlos y

los otros conceptos quedan englobados en ellos, aunque no sean explícitos, sin embargo, cuenta con un espacio general que ofrece la posibilidad de describirlos, por ejemplo, los pros y los contras se relatan libremente en un elemento de tipo consecuencia (Cq).

En la revisión de la literatura se identifican distintos tipos de enfoques que buscan documentar el *rationale* de las decisiones de diseño arquitectónico, por ejemplo, se encuentran herramientas, plantillas, anotaciones en el código, modelos, metodologías, plantillas, encuestas y ciclos de captura, muchos basados en meta-modelos, sin embargo, estas propuestas generan modelos de decisiones, es decir, se centran en generar elementos para documentar la decisión, generando distancia entre el *rationale* y la decisión. Por otra parte, las propuestas pueden llegar a generar una carga cognitiva excesiva al diseñador, esto debido a que incluyen demasiados elementos de documentación. Por ello, es necesario tener un balance, ya que puede ser difícil de mantener una documentación actualizada en un contexto ágil. El enfoque de documentación del *rationale* con anotaciones en el código presenta un gran valor, dado que el código es la fuente más confiable de la información a la hora de hacer mantenimiento del software. Sin embargo, no todas las decisiones y su *rationale* se pueden localizar en un solo lugar del código, puesto que decisiones arquitecturales y su *rationale* pueden impactar muchas partes del sistema, por lo que un modelo que permita documentar en forma explícita y transversal este conocimiento, brindaría una vista más del diseño arquitectónico del sistema, que puede resultar más práctico para el mantenimiento, incluso que extensos documentos de arquitectura y diseño que se tornan poco confiables en el tiempo (Singer, 1998). Así que nuestro enfoque con las anotaciones de código, son dos estrategias que pueden integrarse a través del MDE, de tal forma que brinden una estrategia práctica y simplificada, particularmente, para soportar en lo ágil, con foco en la arquitectura. El primer paso sería extender las anotaciones de código para que los lenguajes sean equivalentes semánticamente para facilitar transformaciones MDE y modelo a texto/código (Model-To-Text o M2T). Así mismo, el lenguaje ofrece los constructos mínimos para integrar las decisiones con el *rationale*, esto permite modelar una vista integradora que es muy necesaria en el modelado de la arquitectura. Por ejemplo, Kruchten, Capilla y Dueñas (2009) en su enfoque de 4+1 vistas hablan de una quinta vista (+1), son los escenarios que permiten evaluar la consistencia entre las vistas. Este modelo cumple este rol, de hacer explícitas las decisiones de diseño que son verificables en las demás vistas y el *rationale* detrás de estas decisiones. De este modo, este trabajo contribuye al área de documentación de la arquitectura, particularmente al enfoque en el cual la arquitectura de software es tratada como un conjunto de decisiones de diseño arquitectónico (Singer, 1998). Es decir, el trabajo de modelar las decisiones y su *rationale*, es parte del modelado arquitectónico que se ocupa de la representación, captura, gestión y documentación de las decisiones de diseño tomadas en el ciclo de vida del software (Kruchten *et al.*, 2009).

Diseñar una arquitectura de software es un proceso de toma de decisiones (Lopes; Aquino, 2017). Los métodos ágiles cambiaron drásticamente la forma de diseñar una arquitectura de software. En proyectos que utilizan métodos ágiles, por ejemplo, Scrum, tomar decisiones de diseño arquitectónico no es responsabilidad de una sola persona, sino de todo el equipo de desarrollo, sumado a esto se centran en la entrega continua del producto, sin embargo, vemos como hacen un esfuerzo en incorporar prácticas de arquitectura en sus procesos (Lopes; Aquino, 2017). Nuestro enfoque se ajusta de manera apropiada en este contexto, ya que permite capturar las decisiones y su *rationale* de manera ágil.

3. Decisions and *rationale* modeling language – DRML

En este artículo se presenta un lenguaje de documentación que combina enlaces explícitos entre las decisiones de diseño arquitectónico y sus justificaciones. El lenguaje busca ofrecer un mecanismo para documentar la razón, sus alternativas, justificaciones, consecuencias y contexto detrás de cada decisión de diseño arquitectónico. La técnica propuesta está diseñada para ayudar a las partes interesadas y los arquitectos a compartir, comprender y mantener los diseños de arquitectura. Previamente, se intentó especificar las decisiones de diseño en el código, sin embargo, el código es una sola perspectiva del software, de muchas posibles. Una decisión de diseño que involucre una cualidad de tiempo de ejecución, como es el desempeño, ¿En qué parte del código se

documenta?, considerando que el desempeño es afectado por la forma en que se instalan los componentes, si estos componentes tienen constante comunicación, si van a estar instalados en una misma máquina o servidor, pero, si están en servidores geográficamente dispersos, puede haber ruido, debe hacerse replicación, envío de información, paquetes, aspectos que hacen lento el proceso y que no pueden localizarse en el código. Entonces el código tiene ciertas limitaciones. En lo ágil, uno de los criterios que se aplican en estos casos es que lo que se pueda hacer en código se haga con las anotaciones. El problema con la arquitectura de software, es que no todo se puede especificar a ese nivel, por lo tanto, se necesita una especificación simple, fácil de cargar y adaptable que se pueda agregar por separado como un artefacto más de arquitectura y se pueda asociar con la documentación nueva o existente. Aquí es donde entra nuestro lenguaje, al tratarse de un lenguaje que se puede utilizar a nivel conceptual y de anotaciones, nos basamos en los estudios previos de Dorado y Hurtado (2019), donde se ha dicho que las anotaciones de código tienen un impacto positivo sobre la eficiencia, efectividad y comprensión de la arquitectura de software y su *rationale*, en la realización de cambios arquitectónicos. Por lo tanto, basados en este trabajo, se complementó el modelo de anotaciones con nuestro lenguaje. Se usa el lenguaje para que se puedan representar aquellas anotaciones que no se limiten a solo las posibles anotaciones de código.

La diferencia entre documentar las justificaciones y la decisión muchas veces no es clara. No se pretende proporcionar una frontera entre ellos. De hecho, esta línea depende del dominio de la aplicación, los requisitos de calidad de la arquitectura y la voluntad del arquitecto del sistema. Es común que los arquitectos de software y las partes interesadas sigan estándares de calidad para documentar el diseño de la arquitectura. En ocasiones, de acuerdo a la experiencia de los arquitectos, pueden documentar o no la razón detrás de cada decisión de diseño arquitectónico (Jansen; Bosch, 2005). Es por esto que para documentar las razones de diseño detrás de cada decisión, se optó solo por las que sean significativas de tipo arquitectónico. En la Figura 1, se presenta el meta-modelo que determina el lenguaje de especificación de decisiones de diseño y su *rationale*.

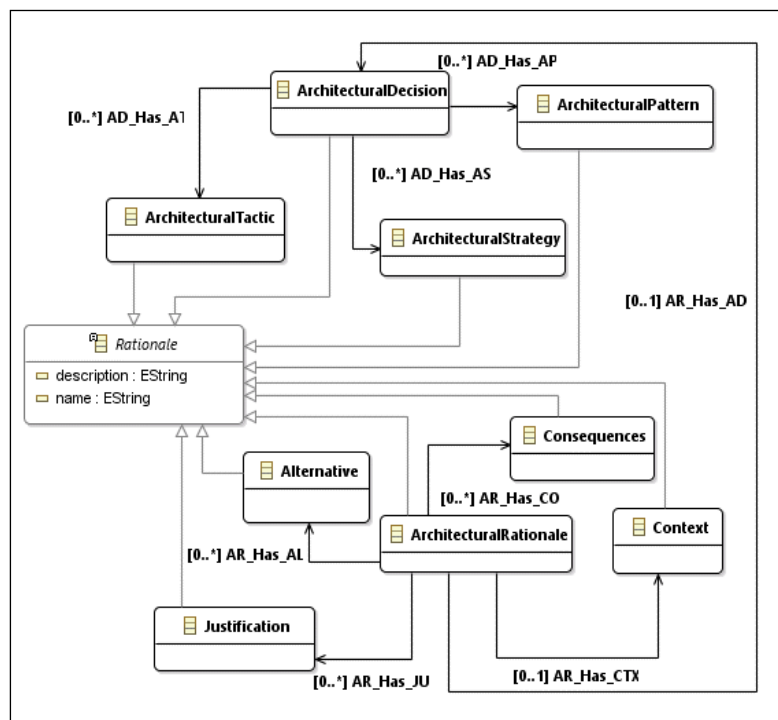


Figura 1. Meta-modelo de Rationale Arquitectónico

Fuente: elaboración propia.

El meta-modelo se compone de las siguientes abstracciones; ArchitecturalRational y ArchitecturalDecision, que se relacionan para proporcionar enlaces concretos entre las razones y la decisión de diseño final. Los enlaces de

documentación permiten a los diseñadores estructurar de manera explícita las razones detrás de una solución. En nuestro enfoque, lo primero que se registra es el *rationale*, mediante el elemento clave *ArchitecturalRationale*, que a su vez se relaciona con *Justification*, que se encarga de agrupar las justificaciones. *Alternative* define un conjunto de alternativas, donde el diseñador debe anotar las alternativas antes de seleccionar una opción en particular. *Consequences* es una descripción de las consecuencias esperadas a una solución en particular dentro de la arquitectura de software.

El elemento debe proporcionar información adicional a través de los pros y los contras de la solución. Por ejemplo, una toma de decisiones puede introducir la necesidad de tomar otras decisiones, crear nuevos requisitos o nuevas restricciones en el entorno y modificar los requisitos existentes, entre otros. *Context*, la toma de decisiones a menudo está sujeta a diversos factores, por ejemplo, la experiencia del diseñador, el contexto que lo rodea, la tecnología de moda, el curso que acabo de tomar, entre muchos más. Es importante anotar ese conocimiento. *ArchitecturalDecision* representa la decisión de diseño final seleccionada, que a su vez se relaciona con *ArchitecturalPattern*, con el fin de brindar enlaces de seguimiento concretos entre la decisión final y los patrones arquitectónicos relacionados, donde el diseñador puede especificar múltiples soluciones que pueden ser reutilizables en un futuro. *ArchitecturalTactic* es importante documentar el conocimiento acerca de las tácticas, ya que son decisiones de diseño que influyen en la respuesta a los atributos de calidad, en el meta-modelo se relaciona directamente con *ArchitecturalDecision*. Finalmente, *ArchitecturalStrategy*, es vital anotar las estrategias de arquitectura que se componen de un conjunto de tácticas.

3.1. Fundamentos técnicos

El enfoque planteado hace uso de la ingeniería dirigida por modelos (MDE). Para crear la herramienta de modelado específico de dominio, se utilizó *Eclipse Modeling Framework* (EMF) y *Graphical Modeling Framework* (GMF), ambas proporcionadas por la plataforma de Eclipse. GMF precisa de un meta-modelo y para ello se sirve de EMF, que se trata de un marco de modelado que soporta y genera documentos XMI y XML, los cuales son un estándar para el intercambio de información de metadatos con la especificación del dominio.

El primer paso es especificar en *Ecore* (el meta-modelo de EMF) la sintaxis abstracta del lenguaje a través de un meta-modelo, luego GMF establece una serie de pasos para construir una herramienta de este tipo, tomando como entrada el meta-modelo y la definición de la metáfora gráfica del lenguaje (sintaxis concreta) se genera semiautomáticamente de la herramienta (Montenegro; Gaona; Cueva; San Juan, 2011). A partir de este proceso se obtiene un plug in para Eclipse que contiene la herramienta DRML construida. La apariencia de la herramienta se muestra en la Figura 2.

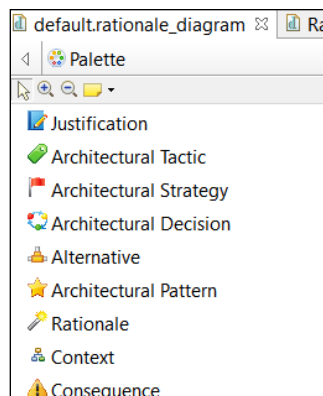


Figura 2. Herramienta para modelar el *Rationale* Arquitectónico
Fuente: elaboración propia.

El funcionamiento de la herramienta es sencillo, para crear los módulos basta con arrastrar los nodos de la “Palette” al área de trabajo, rellenar los campos y conectarlos.

3.2. Características del lenguaje

El lenguaje proporciona varias funciones expresivas que le permiten documentar la razón fundamental, en armonía con la variedad de procesos y su rigurosidad. A continuación, se muestra una descripción general de estas características:

Liviano: el lenguaje con su modelo de dominio puede ser adoptado total o parcialmente por distintos tipos de enfoques, planteando un lenguaje con los elementos necesarios que permita documentar el *rationale*, de las principales decisiones de diseño arquitectónico, pero buscando aliviar el trabajo pesado asociado con las actividades de los arquitectos de software y diseñadores a la hora de documentar y hacer seguimiento.

Simple: plantea los elementos mínimos de trabajo para la documentación del *rationale* arquitectónico, incluyendo y extendiendo los elementos de proceso más comunes encontrados en la literatura científica y los elementos más usados por arquitectos de software y diseñadores.

Expresivo: cada entidad de desarrollo y proyecto es diferente, el lenguaje considera los principales escenarios posibles para documentar un cambio de diseño arquitectónico e incluye varios constructos para armar una gran variedad de decisiones y su *rationale*.

3.3. Enfoque de solución DRML

En este apartado, se presenta la herramienta para la documentación del *rationale* arquitectónico, que se implementó con base en el lenguaje planteado. DRML provee varias características para la documentación, proporciona un editor que soporta la edición específica para el fundamento y la decisión. Primero, dentro de este editor, los arquitectos y diseñadores pueden crear y editar cualquier componente de fundamento arquitectónico en conjunto, como se muestra en la Figura 3, durante la fase de ingeniería de requerimientos, análisis y diseño, implementación, pruebas y despliegue.

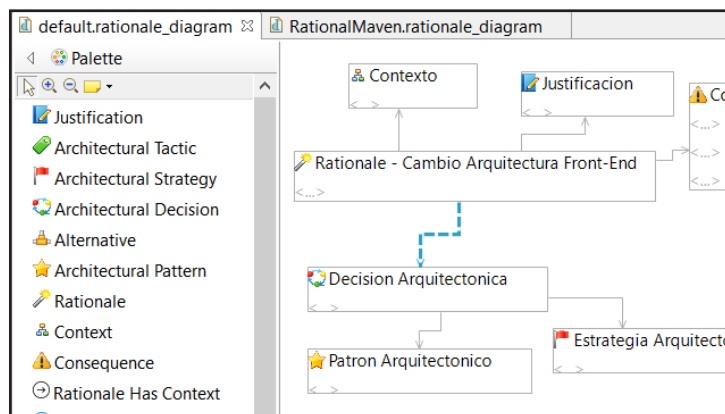


Figura 3. Editor de *Rationale* Arquitectónico
Fuente: elaboración propia.

El lenguaje permite, de una manera sencilla y elegante, crear más de un modelo de fundamento arquitectónico, en donde se puede implementar uno por cada componente de software si así se requiere, al igual que es posible utilizar diferentes elementos donde tan solo con seleccionar y arrastrar del panel de herramientas,

se empieza a construir la documentación. Por ejemplo, utilizar el elemento de *rationale* y *architecturalDecision* y complementarlos con el contexto, justificación, estrategias arquitectónicas, tácticas y las partes que se consideran importantes y que impactan los diseños de la arquitectura de software. Como se muestra en la Figura 4, también es importante resaltar que cada una de las piezas que componen la herramienta son opcionales al momento de construir el conocimiento de la decisión.

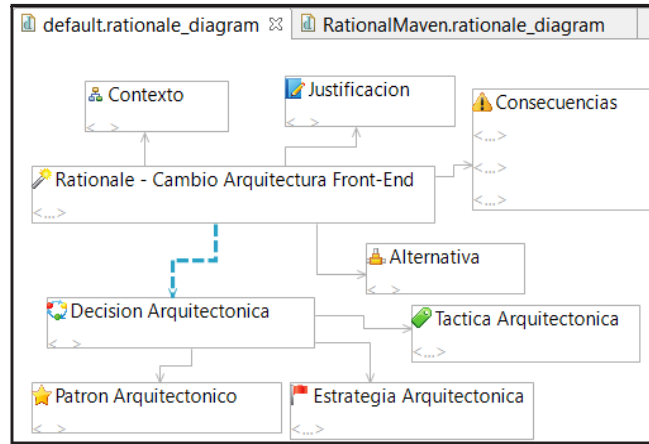


Figura 4. Elementos de Rationale Arquitectónico
Fuente: elaboración propia.

El diseño generado con DRML se puede agregar por separado como un artefacto más de arquitectura que se asocia con la documentación nueva y existente. Esto se muestra en la Figura 5.

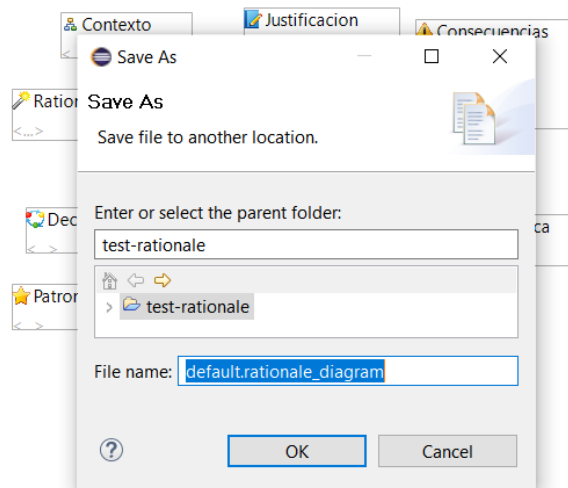


Figura 5. Artefacto de Arquitectura Software
Fuente: elaboración propia.

4. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos al inicio de este proyecto, se utilizaron las pautas de investigación del método de Bunge (2002) para la especificación del lenguaje de seguimiento que permite facilitar la documentación de arquitecturas. La evaluación del proceso siguió el método de estudios de caso propuesto por Runeson y Höst (2009). El estudio de caso es una metodología de investigación adecuada para la ingeniería del

software, puesto que permite estudiar la ingeniería en su contexto real, buscando mantener la integridad y las características significativas de los eventos, y es ejecutado cuando el investigador tiene poco control sobre los eventos y cuando los sujetos de estudio son más fáciles de observar en grupo, que de manera aislada (Runeson; Höst, 2009). A continuación, se describen las etapas de desarrollo del lenguaje.

Etapla exploratoria: consta del planteamiento del problema, construcción del modelo teórico, reconocimiento de los hechos, estudio del referente teórico de lineamientos y técnicas para documentar el *rationale*, de las principales decisiones de diseño arquitectónico en un contexto ágil con prácticas de arquitectura de software.

Etapla de formulación: se define el mecanismo que permite documentar las principales decisiones de diseño arquitectónico a través de un lenguaje visual de *rationale* arquitectónico.

Etapla de evaluación: se realizan ajustes del proceso siguiendo los hallazgos obtenidos en el estudio de caso y las evaluaciones realizadas.

En las siguientes subsecciones, se utilizan ejemplos de decisiones de diseño del proyecto SUIIN (Sistema Único de Información Indígena) para explicar e ilustrar la herramienta propuesta.

4.1. Contexto del caso

El estudio se realizó en una entidad promotora de salud pública, que busca fortalecer la capacidad administrativa y organizativa de sus procesos y procedimientos internos, a través de la administración automatizada de la información, con el fin de prestar un mejor servicio de salud a sus usuarios y optimizar procesos internos que en algunos casos se hacen manualmente. Razón por la cual, dentro de sus procesos organizativos se implementa un subproceso de desarrollo de software. Se trata de un equipo de trabajo conformado por ingenieros de sistemas, con un alto grado de conocimiento técnico, enfocados en la formalización, optimización y sistematización de procesos, mediante el sistema SUIIN que centraliza la información. Hay que mencionar, además, que implementan buenas prácticas en el desarrollo de sistemas de información. Por ejemplo, la metodología que utilizan para desarrollar software es el proceso unificado ágil (AUP), con el cual se desarrolla software de manera ágil, pero con buenas prácticas de arquitectura. Sin embargo, los sistemas heredados de la organización, que no fueron construidos con estas mismas prácticas, requieren de modificaciones (incluyendo nuevas decisiones de diseño) que requieren comprender y analizar las decisiones previamente tomadas. Por esto, la empresa cuenta con un escenario adecuado para aplicar DRML y su herramienta de soporte. El código fuente del sistema se encuentra en el repositorio de la empresa, con el fin de describir el software con la mayor precisión posible. La estructura se basa en el modelo de vistas de arquitectura “4 +1”.

4.2. Indicador y métrica

La Tabla 2 presenta la métrica utilizada para evaluar el valor que la propuesta tiene sobre la documentación del *rationale* arquitectónico. Posteriormente, se detalla su medición y tratamiento.

Tabla 2.

Indicador y métrica

Indicador	Métrica	Instrumento
Percepción de la usabilidad por parte de los usuarios	Facilidad de uso de los elementos del prototipo implementado a través del meta-modelo DRML.	Encuesta: https://github.com/tomilton/PercepcionUsabilidad.git

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se describen en detalle el indicador y la forma en que es calculado a través de la métrica identificada.

4.2.1. Percepción de usabilidad por parte de los usuarios

Para evaluar la satisfacción percibida por los usuarios, se aplicó un cuestionario de siete preguntas basado en el cuestionario estandarizado de Sauro y Lewis (2016). Los ítems del formulario generan cuatro puntajes, uno general y tres subescalas. Las reglas para computar son:

- General: promedio de las respuestas para los ítems 1 al 16 (todos los ítems).
- Calidad de la herramienta: elementos promedio del 1 al 6.
- Calidad de la información: elementos promedio de 7 al 12.
- Calidad de interfaz: elementos promedio del 13 al 16.

La Ecuación 1 es definida para calcular la usabilidad percibida es:

$$Pu = \frac{\sum_{i=1}^n RA_i}{n}$$

Donde Pu es la percepción de usabilidad; RA_i es el resultado asimilado para la pregunta i, el cual puede tomar valores de 1 al 7; y n es el número de ítems evaluados en la encuesta por los ingenieros.

4.3. Cambios Arquitectónicos

Actualmente el sistema en el front-end está utilizando el *framework* de presentación *primefaces*, el cual ha respondido de manera óptima a las necesidades de la organización, sin embargo, con el fin de mejorar la accesibilidad de los usuarios al sistema, ha surgido la necesidad de que los módulos nuevos que se construyan sean adaptables a dispositivos móviles, además de mejorar su aspecto visual. Por otra parte, el *back-end* de los módulos que se construyen para el sistema no cuentan con un mecanismo que les permita interactuar con otros módulos, esto dificulta la reutilización de código. También, es necesario redefinir algunas capas para lograr una mejor modificabilidad y escalabilidad.

4.4. Participantes

Los participantes fueron ingenieros de software (sistemas y electrónicos) actualmente relacionados con la industria local de software, por lo que las personas seleccionadas tienen conocimiento en los campos de la ciencia de la computación y relacionados. Tres fueron mujeres y tres fueron hombres mayores de 27 años, con experiencia entre 2 y 5 años en la industria, desempeñando diferentes roles, como analista, ingeniero de producto, desarrollador, pruebas y arquitecto de software.

4.5. Desarrollo del Caso

El estudio comienza con una introducción a la teoría del *rationale* arquitectónico para mostrar los conceptos a los participantes, seguido de la presentación de la herramienta DRML. Se realiza un ejemplo para comprender su uso, estructuras, restricciones y el modelado resultante del *rationale*. Después de entrenar a los participantes, se explican los cambios arquitectónicos a realizar y se entrega el material del estudio. La configuración del proyecto se realiza en el entorno de desarrollo Eclipse. El código fuente de la aplicación se descarga del repositorio de control de versiones subversión (SVN por su sigla en inglés) de la empresa, al igual que el documento de arquitectura SAD (documento de arquitectura de software) - SUIIN. También se entrega una guía con los cambios arquitectónicos y una encuesta que deben realizar después de llevar a cabo los cambios arquitectónicos. Los participantes comenzaron a documentar el *rationale* de los cambios, cada participante revisa la documentación previa de un cambio documentado, con el objetivo de evaluar si el *rationale* de cada decisión es comprensible por otro participante. A medida que cada participante modela la decisión con su *rationale* y evalúa la documentación de los demás cambios, se le entrega la encuesta para recopilar información cuantitativa y cualitativa que contribuya a la definición de la estructura final del modelo de documentación para el *rationale* arquitectónico.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados cuantitativos y cualitativos del estudio de caso.

5.1. Resultados cuantitativos

La Tabla 3 muestra los resultados de la encuesta de percepción de usabilidad para cada uno de los ingenieros en los criterios evaluados: calidad de la herramienta, calidad de la información y calidad de la interfaz.

Tabla 3.
Percepción de usabilidad

Criterios	Unidad de Análisis			
	Ingeniero 1	Ingeniero 2	Ingeniero 3	Promedio
Calidad de la herramienta	6,0	6,6	6,1	6,2
Calidad de la información	5,1	6,6	5,0	5,6
Calidad de interfaz	6,0	6,0	3,2	5,0
Promedio general	5,7	6,4	4,8	5,6

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 1 muestran que la calidad de la herramienta es aproximadamente del 89 %. La calidad de la información es 80 % aproximadamente y la calidad de la interfaz es 72 % aproximadamente.

5.2. Resultados cualitativos

Algunas de las observaciones, modelado de *rationale* y decisión de diseño de los ingenieros son presentados a continuación:

a) Observaciones:

La definición de la arquitectura y su lógica son el eje fundamental para la evolución del software, sería interesante contar con un repositorio donde se pudiera buscar el conocimiento documentado. Sería muy útil que la herramienta pudiera subirse a un repositorio y ser instalada como plug in del IDE Eclipse. Sería útil que se pudiera representar especificados patrones de diseño estructural y patrones de miniarquitectura. Sería útil que se pudieran representar los patrones de diseño que hayan sido personalizados. Es necesario que permita enlaces a documentos o artefactos externos, por ejemplo, el lenguaje unificado de modelado (UML). Es importante que en la herramienta se pueda identificar el actor que genera el requerimiento y los diferentes miembros del equipo que participan en el proceso, cada uno con su respectivo rol. Cuando se documentan las tácticas y estrategias arquitectónicas, es útil poder anotar que una estrategia consta de un conjunto de tácticas y relacionarla con la decisión.

b) Modelado de *rationale* y decisión:

La Figura 6 muestra el modelado final del *rationale* de uno de los ingenieros que participó en el estudio. Se puede ver que hizo énfasis en sustentar la decisión de diseño final; documenta los cambios arquitectónicos, utilizando de manera correcta los elementos que la herramienta le brinda, es decir, se puede ver como el *rationale* se relaciona con tres justificaciones. También anota una posible alternativa dentro de un contexto y una consecuencia con sus pros y contras. Así mismo, documenta la decisión final junto con enlaces explícitos a un patrón específico de arquitectura, que se relaciona con una táctica de arquitectura.

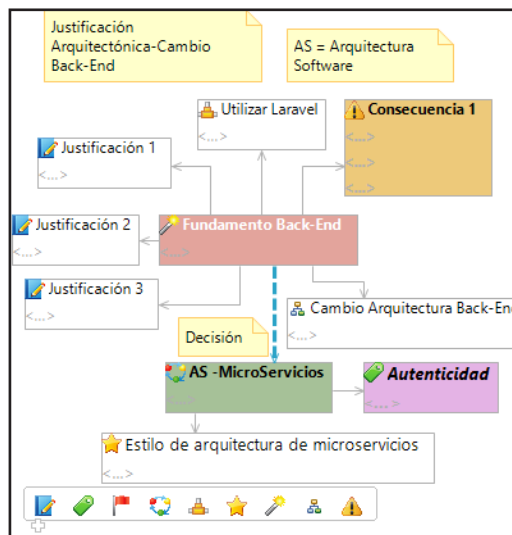


Figura 6. Modelo resultado de *Rationale* Arquitectónico
Fuente: elaboración propia.

La solución propuesta por el ingeniero consiste en cambiar la arquitectura monolítica por una arquitectura basada en microservicios, utilizando el lenguaje Java y Maven (herramienta de software para la gestión y construcción de proyectos Java). Anota tres justificaciones a nivel técnico para soportar la decisión final. Primero, su propuesta consiste en crear módulos con gestión de dependencias basados en Maven, con lo cual garantiza la estructuración del código en proyectos separados, lo que le permite separar la capa lógica, la capa de acceso a datos y la capa de servicios. Segundo, al utilizar Maven puede diseñar un arquetipo común, en el cual puede colocar lógica reutilizable, por ejemplo, acceso a métodos y clases comunes que se requieran desde diferentes microservicios, luego menciona que Maven le permite crear un arquetipo base para cada módulo. También anota una posible consecuencia en los microservicios que permite crear módulos en distintas tecnologías, lo que causa que el mantenimiento sea complejo. Una ventaja es que no es necesario detener la aplicación para realizar ajustes, cada componente funciona por separado. Además, documenta una táctica que consiste en autenticar a los clientes a través de tokens de seguridad JWT (JSON Web Tokens), generando un token único y usando un servicio de autenticación que garantice la validez de la conexión. Finalmente, anota una posible alternativa técnica que consiste en utilizar Laravel, un framework PHP.

6. Análisis

En el proyecto se emplearon diferentes estilos arquitectónicos motivados por diferentes decisiones de diseño. Un producto arquitectónico fue generado por cada componente durante las iteraciones realizadas. Diferentes grados de los detalles de las decisiones tomadas fueron registradas, para una mayor manipulación o proceso de mantenimiento. Tanto en el primer cambio arquitectónico como en el segundo tuvieron puntos de vista diferentes. La evaluación de la herramienta en ambos cambios demostró la utilidad de representar visualmente y gestionar el *rationale* arquitectónico de las decisiones de diseño. Hasta este punto, la interfaz de la herramienta fue suficiente para navegar fácilmente el fundamento y las decisiones tomadas. Por lo tanto, el arquitecto tiene una vista completa del proceso de diseño general, porque los elementos mostrados por la herramienta describen cronológicamente los eventos más importantes ocurridos durante el proyecto. Este enfoque facilita la comprensión del proceso de construcción de arquitectura para los interesados que están directamente relacionados con los problemas técnicos. Además, se genera documentación útil que incluye las decisiones tomadas, los patrones aplicados y los productos de arquitectura generados durante el proceso. La herramienta proporciona el modelo con la extensión *Rationale Diagram* que se asocia con la documentación nueva o existente, de la arquitectura de software como una vista más, en un contexto ágil. Aunque los ingenieros de software encontraron el lenguaje y la herramienta útil, se tienen algunos reparos al respecto. Primero, la calidad de la interface fue evaluada con solo el 72 %. Particularmente hay limitaciones para escalar el modelo de decisiones a todo el proyecto, la trazabilidad con los requisitos, en particular los no funcionales, así como su trazabilidad hacia el modelo arquitectónico expresado en otros modelos, como por ejemplo UML.

Es importante considerar que el caso se desarrolla en el contexto de una pequeña organización a través de varias sesiones de modelado, con un conjunto pequeño de decisiones de diseño (menos de tres). Sin embargo, la experiencia reportada por Zimmermann (2012), ha identificado 35 decisiones recurrentes en el desarrollo de aplicaciones empresariales en el contexto del diseño de arquitectura orientado a servicios. Además, Kellari, Crawley e Cameron (2018) analizan las decisiones arquitectónicas del software de aviones desde el DC3 hasta el 787, encontrando una disminución en la variación de las decisiones en un conjunto de datos, de 157 arquitecturas en el histórico de aviones, llegando a la conclusión de que son 27 las decisiones arquitectónicamente relevantes. Estos dos escenarios; uno típico y otro extremo en términos de confiabilidad, permiten evidenciar que el lenguaje de modelado de decisiones y su *rationale* debe facilitar la formación del modelado de un número no pequeño de decisiones de diseño arquitectónico, facilitando una estructura de organización de dichas decisiones (relaciones temporales o causa/efecto), y un relacionamiento con elementos externos para facilitar su integración y trazabilidad. Un enfoque es visualizar decisiones de arquitectura desde diferentes perspectivas. Una perspectiva permitiría abordar un conjunto de preocupaciones relacionadas con la decisión. La idea de mostrar diferentes perspectivas de decisiones facilitaría la asociación directa con los puntos

de vista con los que describa la arquitectura, aunque esto traería más complejidad para relacionar. Además, tampoco hay una relación entre las decisiones de diseño y los artefactos de diseño arquitectónico donde estas decisiones se reflejan (vistas y modelos de la arquitectura).

Por otro lado, una efectiva toma de decisiones requiere de una comunicación efectiva y acciones coordinadas del equipo, lo cual agrega mayor complejidad a los proyectos open source, debido a que los desarrolladores de estos proyectos generalmente no trabajan en el mismo lugar (Harrison; Gubler; Skinner, 2016). Esto aumenta la posibilidad de decisiones arquitectónicas mal entendidas y la motivación detrás de estas. Además, es probable que existan objetivos diferentes, porque no necesariamente trabajan en la misma empresa y para los mismos intereses, por lo que la toma de decisiones en forma unificada es de vital importancia. En este escenario la herramienta DRML brindaría un mecanismo para eliminar la ambigüedad de las decisiones y la posibilidad de su unificación. Además del tema de la escalabilidad, en este escenario habría que explorar la posibilidad de brindarle capacidades de trabajo colaborativo asistido por computador. Y esto no solo resultaría beneficioso en proyectos open source, sino en general, porque el diseño arquitectónico requiere del trabajo en equipo que normalmente falla por varios motivos, como la falta de flexibilidad, el ego del personal y la lealtad hacia una tecnología preferida, evitando que se logre un consenso en las decisiones y su *rationale*. Algunos miembros del equipo constantemente intentan forzar su forma de hacer las cosas a los otros, en lugar de participar objetivamente en las discusiones (Dasanayake; Markkula; Aaramaa; Oivo 2016).

7. Conclusiones

En este artículo se evidencia la importancia de documentar el *rationale* arquitectónico de las decisiones de diseño como pieza clave en la documentación de la arquitectura de software, en un contexto ágil. Grabar y documentar el conocimiento de las decisiones de diseño de arquitectura es importante para los procesos de desarrollo y mantenimiento. Para lograr el objetivo en la documentación de la justificación de los cambios arquitectónicos, se ha propuesto un lenguaje y una herramienta basada en sus elementos especificados capaz de grabar, mantener y gestionar las decisiones tomadas durante el proceso de construcción y mantenimiento de la arquitectura.

Nuestro enfoque conecta los requisitos con las arquitecturas a través del *rationale* arquitectónico y decisiones de diseño, para establecer rastros entre ellos. El estudio indica que trabajar con MDE permite definir y realizar transformaciones entre diferentes modelos, facilitando la interoperabilidad entre plataformas. Como un resultado de la evaluación realizada, se evidencia que este tipo de herramientas y, en particular, las herramientas basadas en meta-modelos, innovan la ingeniería del software con un enfoque centrado en desarrollo de aplicaciones a partir de modelos específicos de dominio de manera ágil y reduciendo costos, beneficiando a la industria del software y a la comunidad científica. También se identificaron limitaciones de la propuesta. Es necesario que el lenguaje permita especificar requerimientos funcionales y no funcionales y escalar el modelado para un número amplio de decisiones y sus relaciones. En cuanto a DRML, es importante que cuente con enlaces a fuentes externas de conocimiento, por ejemplo, UML, documentos de arquitectura y Wikis, entre otros. También sería útil generar un árbol de navegabilidad donde se pueda buscar el conocimiento documentado. Dado que el estudio es un caso exploratorio, este también tiene limitaciones en la muestra de los datos, ya que depende, en gran medida, de la experiencia y habilidades técnicas de los participantes en el conocimiento del tema para obtener mejores resultados. Como trabajo futuro se plantea extender el lenguaje para soportar el modelado de paquetes de decisiones (paquetes de preocupaciones y perspectivas), la trazabilidad con otros artefactos de la arquitectura, así como incorporar en la herramienta aspectos de versionado y modelado colaborativo. Además, aprovechando el paradigma MDE, relacionar por transformaciones los elementos de documentación del lenguaje DRML con las anotaciones de código desarrolladas por Dorado y Hurtado (2019), dado que el código sigue siendo la fuente más frecuente y confiable, en la que los desarrolladores encuentran información relevante a las justificaciones de las decisiones de diseño, particularmente, en el enfoque ágil con foco en la arquitectura.

Referencias

- Aldrich, J.; Chambers, C.; y Notkin, D. (2002). ArchJava: connecting software architecture to implementation. *Proceedings of the 24th International Conference on Software Engineering*. ICSE 2002, (pp. 187–197).
<https://doi.org/10.1109/ICSE.2002.1007967>
- Bass, Len; Clements, Paul; Kazman, Rick (2003). *Software architecture in practice*. Boston, EE.UU: Addison-Wesley.
- Bucaioni, Alessio; Cicchetti, Antonio; Ciccozzi, Federico; Mubeen, Saad; Sjodin, Mikael (2017). A Metamodel for the Rubus Component Model: Extensions for Timing and Model Transformation from EAST-ADL. *IEEE Access*, 5, 9005–9020.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2641218>
- Bunge, Mario (2002). *La investigación científica: su estrategia y su filosofía*. México: Siglo XXI Editores.
- Che, Meiru (2014). *Managing Architectural Design Decision Documentation and Evolution Committee* (tesis doctoral). University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Cleland-Huang, Jane; Mirakhorli, Mehdi; Czauderna, Adam; Wieloch, Mateusz (Mayo de 2013). Decision-Centric Traceability of architectural concerns. *2013 7th International Workshop on Traceability in Emerging Forms of Software Engineering, (TEFSE)*. San Francisco, California, EE. UU.
<https://doi.org/10.1109/TEFSE.2013.6620147>
- Dasanayake, Sandun; Markkula, Jouni; Aaramaa, Sanja; Oivo, Markku (2016). An Empirical Study on Collaborative Architecture Decision Making in Software Teams. In: Tekinerdogan B.; Zdun U.; Babar A. (eds). *European Conference on Software Architecture* (pp. 238–246). Springer, Cham: Lecture Notes in Computer Science.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48992-6_18
- Dermeval, Diego; Castro, Jaelson; Silva, Carla; Pimentel, Joao; Bittencourt, Ibert; Brito, Patrick; Elias, Endhe; Tenorio, Thyago; Pedro, Alan (March de 2013). On the use of metamodeling for relating requirements and architectural design decisions. *SAC '13: Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing* (pp. 1278–1283). Coimbra, Portugal.
<https://doi.org/10.1145/2480362.2480601>
- Dorado, Santiago; Hurtado, Julio (2019). Documenting architectural *rationale* using source code annotations: An exploratory study. *EPiC Series in Computing*, 64, 204–214.
- Gilson, Fabian; Englebert, Vincent (September de 2011). *Rationale, decisions and alternatives traceability for architecture design*. *ECSA 11: Proceedings of the 5th European Conference on Software Architecture: Companion* (pp. 1–9). New York, EEUU.
<https://doi.org/10.1145/2031759.2031764>
- Hadar, Irit; Sherman, Sofia; Hadar, Ethan; Harrison, Jhon (May 2013). Less is more: Architecture documentation for agile development. *2013 6th International Workshop on Cooperative and Human Aspects of Software Engineering, CHASE 2013 - Proceedings* (pp. 121–124). San Francisco, CA, USA.
<https://doi.org/10.1109/CHASE.2013.6614746>
- Harrison, Neil; Avgeriou, Paris (2010). How do architecture patterns and tactics interact? A model and annotation. *Journal of Systems and Software*, 83(10), 1735–1758.
<https://doi.org/10.1016/j.jss.2010.04.067>

- Harrison, Neil; Gubler, Erich; Skinner, Danielle (March de 2016). Architectural Decision-Making in Open-Source Systems-Preliminary Observations. *2016 1st International Workshop on Decision Making in Software ARCHitecture - Proceedings* (pp. 16–21). Venice, Italy.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/MARCH.2016.7>
- Hernández, Flor; Hurtado, Julio (2016). Difficulties and challenges in the incorporation of architectural practices. *Sistemas y Telemática*, 14(38), 74–86.
<https://doi.org/10.18046/syt.v14i38.2290>
- Hesse, Tom-Michael; Kuehlwein, Arthur; Paech, Barbara; Roehm, Tobias; Bruegge, Bernd (2015). Documenting Implementation Decisions with Code Annotations. *SEKE*, 152-157.
<https://doi.org/10.18293/SEKE2015-084>
- Jansen, Anton; Avgeriou, Paris; van Der Ven, Jan (2009). Enriching software architecture documentation. *Journal of Systems and Software*, 82(8), 1232–1248.
<https://doi.org/10.1016/j.jss.2009.04.052>
- Jansen, A.; Bosch, J. (November 2005). Software architecture as a set of architectural design decisions. *5th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture, WICSA 2005 – Proceedings* (pp. 109–120). Pittsburgh, Pennsylvania.
<https://doi.org/10.1109/WICSA.2005.61>
- Kellari, Demetrios; Crawley, Edward; Cameron, Bruce (2018). Architectural decisions in commercial aircraft from the DC-3 to the 787. *Journal of Aircraft*, 55(2), 792–804.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2514/1.C034130>
- Kruchten, Philippe; Capilla, Rafael; Dueñas, Juan (2009). The decision view's role in software architecture practice. *IEEE Software*, 26(2), 36–42.
<https://doi.org/10.1109/MS.2009.52>
- Kruchten, Philippe; Obbink, H.; Stafford, J. (2006, March). The past, present, and future for software architecture. *IEEE Software*, 23(2), 22-30.
<https://doi.org/10.1109/MS.2006.59>
- Lopes, Socrates; Aquino, Plinio (2017). Architectural Design Group Decision-Making in Agile Projects. *2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW)*(pp. 201-215). Gothenburg, Sweden.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7958489/>
- Malavolta, Ivano; Muccini, Henry; Rekha, Smrithi (2014). Enhancing Architecture Design Decisions Evolution with Group Decision Making Principles. In: Majzik I., Vieira M. (eds). *Software Engineering for Resilient Systems. SERENE 2014. Lecture Notes in Computer Science* (pp. 9–23). Budapest, Hungary: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-12241-0_2
- Manteuffel, Christian; Tofan, Dan; Koziolk, Heiko; Goldschmidt, Thomas; Avgeriou, Paris (2014). Industrial implementation of a documentation framework for architectural decisions. *2014 IEEE/IFIP Conference on Software Architecture – Proceedings* (pp. 225–234). Sydney, NSW.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/WICSA.2014.32>
- Montenegro, Carlos; Gaona, Paulo; Cueva, Juan; San Juan, Oscar (2011). Aplicación de ingeniería dirigida por modelos (MDA), para la construcción de una herramienta de modelado de dominio específico (DSM) y la creación de módulos en sistemas de gestión de aprendizaje (LMS) independientes de la plataforma. *Dyna*, 78 (169), 43–52.
<https://www.redalyc.org/pdf/496/49622390005.pdf>

- Plataniotis, Georgios; Ma, Qin; Proper, Erik; de Kinderen, Sybren (2015). Traceability and modeling of requirements in enterprise architecture from a design *rationale* perspective. *2015 IEEE 9th International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS)* (pp. 518–519). Athens, Greece.
<https://doi.org/10.1109/RCIS.2015.7128916>
- Reynoso, Carlos (2004). *Introducción a la Arquitectura de Software*.
<http://cic.puj.edu.co/wiki/lib/exe/fetch.php?media=materias:introarq.pdf>
- Roeller, Ronny; Lago, Patricia; van Vliet, Hans (2006). Recovering architectural assumptions. *Journal of Systems and Software*, 79(4), 552–573.
<https://doi.org/10.1016/j.jss.2005.10.017>
- Roldán, Maria; Gonnet, Silvio; Leone, Horacio (2016). Operation-based approach for documenting software architecture knowledge. *Expert Systems*, 33(4), 313–348.
<https://doi.org/10.1111/exsy.12152>
- Runeson, Per; Höst, Martin (2009). Guidelines for conducting and reporting case study research in software engineering. *Empirical Software Engineering*, 14(2), 131–164.
<https://doi.org/10.1007/s10664-008-9102-8>
- Sauro, Jeff; Lewis, James (2016). Standardized usability questionnaires. In *Quantifying the User Experience* (pp. 185–248). EE.UU: Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802308-2.00008-4>
- Singer, J. (1998). Practices of software maintenance. *Proceedings. International Conference on Software Maintenance* (Cat. No. 98CB36272) (pp. 139–145). Bethesda, EE.UU.
<https://doi.org/10.1109/ICSM.1998.738502>
- Tang, Antony; Babar, MMuhammad; Gorton, Ian; Han, Jun (2006). A survey of architecture design *rationale*. *Journal of Systems and Software*, 79(12), 1792–1804.
<https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.04.029>
- van Der Ven, Jan; Bosch, Jan (2016). Busting Software Architecture Beliefs: A Survey on Success Factors in Architecture Decision Making. *2016 42th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA)* (pp. 42–49). Limassol, Cyprus.
<https://doi.org/10.1109/SEAA.2016.35>
- van Der Ven, Jan; Jansen, Anton; Nijhuis, Jos; Bosch, Jan (2006). Design decisions: The bridge between *rationale* and architecture. In Dutoit A.H., McCall R., Mistrík I., Paech B. (eds). *Rationale Management in Software Engineering* (pp. 329–348). Berlin, Heidelberg, Springer.
https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-30998-7_16
- van Vliet, Hans; Tang, Antony (2016). Decision making in software architecture. *Journal of Systems and Software*, 117, 638–644.
<https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.01.017>
- Zimmermann, Olaf (2012). Architectural decision identification in architectural patterns. In: *WICSA/ECSA '12: Proceedings of the WICSA/ECSA 2012 Companion Volume* (pp. 96–103). New York, EE.UU: Association for Computing Machinery.
<https://doi.org/10.1145/2361999.2362021>

Benchmark para determinar el sistema de cifrado con mejor rendimiento sobre dispositivos inteligentes

Benchmark to determine the best performing encryption system on smart devices

Alber Montoya Benitez¹
Bayron Ospina²

¹ Instituto Tecnológico Metropolitano (Colombia). Correo electrónico: albermontoya@itm.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7452-8540>

² Instituto Tecnológico Metropolitano (Colombia). Correo electrónico: bayronospina@itm.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3993-1430>

Recibido: 09-05-2020 Aceptado: 17-09-2020

Cómo citar: Montoya-Benitez, Alber; Ospina, Bayron (2020). Benchmark para determinar el sistema de cifrado con mejor rendimiento sobre dispositivos inteligentes. *Informador Técnico*, 84(2), 175 - 191.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2782>

Resumen

Actualmente las telecomunicaciones y especialmente las comunicaciones móviles han tomado gran importancia y relevancia en las actividades cotidianas de las personas. Sin embargo, el uso de dispositivos móviles se ha visto amenazado por la creciente ola de ataques y *malware* tipo troyanos (e.g., *exploits*), para robo de información y daño de archivos. Con el fin de contrarrestar estos ataques, se han creado técnicas de cifrado de datos y procesos de autenticación. De esta manera se puede evitar violación de la confidencialidad y autenticidad en las comunicaciones. Por otra parte, algunos de los algoritmos de cifrado existentes son inseguros y pueden requerir altos costos computacionales. En este trabajo se realizó el análisis del rendimiento de tres de los principales algoritmos de cifrado definidos por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por su sigla en inglés): Rijndael como el Estándar Avanzado de Cifrado (AES por su sigla en inglés), Serpent y Twofish, analizando sus principales características de funcionamiento y realizando pruebas de rendimiento sobre dispositivos inteligentes (smartphones y tablets), con el fin de determinar cuál de estos algoritmos sería el más adecuado para ser implementado en cada equipo. Finalmente, se genera una ecuación llamada costo computacional, que depende de la RAM, CPU y el gasto de batería; con la cual, se pueden realizar análisis para los algoritmos de cifrado simétricos en dispositivos similares a los tratados en este experimento.

Palabras clave: dispositivos inteligentes; seguridad informática; comunicaciones móviles; algoritmos de cifrado; gasto computacional.

Abstract

Currently, telecommunications and especially mobile communications have taken great importance and relevance in people's daily activities. However, the use of mobile devices has been threatened by the growing wave of attacks and Trojans as malware (e.g., exploits) for information theft, and fire damage; To mitigate these attacks there are data encryption techniques and authentication processes. In this way, a breach of confidentiality and authenticity in communications can be avoided. On the other hand, some of the existing encryption algorithms are insecure and may require high computational costs. This work analyzes the performance of three of the main encryption algorithms defined by the National Institute of Standards and Technology (NIST): Rijndael as Advanced Encryption Standard (AES), Serpent and Twofish, specifying their main operating characteristics, analyzing performance tests on smart devices, to determine which of these algorithms is the

most appropriate to be implemented in each device. Finally, an equation called computational cost is generated, which is a function of RAM, CPU, and battery drain; that analyses for symmetries encryption algorithms that can be performed on similar devices to those treated in this experiment.

Keywords: smart devices; computer security; mobile communications; encryption algorithms; computational cost.

1. Introducción

Hoy en día se requiere de dispositivos móviles no solo en las comunicaciones sino en gran parte de actividades cotidianas. No obstante, en tendencias como BYOD (traiga su propio dispositivo) su uso se ve amenazado, debido a la presencia de un alto número de ataques. Las técnicas de autenticación y cifrado de datos son protecciones contra tales amenazas, ayudando a que las comunicaciones y el almacenamiento sean seguros y legítimos. En contraste, los algoritmos de cifrado demandan costos computacionales altos y afectan en gran medida el rendimiento de los equipos. Por otro lado, la miniaturización ha reducido el tamaño de los componentes internos de estos dispositivos mediante nuevos desarrollos, la nanotecnología y materiales más resistentes. La reducción del tamaño de los elementos hace que las baterías almacenen menos energía. A largo del tiempo se han realizado algunos estudios sobre el tema, los cuales, son base de este trabajo. En este trabajo se presenta un “benchmark” para identificar cuál sería el mejor algoritmo de cifrado, en términos de costo computacional y seguridad, para dos tipos de equipos móviles. Para el experimento, se realizaron diversas pruebas con diferentes tamaños y tipos de archivos, obteniendo valores medios que posteriormente se analizaron y compararon entre sí, con el fin de proponer las mejores opciones y así usarlas en cada dispositivo. El trabajo involucra las variables CPU, RAM y consumo de batería cuando se ejecutan tres de los algoritmos de cifrado más seguros definidos por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por su sigla en inglés) (Federal Information Processing Standards Publications [FIPS PUBS] 2001).

Infelizmente, hay cada vez más ataques a las comunicaciones móviles, en el primer semestre de 2019, más de 440.000 usuarios únicos fueron atacados por amenazas financieras, un 7 % en comparación del año anterior, también el número de ataques financieros móviles en la primera mitad de 2019 fue de 3.740.378, un 107 % más que en el primer semestre del año anterior; actualmente solo un pequeño porcentaje de teléfonos inteligentes y tabletas ha instalado algún software de seguridad (Kupreev; Sidorina; Chebyshev; Kuskov, 2019). Además el uso de los canales electrónicos ha aumentado para el sistema financiero, pero incluso un alto porcentaje de usuarios todavía no utiliza servicios en línea por considerarlos inseguros.

Uno de los principales inconvenientes en las telecomunicaciones es la implementación de un sistema de autenticación no cifrado, o en algunos casos, el uso de un cifrado débil que puede ser fácil de atacar, los cuales son ineficientes para proteger información crítica. Por ejemplo, la aplicación WhatsApp utilizaba el sistema crypt5 o crypt7 para proteger las conversaciones, o autenticación WEP en red inalámbrica, la cual, es muy frágil a ataques. Además, el costo computacional requerido por algunos algoritmos afecta el tiempo de funcionamiento de la batería. En la literatura revisada no se encontró ningún método para determinar cuál es el mejor algoritmo para cada dispositivo móvil en función de las características de CPU y memoria mencionadas anteriormente. En este documento se muestra un punto de referencia para los algoritmos de cifrado y se muestra el rendimiento de cada uno en un dispositivo móvil.

2. Contexto

2.1. Amenazas

Existen diversos tipos de ataques a los algoritmos mencionados anteriormente. Estos incluyen el Time-Memory Trade-Off (TMTO), un ataque que reduce el tiempo de criptoanálisis mediante el uso de datos almacenados en

la memoria. Para contrarrestar este ataque, Saberi; Shojaie; Salleh; Niknafsgermani; Alavi (2012) agregan un bloque de cifrado en el intercambio de autenticación de mensajes *Advanced Encryption Standard (AES)*. Otro tipo de ataque que afecta a estos sistemas de autenticación son los ataques de diccionario, ampliamente utilizados contra los sistemas de autenticación *Wi-Fi Protected Access (WPA)* (Shivkumar; Umamaheswari, 2011). Como consecuencia de los desarrollos de WPA, WPA2 y WPA3, la efectividad de este ataque se minimiza porque se realiza un cambio dinámico de la clave de autenticación. El *Data Encryption Standard (DES)* en sí era vulnerable a este ataque debido a su clave corta de 56 bits, lo que obligó a la aparición de 3DES y AES con longitudes de bits de hasta 128 y 256 bits.

En ataques comunes en SMS de móviles, los troyanos se usan generalmente para enviar mensajes *premium* desde dispositivos, sin embargo, su uso ha sido reemplazado por los de puerta trasera, programas desarrollados para facilitar las malas intenciones de los ciberdelincuentes que abren puertos adicionales. Con una puerta trasera es fácil descargar *malware* en su teléfono o tablet y facilita el robo de información personal que puede incluir: imágenes, videos, números de teléfono, direcciones de correo electrónico y coordenadas de ubicación (Technology Day revista IT Now, 2013).

2.2. Protección

De acuerdo con la Norma de Seguridad ISO/IEC 27001, aprobada y publicada en octubre de 2005 por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Comisión Electrotécnica (IEC) para proporcionar una fuerte seguridad a las comunicaciones, se deben cumplir tres características, disponibilidad, confidencialidad e integridad. Para cumplir con estos parámetros, es necesario asegurar la autenticación como un elemento importante en el proceso de seguridad de tres maneras: biometría, tarjetas inteligentes o tokens y llaves. Las claves se pueden transferir utilizando algoritmos cifrados o no cifrados. Los algoritmos de cifrado se dividen en dos grupos simétricos y asimétricos. A continuación, se explican brevemente los algoritmos clave de este estudio.

2.2.1. AES - Rijndael

Trabaja a nivel de bytes interpretando bytes como un cuerpo de Galois $GF(2^8)$ (FIPS PUBS, 2001), cubre los registros a nivel de 32 bits al considerarlos como polinomios de grado inferior a 4 con coeficientes que son polinomios en $GF(2^8)$ (FIPS PUBS, 2001). En los cálculos, los polinomios irreducibles de grado m se usan de la siguiente manera (Ecuación 1):

$$GF(pm) = \{\lambda_0 + \lambda_1X + \lambda_2X^2 + \dots + \lambda_{m-1}X^{m-1}; \lambda_i \in Z_p\} \quad (1)$$

El tamaño del bloque y la longitud de la clave pueden ser variables en múltiplos de 4 bytes. Las claves predeterminadas son 128, 192 y 256 bits. La estructura consta de dos etapas y, estas a su vez, por una serie de "rondas" que permiten ciertos cambios en la matriz de estado. Se explicarán brevemente en la Figura 1, Figura 2, Figura 3, Figura 4.

SubBytes: cada byte en la matriz de estado se reemplaza con su entrada en una tabla fija de búsqueda de 8 bits (Ecuación 2).

$$S = b_{ij} = (a_{ij}) \quad (2)$$

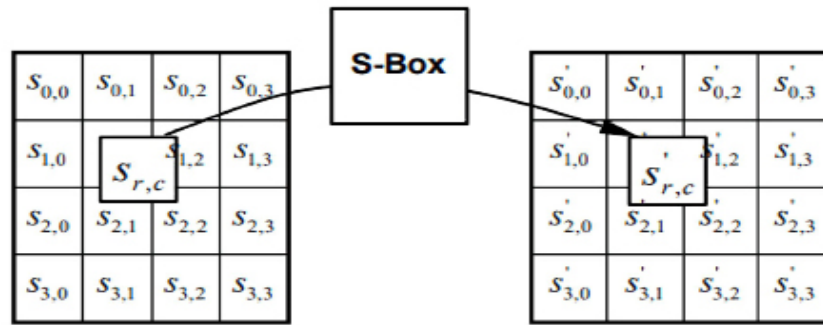


Figura 1. Reemplazo de entradas de matriz
Fuente: FIPS PUBS (2001).

ShiftRows: los bytes en cada fila se desplazan cíclicamente a la izquierda.

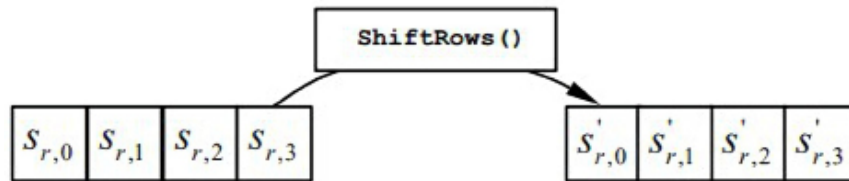


Figura 2. Rotación de elementos
Fuente: FIPS PUBS (2001).

MixColumns: cada columna se multiplica por un polinomio constante $c(x)$.

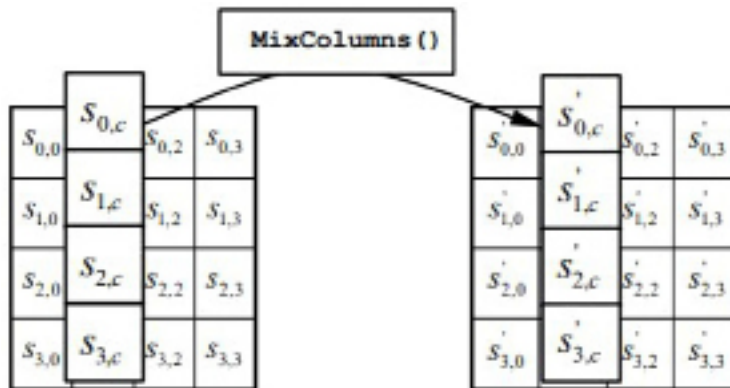


Figura 3. Transformación lineal
Fuente: FIPS PUBS (2001).

AddRoundKey: cada byte se combina con uno de la subclave utilizando la operación XOR($\oplus$).

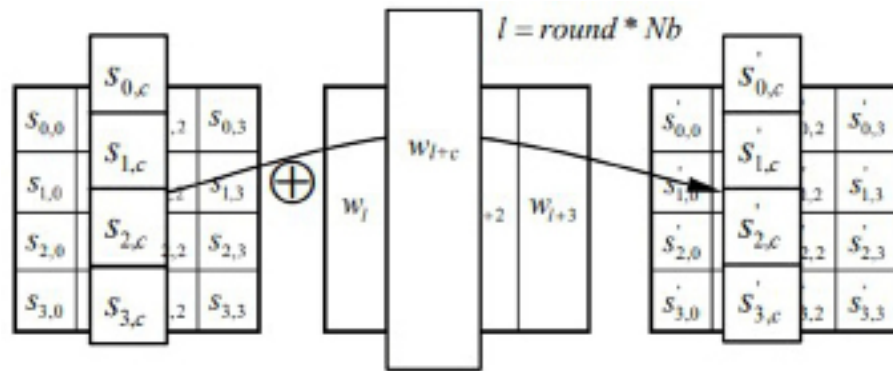


Figura 4. Combinación de Subclave usando XOR
Fuente: FIPS PUBS (2001).

2.2.2. RSA (Rivest, Shamir & Adleman)

A diferencia del algoritmo anterior, este es un algoritmo asimétrico que se aplica tanto para cifrar como para firmar digitalmente (RSA Laboratories, 2002). Consta de tres pasos: generación de claves, cifrado y decodificación.

Generación de claves

Cada usuario elige dos números primos diferentes p y q . (n) se calcula con Ecuación 3.

$$n = pq \quad (3)$$

Y se usa como módulo para las llaves. $\varphi(n)$ se calcula con donde φ es la función de Euler φ (Ecuación 4).

$$\varphi(n) = (p-1)(q-1) \quad (4)$$

Se elige un número entero positivo e menor y primo relativo para (n) . e se muestra como el exponente de la clave pública d , así d se mantiene como el exponente de clave privada (Ecuación 5).

$$d = e^{-1}(n) \quad (5)$$

Cifrado

El usuario A comunica su clave pública (n, e) al usuario B y A mantiene en secreto la clave privada. Ahora B quiere enviar un mensaje M a A. Primero, B convierte M en un número entero m menor que n mediante el uso de un protocolo reversible; luego calcula el texto cifrado c por la Ecuación 6.

$$C \equiv (mod n) \quad (6)$$

Decodificación

A puede recuperar m de c utilizando su exponente d de la clave privada (Ecuación 7).

$$m \equiv (mod n)$$

2.2.3. Serpent

Fue diseñado por Anderson, Biham y Knudsen (1998). En este algoritmo utilizaron un tamaño de bloque de 128 bits que admite tamaños de clave de 128, 192 y 256 bits de longitud. El cifrado implica 32 rondas de operación de sustitución-permutación en cuatro bloques de 32 bits. Cada ronda usa 32 copias de las mismas S-Box de 4 bits. Serpent fue diseñado para operaciones que se ejecuten en paralelo utilizando 32 desplazamientos de 1 bit (Figura 5).

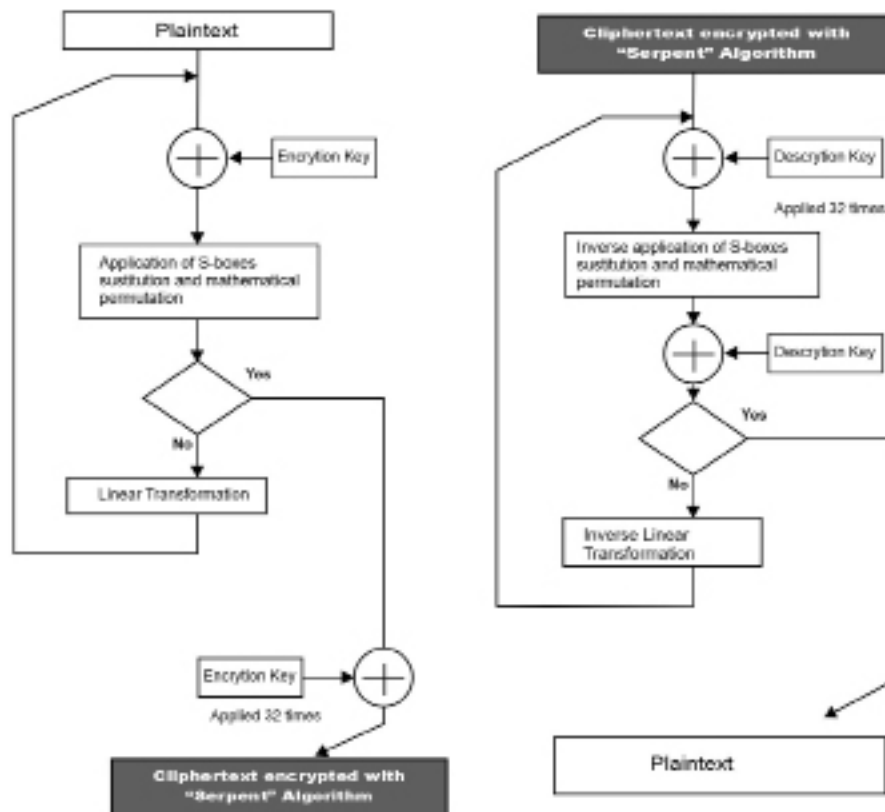


Figura 5. Cifrado Serpent

Fuente: Anderson; Biham; Knudsen (1998).

2.2.4. Twofish

Fue diseñado por Schneier, Kelsey, Withing, Wagner, Hall y Ferguson (1998). Es un método de cifrado simétrico en bloque desarrollado por Counterpane Labs y presentado al concurso NIST en busca de un reemplazo para DES. Su tamaño de bloque es de 128 bits y el tamaño de la clave puede ser de hasta 256 bits. Twofish obtiene otros elementos de diseño, como el cifrado SAFER de la familia de transformadas Pseudo-Hadamard (PHT). Utiliza la misma estructura Feistel de DES (Figura 6). En la mayoría de las plataformas de software, Twofish es un poco más lento que Rijndael para las claves de 128 bits, pero algo más rápido para las claves de 256 bits (Schneier *et al.*, 1998).

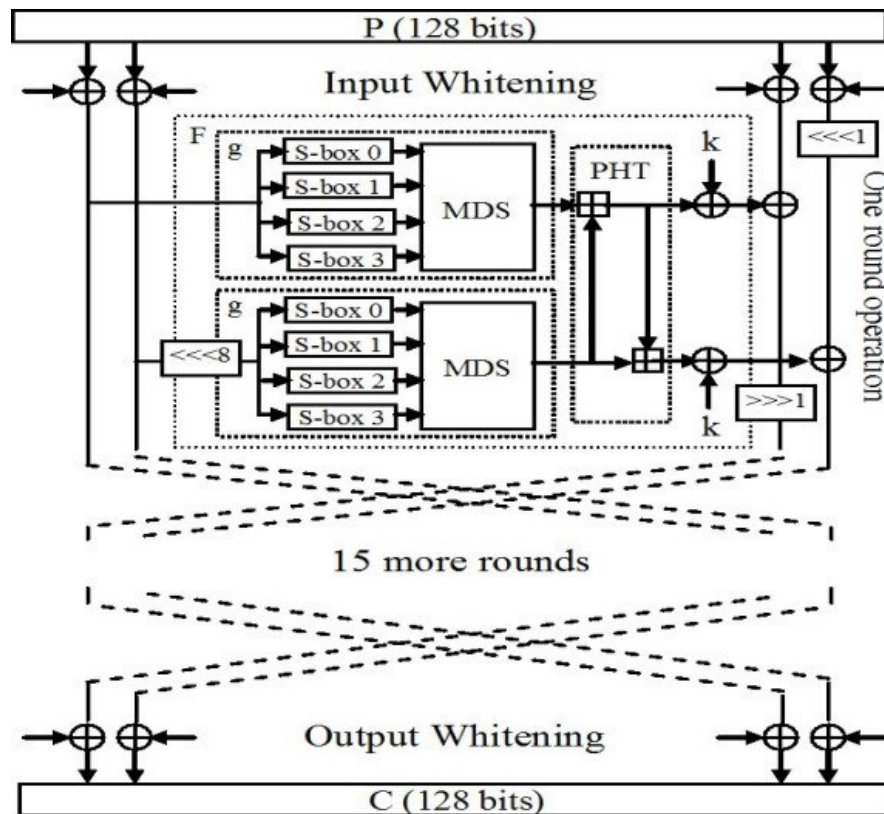


Figura 6. Cifrado Twofish. Tomado de Schneier *et al.* (1998)

2.3. Investigaciones previas

Uno de los estudios publicados por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés) propone un esquema de seguridad criptográfica que reduce el uso de los recursos utilizados por los dispositivos móviles antes de cargar datos en la nube. El esquema es la modificación de operaciones lógicas y matemáticas en bloques cifrados (Khan; Kiah; Khan; Madani; Khan, 2013), esta propuesta puede reducir el desperdicio de recursos, pero podría comprometer la fortaleza de los algoritmos criptográficos. En otro estudio, se expone un método de autenticación en el que la posición del usuario y la hora del día forman parte del proceso. En este caso, se permitirá la autenticación del usuario solo a ciertas horas del día. El método se basa en el algoritmo hash MD5 y el cifrado DES, pero también es compatible con AES y 3DES (Karimi; Kalantari, 2011). Esta propuesta es bastante adecuada porque aumenta el control y reduce el tiempo de exposición a los ataques.

En una mirada a las tendencias actuales en Colombia y el mundo, se presentan múltiples desarrollos y aplicaciones que se pueden clasificar en el Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Este es el caso de Dussán, Vanegas, Chavarro y Molina (2016), quienes presentan un prototipo electrónico que monitorea parámetros fisicoquímicos a fin de detectar situaciones críticas de un cultivo de peces. El prototipo desarrollado requiere de equipos con bajos recursos de máquina, tipo Arduino o el microprocesador ATMEGA 328P, que podrían requerir e implementar sistemas de cifrado para la protección de la información.

En un estudio sobre tecnologías de VoIP, se realiza un análisis de amenazas que combinan protocolos de intercambio de claves basado en la curva elíptica Diffie Hellman (ECDH) criptográfica de clave pública con la autenticación basada en la identidad del usuario, que también utilizan la información (identidad, dirección IP, puerto). Se propone el protocolo de intercambio de claves para garantizar confidencialidad e integridad. Bandung y Priyatna (2017) realizaron un análisis de seguridad entre el protocolo propuesto con el protocolo

ECDH existente y compararon su rendimiento de generación de claves y el tiempo de intercambio de claves. Los resultados mostraron que la combinación de ECDH y un mecanismo de autenticación ha demostrado ser segura contra ataques. Con la adición de la autenticación, el tiempo total de ejecución de la clave de generación y la clave de intercambio es más lento en un 11,70 % que el ECDH original. Sin embargo, se puede garantizar que las comunicaciones VoIP todavía se pueden realizar de forma interactiva. Por su parte, Bian, Lu y Kuang (2013) proponen una modificación al algoritmo Blowfish para que se ejecute en un teléfono inteligente. Este sistema mejora la eficiencia del algoritmo para trabajar en teléfonos móviles, aunque esto no es tan seguro como el objetivo de los algoritmos de este trabajo que fueron finalistas en el NIST.

Ren, Boukerche y Nelem (2010) desarrollaron un sistema de cifrado híbrido con claves simétricas y asimétricas, para la autenticación en redes ad-hoc, lo que demuestra ser bastante seguro, aunque podría ser algo complejo y pesado para ciertos dispositivos móviles. De manera similar, Zhang, Xiao, Zhang (2010) desarrollaron un sistema criptográfico basado en el algoritmo IDEA, minimizando el costo computacional cuando se ejecuta en teléfonos móviles. Esto podría ser un desarrollo interesante y es una inspiración para el trabajo actual.

Al revisar investigaciones en campos de la salud, se encontraron investigaciones como la de Tovar; Díaz, Quiñones, Pabón y García (2018), donde se desarrolla un sistema de rehabilitación física teleoperado para pacientes que viven en áreas rurales. Este sistema maneja un conjunto de indicadores críticos que requieren una baja latencia para minimizar el margen de error en la respuesta a los procesos que se manejan en tiempo real. Por tal razón, es importante que se implementen programas de bajo consumo de recursos, pero que a su vez garanticen la confidencialidad de la información. De manera similar en la revisión de Castro *et al.* (2017), se presentan más desarrollos en el campo de la salud con IoT. Por su parte, en la investigación de Qi, Pan y Ding (2011) se utiliza un *Field Programmable Gate Array (FPGA)*, que aumenta la velocidad de cifrado en mensajes cortos en dispositivos móviles, resolviendo el problema anterior. Esta solución puede ser un ejemplo para implementar en algoritmos simétricos.

En cuanto a Alomari y Samsudin (2011) implementaron un XTS-AES en una GPU, usando un procesamiento en paralelo, lograron un cifrado más eficiente y con un impacto menor en los dispositivos. Uskov (2012) presenta un punto de referencia de algoritmos de autenticación y cifrado para VPN con diferentes resultados con respecto a los algoritmos que conciernen a este trabajo, se demostró que AES tiene el mejor rendimiento en 2 de 3 plataformas probadas. Finalmente, Umavathi y Varughese (2010) realizaron un análisis de tres algoritmos: AES, 3DES y Blowfish en MANET, encontrando que AES es el mejor. Sin embargo, se sabe que 3DES es un algoritmo en desuso y Blowfish es menos seguro que el primero.

3. Metodología

3.1. Método aplicado

Las pruebas consisten en medir el rendimiento de diferentes algoritmos cuando se ejecutan en ciertos dispositivos móviles, específicamente se correrán AES, Twofish y Serpent; en un teléfono inteligente y una tableta. Se utilizaron aplicaciones diferentes, obteniendo resultados equivalentes. Con base en el funcionamiento interno de cada aplicación, se propuso la siguiente secuencia de pasos, donde se consideran dos variables de respuesta, CPU y memoria RAM. El experimento se realizó utilizando una técnica denominada diseño de bloques aleatorizados, la cual consiste en los siguientes pasos:

1. Instalación y configuración de software de cifrado (herramienta 1). En este paso se realizaron configuraciones iniciales como el tamaño de la clave en cada aplicación.

2. Instalación y configuración de software de medición (herramienta 2). Esta herramienta toma los valores de las variables CPU y RAM que muestran resultados numéricos y gráficos en una línea de tiempo.
3. Cifrar/descifrar múltiples archivos de diferentes tamaños. Las pruebas se realizaron con diferentes tipos de archivos, los formatos utilizados fueron docx, xlsx, jpg, mp3 y avi, que son los tipos de archivos más comunes para el almacenamiento de datos en el dispositivo analizado.
4. Para ejecutar los algoritmos, se realizó solo código nativo (sin leer ni escribir en el disco). Como prueba alternativa, los algoritmos se ejecutaron en un proceso que aísla la lectura y escritura en el disco, y las aplicaciones tienen la función de obtener explícitamente el consumo de recursos (CPU y RAM) del proceso de cifrado.
5. Hacer mediciones de las variables de CPU y memoria para determinar el gasto de batería. Los valores de las variables de CPU y RAM se tomaron cuando se ejecutaron los algoritmos de cifrado, en el proceso de medición se aislaron otros factores externos, tomando como referencia un punto inicial específico. Finalmente, los resultados se tabularon obteniendo un promedio.
6. Proponer los algoritmos más adecuados para cada tipo de dispositivo móvil y aplicación analizados. Consiste en plantear una expresión matemática para determinar el costo computacional de los algoritmos analizados sobre cada dispositivo.

4. Resultados

4.1. Resultados obtenidos

Rijndael, Twofish y Serpent fueron los algoritmos seleccionados para esta investigación, de acuerdo con que fueron los finalistas en la competencia AES (FIPS PUBS, 2001). Por lo tanto, son altamente utilizados en los sistemas de cifrado. Las pruebas se realizaron en un teléfono inteligente y una tableta cuyas características de hardware y software se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Características de dispositivos

SMARTPHONE	TABLET
Samsung Galaxy S10+.	Dell Venue 11 Pro11i-6363blk laptop/tablet
Procesador Qualcomm Snapdragon Octa-core 2,4 GHz. 128 GB Flash.	Procesador Intel Core i3-4020Y 1,5GHz. Tarjeta gráfica integrada Intel GT2. 128GB Disco de almacenamiento de estado sólido.
Memoria RAM 8 GB.	Ram 4GB DDR3.
Sistema operativo Android 9,0.	Sistema operativo Win 10.
Batería lithium-ion, 4.100 mAh.	Batería 37Wh ion litio.

Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, se instaló la aplicación *Secret Space Encryptor* en el teléfono inteligente, se llevaron a cabo dos tipos de pruebas, un *benchmark* para el código nativo de los 3 algoritmos (Figura 7) y el cifrado de un archivo de 300MB, que midió el rendimiento de la CPU y el uso de RAM (Figura 8, Figura 9). Estos resultados se analizarán gráficamente en la siguiente sección.



Figura 7. Benchmark Smartphone
Fuente: Elaboración propia.

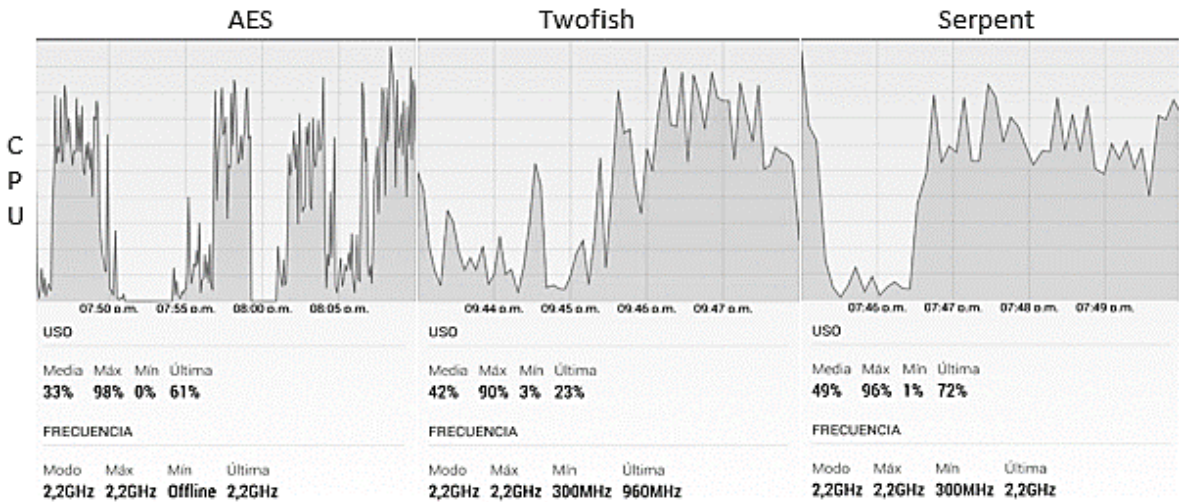


Figura 8. Rendimiento de CPU en Smartphone
Fuente: elaboración propia.

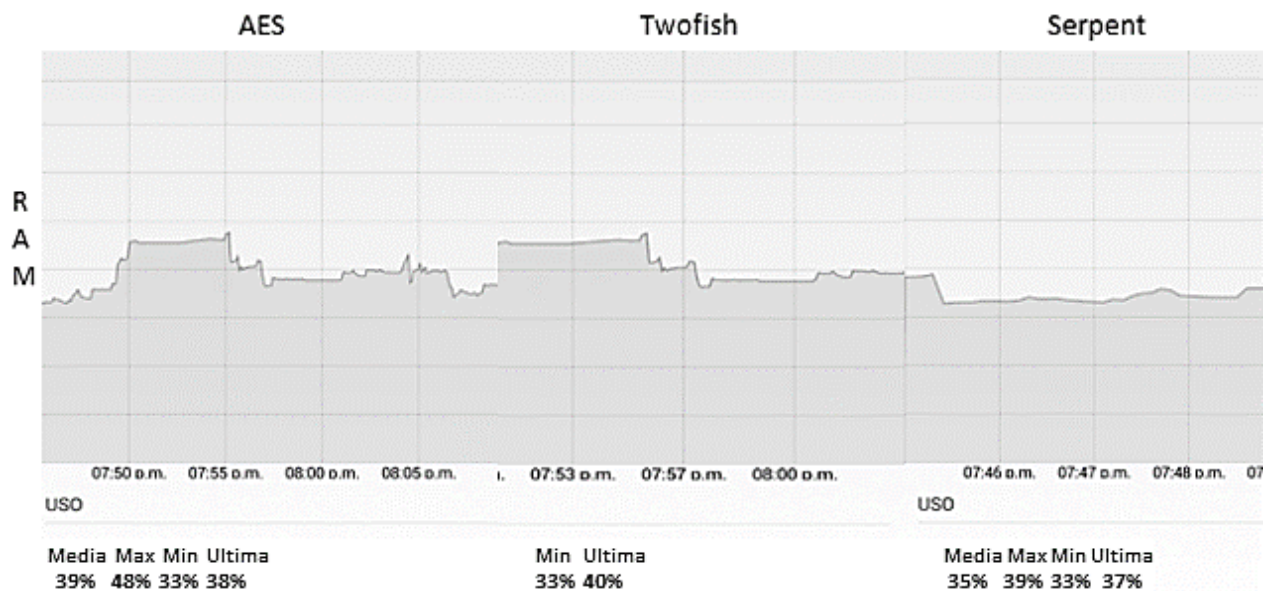


Figura 9. Uso de RAM en Smartphone
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, en la tablet se instaló la aplicación *TrueCrypt* en la que se ejecutaron pruebas de cifrado/descifrado, utilizando la misma longitud de clave, método y tipo de algoritmo utilizado en el teléfono inteligente, así como las posibles combinaciones entre pares, para un tamaño de búfer de 1GB que aísla el proceso de escritura en disco, ya que funciona en una unidad RAM. Los resultados obtenidos por el *software*, muestran en primer lugar de rendimiento (proceso cifrado/descifrado) al algoritmo AES. Twofish fue el segundo, mientras que Serpent fue el último en rendimiento. Los valores estadísticos de las medias aritméticas de la capacidad de procesamiento fueron respectivamente 518MB/s 80MB/s y 47.1MB/s (Figura10).

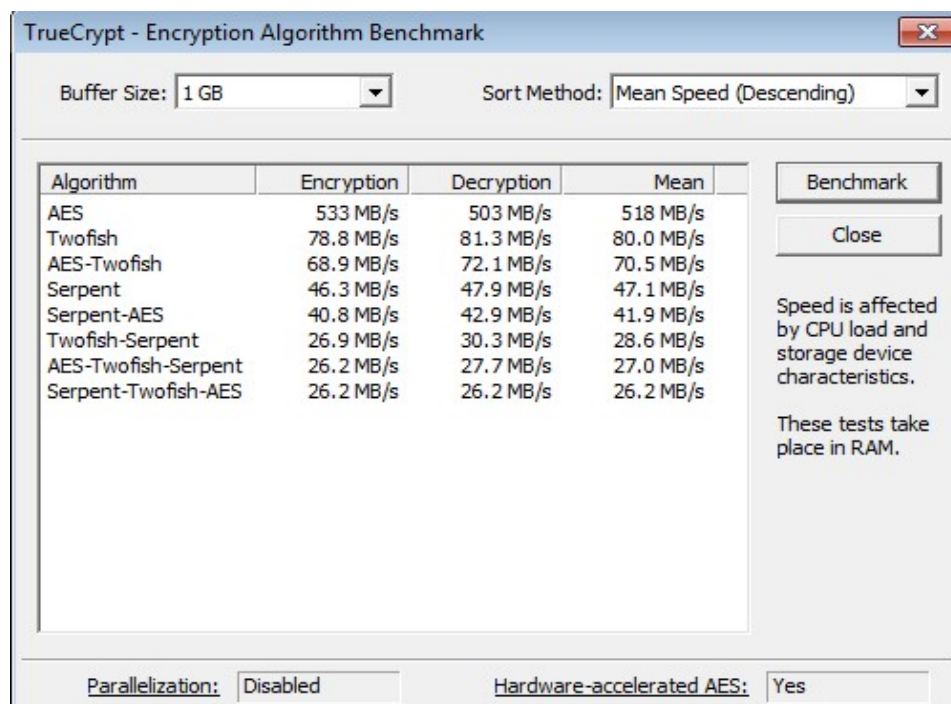


Figura 10. Benchmark en tablet [Mbps]
Fuente: elaboración propia.

En el segundo tipo de prueba, en la tablet, el rendimiento del procesador, el uso de la memoria y la escritura se miden y se muestran para cada algoritmo en el dominio del tiempo (Figura 11). Al ejecutar AES, el porcentaje de utilización del procesador es menor que al ejecutar Twofish y Serpent, aunque el consumo de memoria es menor cuando se ejecuta Twofish.

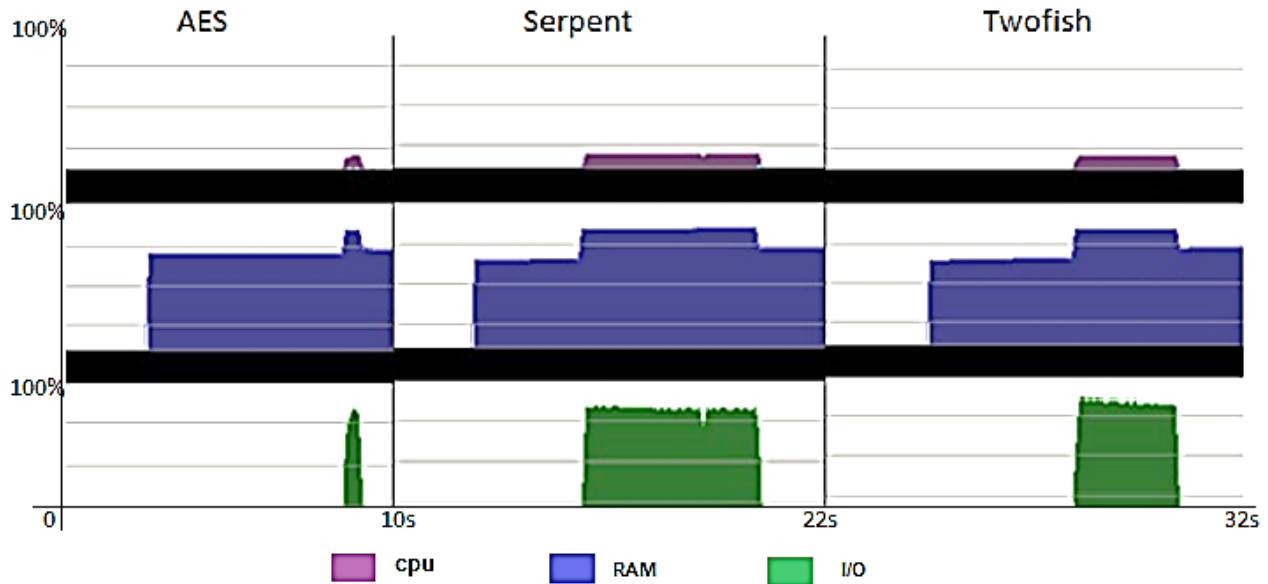


Figura 11. Rendimiento CPU-MEMORIA-I/O
Fuente: elaboración propia.

La velocidad de cada algoritmo para cifrar la información se obtuvo utilizando las mismas pruebas para cada uno.

4.2. Análisis de resultados

En la primera prueba, el *benchmark* en el teléfono inteligente muestra el algoritmo Twofish como el de mejor rendimiento en el consumo de recursos de la máquina, seguido por Rijndael y finalmente Serpent. La velocidad de procesamiento para cada uno fue de 942MB/s, 710MB/s y 673MB/s respectivamente. Entre tanto, en la prueba con la tablet, Rijndael fue el de mejor rendimiento con una amplia ventaja sobre los otros algoritmos (Figura 10). Este comportamiento corrobora la teoría que sugiere que el algoritmo Serpent es más robusto que AES, ya que funciona con más rondas en el proceso de cifrado/descifrado (32 sobre 10) (Anderson; Biham; Knudsen, 1998). Esta característica mejora la fuerza criptográfica del algoritmo, pero lo hace más lento y pesado para ejecutarse sobre dispositivos móviles. En cuanto a Twofish, tiene una estructura diferente (Fiestel), que no lo hace tan fuerte como AES y Serpent, pero se transforma en un algoritmo más responsivo, por tal motivo ejecuta más rápidamente el proceso de cifrado que el algoritmo Serpent.

Tabla 2.

Resumen de Resultados

	ALG/ VBLE	BENCHMARK [MB/s]	SPEED [MB/s]	CPU [%]	MEMORY [%]
SMARTPHONE	RIJNDAEL	710	433	33	39
	SERPENT	673	78	49	35
	TWOFISH	942	96	42	33
	RIJNDA EL	518	341	46	36
TABLET	SERPENT	47.1	42.7	50	47
	TWOFISH	80	70.6	54	39

Fuente: Elaboración propia.

En la segunda prueba con Smartphone, se cifró un archivo de 300 MB. Rijndael se desempeña mejor en términos de procesamiento, ejecutándose con casi un 10 % de utilización de CPU menos que Twofish y un 16 % menos que el algoritmo Serpent. En cuanto al consumo de memoria, el Twofish obtuvo menos consumo, un 33 %, Serpent 35 %, mientras que AES se vuelve más pesado con 39 %. En el caso de la prueba de tablet, Twofish no obtuvo tan buen resultado, un 54 % de uso de CPU, solo un poco más alto que Serpent con 50 % y Rijndael con 46 %. La prueba de la variable de memoria mostró que AES consumió menos memoria que Twofish y Serpent. En la Tabla 2 se presenta un resumen de todos los resultados y promedios.

Al hacer un análisis de estos resultados, se puede inferir que los mismos presentan relación con las características propias de cada equipo, es decir, que el poder de computación de estos dependen principalmente del funcionamiento de la CPU y de la RAM conjuntamente. No obstante, existen más elementos tanto de *hardware* como de *software* que influyen en alguna medida en los procesos internos que ejecutan estos dispositivos, por ejemplo, los procesos de cifrado. Tales características de los equipos son distintas, ya que estos son fabricados en general con ciertos fines específicos y, de esta manera, poder tomar las mejores decisiones a la hora de elegir cual equipo utilizar, según el propósito para el cual se adquieren. De igual forma, de acuerdo con el dispositivo que utilice hacer la mejor selección de los sistemas de cifrado para la protección de información, logrando los mejores resultados de rendimiento.

En conclusión, según la teoría, los tres algoritmos son muy seguros, pero según los valores obtenidos en las pruebas, el algoritmo AES se confirma como el de mejor rendimiento (tasa de cifrado [MB/s]), bajo uso de CPU y consumo de memoria para trabajar en tabletas, mientras que Twofish puede ser una opción adecuada para implementar en teléfonos inteligentes.

4.3. Función de consumo de recursos

El consumo de batería está directamente relacionado con el uso del procesador y la memoria. En función de estas variables, se propuso un indicador llamado *costo computacional* (mediante el cual se puede determinar cuál algoritmo de cifrado usa mayor cantidad recursos de máquina en cada dispositivo móvil. En la Ecuación 8, se describe el indicador de costo.

$$I_C = \tau * (0.6\alpha + 0.4\mu) + \frac{\omega\varphi}{\beta}, \quad \varphi > 0, \quad \beta > 0 \quad (8)$$

Donde:

I_C : Indicador de Costo del Algoritmo

τ : Promedio tiempo de ejecución

α : Promedio de la variable CPU

μ : Promedio de la variable RAM

ω : Número de rondas del algoritmo

φ : Longitud de clave

β : Tamaño del bloque a cifrar

Estas variables dependen, de una constante que dará un peso a cada una de ellas en el costo computacional. Las ponderaciones se definieron en 0,6 para la CPU y 0,4 para la RAM, de acuerdo con un análisis de varianza extraído del experimento.

Aplicando esta fórmula a los valores obtenidos del experimento, se obtuvieron los siguientes costos para cada algoritmo al ejecutarse en ambos dispositivos. El indicador es un valor sin unidades (adimensional), su función consiste en determinar el costo computacional (Figura 12, Figura 13).

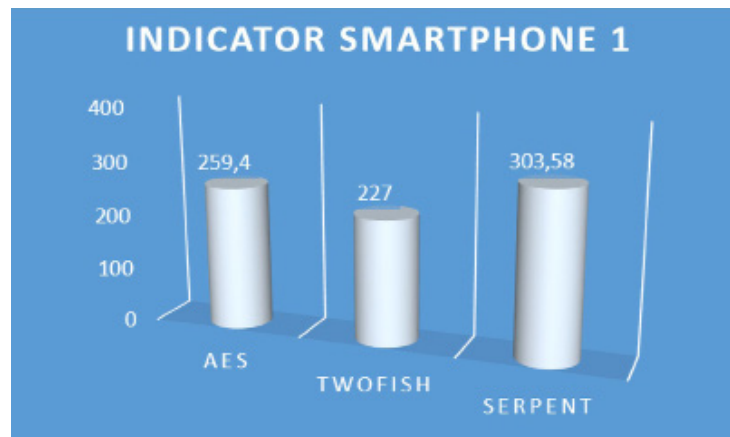


Figura 12. Costo computacional del Smartphone
Fuente: elaboración propia.

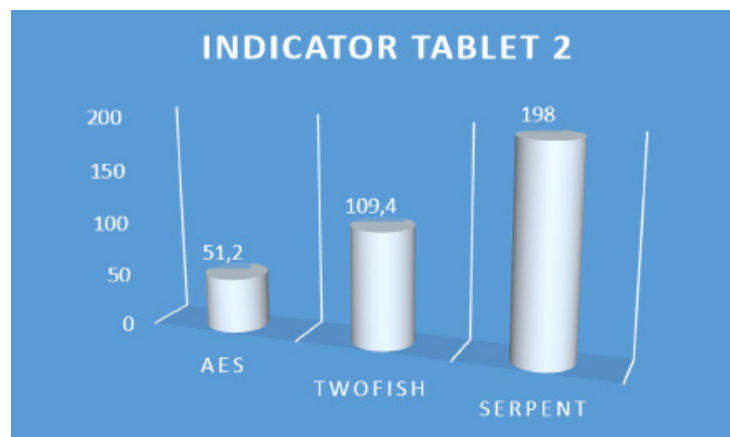


Figura 13. Costo computacional de la tablet
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 12, se muestra que en el teléfono inteligente el algoritmo Twofish tiene un costo computacional menor a los demás, mientras que en la Figura 13 se ven los resultados para la Tablet, donde AES tiene el costo computacional más bajo y Serpent tiene el costo computacional más alto, con relación a los resultados obtenidos.

5. Discusión

Teniendo en cuenta que en la actualidad existen diversos métodos de cifrado para proteger la información que se maneja en los diferentes dispositivos, es importante que se pueda implementar el mejor algoritmo en cuanto a rendimiento y gasto energético en cada caso. Esto cobra mayor relevancia en las nuevas tendencias, como lo es el internet de las cosas, donde se manejan equipos/actuadores con bajos recursos de máquina y que, por esta razón en muchas de sus implementaciones no utilizan métodos de cifrado como medida de seguridad en sus sistemas. Aunque los equipos analizados en este trabajo son dispositivos tipo *smartphone* y *tablet*, los resultados obtenidos en las pruebas y, particularmente la ecuación de indicador de costo computacional, pueden abrir un camino para analizar de manera similar el comportamiento de los tres algoritmos trabajados en dispositivos IoT.

6. Conclusiones

Con las pruebas ejecutadas fue posible realizar un “*benchmark*” para los algoritmos AES-Rijndael, Twofish y Serpent. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que AES-Rijndael es el algoritmo que requiere menos recursos de máquina cuando se lleva a cabo el proceso de cifrado/descifrado, mientras que el algoritmo Serpent utiliza más recursos que los otros dos. Sin embargo, el tiempo requerido para la ejecución del proceso en el teléfono inteligente es mayor cuando se usa AES-Rijndael.

Al incluir la variable de tiempo en los cálculos, se encontró que AES- Rijndael es el mejor algoritmo para ejecutarse en la *tablet* con un 50 % de los recursos que consumiría Twofish, esto es una relación de 2 a 1 en rendimiento. Por su parte, el algoritmo Twofish funciona mejor en el teléfono inteligente con un 87 % de lo que consumiría Serpent. Este último resultado es importante, debido a que Twofish se puede presentar como una alternativa muy confiable y segura para este tipo de teléfonos inteligentes y podría ser un fuerte contendor para el AES-Rijndael, que actualmente es el más utilizado.

Por su parte, la estructura y la cantidad de rondas que ejecuta el algoritmo Serpent, lo hacen seguro y fuerte. No obstante, por esta razón, se evidencia que este algoritmo presenta procesamiento lento en los equipos móviles evaluados, por lo que no sería adecuado su uso en dispositivos inteligentes. Adicionalmente, al requerir más recursos de máquina, aumenta el consumo de batería reduciendo la vida útil de la misma.

Por último, se desarrolló una ecuación para estimar el costo computacional. Este indicador permite determinar la cantidad de recursos de máquina que consume cada algoritmo al ejecutarse en un dispositivo móvil. La ecuación se elaboró en función del tiempo, CPU, RAM, ciclos del algoritmo, tamaños de la clave y bloques a cifrar. Esta ecuación permite la elección adecuada de los algoritmos de cifrado que a la vez es esencial para el uso efectivo de la criptografía en la seguridad.

Referencias

- Alomari, Mohammad; Samsudin, Khairulmizam (2011). A framework for GPU-accelerated AES-XTS encryption in mobile devices. *TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference* (pp.144-148). Bali, Indonesia.
[10.1109/TENCON.2011.6129080](https://doi.org/10.1109/TENCON.2011.6129080)
- Anderson, Ross; Biham, Eli; Knudsen, Lars (1998). Serpent: A New Block Cipher Proposal. In *International Conference on Fast Software Encryption* (pp 222–238). Springer, LNCS.
- Bandung, Yoanes; Priyatna, Andri (2017). Development of key exchange protocol to enhance security of voice over internet protocol on mobile phone. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 9(1), 173-184.
<http://dx.doi.org/itm.elogim.com/10.15676/ijeei.2017.9.1.12>
- Bian, Jiali; Lu, Bei; Kuang, Jian (2012). A new hierarchical file encryption system based on smartphone, Computer Science and Network Technology (ICCSNT). In *Proceedings of 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology* (pp. 943-946). Changchun, China.
[10.1109/ICCSNT.2012.6526082](https://doi.org/10.1109/ICCSNT.2012.6526082)
- Castro, Diego; Coral, William; Cabra, José; Colorado, Julián; Méndez, Diego; Trujillo, Luis (2017). Survey on IoT solutions applied to Healthcare. *DYNA*, 84(203), 192-200.
<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n203.64558>
- Dussán, Sergio; Vanegas, Oscar; Chavarro, Adrián; Molina, Johan (2016). Diseño e implementación de un prototipo electrónico para monitoreo de parámetros físico-químicos en cultivo de tilapia a través de una aplicación móvil. *Informador Técnico*, 80(1), 49-60.
<https://doi.org/10.23850/22565035.322>
- FIPS PUBS (2001). *Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)*. Recuperado de:
<https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/security/anyconnect-secure-mobility-client/fips.pdf>
- Karimi, Rohollah; Kalantari, Mohammad (2011). Enhancing security and confidentiality on mobile devices by location-based data encryption, Networks (ICON), 2011 17th IEEE International Conference on Networks (pp. 241-245). Singapore, Singapore.
[10.1109/ICON.2011.6168482](https://doi.org/10.1109/ICON.2011.6168482)
- Khan, Abdul; Kiah, M.; Khan, Samee; Madani, Sajjad; Khan, Atta (2013). A study of incremental cryptography for security schemes in mobile cloud computing environments. In *013 IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA)* (pp. 62-67). Kuching, Malaysia. 10.1109/ISWTA.2013.6688818
- Kupreev, Oleg; Sidorina, Tatyana; Chebyshev, Victor; Kuskov, Vladimir (2019). *Financial threats in H1 2019*. Recuperado de:
<https://securelist.com/financial-threats-in-h1-2019/91899/>.
- RSA Laboratories (2002). *PKCS #1 v2.1: RSA Cryptography Standard*. Recuperado de:
https://www.cryptrec.go.jp/en/cryptrec_03_spec_cypherlist_files/PDF/pkcs-1v2-12.pdf
- Qi, Na; Pan, Jing; Ding, Qun (2011). The Implementation of FPGA-based RSA Public-key Algorithm and its Application in Mobile-phone SMS Encryption System, In *2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control* (pp. 700-703). Beijing, China.
[10.1109/IMCCC.2011.178](https://doi.org/10.1109/IMCCC.2011.178)

- Ren, Yonglin; Boukerche, Azzedine; Nelem, Richard (2010). Performance Evaluation of a Hybrid Cryptosystem with Authentication for Wireless Ad hoc Networks, *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010* (pp. 6-10). Miami, FL, USA.
- Saberi, Iman; Shojaie, Bahareh; Salleh, Mazleena; Niknafskermani, Mahan; Morteza, Seyyed (2012). Improving confidentiality of AES-CCMP in IEEE 802.11i. In *2012 International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*. (pp. 82-86). Bangkok, Thailand.
[10.1109/JCSSE.2012.6261930](https://doi.org/10.1109/JCSSE.2012.6261930)
- Schneier, Bruce; Kelsey, John; Withing, Doug; Wagner, David; Hall, Chris; Ferguson, Niels (1998). *The Twofish Encryption Algorithm: A 128-Bit Block Cipher*. EE.UU.: Wiley.
- Shivkumar, S.; Umamaheswari, G. (2011). Performance Comparison of Advanced Encryption Standard (AES) and AES Key Dependent S-Box - Simulation Using MATLAB. In *2011 International Conference on Process Automation, Control and Computing*. (pp.1-6). Coimbatore, India.
- Tecnology Day revista IT Now (2013). *Tecnology Day*. Recuperado de:
<http://revistaitnow.com/2013/05/seguridad/aumentan-ataques-a-dispositivos-moviles/>
- Tovar, José; Díaz, Juan; Quiñones, Getssy; Pabón, Anabella; García, José (2018). Development of an information system for teleoperated physical rehab care service via Internet. Pilot case: patients with mild knee injury who live in geographically vulnerable zones. *DYNA*, 8(205), 284-293.
<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67961>.
- Uskov, Alexander (2012). Information Security of IPsec-based Mobile VPN: Authentication and Encryption Algorithms Performance. *2012 IEEE 11th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications* (pp.1042-1048). Liverpool, UK.
[10.1109/TrustCom.2012.187](https://doi.org/10.1109/TrustCom.2012.187)
- Umaparvathi, M.; Varughese, Dharmishtan (2010). Evaluation of symmetric encryption algorithms for MANETs. In *2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research* (pp.1-3). Coimbatore, India.
[10.1109/ICCIC.2010.5705754](https://doi.org/10.1109/ICCIC.2010.5705754)
- Zhang, Wen-Xiang; Xiao, Si-You; Zhang, Yi (2010). Research on Image-Text Encryption Techniques in Mobile Communications, *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems* (pp.115-118). Wuhan, China.
[10.1109/GCIS.2010.184](https://doi.org/10.1109/GCIS.2010.184)
- ISO/IEC (2005). ISO/IEC 27001: 2005 *Tecnología de la información - Técnicas de seguridad - Especificación para un sistema de gestión de seguridad de la información*. Ginebra, Suiza: ISO/IEC.

Caracterización de escoria de cobre secundaria y evaluación de su actividad puzolánica

Characterization of secondary copper slag and evaluation of its pozzolanic activity reaction

Yessica Díaz-Rosero¹
Luis González-Salcedo²
Jherson Díaz-Rosero³

¹ Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira (Colombia). Correo electrónico: ydiazr@unal.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7225-8604>

² Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira (Colombia). Correo electrónico: logonzalezsa@unal.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2460-6106>

³ Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: jhersondiaz@hotmail.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2885-9365>

Recibido: 07-04-2020 Aceptado: 17-09-2020

Cómo citar: Díaz-Rosero, Yessica; González-Salcedo, Luis; Díaz-Rosero, Jherson (2020). Caracterización de escoria de cobre secundaria y evaluación de su actividad puzolánica. *Informador Técnico*, 84(2), 192 - 201.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2696>

Resumen

El presente estudio se centró en la caracterización de una escoria de cobre secundaria (ECS) generada por una empresa ubicada en la región del Valle del Cauca, Colombia, para su posible uso como adición en el proceso de producción de cemento. Se realizó un análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP), caracterización química (FRX), caracterización mineralógica (DRX) y, finalmente, se evaluó la actividad puzolánica de la escoria de cobre secundaria fina (ECF) utilizando el método establecido en la norma ASTM C 311, por medio del índice de actividad por resistencia (IAR). Se encontró que la ECF cumple con las condiciones químicas para clasificarse como puzolana y con las condiciones de resistencia, de acuerdo a las normas ASTM C618 y ASTM C311, respectivamente, con un IAR de 67,37 % a 7 días y 78,56 % a 28 días. Se encontró también, que los principales componentes mineralógicos de la ECF son leucita y piroxeno, y que el porcentaje de fase vítrea de la escoria es 45,8 %, con estos resultados se hace posible la utilización de este residuo en procesos de fabricación de materiales cementantes.

Palabras clave: puzolana, residuo industrial, aprovechamiento de residuos, morteros de matriz cementicia, índice de actividad por resistencia.

Abstract

This study focuses on the characterization of a secondary copper slag (ECS) generated by a company located in the Valle del Cauca region, Colombia, for possible use as an addition to the cement production process. A particle size distribution (DTP), chemical characterization (FRX), mineralogical characterization (DRX) analysis is performed, and finally, the pozzolanic activity of fine secondary copper slag (ECF) is evaluated using the method set out in ASTM C 311 using the Resistance Activity Index (IAR). ECF was found to meet the chemical conditions to be classified as pozzolanic and resistance conditions according to ASTM C618 and ASTM C311 standards respectively, with an IAR of 67.37 % to 7 days and 78.56 % to 28 days. It was also found that the main mineralogical components of are leucite and pyroxene, and that the vitreous phase percentage of the slag is 45.8 %, with these results making it possible to use this waste in cementing materials manufacturing processes.

Keywords: pozzolanic, industrial waste, waste management, cementitious matrix mortars, resistance activity index.

1. Introducción

Una de las grandes preocupaciones a nivel mundial es la problemática del crecimiento en la producción de residuos, su tratamiento y disposición final, principalmente, los residuos industriales, a raíz de esto, se vienen generando a través de los años investigaciones que aportan estrategias para el tratamiento o aprovechamiento de diferentes residuos. Uno de los residuos industriales es la escoria de cobre, existen dos tipos: escoria de cobre primaria (EC), producida en la extracción de cobre desde el mineral, y la escoria de cobre secundaria, la cual es generada en el aprovechamiento de la EC y/o de la fundición de chatarra de cobre. Se estima una producción anual mundial de EC de 40 millones de toneladas (International Copper Study Group [ICSG], 2015), siendo los países de mayor relevancia: China, Japón, Chile, Rusia, India, Corea, Polonia, Zambia, Estados Unidos y Alemania. Para el 2011. Según estudios realizados, por cada tonelada de cobre producido se generan 2,2 toneladas de escoria (Nazer; Pavez; Rojas; Aguilar, 2010). Los altos valores generados crean la necesidad de realizar un aprovechamiento o valorización a nivel mundial.

Las escorias de cobre primarias se componen, principalmente, en un 30 % a 40 % por óxidos de cobre (CuO , Cu_2O), que se producen por la oxidación durante el proceso piro-metalúrgico; seguido de óxidos de silicio (SiO_2) que están en un 35 % y óxidos de aluminio (Al_2O_3) que pueden llegar hasta 10 %, al igual que los óxidos de calcio (CaO). También se caracteriza por su alto contenido de hierro, donde los principales componentes son la fayalita y la magnetita, además de encontrar óxidos de calcio, aluminio (CaAl_2O_4), silicato de zinc (Zn_2SiO_4) y óxidos de cobre hierro (CuFe_2O_4) (Carrasco, 2017). Por otra parte, las escorias de cobre secundarias contienen, principalmente, FeO y SiO_2 y en menor cantidad componentes, como óxidos de calcio y óxidos de cobre (Wang *et al.*, 2015).

Mineralógicamente, estas escorias (ECS) están constituidas tanto por fases vítreas como cristalinas y se producen a partir de los 1600 °C, al ser líquidas, su estructura amorfa-cristalina dependerá de la velocidad de enfriamiento. Si es rápido, la estructura queda colapsada y es mayoritariamente amorfa y sus propiedades serán las de un material altamente reactivo. En cambio, si el enfriamiento es lento, se tiene menor cantidad de estructura amorfa o vítrea, predominando estructuras cristalinas que impiden la formación de nuevos enlaces (Oyarzún, 2013).

El aprovechamiento de la escoria de cobre en materiales de construcción se ha venido estudiando desde el siglo XX, principalmente de las EC. Tixier, Devaguptapu y Mobasher (1997) estudiaron la viabilidad de esta como cementante sustituto (adición), encontrando que aporta resistencia a la compresión y a la densidad. Estudios más recientes se han enfocado en la utilización de EC como un material que reemplace en forma parcial al cemento Portland (adición). Los resultados que se han informado ratifican que algunas escorias de cobre tienen propiedades cementicias y pueden considerarse materiales cementantes alternativos (Rojas, 2004; Behnood; Meyer; Behnood, 2008; Sharma; Khan, 2017). Dado que en el proceso de fabricación de cemento se introduce como sustituto parcial en el proceso de molienda que incorpora minerales, como sílice y hematita, cuenta con beneficios, como alta resistencia, disminución del consumo de agua, del poder calorífico y, por ende, disminución en los costos de producción, lo que permite contribuir con procesos más sostenibles con el ambiente (Orizola, 2006).

Por otro lado, se ha estudiado la EC como material cementante alternativo en concretos de ultra alta resistencia (UHSC), encontrando que se puede sustituir un 5 % en el material cementante aportando a las reacciones de endurecimiento (Edwin; Gruyaert; De Belie, 2017). Otro estudio demuestra la viabilidad como material cementante reemplazando hasta un 30 % (Mirhosseini; Fadaee; Tabatabaei; Fadaee, 2017). En un estudio más reciente se encontró que la activación alcalina de escoria de cobre junto al metacaolín y ceniza volante se obtienen resultados favorables respecto a la resistencia a compresión (Singh; Singh, 2019).

De este modo, se evidencia que existen pocas investigaciones acerca de la escoria de cobre secundaria, de ahí la motivación para el desarrollo del presente estudio, en el cual se pretende caracterizar física, química y mineralógicamente la escoria de cobre secundaria fina (ECF) resultante de la fundición de chatarra de cobre de una empresa del Valle del Cauca (Colombia), y analizar su posible uso como adición en la molienda de cemento (como puzolana), evaluando el índice de actividad por resistencia (IAR), y los requerimientos químicos y físicos para clasificarla como puzolana con base en las normas técnicas americanas ASTM C311 y ASTM C618.

2. Metodología

En la presente investigación se tomó como población una muestra de escoria de cobre secundaria (ECS) producida por BRONALCO LTDA, empresa de fundición de metales no ferrosos ubicada en la región del Valle del Cauca (Colombia), efectuando un muestreo no probabilístico intencional. Para el material de comparación se utilizó un cemento tipo HE, de acuerdo a la norma ASTM C1157. En la Figura 1 se presenta la fotografía de la escoria de cobre secundaria (ECS) y en la Figura 2, el esquema del procedimiento metodológico implementado.



Figura 1. Fotografía de escoria de cobre secundaria
Fuente: elaboración propia.

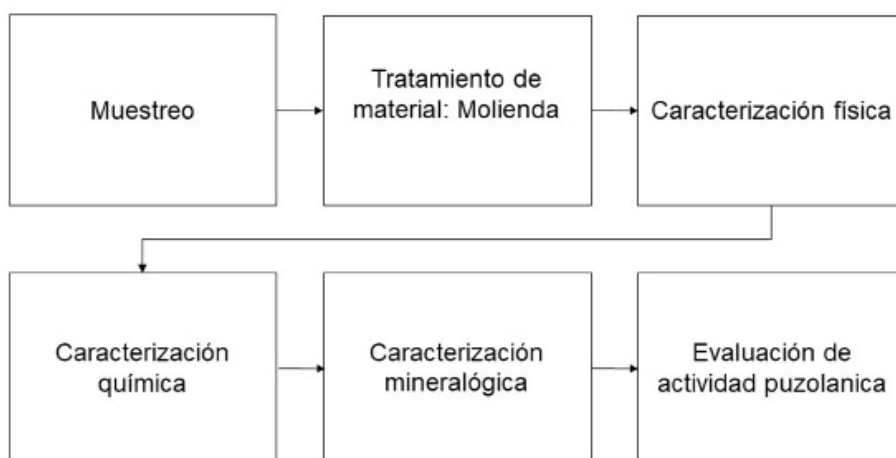


Figura 2. Esquema de la metodología desarrollada
Fuente: elaboración propia.

2.1. Molienda

El proceso de disminución de tamaño de partícula se realizó por medio de una molienda, en un molino de bolas, durante un tiempo de 2 horas. La fracción utilizada en los estudios químicos y mineralógicos se tomó de la muestra única general por el método de cuarteo. Después de este proceso, se obtuvo la escoria molida, la cual se denominó “escoria de cobre secundaria fina (ECF)”.

2.2. Caracterización física

Las caracterizaciones físicas realizadas a la escoria de cobre secundaria (ECF) y del cemento tipo HE, fueron la distribución de tamaño de partícula (DTP) tomadas por un equipo mastersizer 2000, y la densidad, a través de un picnómetro de Gay-Lussac para sólidos. Este proceso se realizó por vía líquido utilizando kerosene como disolvente.

2.3. Caracterización química

Para encontrar la composición química ECF y del cemento tipo HE, se realizó la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX), utilizando un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X secuencial por longitud de onda dispersiva (WDXRF) marca PANalytical modelo AXIOS mAX, software SuperQ versión 5.0L – Estándares de la base de datos OMNIAN, para análisis semicuantitativo y la detección de elementos desde el Sodio (Na) hasta el Uranio (U).

2.4. Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica de los materiales en estudio se llevó a cabo en un difractómetro de rayos X, utilizando un software PANalytical X’Pert Pro para determinar las fases cristalinas, la fase amorfa de la ECF se calculó con el método DOC (degree of crystallinity) (Kern; Madsen; Scarlett, 2012).

2.5. Evaluación de actividad puzolánica

Para la evaluación de la ECF como puzolana, se realizó un análisis a partir del método establecido en la norma ASTM C311, por medio del índice de actividad por resistencia (IAR), donde se sustituye el 20 % en peso del cemento por el residuo en estudio y la ASTM C618, donde se establecen requerimientos químicos y físicos para clasificar la ECF como puzolana. Para realizar las mezclas de mortero, se utilizó agregado fino natural de la región.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización

En la Figura 3 (izquierda) se observa la distribución de tamaño de partícula de la ECF y el cemento HE, DTP de la ECF, muestra que se tiene una gran fracción de las partículas con tamaño mayor al del cemento. Se puede observar en la gráfica derecha la curva del % pasante evidenciando que el D50 del cemento es de 7 μ m mientras que el de la ECF es de 13 μ m.

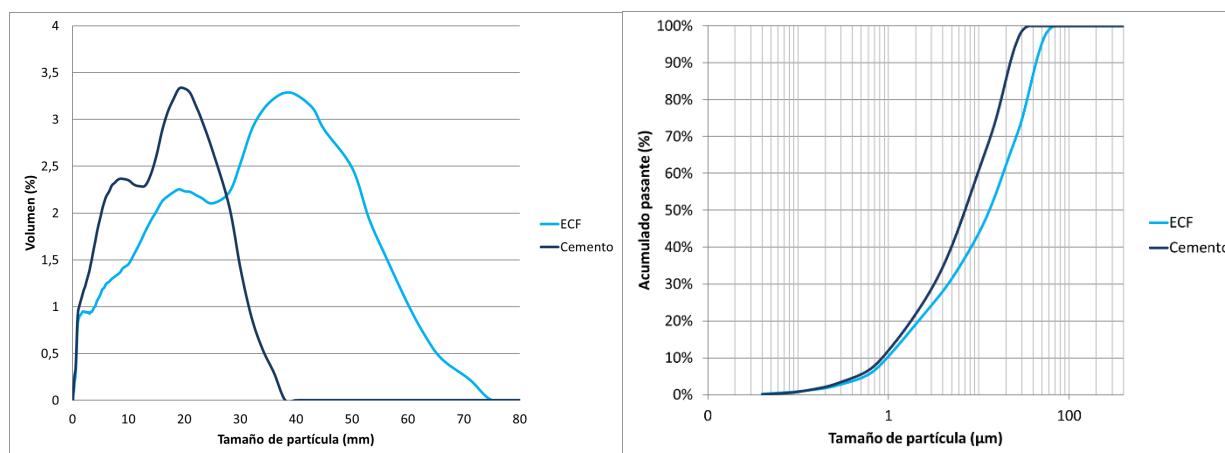


Figura 3. Distribución de tamaño de partícula (DTP) de la ECF del cemento (izquierda). Porcentaje (%) acumulado pasante ECF y cemento (derecha)
Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 1 se presenta la composición química del cemento y de la ECF, donde se observa que la escoria estudiada está compuesta, principalmente, por óxidos de SiO_2 - Al_2O_3 - CaO - CuO - Fe_2O_3 . Lo anterior concuerda con un estudio realizado a una escoria de cobre secundaria en donde los componentes mayoritarios fueron SiO_2 - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - CuO a excepción de CaO (Francois; Gazeli; Couris; Angelopoulos; Blanpain; Malfliet, 2020). En comparación con las escorias primarias, estas se encuentran compuestas, mayoritariamente, por sílice (Rozendaal; Horn, 2013; Potysz; Kierczak; Pietranik; Kadziolka, 2018). En algunos casos, presentan mayoritariamente contenidos de hierro (Gorai; Premchand, 2003), también se puede dar el caso de composiciones cercanas (Yan *et al.*, 2019), esto puede variar de acuerdo al proceso de obtención, temperatura de enfriamiento y procedencias geológicas del material fundido. Las densidades calculadas para el cemento y para la ECF muestran valores similares entre sí. Según la norma ASTM C618, la ECF se puede clasificar como una puzolana "Clase N", debido a que los óxidos de silicio, aluminio y hierro suman alrededor del 70 % de todo el material.

Tabla 1.
Composición química y características físicas del cemento y la ECF

Composición química (% en peso)		
Compuesto	Cemento	ECF
SiO_2	36,52	54,161
Al_2O_3	3,74	10,816
Fe_2O_3	3,050	4,860
MgO	1,380	0,753
CaO	46,31	10,654
Na_2O	0,238	2,707
K_2O	0,191	0,369
P_2O_5	0,133	0,209
SO_3	2,380	0,664
CuO		3,926
Cr_2O_3	0,013	
ZnO		9,104
PbO		1,093
SrO	0,147	
otros	0,372	0,684
LOI	5,520	1,810

Propiedades físicas

Densidad (g/cm ³)	3,116	3,051
Partículas <45 µm	100 %	91,8 %

Fuente: elaboración propia.

Mineralógicamente se diferencian en las fases presentadas en las Figuras 3 y 4, se observa que el cemento estudiado muestra compuestos principales, como silicatos tricálcicos, silicatos bicálcicos, calcita, y yeso. La escoria analizada está compuesta, principalmente, por minerales, como leucita (aluminio silicato potásico) y piroxeno (silicato-ferro magnésico). Se encontró que la ECF tiene un porcentaje de fase amorfa de 45,8 %, lo que indica que posee un importante porcentaje reactivo, siendo un material con un potencial considerable para usarse como adición en la fabricación de cemento.

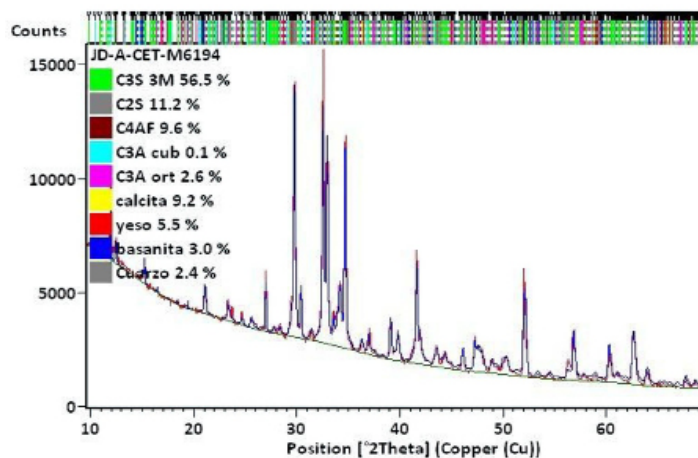


Figura 3. DRX del cemento
Fuente: elaboración propia.

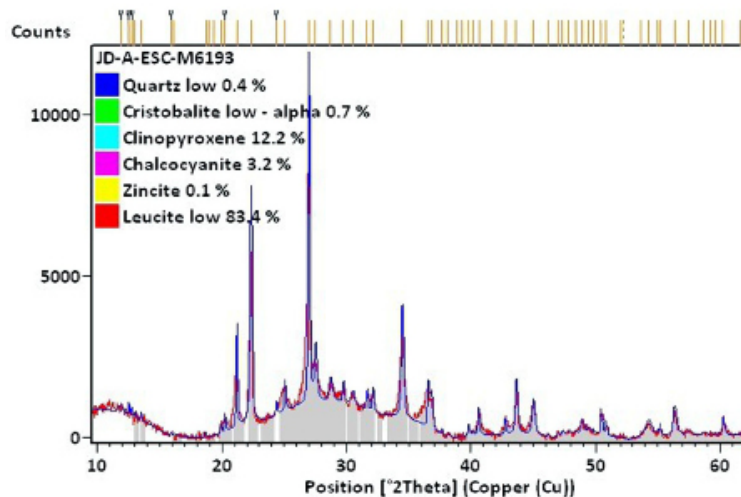


Figura 4. DRX de la escoria de cobre secundaria fina (ECF)
Fuente: elaboración propia.

3.2. Evaluación de actividad puzolánica

En la Figura 5, se presenta el índice de actividad por resistencia (IAR) y la resistencia de los morteros ensayados a 7 y 28 días de curado, de acuerdo con la norma ASTM C311, donde se observa que los morteros con ECF ensayados a los 7 días de curado presentan un 67,37 % de resistencia frente al mortero patrón; mientras que, a los 28 días de curado, los morteros ensayados cumplen con el requerimiento mínimo de resistencia del 75 %. La baja reactividad de la ECF a la edad de 7 días se atribuye al contenido de metales pesados en la ECF que retrasa el proceso de hidratación en el cemento (Zain; Islam; Radin; Yap, 2004), sin embargo, a los 28 días se obtuvo una reactividad mayor de la ECF, cumpliendo con lo requerido con la norma en mención (IAR ≥ 75 %).

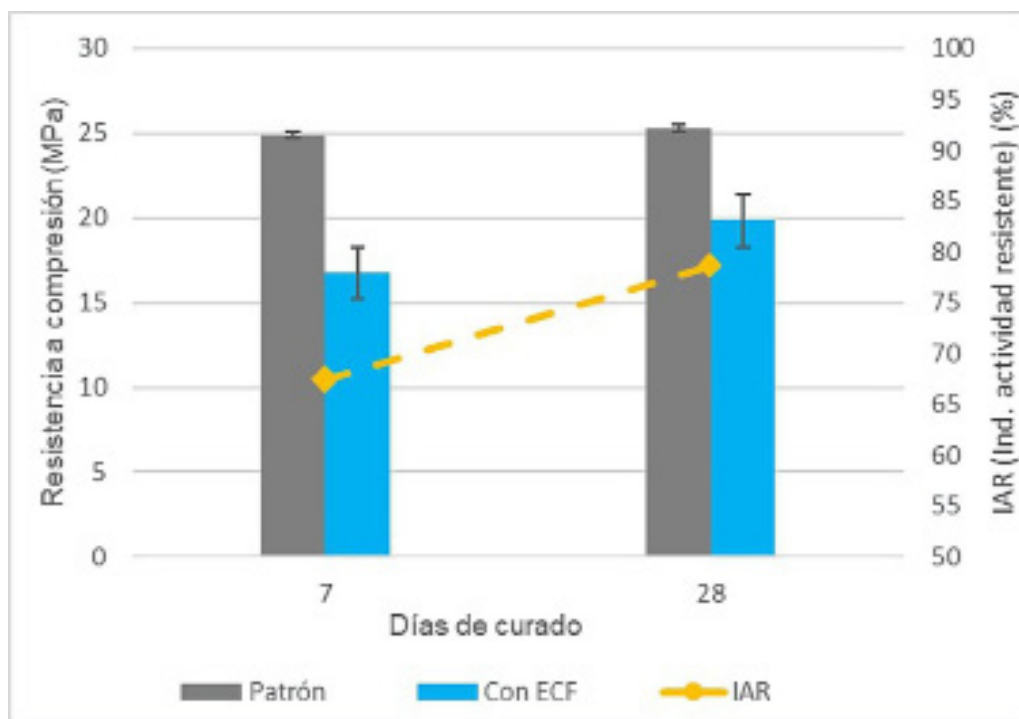


Figura 5. Resistencia a compresión de morteros ensayados, de acuerdo a la norma ASTM C311
Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se muestran los comparativos de los requerimientos físicos y químicos de la ECF estudiada. Además, se observa que los requerimientos químicos cumplen como los requisitos máximos de SO_3 (%), contenido de humedad y pérdida por ignición. La suma de los óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) se encuentra muy cercana al mínimo que pide la norma ASTM C618. Esto indica que la ECF presenta potencial para ser utilizada como adición puzolánica, de acuerdo con su composición química y su comportamiento mecánico conforme a las evaluaciones realizadas por otros autores que estudian esta propiedad en diferentes residuos (Silva; Gordillo; Delvasto, 2017). Por su parte, Edwin, De Schepper, Gruyaert, De Belie (2016) estudiaron escorias de cobre secundarias con procesos de enfriado rápido y lento, encontrando que las escorias con enfriado lento cumplieron con el IAR mientras que las de enfriado rápido no.

Tabla 2.

Propiedades químicas y físicas de la ECF, de acuerdo con la norma ASTM C618

Requerimientos	Puzolana, ASTM C618	ECF
Requerimientos químicos		
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	Min, 70,0	69,84
Trióxido de azufre, SO ₃ (%)	Max, 4,0	0,66
Contenido de humedad (%)	Max, 3,0	0,0
Pérdida por ignición (%)	Max, 10,0	1,81
Requerimientos físicos		
Índice de actividad de resistencia a los 7 días	Min, 75	67,37
Índice de actividad de resistencia a los 28 días	Min, 75	78,56

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

De acuerdo al análisis de los requerimientos físicos y químicos de la ECF como puzolana tipo N, de acuerdo con la norma ASTM C618, esta cumple con la mayoría de los requerimientos, aunque se encuentra muy cercano al límite mínimo sugerido por la norma de composición de óxidos de sílice, alúmina y hierro. La ECF cumplió con el IAR a 28 días, sin embargo, presentó una actividad puzolánica baja a edad temprana. Se concluye que el material es apto para usarse como adición activa en la industria cementera, resaltando que la finura de la ECF se encuentre por encima de la del cemento, y que es posible potencializar el efecto químico de esta al hacer una molienda conjunta a nivel industrial (Clinker- ECF-otros). Además, se recomienda adicionar la ECF en proporciones menores a la evaluada en el IAR, ya que esta medida es solamente para determinar la actividad química.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a Tecnoparque Nodo Cali, SENA Centro de la Construcción Regional Valle y la empresa BRONALCO LTDA por su aporte en el desarrollo de la investigación.

Referencias

- ASTM International (2017). Standard Specification for coal fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618-17). West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2017). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete (ASTM C311-17). West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2008). Historical Standard: Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico (ASTM C1157-08). West Conshohocken, PA.
- Carrasco, Pedro (2017). *Propuesta de reciclaje de la escoria de cobre de la fundición ventanas de CODELCO, para mitigar el impacto ambiental* (tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Edwin, Romy; Gruyaert, Elke; De Belie Nele (2017). Influence of intensive vacuum mixing and heat treatment on compressive strength and microstructure of reactive powder concrete incorporating secondary

- copper slag as supplementary cementitious material. *Construction and building materials*, 155, 400-412.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.036>
- Feng, Yan; Yang, Qixing; Chen, Qiusong; Kero, Jakob; Andersson, Anton; Ahmed, Hesham; Engstrom, Fredrik; Samuelsson, Caisa (2019). Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of granulated copper slag modified with CaO. *Journal of cleaner production*, 232, 1112-1120.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.062>
- Francois, Eliese; Gazeli, Odhisea; Couris, Stelios; Angelopoulos, George; Blanpain, Bart; Malfliet, Annelies (2020). Laser-induced breakdown spectroscopy analysis of the free Surface of liquid secondary copper slag. *Spectrochimica Acta Part B. Atomic Spectroscopy*, 170, 105921.
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105921>
- Gorai, Bipra; Premchand, Jana (2003). Characteristics and utilization of copper slag- a review. *Resources Conservation and Recycling*. 39, 299-313.
[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00171-4)
- International Copper Study Group (2015). *The World Copper Factbook 2015*. Lisbon, Portugal: International Copper Study Group.
- Kern, Arnt; Madsen, Ian; Scarlett, Nicola (2012). *Quantifying amorphous phases*. En: Kolb, U.; Shankland, K.; Meshi, L.; Avilov, A.; David, W. (Eds.), *Uniting Electron Crystallography and Powder Diffraction* (pp. 219-232). Erice, Italy: Springer.
- Mirhosseini, Seyed; Fadaee, Mostafa; Tabatabaei, Ramin; Fadaee, Mohammad (2017). Mechanical properties of concrete with Sarcheshmeh mineral complex copper slag as a part of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 134, 44-49.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.024>
- Nazer, Amin; Pavez Osvaldo; Rojas, F; Aguilar C. (2010). Una revisión de los usos de las escorias de cobre. En: *Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales*. Viña del Mar, Chile. (pp. 2-5). 10.13140/2.1.3740.0328
- Orizola, Sebastián. (2006). *Uso de escoria de cobre en cementos* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Oyarzún, Iván (2013) *"Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón"* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Potysz, Anna; Kierczak, Jakub; Pietranik, Anna; Kadziolka, Katarzyna (2018). Mineralogical, geochemical, and leaching study of historical Cu-slugs issued from processing of the Zechstein formation (Old Copper Basin, southwestern Poland). *Applied Geochemistry*, 98, 22-35.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.08.027>
- Rojas, F. (2004). *Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción* (tesis de pregrado). Universidad de Atacama, Chile.
- Edwin, Romy; De Schepper, Mieke; Gruyaert, Elke; De Belie, Nele (2016). Effect of secondary copper slag as cementitious material in ultra-high performance mortar. *Construction and building materials*, 119, 31-44.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.007>
- Rozendaal, Abraham; Horn, Richard (2013). Textural, mineralogical and chemical characteristics of copper reverb furnace smelter slag of the Okiep Copper District, South Africa. *Minerals Engineering*, 52, 184-190.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.06.020>

- Sharma, Rahul; Khan, Rizwan (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 151, 179–192.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.031>
- Shi, Caijun; Meyer, Christian; Behnood, Ali (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1115-1120.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008>
- Silva, Yimmy; Gordillo, Marisol; Delvasto, Silvio (2017). Influencia del residuo de mampostería (RM) como material cementicio suplementario en la elaboración de morteros. *Informador Técnico*, 81(1), 44-54.
<https://doi.org/10.23850/22565035.719>
- Singh, Jagmeet; Singh, Surinder (2019). Development of Alkali-activated Cementitious Material using Copper Slag. *Construction and Building Materials*, 211, 73–79.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.233>
- Tixier, Raphaë; Devaguptapu, R; Mobasher, Barzin (1997). *The effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures*. *Cement and Concrete Research*, 27(10), 1569-1580.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00166-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00166-X)
- Wang, X; Geysen D; Padilla, Silvia; D'Hoker, N; Van Gerven, T; Blanpain, B (2015). Characterization of copper slag in view of metal recovery, *Miner Process. Ext. Metall.* 124 (2) 83–87.
<https://doi.org/10.1179/1743285515Y.0000000004>
- Zain, Muhammad; Islam, M; Radin, Salihuddin; Yap, S. (2004). Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 845-851.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.08.002>

Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)

Chemical stabilization of soils - conventional and alkali-activated materials (review)

Jhonathan F. Rivera¹
Ana Aguirre-Guerrero²
Ruby Mejía de Gutiérrez³
Armando Orobio⁴

¹Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: jhonathan.rivera@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0395-1517>

²Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: ana.aguirre@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9986-6557>

³Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: ruby.mejia@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5404-2738>

⁴Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: armando.orobio@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7166-3061>

Recibido: 18-11-2019 Aceptado: 31-05-2020

Cómo citar: Rivera, Jhonathan; Aguirre-Guerrero, Ana; Mejía de Gutiérrez, Ruby; Orobio, Armando (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (review). *Informador Técnico*, 84(2), 202-226.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2530>

Resumen

El creciente interés por el desarrollo de alternativas frente al uso masivo de cementantes tradicionales en aplicaciones geotécnicas, tales como cemento y cal, se debe en gran medida a los retos ambientales y costos asociados en este tipo de aplicaciones. Los cementantes activados alcalinamente surgen como una de las alternativas de mayor sostenibilidad, particularmente por su bajo consumo energético y en teoría la baja huella de carbono en su fabricación; además, tienen la posibilidad de utilizar residuos y subproductos industriales como materiales precursores en su fabricación. Este artículo presenta un estado del arte de los diversos materiales empleados convencionalmente en la estabilización química de suelos y realiza una revisión de los artículos publicados en relación con la implementación de cementantes activados alcalinamente, su viabilidad técnica, los impactos ambientales asociados y los retos que se deben superar para lograr posicionarlos como una alternativa sostenible para procesos geotécnicos.

Palabras clave: estabilización de suelos; materiales activados alcalinamente; geopolímeros; cemento; residuos industriales.

Abstract

The growing interest in the development of alternatives to the use of traditional binders in geotechnical applications, such as cement and lime, is largely due to the environmental challenges and associated costs in this type of applications. Alkali-activated binders emerge as one of the most sustainable alternatives, particularly because of their low energy consumption and in theory the low carbon footprint in their manufacture. In addition, this type of binders have the possibility of using industrial waste and by-products as precursor materials in

their production process. This article presents a state of the art of the various materials conventionally used in the chemical stabilization of soils and performs a review of published articles in relation to the implementation of alkali-activated binders. The technical feasibility, the environmental impacts associated, the challenges that must be overcome in order to position them as a sustainable alternative for geotechnical processes, and the advantages and disadvantages of its application are considered.

Keywords: soil stabilization; alkali-activated materials; geopolymers; cement; industrial wastes.

1. Introducción

La definición de “suelo” puede interpretarse de diferentes maneras de acuerdo con los intereses o aplicaciones. Para la ingeniería, el suelo es un sustrato terroso o depósito de partículas minerales no consolidado, un sistema que está formado por múltiples fases: sólida, líquida y gaseosa, sobre el cual se realizan diversas obras de ingeniería (Nortcliff *et al.*, 2012). El suelo se considera como el material de construcción más antiguo, complejo y utilizado por los ingenieros, siendo las propiedades fisicoquímicas y mecánicas, tales como la compresibilidad, resistencia, permeabilidad, estabilidad volumétrica y durabilidad, de gran importancia en la ingeniería, ya que prácticamente todas las estructuras civiles están cimentadas sobre la superficie de la tierra o dentro de ella. Además, el suelo, no solo es un elemento de soporte de las construcciones civiles, sino que provee innumerable materia prima para la fabricación de elementos de mampostería y la construcción de estructuras.

El suelo, como elemento portante, juega un papel determinante en las cimentaciones, de sus propiedades depende en gran medida la estabilidad de las estructuras. Las cargas se transmiten a través de la cimentación, esto hace que se generen tensiones y deformaciones, las cuales dependerán de la magnitud de la carga aplicada y de las propiedades del terreno de soporte. Bajo estas condiciones de tensión, la integridad del suelo de soporte se ve afectada principalmente por: la acción no anticipada del agua (Liu *et al.*, 2011), heladas (Jing *et al.*, 2019) y asentamientos excesivos no previstos, entre otros. La pérdida de resistencia del suelo de soporte conlleva daños severos en las estructuras. Solo en los Estados Unidos los costos de los daños producidos a las estructuras por suelos expansivos alcanzan la cifra de 1 billón de dólares al año; en el Reino Unido unos 150 millones de libras esterlinas al año y, en general, ascienden a miles de millones alrededor del mundo (Firoozi; Guney Olgun; Firoozi; Baghini, 2017; Puppala; Pedarla, 2017; Zhao; Ge; Petry; Sun, 2014). En muchos de los proyectos de ingeniería de obras civiles, el suelo nativo no cumple con los requisitos de diseño y por lo tanto es necesario realizar procesos de modificación, estabilización o sustitución para proporcionar a la obra un material de construcción mejorado.

Con la estabilización de suelos se puede incrementar la capacidad de soporte del suelo nativo, mejorar la resistencia al corte, aumentar la resistencia al ablandamiento por acción del agua, proporcionar estabilidad volumétrica ya que se minimiza la permeabilidad del agua, disminuir la plasticidad y aumentar el peso unitario de los suelos tratados (Hall; Najim; Keikhaei, 2012). Los procesos de estabilización de suelos más simples que se han implementado son la compactación y el drenaje de suelos; sin embargo, estas dos técnicas en algunos casos no son suficientes para lograr una buena estabilización de los terrenos, por lo que se recurre a la mejora de la gradación del tamaño de las partículas del suelo, siendo uno de los procesos de estabilización de suelos más utilizados, y se puede lograr agregando aglutinantes (Makusa, 2013). La aplicación de aglutinantes se conoce como estabilización química de suelos, esta metodología utiliza materiales cementantes universales como el cemento Portland y la Cal, aunque también en aplicaciones específicas se han implementado sales como el cloruro de sodio (NaCl) o impermeabilizantes como los productos asfálticos (Hall *et al.*, 2012).

Siendo el cemento Portland uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción en diferentes aplicaciones, entre estas como se mencionó anteriormente, la estabilización de suelos. Debido a que la producción de este ha sido íntimamente relacionada con el calentamiento global asociado a las altas temperaturas utilizadas en el proceso de producción, el excesivo consumo energético y de recursos naturales

(Damtoft *et al.*, 2008), se han desarrollado materiales alternativos que puedan reducir la huella de carbono y además conservar las propiedades aglutinantes del cemento Portland. De ahí, han surgido los materiales activados alcalinamente o también llamados geopolímeros, los cuales se producen por la interacción química de un material tipo aluminosilicato con una solución alcalina activante (Provis; Bernal, 2014; Shi; Fernández-Jiménez; Palomo, 2011). Los principales materiales utilizados como fuente de aluminosilicatos son cenizas volantes, escorias siderúrgicas y metacaolín. En estudios recientes se han utilizado otros materiales como desechos de demolición, residuos de ladrillo y residuos de vidrios, entre otros (Rivera; Cuarán-Cuarán; Vanegas-Bonilla; Mejía de Gutiérrez, 2018; Robayo-Salazar; Rivera; Mejía de Gutiérrez, 2017; Robayo; Mulford; Munera; Mejía de Gutiérrez, 2016). A diferencia del cemento portland, la producción de materiales activados alcalinamente no consume grandes cantidades de energía, ya que se realiza a temperaturas bajas, ofreciendo una alternativa más ecológica. Desde 1930, la comunidad científica ha incrementado su interés en estudiar las propiedades de este tipo de materiales encontrando que presentan generalmente altos desempeños mecánicos, elevada resistencia a ataque químico, así como a altas temperaturas, entre otras propiedades (Wu *et al.*, 2019). La utilización de este tipo de materiales como cementante para la aplicación en la estabilización química de suelos es un concepto relativamente nuevo.

2. Metodología

La metodología seguida en el presente estudio contempla una revisión de la base de datos científicos (Scopus, Elsevier), utilizando como palabras claves “soil stabilization alkali-activated/geopolymer” y “soil stabilization Portland cement”. La revisión, realizada para los últimos nueve años (2010-2019) muestra que el número de las publicaciones relacionadas con la estabilización de suelos utilizando cementos de activación alcalina no sobrepasan los 70 documentos. De acuerdo con la Figura 1 (datos tomados de Scopus), las primeras publicaciones datan del año 2012, y su estudio se ha venido incrementando poco a poco en el tiempo. Cabe anotar, que de las publicaciones a octubre de 2019, tan solo el 72 % corresponden a artículos, el porcentaje restante son capítulos de libros o presentaciones a nivel de conferencias internacionales. Para abril de 2020, ya se ha incrementado en 11 artículos más. En general, la mayoría de artículos se encuentran publicados en revistas de las bases de datos Science Direct (Elsevier) y Springer. En la Figura 1 se observa que la producción científica relacionada a la estabilización química con cemento portland supera en aproximadamente seis veces la de los materiales activados alcalinamente. Sin embargo, aunque esta tecnología es relativamente reciente, los excelentes desempeños mecánicos obtenidos en los diferentes estudios de investigación a nivel global, utilizando diversos tipos de suelos (finos y granulares), ha llevado a considerarla potencialmente viable en la estabilización química de suelos.

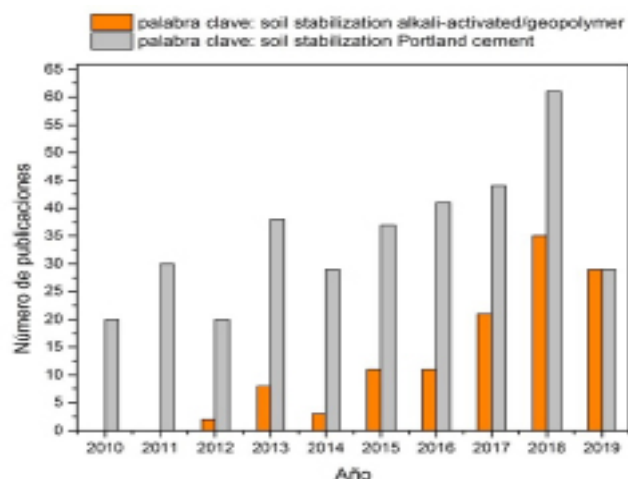


Figura 1. Publicaciones de los últimos 9 años (enero 2010-octubre 2019) en el campo de estabilización de suelos con materiales activados alcalinamente vs. cemento Portland. (Base de registros de Scopus)

Fuente: elaboración propia.

Este *review* presenta una breve descripción de los materiales tradicionalmente utilizados en la estabilización química de los suelos tales como cemento Portland, cal, cenizas volantes (CV), escorias siderúrgicas de alto horno (GBFS) y sales, seguido de la presentación de algunos de los resultados mas relevantes de estabilización de suelos utilizando materiales cementantes activados alcalinamente. Adicionalmente, se presentan las posibles ventajas y desventajas de la utilización de este material alternativo, sus oportunidades y retos asociados a su aplicación.

2.1. Metodos de estabilizacion de suelos

Un suelo se considera estable cuando posee la resistencia suficiente para no sufrir grandes deformaciones ni excesivo desgaste en servicio por acción de las condiciones climáticas variables que se puedan presentar, además debe de conservar estas propiedades a través del tiempo. Un suelo natural puede tener a veces la composición granulométrica, la plasticidad y el grado de humedad adecuada, para que, siendo únicamente compactado, presente las características mecánicas que lo hacen utilizable como cimentación de una vía o camino. No obstante, si no se logra un adecuado equilibrio entre el rozamiento inter-partículas y su adhesión, no se tendrá la estabilidad esperada. Por tanto, en lo general la estabilización de un suelo es un proceso que permite mejorar la calidad del suelo natural para obtener unas características físicas, químicas y mecánicas estables en relación con las condiciones medioambientales de servicio. Con estos procesos de estabilización puede alterarse una o más propiedades del suelo: controlarse la expansión, incrementar la resistencia, reducir la plasticidad, disminuir la permeabilidad, prevenir la erosión, entre otras propiedades. Por ejemplo, es posible mejorar la resistencia de suelos y convertirlos en materiales apropiados para la construcción, capaces de soportar los efectos del tránsito y del ambiente con excelente durabilidad. Los métodos de estabilización de suelos pueden clasificarse en: mecánicos, físicos, químicos y biológicos.

La estabilización mecánica consiste en compactar el suelo de forma estática o dinámica para aumentar su densidad, su resistencia mecánica, disminuir su porosidad y su permeabilidad. Puede incluir también previamente la mezcla de suelos de diferente gradación para obtener la especificación apropiada. Los objetivos ingenieriles de dicho procedimiento son principalmente a) aumentar su capacidad portante, b) disminuir el asentamiento de las estructuras, c) controlar cambios volumétricos indeseables, d) reducir la permeabilidad al agua, y e) aumentar la estabilidad de los taludes (Das, 2013). La compactación de un suelo depende de la energía de compactación, por el tipo y gradación del suelo, y el grado de compactación depende del contenido de humedad y el peso unitario seco. El grado de compactación es entonces medido en términos del peso unitario del suelo seco.

La estabilización física consiste en modificar las propiedades de los suelos mediante la intervención en algunas de sus propiedades para aportarle características estructurales nuevas. Entre los procedimientos físicos se encuentran el uso de los materiales denominados geosintéticos, tales como los geotextiles, fabricados generalmente de fibras sintéticas como el poliéster o polipropileno; las geomallas, estructuras tridimensionales pero con la característica de ser mono o bi-orientadas y fabricadas en polietileno de alta densidad; las geomembranas, láminas poliméricas impermeables fabricadas en cloruro de polivinilo (PVC), o polietileno de alta o baja densidad (PEAD/PEBD); el geocompuesto, diseñado específicamente para estabilización de suelos donde se requiere tanto refuerzo como separación de una base granular y un subsuelo muy fino, este se produce uniendo un geotextil no tejido a una geomalla, lo que permite una gran interacción con el suelo reforzado; y las geoceldas, que son sistemas tridimensionales de confinamiento celular fabricadas en paneles de polietileno o polipropileno, muy resistentes para el confinamiento de cargas (Liu *et al.*, 2011).

La estabilización química consiste en añadir al suelo otros materiales, o productos químicos, que modifican sus propiedades, ya sea por una reacción fisicoquímica, o mediante la creación de una matriz que aglomere las partículas del suelo (Bahar; Benazzoug; Kenai, 2004; Billong; Melo; Louvet; Njopwouo, 2009). Algunos autores (Bahar *et al.*, 2004; Billong *et al.*, 2009) recomiendan la combinación de dos métodos, el de

estabilización por métodos mecánicos de compactación y vibración y el de estabilización por métodos químicos, para obtener mayor resistencia y durabilidad.

Una última técnica es la estabilización biológica que consiste básicamente en la utilización de enzimas biológicas que al ser incorporadas al suelo actúan aumentando el grado de aglutinamiento y compactación de las partículas del suelo, como consecuencia de un intercambio catiónico en la estructura del suelo que da lugar a un proceso de cementación acelerado.

En los siguientes apartados se detallan los métodos tradicionales y alternativos de estabilización química de suelos, señalando en cada caso sus ventajas y desventajas.

2.1.1. Estabilización química de suelos – métodos tradicionales

La estabilización química se puede utilizar en todos los tipos de suelos para el mejoramiento de sus propiedades geotécnicas, cambiando las propiedades fisicoquímicas iniciales del suelo nativo con el objetivo de mitigar algunos problemas tales como la inestabilidad volumétrica o incrementar algunas de sus propiedades como la resistencia y durabilidad de los suelos tratados. Este tipo de estabilización incluye la utilización de una amplia gama de materiales, entre los cuales el cemento y la cal han sido los más convencionales; sin embargo, otros productos como sales (cloruro de sodio, cloruro de calcio) y residuos o subproductos industriales (escoria de alto horno, cenizas volantes) también han sido considerados en la estabilización de suelos para construcción de carreteras (Syed-Zuber *et al.*, 2013). Adicionalmente, la combinación de varias materias primas adecuadamente seleccionadas puede permitir la sinergia de sus propiedades brindando un mejor comportamiento frente a la estabilización de un suelo.

Cabe anotar, que la selección del tipo y porcentaje de estabilizante es función primordial del tipo de suelo o clasificación y por supuesto, en segunda instancia, de la expectativa de mejoramiento requerida para el caso particular. Otros factores importantes son el costo y las condiciones medioambientales. Así, cuando solamente se pretende modificar algunas de sus propiedades, tales como la trabajabilidad, plasticidad o distribución de partícula es posible que se requieran proporciones bajas del aditivo; sin embargo, cuando se desea interactuar con propiedades tales como la resistencia y la durabilidad para incrementar la vida útil en servicio, la cantidad del aditivo puede ser superior. Aunque puede existir más de un estabilizante apropiado para un tipo de suelo determinado, hay algunos lineamientos para seleccionar el estabilizador específico, estos se basan en la granulometría del suelo, su plasticidad y textura.

En general, los criterios para decidir sobre un tipo o no de estabilización química se basan generalmente en los límites de Atterberg, los cuales permiten caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Un suelo puede presentar cuatro estados de consistencia dependiendo de su grado de humedad; seco, semisólido, plástico y líquido. El límite plástico (LP) corresponde al paso de estado semisólido a estado plástico; y el límite líquido (LL) corresponde al paso de estado plástico a estado líquido. El índice de plasticidad (IP) se calcula como la diferencia entre el contenido de humedad en los LL y LP. Algunas normas consideran que el LL no puede superar valores entre 30-40 % y el IP entre el 10-12 %, respectivamente para materiales de subbase y base, y alrededor de 40 y 20 % para materiales subrasantes. Otras características que determinan el tipo de estabilización están relacionadas con la densidad en estado seco y el valor del *California Bearing Ratio* (CBR) del suelo. Estas características, en general, definen la calidad del suelo y su conocimiento es tan importante como escoger bien los materiales para realizar la estabilización. La norma ASTM D4609, la cual evalúa el potencial de los productos utilizados para mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos, en su apartado 8.1.4 indica que "cualquier producto que consiga un incremento de 345 kPa de la resistencia a compresión del suelo y, además que garantice que, al sumergir las probetas en agua éstas no pierdan significativamente su resistencia, puede considerarse apto para la estabilización". No obstante, es común que, una vez realizada la estabilización química se apliquen métodos mecánicos para compactar el suelo.

2.1.2. Estabilización con Cemento Portland

El cemento Portland (del inglés, *ordinary Portland cement*, OPC) es el aglutinante más utilizado a nivel mundial porque posee la capacidad de estabilizar una amplia variedad de suelos, aunque es mucho más efectivo en suelos arenosos y en suelos arcillosos con índices de plasticidad entre mediano y bajo (Pandey; Rabbani, 2017). Al material generado por la mezcla de suelo con diferentes porcentajes de OPC se le da el nombre de suelo-cemento. Este material se usa en muchos tipos de aplicaciones de infraestructura civil como bases o subbases para construir carreteras, terraplenes, diques y estabilización de cimentaciones, entre otros. Se ha implementado desde hace más de 80 años, y su desarrollo se dio simultáneamente en Estados Unidos e Inglaterra, en donde en el año 1917 aplicaron exitosamente mezclas de suelo arcilloso con cemento para crear caminos; pese a ello, no fue muy utilizado en esa época por el tipo de tráfico. En Estados Unidos los primeros proyectos de los que se tiene registro del uso de suelo-cemento en la construcción de carreteras se realizaron en Dakota del Sur, Iowa, Ohio, California y Texas. A partir de 1935 la Portland Cement Association (PCA) desarrolló una serie de investigaciones que derivaron en los primeros ensayos de humedad-densidad, humedecimiento-secado y hielo-deshielo de diversas mezclas de suelo-cemento y a partir de este trabajo a mediados de 1940 surgen las primeras normas ASTM y AASHTO para este tipo de material (Portland Cement Association, 1992).

Los mecanismos por los cuales el suelo es estabilizado por el cemento son la hidratación, el intercambio catiónico, floculación y aglomeración, carbonatación y reacciones puzolánicas. De estos, el más importante es la hidratación del cemento ya que se generan compuestos de silicato cálcico hidratado (del inglés *calcium silicate hydrate*, C-S-H) que cementan las partículas del suelo generando estabilidad frente a los cambios de humedad en el ambiente. El intercambio catiónico es el segundo mecanismo en importancia cuando se estabilizan suelos cohesivos, los cationes Ca^{++} del cemento llenan los vacíos en la estructura del suelo o se intercambian por algunos cationes del suelo, reduciendo la carga neta superficial haciendo que se genere una menor atracción de moléculas de agua por parte del material (Pandey; Rabbani, 2017). Khemissa y Mahamedi (2014) al tratar suelos expansivos con cemento Portland corroboraron que el índice de plasticidad y el límite líquido de los suelos tratados decrecía apreciablemente (órdenes del 50 %), reduciendo de esta manera su potencial de hinchamiento y volviéndolos menos sensibles al agua con la consecuente mejora en los procesos de compactación de las mezclas de suelo-cemento. La floculación puede cambiar la textura plástica de algunos suelos a una textura fina y granular (Prusinski; Bhattacharja, 2007), mientras que la carbonatación contribuye a la resistencia del material estabilizado y las reacciones puzolánicas contribuyen a la generación de material cementante adicional (C-S-H) conforme pasa el tiempo incrementando la estabilización por cementación de las partículas.

Dependiendo de la proporción de los componentes en la mezcla entre el suelo y el cemento, se generan varias clases de suelo-cemento: suelo-cemento compactado, suelo-cemento plástico y suelo modificado con cemento. El tipo de mezcla más utilizada es el suelo-cemento compactado llamado comúnmente como suelo-cemento, este contiene una proporción de OPC entre 4-25 % en peso de suelo seco y se compacta para lograr mayor resistencia. Los suelos que mejor resultado presentan al ser estabilizados con OPC son los materiales granulares bien gradados con la suficiente cantidad de material fino, para producir una especie de agregados flotantes en la matriz. Según la PCA el tamaño máximo de las partículas del material a estabilizar debe ser de 5.1 cm, el Índice de Plasticidad (IP) para estos materiales debe ser menor de 30, mientras que para materiales más finos el IP debe ser inferior a 20 con Límite Líquido (LL) por debajo de 40 (U.S.Department of Transportation, 1992).

Estudios realizados por Horpibulsuk *et al.* (2010) relacionaron la resistencia de un suelo arcilloso estabilizado con diferentes contenidos de cemento para una determinada cantidad de agua, identificando tres zonas que estaban relacionadas con la cantidad de OPC adicionado al suelo. La primera que denominaron *zona activa*, donde la resistencia de la mezcla incrementa con el contenido de cemento entre 0-10 %, atribuible a los productos de hidratación del OPC (C-S-H). Entre 10 – 30 % de cemento el incremento en la resistencia es casi cero, esto quiere decir que no existe mejora significativa en la resistencia, esta región fue denominada *zona*

inerte. Con contenidos de cemento > 30 % encontraron que la resistencia disminuyó y la denominaron zona de deterioro, esto fue atribuido a una insuficiente cantidad de agua que promueva la hidratación completa del cemento en la mezcla. Con base en lo anterior, definieron como límite máximo el 10 % de cemento.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las diferentes mezclas suelo/cemento, sus propiedades principales y su respectiva aplicación en pavimentos (Quintanilla, 2007).

Tabla 1.

Clasificación y propiedades de diferentes mezclas de suelo/cemento

Clasificación	Materiales	Cantidad de cemento (%w)	Propiedades	Usos
Suelocemento	Suelos finos o granulares y cemento	3-7	>4MPa Compresión	Subbases
Suelo modificado con cemento	Sueos finos o plásticos con excesiva humedad y cemento	Máximo 2 %	Incrementa CBR y disminuye la plasticidad	Subrasantes o explanadas
Suelo estabilizado con cemento	Suelos con fracción granular elevada y cemento	Mínimo 2 %	Incrementa rigidez y resistencia mecánica	Subrasantes o explanadas
Suelocemento plástico	Suelo, cemento y aditivos	-	3-8.5 MPa Compresión	Bases para pavimentos
Base granular tratada con cemento	Agregados y cemento	3- 13 %	3-6 MPa Compresión 7.000-14.000MPa Módulo de elasticidad	Capa de base para pavimentos
Pavimento unicapa de alto desempeño	Suelo existente en la obra y cemento	11-20 %	5-13 MPa Compresion 10.000-20.000 MPa Modulo de elasticidad	Capa de base o capa de rodadura de pavimentos

Fuente: tomado y adaptado de Quintanilla (2007).

Cabe anotar que, los rangos típicos de resistencia a compresión simple a 7 días exigidos por el código ACI 230 depende del tipo de suelo, así para suelos ML y CL es de 17.58 - 35.15 kg/cm²; en suelos MH y CH es de 14.06 - 28.12 kg/cm², y en el resto de los tipos de suelo del sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) es de 21.09 - 42.18 kg/cm².

2.1.3. Estabilización de suelos con Cal

La cal es uno de los materiales más utilizados en la estabilización de suelos. Se puede usar en diferentes formas dependiendo del tipo de aplicación, cal viva, como desecante de suelos muy húmedos; cal hidratada y lechada de cal para estabilización de suelos arcillosos de grano fino. Al aplicar la cal a suelos arcillosos inmediatamente sus partículas pierden poder de cohesión transformando al suelo plástico en un material más granular. Los registros de la utilización de cal datan de épocas tan antiguas como la civilización mesopotámica pasando por antiguo Egipto, imperio Romano y la antigua Grecia (McDowell, 1959). En la era moderna, la cal fue utilizada

como agente estabilizador aproximadamente desde los años de 1924, su uso se generalizó a partir de la segunda guerra mundial como químico estabilizador de suelos para construcción de carreteras (Bell, 1996). Al aplicar cal a los suelos, el intercambio catiónico es el primer mecanismo que modifica las propiedades ingenieriles del suelo tratado. Debido a la floculación de sus partículas, se promueve la fijación de los cationes Ca^{++} en la estructura del suelo y esto da lugar a la generación de reacciones puzolánicas responsables de estabilizar al suelo modificando sus propiedades iniciales (Behnood, 2018a; Bell, 1996). Al romper las partículas de arcilla, se liberan la sílice y la alúmina, que reaccionan con el calcio de la cal para formar silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) y aluminatos cálcicos hidratados (C-A-H), que son cementantes análogos a los formados en las reacciones de hidratación del cemento Portland. Estos componentes hidratados forman una matriz con menor índice de plasticidad, la cual contribuye a la resistencia de las capas de suelo estabilizadas con cal y a su menor permeabilidad. La capa de suelo se hace más fácil de trabajar y de compactar. En este tipo de estabilización puede considerarse la cal como un activante alcalino apto para generar un suelo resistente, mecánica y químicamente a partir de su acción con el suelo de carácter arcilloso.

Bell (1996) estudió el efecto de la cal en tres tipos de los minerales más comunes de los suelos finos, montmorillonita, cuarzo y caolinita. El autor reporta una disminución significativa de la plasticidad en el mineral de montmorillonita, pasando del 15 % al 3 % al utilizar un contenido de cal del 10 %, mientras que en la caolinita la reducción fue menor. Al adicionar cal, la caolinita y el cuarzo incrementan su límite líquido mientras que en la montmorillonita se redujo; en esta última, la resistencia incrementa más rápidamente. De acuerdo con Mallela; Quintus y Smith (2004), la estabilización con cal actúa mejor en suelos finos con un contenido mínimo de arcilla del 10 % e IP superior a 10. Al-Mukhtar; Khattab y Alcover, (2012) estabilizaron con cal una arcilla plástica conocida como "*FoCa Clay*"; después del tratamiento químico el suelo tratado mejoró sus propiedades geotécnicas al reducir su plasticidad y la posibilidad de hinchamiento e incrementar la resistencia, corroborando que inmediatamente al ser tratado el suelo con la cal pierde sus propiedades cohesivas y se transforma en un suelo granular con propiedades geotécnicas mejoradas.

Millogo; Morel; Traoré y Ouedraogo (2012), evaluaron las características microestructurales de suelos lateríticos estabilizados con cal en diferentes proporciones (2, 3, y 8 %); los suelos estaban compuestos por 26 % de caolinita y 42 % cuarzo y sus características físicas fueron: LL 22.5 %, LP 12 %, IP 10.5, CBR 43; los autores reportaron como productos de la reacción calcita (CaCO_3), portlándita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), y silicato cálcico hidratado (C-S-H) pobremente cristalizado, formado este último a partir de la reacción entre la caolinita presente en el suelo y la cal incorporada en la mezcla. Los índices IP, y la densidad máxima seca (del inglés *maximum dry density*, MDD) disminuyen con la adición de cal mientras el contenido óptimo de humedad (del inglés *optimum water density*, OMC) aumenta. En cuanto a las propiedades mecánicas se observó un aumento del índice CBR hasta el 3 % de cal; por lo cual, los autores recomiendan este porcentaje para modificar las gravas lateríticas y usarlas como una opción económica para bases en la construcción de carreteras (Millogo *et al.*, 2012). Ismeik y Shaquor (2020) estudiaron la durabilidad frente a ciclos de hielo-deshielo de un suelo caolinitico estabilizado con diferentes porcentajes de cal; observaron reducción en la plasticidad del suelo nativo en aproximadamente un 50 %, mientras el incremento en la durabilidad y resistencia mecánica dependían del contenido de cal en la mezcla. Reportaron que un 6 % de cal mejoró sustancialmente la durabilidad a los ciclos de hielo-deshielo de la mezcla compactada, concluyendo que este suelo estabilizado podría ser un excelente material para construir bases para pavimentos e incluso cimentaciones. En términos generales, el porcentaje de cal no debe superar el 8 %.

2.1.4. Estabilización de suelos utilizando Cenizas volantes

Las cenizas volantes (CV) fueron implementadas como material para estabilizar suelos debido a los inconvenientes ambientales y económicos que se asociaban a la cal y al cemento Portland, motivando muchas investigaciones alrededor de estos subproductos con el objetivo de desarrollar nuevos cementantes ambientalmente sostenibles para una variedad de aplicaciones ingenieriles. Inicialmente se utilizaban como aditivo para productos a base

de cemento y concreto; posteriormente se comenzaron a implementar como material de relleno estructural en terraplenes; y finalmente, como material estabilizador de suelos en la construcción de carreteras (Babu; Rao, 1996; Behnood, 2018b; Horiuchi; Kawaguchi; Yasuhara, 2000; Kim; Prezzi; Salgado, 2005; Kumar; Chandra; Vishal, 2006; Senol; Edil; Bin-Shafique; Acosta; Benson, 2006). Las cenizas volantes dependiendo de la clase de carbón utilizado en la combustión, se clasifican en cenizas tipo F y cenizas tipo C (ASTM C618); las cenizas tipo F se componen de óxidos de silicio, aluminio y hierro (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 respectivamente), los cuales representan en total un 70 % del material y poseen un contenido de óxido de calcio (CaO) muy bajo (inferiores al 10 %), mientras que las cenizas tipo C presentan un contenido de CaO por encima del 30 % aproximadamente y altos contenidos de óxidos de azufre (SO_3) (Kim *et al.*, 2005; Makusa, 2013; Moghal, 2017).

Por el bajo poder de cementación de las cenizas tipo F, generalmente se mezclan con fuentes de calcio como la cal o el OPC, ya que por su naturaleza puzolánica interactúan con los óxidos de calcio, para generar productos de reacción que cementan las partículas de los suelos tratados (Arora; Aydilek, 2005). El poder de cementación de las cenizas se puede mejorar cuando se adiciona cal junto con yeso, el cual mejora la resistencia en edades tempranas con cantidades de cal moderadas; incluso se observan incrementos muy significativos cuando la fuente de calcio se adiciona en mayores proporciones como lo demostraron Sivapullaiah y Moghal (2010). De acuerdo con Kim *et al.* (2005) la resistencia al corte de suelos estabilizados con cenizas volantes se puede atribuir al ángulo de fricción interna característico de las cenizas de tipo F ya que la resistencia proporcionada se debe a la fricción entre sus partículas, mientras que con las cenizas tipo C se relaciona más con una resistencia por cohesión, gracias a su mayor capacidad de cementación.

La combinación ceniza y cal puede utilizarse exitosamente para estabilizar suelos arenosos y suelos limosos incrementando enormemente la rigidez del suelo estabilizado (Puppala, 2016). Arora y Aidilek (2005) estudiaron mezclas de cenizas tipo F modificadas con OPC y cal con las cuales estabilizaron un suelo arenoso para aplicaciones como capa base para la construcción de carreteras; la resistencia a compresión no confinada y el módulo de resiliencia incrementaron al adicionar hasta 5 % de OPC en la mezcla. En los ensayos de ciclos hielo-deshielo, la resistencia a la compresión incrementó en cada ciclo para las mezclas modificadas con OPC a diferencia de las mezclas modificadas con cal. Por último, después del tratamiento, el espesor de la capa base disminuyó al implementar mezclas de suelo-ceniza modificadas con OPC. Edil; Acosta y Benson (2006) llevaron a cabo un estudio de la efectividad de las cenizas tipo C para estabilizar suelos de grano fino, demostrando que las cenizas estén o no dentro de la especificación de la norma ASTM C618 son igual de efectivas para estabilizar los suelos de grano fino; en todos los casos el suelo presentó incrementos en el CBR y el módulo de resiliencia con cualquiera de las cenizas utilizadas. Un trabajo similar realizaron Joshi; Patel y Shahu (2019) al estabilizar suelos arcillosos para aplicaciones como base o subbases de pavimentos flexibles, en el cual coincide que a medida que se incrementa el contenido de ceniza en la mezcla con el suelo, incrementa el valor de CBR, módulo de resiliencia y resistencia a la compresión no confinada del material estabilizado, con lo que se podrían hacer incluso capas con espesores más delgados permitiendo realizar diseños de pavimentos más rentables económicamente.

2.1.5. Estabilización de suelos utilizando escorias siderúrgicas de alto horno

La escoria granulada de alto horno (del inglés “*granulated blast furnace*”, GBFS) es un subproducto de la industria del acero. Se compone principalmente de silicatos y aluminosilicatos cálcicos y es de particular interés por sus propiedades hidráulicas latentes que se pueden desarrollar al combinarse con cemento Portland, cal o agentes alcalinos (Das; Prakash; Reddy, Misra, 2007; Gutt; Nixon, 1979). GBFS se ha utilizado con éxito en la estabilización de suelos expansivos. Estudios realizados por Al-Rawas (2002) demostraron que GBFS es un aditivo efectivo para mejorar este tipo de suelos, al reducir el potencial de hinchamiento del suelo debido a que los iones calcio interactúan con las partículas de suelo para generar flóculos y volverlo menos susceptible a los cambios de volumen por acción del agua. Resultados similares obtuvieron Cokca; Yazici y Ozaydin (2009); Hasan; Chegenizadeh; Budihardjo y Nikraz (2016); Manimaran; Santhosh; Ravichandran (2018), demostrando

que la alteración del tamaño de partícula del suelo al adicionar GBFS no solo disminuye el potencial de hinchamiento sino que incrementa la gravedad específica, reduce el índice de plasticidad, incrementa el CBR y la resistencia mecánica. GBFS en combinación con cemento Portland genera una mayor resistencia, debido a los productos de reacción de carácter puzolánico; el incremento varía en función de parámetros tales como el porcentaje de adición de GBFS y las condiciones de curado. Cuando GBFS se combina con cal proporciona auto regeneración en caso de daños iniciales en la estructura por sobrecarga, además, no es afectada la mezcla por la presencia de sulfatos en el suelo (Higgins, 2005), siendo los principales productos de reacción aluminatos de calcio hidratados (C-A-H), silicatos de calcio hidratados (C-S-H) y silicatos de calcio hidratados ricos en aluminio (C-A-S-H) (Sekhar; Nayak; Preetham, 2017; Yi, Zheng; Liu; Al-Tabbaa, 2015). Recientemente, estudios realizados por Bensaifi; Bouteldja; Nouaouria y Breul (2019) demostraron que GBFS puede activarse con residuos de cáscaras de huevo calcinadas para mejorar las propiedades geotécnicas de un suelo tipo Marl usado para construcción de carreteras; los autores reportan incrementos del CBR de hasta 22 veces con respecto al valor de CBR del suelo sin tratar.

2.1.6. Estabilización de suelos utilizando sales

Como materiales alternativos de bajo costo se han utilizado sales tales como cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de calcio (CaCl_2). El objetivo de su uso es retener humedad y mejorar la compactación del material. Además, ayudan a reducir el punto de congelación del agua contenida en el suelo y en zonas muy secas evita la rápida evaporación del agua de compactación (Firoozi *et al.*, 2017). Las propiedades plásticas de suelos arcillosos dependen del intercambio catiónico. Cuando las partículas de arcilla están cubiertas con cargas similares se repelen entre sí; cuando existen partículas con cargas diferentes se atraen; si el entorno es un ambiente ácido, es decir, exceso de H^+ ($\text{pH} < 7$), las partículas tienden a estar cargadas positivamente, lo que conlleva a la floculación de la arcilla, y en un entorno básico resulta una estructura dispersa. Yunus y Zurairahetty (2007) investigaron el uso de la cal mezclada con sales (NaCl y CaCl_2 en rangos de 2 al 10 %) en la estabilización de un suelo arcilloso (57,51 % de limo y 20,78 % de arcilla) con un contenido de material orgánico del 14,41 %, el cual se conoce reduce la efectividad de la cal como estabilizante. En general, la presencia de las sales en órdenes del 10 % aumentó la resistencia de la mezcla, destacándose el desempeño del NaCl; en este sentido afirman que estas sales actúan como acelerantes de las reacciones en la presencia de ácidos húmicos.

El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento. A humedades relativas altas actúa como retenedora del agua debido a su naturaleza higroscópica, reduce la evaporación y evita la formación de polvo. Además, se puede esperar un mejor resultado si el suelo contiene material fino que reaccione con la sal. Entre las limitaciones para su uso se señalan: el medio ambiente debe tener una humedad relativa superior al 30 %; las partículas del suelo deben pasar por malla 200 y reaccionar favorablemente con la sal; y la ausencia de materia orgánica ya que esta inhibe la acción de la sal (Garnica; Pérez; Gómez y Yhaaraby, 2002).

2.1.7. Ventajas y desventajas de los métodos tradicionales de estabilización química de suelos

Las ventajas de los métodos tradicionales de estabilización de suelos es la existencia de una amplia variedad de productos en el mercado desarrollados para mejorar diversos tipos de suelos o ciertas propiedades en algunos tipos de suelos. En referencia a los cementantes más utilizados, OPC y cal, su principal ventaja es que se pueden utilizar prácticamente en casi todas las clases de suelos. Como ventajas técnicas se señala la ganancia de resistencia a edades tempranas y el incremento de la durabilidad de los suelos tratados. En aplicaciones viales se pueden reducir los espesores de las capas de las estructuras de los pavimentos, disminuyendo los costos de la obra. En general, son productos ampliamente difundidos y disponibles comercialmente, y su composición química tiene una variabilidad relativamente aceptable ya que sus procesos de producción están ampliamente desarrollados y controlados.

Como desventaja se señala su impacto ambiental negativo con respecto a su producción e incluso por su costo de fabricación. Solo la industria de producción de OPC genera aproximadamente del 5 – 8 % del total las emisiones mundiales de CO_2 (Andrew, 2017; Gartner, 2004); de acuerdo con Kim y Worrel (2002) y Shi *et al.* (2011) por cada tonelada de OPC producida se emite a la atmosfera entre 0,8 y una tonelada de CO_2 , esto se atribuye a la descomposición de las materias primas y el uso de combustibles fósiles en el proceso de fabricación. Otro de los inconvenientes asociados al uso de cementantes a base de calcio es su poca efectividad en suelos con contenidos altos de materia orgánica ya que se afectan las reacciones de hidratación y reacciones puzolánicas necesarias para que el suelo estabilizado alcance la resistencia mecánica apropiada (Tremblay; Duchesne; Locat y Leroueil, 2002). De acuerdo con Ma; Chen y Chen (2016) la resistencia a la compresión de suelos con alto contenido de materia orgánica tratados con cementantes a base de calcio, disminuye a medida que el ácido húmico aumenta por la descomposición de la materia orgánica, esto en ocasiones se compensa con mayor proporción de cemento (Chen; Wang, 2006); sin embargo, es una práctica costosa. Generalmente no se recomienda utilizar cemento para estabilizar suelos con más del 2 % de materia orgánica, tampoco se recomienda usar cemento para estabilizar suelos con un pH ácido debido a que se puede ralentizar o inhibir los procesos de hidratación (Trussell; Spence, 1994).

En respuesta a las desventajas mencionadas anteriormente, la comunidad científica ha centrado esfuerzos en la búsqueda de nuevas tecnologías que se puedan implementar en este tipo de aplicaciones geotécnicas y que de alguna manera mitiguen primordialmente los problemas relacionados con las emisiones de CO_2 , disminuya la explotación de recursos naturales, sean económicamente viables e incrementen la durabilidad en servicio de los suelos estabilizados.

2.2. Estabilización química de suelos – activación alcalina

La estabilización química de suelos utilizando la tecnología de activación alcalina es una de las más recientes propuestas de investigación y surge como alternativa a los cementantes tradicionales. La literatura alrededor de esta temática es limitada, como se mencionó anteriormente; a pesar de ello, las investigaciones realizadas han logrado algunos avances significativos mostrando resultados promisorios, tanto a nivel de las propiedades mecánicas como de la durabilidad de los suelos evaluados. Desde el punto de vista ambiental, los cementantes activados alcalinamente se consideran, en teoría, una alternativa más sostenible comparada con los cementantes tradicionales, por su menor consumo de energía en el proceso de producción y a la utilización de precursores derivados de algunos residuos o subproductos industriales (cenizas volantes y escorias siderúrgicas de alto horno, entre otros) para su producción, lo cual mitiga la explotación de recursos naturales. La revisión en la Base de datos Scopus analizada en función del tipo de precursor utilizado en el cementante alcalino usado para los estudios de estabilización de suelos en los últimos 10 años (2010-2020) arroja que el mayor número de artículos utilizan cenizas volantes (CV) y escorias siderúrgicas (GBFS), tal como se puede apreciar en la Figura 2.

2.2.1. Estabilización química de suelos con cementantes activados alcalinamente

Un nuevo enfoque del uso de residuos en los procesos de estabilización química de suelos fue presentado por Hughes y Glendinning (2004), quienes utilizaron GBFS mezcladas con residuos de la producción del titanio y cal, las cuales al ser incorporadas al suelo le otorgaron resistencias mecánicas similares a las obtenidas con OPC y mayor durabilidad; el suelo estabilizado no fue afectado por la humedad ni por los ciclos de hielo-deshielo, y tampoco resultó susceptible al ataque por sulfatos. La implementación de la cal para incrementar el pH del medio y lograr una mejor disolución de los precursores, podría considerarse como el punto de partida para el uso de cementantes activados alcalinamente en aplicaciones geotécnicas, a pesar de que la cal no es un activador fuertemente alcalino como el hidróxido de sodio (NaOH) o el silicato de sodio (Na_2SiO_3), sustancias químicas que son los activadores convencionales.

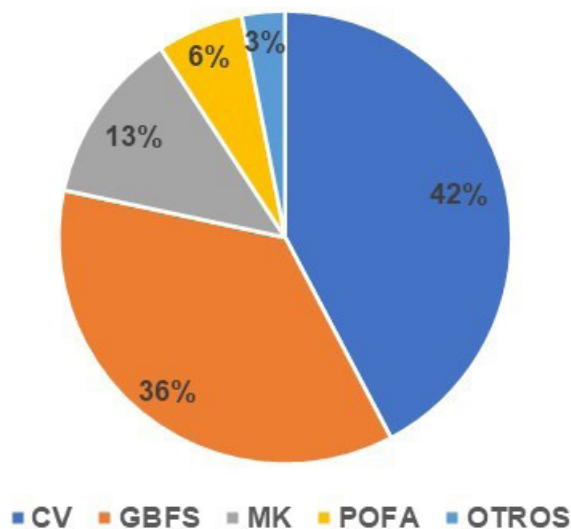


Figura 2. Tipos de precursores utilizados en las investigaciones de estabilización de suelos con materiales activados alcalinamente 2010-2020 (Base de registros de Scopus)
Fuente: elaboración propia.

Cristelo, Glendinning, Fernandes y Pinto (2013) estabilizaron un suelo blando utilizando 20 al 40 % de un cementante activado alcalinamente basado en CV tipo F y activado con NaOH a diferentes concentraciones (10, 12.5 y 15 M), los resultados muestran que la resistencia del suelo estabilizado aumenta al disminuir la relación activador/ceniza, alcanzando 43 MPa al cabo de 365 días. Coudert *et al.* (2019) evaluaron la estabilización de un suelo blando con un cementante activado alcalinamente basado en ceniza volante tipo C adicionada con 20 y 50 % de metacaolín utilizando como activador silicato de sodio; los resultados demostraron que la presencia de metacaolín contribuyó a una reacción rápida de la mezcla obteniendo estructuras mas compactas y menos porosas comparadas con las producidas con 100 % de CV. Cristelo, Glendinning, Fernandes y Teixeira-Pinto (2012); Cristelo, Glendinning y Teixeira-Pinto (2011) al comparar la utilización de CV tipo F con CV tipo C, adicionadas en un rango de 10-40 % en peso del suelo, reportan que a edades tempranas los suelos estabilizados con cenizas volantes tipo C evidencian mayor resistencia frente a los estabilizados con cenizas tipo F; sin embargo, a edad de 365 días los suelos estabilizados con cenizas tipo F alcanzan un valor superior y superan al obtenido en los mismos suelos estabilizados con cal y con cemento, lo cual atribuyen a la elevada acción puzolánica de este tipo de CV.

Cristelo *et al.* (2012) evaluaron la efectividad del activador alcalino al adicionar hidróxido de calcio, cloruro de sodio y un superplastificante para estabilizar un suelo residual granítico, los resultados presentados demostraron que al adicionar hidróxido de calcio en la mezcla se aceleraban las reacciones al igual que en el caso de las cenizas volantes tipo C, y como conclusión general plantean que no se justifica el uso de este tipo de aditivos en la mezcla, ya que no se observaron resistencias significativas a edades avanzadas.

Sargent, Hughes; Rouainia y White (2013) estudiaron la estabilización de un suelo artificial limoso ,empleando un cementante basado en escorias siderúrgicas de alto horno activadas con una solución alcalina mezcla de NaOH:Na₂SiO₃. El suelo tratado con 100 % de escoria presentó la mayor resistencia y rigidez; además, mostró mejor desempeño en ciclos hielo-deshielo y humedecimiento-secado. Zhang *et al.* (2013) utilizaron una mezcla de suelo arcilloso y metacaolín (3-15 % en peso) activado con hidróxido de sodio (NaOH), encontrando que la mezcla es mucho más estable que el suelo sin estabilizar e incluso un 5 % más estable que el suelo estabilizado con cemento portland. La resistencia a la compresión del suelo se incrementa con la proporción del metacaolín y la fragilidad del suelo se ve reducida, con una deformación al momento de fallar los especímenes de 0.08 % para suelos sin metacaolín hasta aproximadamente 3.00 % para suelos estabilizados con 5 y 8 % de

metacaolin, propiedades deseables en la aplicación de pavimentos flexibles. Ghadir y Ranjbar, (2018) utilizaron cenizas volcánicas activadas alcalinamente y reportan el incremento de la resistencia del suelo en un 200 % con respecto al suelo estabilizado con cemento Portland. Abdullah, Shahin y Sarker (2019) evaluaron el efecto de un cementante alcalino basado en la mezcla de CV y GBFS, adicionado al suelo en proporciones hasta de un 30 % respecto al peso de suelo; los autores mencionan que aunque la adición de un 10 % genera una resistencia a 28 días de 1103 kPa, valor comparable al obtenido con 6 % de OPC, en términos de durabilidad es recomendable utilizar un 20 % del cementante, alcanzando resistencias de 2100 kPa, valor que supera el obtenido con 9 % de OPC. Cabe anotar que el contenido óptimo de GBFS en el cementante fue del 20 %.

La implementación de los cementantes activados alcalinamente en la fabricación de elementos de mampostería de tierra compactada y estabilizada igualmente ha sido estudiada por diferentes investigadores. Silva *et al.* (2015) reportaron valores aceptables de propiedades mecánicas (compresión y flexión) de elementos de mampostería producidos con tierra compactada y estabilizada con cenizas volantes tipo F activadas alcalinamente. Muñoz, Easton y Dahmen (2015) exploraron la posibilidad de usar aluminosilicatos recuperados de residuos de canteras (residuos de roca triturada y suelos arcillosos) para la fabricación de elementos de mampostería estabilizados y compactados, los resultados fueron prometedores. No obstante, debido a la naturaleza de los precursores fue necesario adicionar nanopartículas de feldespatos y nanosílice para incrementar la reactividad de la mezcla con el activador alcalino, mejorando la resistencia de los especímenes entre 60-80 % y alcanzando resistencias por encima de 8 MPa a temperaturas de curado entre 50 y 60 °C. Palanisamy y Kumar (2018), utilizaron suelos arenosos y compactación manual para la producción de bloques de tierra compactada incorporando ceniza volante tipo C y escoria granulada de alto horno activadas alcalinamente con una mezcla de hidróxido de sodio y silicato de sodio; las resistencias obtenidas fueron superiores a las de bloques de suelo-cemento; además, los autores reportaron un incremento en la resistencia del 20 % al usar 1 % en volumen de residuos de fibras de coco.

Omar-Sore *et al.* (2018) realizaron la estabilización de suelos de tipo laterítico para fabricar bloques de tierra compactada utilizando metacaolin como precursor y NaOH como activador. Las proporciones adicionadas de cementante alcalino al suelo variaron desde 5 hasta 20 % en peso y como material de referencia utilizaron bloques compactados y estabilizados con 8 % de OPC; concluyeron que la adición de 15 % de metacaolin y una temperatura de curado de 60 °C da lugar a incrementos en la resistencia mecánica y mayor estabilidad al agua; además, la conductividad térmica fue similar a la de bloques de suelo sin estabilizar. Las propiedades térmicas de bloques de tierra compactada y estabilizada fueron también evaluadas por Leitão *et al.* (2017), utilizando bloques estabilizados con cementantes activados alcalinamente basados en cenizas volantes; los autores reportaron que, aunque el desempeño fue menos aislante que el de los materiales de construcción convencionales, el coeficiente de transferencia fue de 2.94 W/m²°C que comparado con ladrillos cerámicos (1.74 W/m²°C) o ladrillos de concreto (2.70 W/m²°C) puede considerarse apto para construcciones en países con clima templado o mediterráneo.. Se destaca que los materiales de tierra compactada tienen como papel principal proporcionar capacidad térmica para almacenar energía y provocar inercia térmica contra las fluctuaciones de temperatura, más que comportarse como aislantes térmicos.

Otro tipo de aplicaciones que han involucrado suelos estabilizados usando cementantes activados alcalinamente es en el mejoramiento de bases, subbases, subrasantes en el diseño de vías e incluso suelos estabilizados como capa de rodadura en vías terciarias. Rios, Cristelo, Viana da Fonseca y Ferreira (2015); Rios, Cristelo, Viana da Fonseca y Ferreira (2016); Rios *et al.* (2019) realizaron una serie de estudios en suelos de tipo limo arenoso estabilizado con un cementante activado alcalinamente a base de cenizas volantes tipo F y silicato e hidróxido de sodio como activador, para evaluar su posible aplicación en la construcción de carreteras en vías terciarias no pavimentadas o como reemplazo del suelo-cemento en aplicaciones viales como bases o subbases. Los resultados demostraron que la resistencia y la rigidez incrementaban significativamente; la diferencia más marcada entre este sistema de estabilización y el convencional fue la velocidad en la que las mezclas ganaban resistencia mecánica, siendo más progresiva y constante para los suelos estabilizados con cementos activados alcalinamente. El comportamiento del material a ciclos de humedecimiento y secado fue

muy similar al mostrado por mezclas de suelo-cemento de referencia. El uso de altas temperaturas de curado incrementa la cinética de la reacción, lo cual da lugar a resistencias mayores a edades más cortas (Bakharev, 2005; Criado; Fernández-Jiménez y Palomo, 2010; Singh; Subramaniam, 2019). Esta condición hace que este tipo de aplicaciones sean competitivas frente a los métodos tradicionales en lugares con clima cálido y que cuenten con la disponibilidad de cenizas volantes de calidad óptima para ser activadas alcalinamente.

Singhi, Laskar y Ahmed (2017) evaluaron mezclas binarias de GBFS-CV activadas alcalinamente con una solución de hidróxido de sodio para estabilizar suelos de tipo arcilloso con el objetivo de mejorar la capa subrasante para la construcción de carreteras; este estudio corroboró lo publicado por anteriores investigaciones en cuanto al incremento de la resistencia mecánica por parte del suelo estabilizado; respecto a la durabilidad en presencia de sulfatos del suelo activado resultó ser más resistente que el suelo-cemento de referencia. En este tipo de aplicaciones viales, los suelos lateríticos, característicos en zonas tropicales y que presentan algunos problemas de estabilización, con los cementantes tradicionales pueden ser estabilizados con estos cementantes alternativos.

Autores como Phummiphan *et al.* (2017) realizaron ensayos de resistencia a la compresión no confinada de suelos lateríticos estabilizados con cementantes activados alcalinamente basados en cenizas volantes, demostrando que los resultados eran comparables a los exigidos por las especificaciones nacionales tailandesas para este tipo de materiales, al cumplir los requisitos mínimos de resistencia a 7 días en condiciones saturadas para fabricación de carreteras de alto y bajo volumen; la adición de GBFS aceleró la reacción y produjo un incremento en los productos de reacción del cementante, geles de silicatos de calcio hidratado (C-S-H) y aluminosilicatos de sodio hidratados (N-A-S-H).

Además de suelos de tipo arenoso y lateríticos se ha investigado la estabilización de suelos altamente expansivos utilizando cenizas volcánicas activadas alcalinamente con hidróxido de potasio e hidróxido de calcio. Miao *et al.* (2017), demostraron que con este cementante se logró reducir la plasticidad del suelo desde 34,8 hasta 14,2 % y con respecto a los activadores utilizados en esta investigación el hidróxido de potasio fue más efectivo por su alto carácter alcalino; también se redujo el potencial de hinchamiento del suelo estabilizado, la resistencia a 90 días de este suelo estabilizado fue de 16,55 MPa. Abdeldjouad *et al.* (2019) analizaron el efecto del contenido de arcilla en la estabilización del suelo con y sin cenizas de aceite de palma (POFA) mezcladas con un activador alcalino a base de potasio (KOH) de concentración 10M. Los resultados mostraron que los minerales arcillosos juegan un papel importante en la estabilización del suelo con activación alcalina; y en general las mayores resistencias (150 y 600 kPa a 7 días y entre 900 y 2000 kPa a 28 días) fueron obtenidas con el cementante álcali-activado. En el mismo sentido, Pourakbar *et al.* (2016) reportaron que un 15 % de POFA contribuye al aporte de sílice y alumina reactiva, lo que induce que la resistencia del suelo luego de su estabilización incremente a 359 kPa a 7 días; así mismo los autores recomiendan el uso de una solución 10 M de NaOH como activador considerando el menor costo comparado al KOH.

Un artículo publicado recientemente por Miranda *et al.* (2020) presenta los resultados de la construcción de 80 m² de una capa estabilizada, de 2,5 m de ancho, utilizando diferentes cementantes, tres de los cuales se basan en el uso de ceniza volante activada alcalinamente y los dos restantes corresponden a OPC y cal considerados como materiales de referencia. En este estudio además de los ensayos técnicos, que indican que el desempeño mecánico del suelo estabilizado con ceniza activada es similar al estabilizado con los cementantes tradicionales, se realizaron análisis financieros y medioambientales. Los autores informan que las metodologías de aplicación, equipos y procedimientos pueden ser las mismas tradicionales, pero recomiendan reducir las proporciones de activadores alcalinos o su reemplazo por activadores sólidos y ambientalmente más sostenibles para lograr menores costos e impacto ambiental.

2.2.2. Ventajas y desventajas de la estabilización química de suelos usando cementantes activados alcalinamente

La ventaja más significativa del uso de cementantes activados alcalinamente en los procesos de estabilización de suelos radica principalmente en la utilización de subproductos o residuos de procesos industriales, tales como cenizas volantes, escorias siderúrgicas, residuos de demolición, residuos de vidrio y en teoría cualquier material compuesto por aluminosilicatos, lo cual contribuye a disminuir la explotación de recursos naturales y las emisiones de CO₂, a la par que se valorizan este tipo de residuos, es decir se minimiza el impacto ambiental. McLellan *et al.* (2011) realizaron un estudio del ciclo de vida y del costo de cementantes activados alcalinamente vs OPC, encontrando que bajo las condiciones estudiadas los productos de cementos activados alcalinamente reducían entre 44-64 % la emisión de gases de efecto invernadero con respecto a OPC, pero los costos asociados se incrementaron casi al doble en comparación con los productos de OPC; estos resultados coinciden con los estudios realizados por Cristelo *et al.* (2015).

Entre las desventajas de usar cementantes activados alcalinamente en aplicaciones de estabilización de suelos, aparte de los costos posibles de fabricación, se puede mencionar el uso de silicato de sodio como activador, el cual afecta los indicadores ambientales ya que es el componente que aporta a las emisiones de CO₂, debido a las altas temperaturas requeridas en su proceso de producción, y a su vez eleva los factores de toxicidad (Habert; D'Espinose De Lacaillerie; Roussel, 2011) tanto en humanos como en fuentes agua y en los suelos. Con el objetivo de minimizar o eliminar el uso del silicato, se han adelantado varias investigaciones por parte de la comunidad científica en las que se han evaluado algunos residuos para usarlos como activadores alcalinos o generadores de sílice reactiva en la mezcla con los precursores. Torres-Carrasco y Puertas (2014) realizaron un estudio del proceso de solubilidad de varios tipos de residuos de vidrio en soluciones alcalinas con el objetivo de generar soluciones de silicato de sodio para usarlas como activador en la preparación de cementantes y concretos; los autores concluyeron que, para lograr una buena solubilidad de los residuos, se debe implementar un proceso con temperaturas por encima de 80 °C, además, los residuos de vidrio deben tener tamaños de partícula inferiores a 45 µm para garantizar una solubilidad de aproximadamente el 60 %. Torres-Carrasco y Puertas (2015), realizaron la caracterización mecánica y microestructural de un cementante activado alcalinamente a base de ceniza volante, usando como activador alcalino una mezcla de NaOH con residuos de vidrio y concluyeron que este tipo de residuos de vidrio puede ser un excelente sustituto del silicato de sodio comercial para activar cenizas volantes. Fernández-Jiménez, Cristelo, Miranda y Palomo (2017); Cristelo *et al.* (2019), hicieron estudios de la sustentabilidad de utilizar residuos industriales como precursores y activadores para sintetizar cementantes a base de cenizas volantes; los autores emplearon residuos de vidrio, residuos de anodizado de aluminio y residuos de solución de limpieza de moldes de aluminio como remplazo del silicato de sodio y NaOH en la mezcla; los resultados de las resistencias fueron muy similares a las obtenidas utilizando cementantes activados con las soluciones activadoras convencionales. El uso de residuos agroindustriales como la ceniza de cascarilla de arroz y residuos de la producción de caolín fueron evaluados por Passuello *et al.* (2017); en un análisis de ciclo de vida realizado por los autores se demostró que, frente al silicato de sodio comercial, las cenizas de cascarilla de arroz reducían seis de las nueve categorías de impacto en aproximadamente un 60 %.

Aunque los cementantes activados alcalinamente se han estado desarrollando desde hace ya varios años, esta es una tecnología que tiene mucho por ser explorada ya que como se puede apreciar existen varios estudios que demuestran sus excelentes propiedades aglomerantes en diversas aplicaciones y en especial el uso potencial de estos cementantes para la estabilización de suelos y sus aplicaciones geotécnicas. En general, los esfuerzos de los investigadores se deben centrar en la búsqueda de cementantes que sean viables tanto en lo económico, como en lo técnico y ambiental. La optimización de las mezclas entre precursores y activadores, el uso de activadores que disminuyan los impactos en su fabricación y la disponibilidad de encontrar precursores o residuos disponibles de buena calidad, son algunos de los retos que se deben superar si se quiere pensar en este tipo de cementantes como un remplazo efectivo al uso de cementantes a base de calcio. Otro reto importante de

la aplicación de este tipo de cementantes es la preparación en obra, ya que principalmente se utilizan soluciones alcalinas acuosas, que generalmente son corrosivas, viscosas y difíciles de manejar en aplicaciones de gran magnitud.

En estudios recientes, se han reportado los denominados “*one-part geopolymer*”, estos materiales solo necesitan agregar agua para ser utilizados en servicio (Luukkonen *et al.*, 2018) ya que sus componentes principales son de carácter sólido y se activan, de igual manera que el cemento, al incorporar el agua en la mezcla. Sin embargo, este tipo de materiales aún están en fase de desarrollo. Es importante mencionar que aún hace falta investigaciones sobre las propiedades de durabilidad en la estabilización de suelos con este tipo de cementantes alternativos y a su vez, se requiere la normalización del producto en el campo de aplicación.

3. Conclusiones y líneas de investigación futura

Con base en la revisión de los artículos publicados en las bases de datos se puede extraer las siguientes conclusiones, así como identificar los futuros campos de investigación y retos que deben ser revisados para lograr la implementación de la tecnología de activación alcalina en los procesos de estabilización de suelos:

- Los estudios sobre la aplicación de cementantes activados alcalinamente en el proceso de estabilización de suelos ha venido incrementando en el tiempo de manera notable, particularmente por la posibilidad de hacer uso como precursores del cementante de algunos residuos o subproductos, minimizando el consumo de recursos naturales y contribuyendo a menores consumos energéticos. Sin embargo, algunos de los residuos estudiados hasta ahora, no cuentan con la calidad, cantidad y homogeneidad suficiente para su utilización masiva en todos los países, lo cual implica que se deben identificar fuentes de precursores viables locales que, cumpliendo con criterios de calidad, permitan la implementación de la tecnología. Por ejemplo, debe investigarse el uso de residuos cerámicos o de construcción y demolición y de puzolanas volcánicas, materiales que han demostrado ser excelentes precursores de cementantes alcalinos para otros tipos de usos y cuya disponibilidad puede ser factible en numerosas regiones.

- Así mismo, cabe mencionar, la posibilidad de combinar los tipos de estabilización química convencional con el alternativo de activación alcalina. De existir sinergia entre estos, su aplicación contribuiría a la reducción del consumo de cemento y cal, lo cual generaría menores impactos ambientales y probablemente menores costos. Este es por tanto, una línea necesaria de investigación futura.

- A partir del análisis de los resultados obtenidos en los diferentes estudios, en general, se aprecia que la tecnología de activación alcalina es viable como método alternativo en la estabilización de suelos, aunque aun existen una serie de retos que deben ser superados para su implementación. Entre los retos a abordar se pueden señalar los siguientes: el desarrollo de activadores alternativos con menores impactos ambientales en su producción; los estudios de durabilidad a largo plazo de los suelos activados alcalinamente; y la validación de los resultados de investigación con pruebas en campo.

- Adicionalmente, es importante la formulación de normas y especificaciones aplicables a estos nuevos materiales, tomando en consideración las normas y códigos constructivos vigentes, así como evaluar los costos financieros y ambientales de la tecnología para lo cual se hace necesario incorporar estudios de ciclo de vida de los proyectos y productos.

Referencias

- ASTM International. (2017). Standard Guide for Evaluating Effectiveness of Admixtures for Soil Stabilization (ASTM D4609). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2018). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618). West Conshohocken, PA.
- Abdeldjouad, Lokmane; Asadi, Afshin; Nahazanan, Haslinda; Huat, Bujang; Dheyab, Wisam; Elkhebu, Ahmed (2019). Effect of Clay Content on Soil Stabilization with Alkaline Activation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5, 4.
<https://doi.org/10.1007/s40891-019-0157-y>
- Abdullah, Hayder; Shahin, Mohamed; Sarker, Prabir (2019). Use of Fly-Ash Geopolymer Incorporating Ground Granulated Slag for Stabilisation of Kaolin Clay Cured at Ambient Temperature. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(2), 721-740.
<https://doi.org/10.1007/s10706-018-0644-2>
- Al-Mukhtar, Muzahim; Khattab, Suhail; Alcover, Jean-Francois (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139-140, 17-27.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>
- Al-Rawas, Amer (2002). Microfabric and mineralogical studies on the stabilization of an expansive soil using cement by-pass dust and some types of slags. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1150-1167.
<https://doi.org/10.1139/t02-046>
- Andrew, Robbie (2017). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 1-52.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.831455>
- Arora, Sunil; Aydilek, Ahmet (2005). Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(6), 640-649.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2005\)17:6\(640\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2005)17:6(640))
- Babu, K. G.; Rao, G. S. N. (1996). Efficiency of fly ash in concrete with age. *Cement and Concrete Research*, 26(3), 465-474.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85034-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85034-4)
- Bahar, Ramdane; Benazzoug, M.; Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilized soil. *Cement and Concrete Composites*, 26, 811-820.
<https://doi.org/doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>
- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1224-1232.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.031>
- Behnood, Ali (2018a). Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, 14-32.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>

- Behnood, Ali (2018b). Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, 14–32.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>
- Bell, F.G. (1996). Lime Stabilization of Clay Minerals and Soil. *Engineering Geology*, 42(42), 223–237.
[https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bensaifi, E.; Bouteldja, F.; Nouaouria, M. S.; Breul, P. (2019). Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl. *Transportation Geotechnics*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100244>
- Billong, Ndigui; Melo, U. C.; Louvet, F.; Njopwouo, D. (2009). Properties of compressed lateritic soil stabilized with a burnt clay-lime binder: Effect of mixture components. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2457–2460.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.017>
- Chen, Huie; Wang, Qing (2006). The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), 445–448.
<https://doi.org/10.1007/s10064-005-0030-1>
- Cokca, Erdal; Yazici, Veysel; Ozaydin, Vehbi (2009). Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-Cement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(4), 489–499.
<https://doi.org/10.1007/s10706-008-9250-z>
- Coudert, Elodie; Paris, Michael; Deneele, Dimitri; Russo, Giacomo; Tarantino, Alessandro (2019). Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution. *Construction and Building Materials*, 201, 539–552.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.188>
- Criado, M.; Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A. (2010). Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description. *Fuel*, 89(11), 3185–3192.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.051>
- Cristelo, Nuno; Fernández-Jiménez, Ana; Castro, Fernando; Fernandes, Lisete; Tavares, Pedro (2019). Sustainable alkaline activation of fly ash, aluminium anodising sludge and glass powder blends with a recycled alkaline cleaning solution. *Construction and Building Materials*, 204, 609–620.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.226>
- Cristelo, Nuno; Glendinning, Stephanie; Fernandes, Lisete; Teixeira-Pinto, Amândio (2012). Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 29, 167–174.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.049>
- Cristelo, Nuno; Glendinning, Stephanie; Fernandes, Lisete; Teixeira-Pinto, Amândio (2013). Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. *Acta Geotechnica*, 8(4), 395–405.
<https://doi.org/10.1007/s11440-012-0200-9>
- Cristelo, Nuno; Glendinning, Stephanie; Miranda, Tiago; Oliveira, Daniel; Silva, Rui (2012). Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 36, 727–735.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>

- Cristelo, Nuno; Glendinning, Stephanie; Teixeira-Pinto, Amândio (2011). Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 164(2), 73–82.
<https://doi.org/10.1680/grim.900032>
- Cristelo, Nuno; Miranda, Tiago; Oliveira, Daniel; Rosa, Ivo; Soares, Edgar; Coelho, Paulo; Fernandes, Lisete (2015). Assessing the production of jet mix columns using alkali activated waste based on mechanical and financial performance and CO₂ (eq) emissions. *Journal of Cleaner Production*, 102, 447–460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.102>
- Damtoft, J. S.; Lukasik, J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.; Gartner, E. M. (2008). Sustainable Development and Climate Change Initiatives. *Cement and Concrete Composites*, 38(2), 115–127.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>
- Das, Braja (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Auckland, Nueva Zelanda: Global Engineering.
- Das, Biki; Prakash, S.; Reddy, Palli; Misra, V. N. (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 40–57.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008>
- Edil, Tuncer; Acosta, Hector; Benson, Hector (2006). Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 283–294.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:2\(283\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:2(283))
- Fernández-Jiménez, Ana; Cristelo, Nuno; Miranda, Tiago.; Palomo, Ángel (2017). Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1200–1209.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.151>
- Firoozi, Ali; Guney, Olgun; Firoozi, Ali; Baghini, Mojtaba (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 26.
<https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Garnica, P.; Perez, A.; Gómez, J.A.; Yhaaraby, E. (2002). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. Instituto Mexicano Del Transporte, N°201, 68. Retrieved from
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt201.pdf>
- Gartner, Ellis (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
- Ghadir, Pooria; Ranjbar, Navid (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361–371.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>
- Gutt, W.; Nixon, P. J. (1979). Use of waste materials in the construction industry Analysis of the RILEM Symposium by Correspondence. *Matériaux et Construction*, 12(70), 255–306.
<https://doi.org/doi:10.1007/bf02473543>
- Habert, G.; D’Espinose De Lacaillerie, J. B.; Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>

- Hall, M. R.; Najim, K. B.; Keikhaei, P. (2012). Soil stabilisation and earth construction: materials, properties and techniques. In *Modern earth buildings* (pp. 222–255). Woodhead Publishing Limited.
<https://doi.org/doi:10.1533/9780857096166.2.222>
- Hasan, Umair; Chegenizadeh, Amin; Budihardjo, Mochamad; Nikraz, Hamid (2016). Experimental Evaluation of Construction Waste and Ground Granulated Blast Furnace Slag as Alternative Soil Stabilisers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(6), 1707–1722.
<https://doi.org/10.1007/s10706-016-9983-z>
- Higgins, D. (2005). *Soil stabilisation with ground granulated blastfurnace slag*. UK Cementitious Slag Makers Association (CSMA). Retrieved from
http://www.ukcsma.co.uk/files/csma_report_on_soil_stabilisation.pdf
- Horiuchi, Sumio; Kawaguchi, Masato; Yasuhara, Kazuya (2000). Effective use of fly ash slurry as fill material. *Journal of Hazardous Materials*, 76(2–3), 301–337.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00205-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00205-3)
- Horpibulsuk, Suksun; Rachan, Runglawan; Chinkulkijniwat, Avirut; Raksachon, Yuttana; Suddeepong, Apichat (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011–2021.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>
- Hughes, Paul; Glendinning, Stephanie (2004). Deep Dry Mix Ground Improvement of a Soft Peaty Clay Using Blast Furnace Slag and Red Gypsum. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 37(1996), 205–216.
- Ismeik, Muhannad; Shaqour, Fathi (2020). Effectiveness of lime in stabilising subgrade soils subjected to freeze–thaw cycles. *Road Materials and Pavement Design*, 21(1), 42–60.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1479289>
- Jing, Ruxin; Zhang, Feng; Feng, Decheng; Liu, Xueyan; Scarpas, Athanasios (2019). Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Compacted Silty Clay Subjected to Freeze–Thaw Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019244.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002893](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002893)
- Joshi, Amruta; Patel, Satyajit; Shahu, Jagdish (2019). Utilization of Class ‘C’ Fly Ash in Flexible Pavement System — A Review. In: Sundaram R., Shahu J., Havanagi V. (eds). *Geotechnics for Transportation Infrastructure*, 29, 629–638.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-6713-7_50
- Khemissa, Mohamed; Mahamedi, Abdelkrim (2014). Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. *Applied Clay Science*, 95, 104–110.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.017>
- Kim, Bumjoo; Prezzi, Monica; Salgado, Rodrigo (2005). Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), 914–924.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:7(914))
- Kim, Yeonbae; Worrell, Ernst (2002). CO2 emission trends in the cement industry: An international comparison. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(2), 115–133.
<https://doi.org/10.1023/A:1022857829028>

- Kumar, Praveen; Chandra, Satish; Vishal, R. (2006). Comparative Study of Different Subbase Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(4), 576–580.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:4\(576\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:4(576))
- Leitão, Dinis; Barbosa, José; Soares, Edgar; Miranda, Tiago; Cristelo, Nuno; Briga-Sá, Ana (2017). Thermal performance assessment of masonry made of ICEB's stabilised with alkali-activated fly ash. *Energy and Buildings*, 139, 44–52.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.068>
- Liu, Jin; Shi, Bin; Jiang, Hongtao; Huang, He; Wang, Gonghui; Kamai, Toshitaka (2011). Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*, 117(1–2), 114–120.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.011>
- Luukkonen, Tero; Abdollahnejad, Zahra; Yliniemi, Juho; Kinnunen, Paivo; Illikainen, Mirja (2018). One-part alkali-activated materials : A Review. *Cement and Concrete Research Journal*, 103, 21–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>
- Ma, Cong; Chen, Bing; Chen, Longzhu (2016). Effect of organic matter on strength development of self-compacting earth-based construction stabilized with cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 123, 414–423.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.018>
- Makusa, Gregory (2013). *State of the Art Review Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice* (tesis de pregrado). University of Technology, Luleå, Sweden.
- Mallela, J.; Quintus, H. Von; Smith, K. L. (2004). *Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design* (tesis de pregrado). University Avenue , Virginia, USA.
- Manimaran, A.; Santhosh, S.; Ravichandran, P. T. (2018). Characteristics study on sub grade soil blended with ground granulated blast furnace slag. *Rasayan Journal of Chemistry*, 11(1), 401–404.
<https://doi.org/10.7324/RJC.2018.1112044>
- McDowell, Chester (1959). Stabilization of Soils with Lime, Lime-Flyash, and Other Lime Reactive Materials. *Highway Research Board Bulletin*, 231, 60–66. Retrieved from
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/231/231-004.pdf>
- McLellan, Benjamin; Williams, Ross; Lay, Janine; Van Riessen, Arie; Corder, Glen (2011). Costs and carbon emissions for geopolymers pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Miao, Shiding; Wei, Cundi; Shen, Zhaopu; Wang, Xuelian; Luo, Feng; Huang, Xiaoming (2017). Stabilization of Highly Expansive Black Cotton Soils by Means of Geopolymerization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002023](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002023)
- Millogo, Younoussa; Morel, Jean-Claude; Traoré, Karfa; Ouedraogo, Raguilnaba (2012). Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. *Construction and Building Materials*, 26(1), 663–669.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.069>

- Miranda, Tiago; Leitão, Dinis; Oliveira, Joel; Corrêa-Silva, Manuela; Araújo, Nuno; Coelho, João; Fernández-Jimenez, Ana; Cristelo, Nuno (2020). Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (sub)base layer. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118427.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118427>
- Moghal, Arif (2017). State-of-the-Art Review on the Role of Fly Ashes in Geotechnical and Geoenvironmental Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017072.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001897](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001897)
- Muñoz, J. F.; Easton, T.; Dahmen, J. (2015). Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials. *Construction and Building Materials*, 95, 86–95.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.144>
- Nortcliff, Stephen; Hulpke, Herwig; Bannick, Claus; Terytze, Konstantin; Knoop, Gerhard; Bredemeier, Michael; Schulte-Bisping, Hubert (2012). Soil, 1. Definition, Function, and Utilization of Soil. *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 33, 399–419.
<https://doi.org/10.1002/14356007.b07>
- Omar-Sore, Seick; Messan, Adamah; Prud'homme, Elodie; Escadeillas, Gilles; Tsobnang, François (2018). Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. *Construction and Building Materials*, 165, 333–345.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>
- Palanisamy, P.; Kumar, P. S. (2018). Effect Molarity in Geopolymer earth Brick Reinforced With Fibrous Coir Wastes Using Sandy Soil and Quarry Dust as Fine Aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 347–358.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.01.009>
- Pandey, Anil; Rabbani, Ahsan (2017). Stabilisation of Pavement Subgrade Soil Using Lime and Cement : Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(6), 5733–5735.
- Passuello, Ana; Rodríguez, Erich; Hirt, Eduardo; Longhi, Marlon; Bernal, Susan; Provis, John; Kirchheim, Ana (2017). Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. *Journal of Cleaner Production*, 166, 680–689.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.007>
- Phummiphan, Itthikorn; Horpibulsuk, Suksun; Rachan, Runglawan; Arulrajah, Arul; Shen, Shui-Long; Chindaprasirt, Prinya (2017). High Calcium Fly Ash Geopolymer Stabilized Lateritic Soil and Granulated Blast Furnace Slag Blends as a Pavement Base Material. *Journal of Hazardous Materials*, 341, 257–267.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.067>
- Portland Cement Association. (1992). *Soil-Cement Laboratory Handbook*. Illinois: Engineering Bulletin.
- Pourakbar, Shahram; Huat, Bujang; Asadi, Afshin; Fasihnikoutalab, Mohammad (2016). Model Study of alkali-Activated Waste Binder for soil stabilization. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(4), 35.
<https://doi.org/10.1007/s40891-016-0075-1>
- Provis, John; Bernal, Susan (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Reviews of Materials Research*, 44, 299–327.
<https://doi.org/doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>

- Prusinski, Jan; Bhattacharja, Sankar (2007). Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1652(1), 215–227.
<https://doi.org/10.3141/1652-28>
- Puppala, Anand (2016). Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice. *Transportation Geotechnics*, 9, 123–138.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.004>
- Puppala, Anand; Pedarla, Aravind (2017). Innovative ground improvement techniques for expansive soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2, 24.
<https://doi.org/10.1007/s41062-017-0079-2>
- Quintanilla, C.A. (2007). *El Estado del Arte del Suelo-Cemento en Estructuras de Pavimentos*. FICEM, Federación Interamericana del Cemento (Federacion). Panamá. Retrieved from
https://www.ibch.com/index.php?option=com_remository&Itemid=&func=startdown&id=14
- Rios, Sara; Cristelo, Nuno; Viana da Fonseca, António; Ferreira, Cristiana (2015). Structural Performance of Alkali-Activated Soil Ash versus Soil Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001398](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001398)
- Rios, Sara; Cristelo, Nuno; Viana da Fonseca, António; Ferreira, Cristiana (2016). Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains. *International Journal of Geomechanics*, 17(3).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000783](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000783)
- Rios, Sara; Ramos, Catarina; Viana da Fonseca, António; Cruz, Nuno; Rodrigues, Carlos (2016). Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads. *Procedia Engineering*, 143, 1392–1400.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.164>
- Rios, Sara; Ramos, Catarina; Viana da Fonseca, António; Cruz, Nuno; Rodrigues, Carlos (2019). Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(2), 245–267.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1275987>
- Rivera, Jhonathan; Cuarán-Cuarán, Zulenly; Vanegas-Bonilla, Nathalie; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2018). Novel use of waste glass powder: Production of geopolymeric tiles. *Advanced Powder Technology*, 29, 3448–3454.
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>
- Robayo-Salazar, Rafael; Rivera, Jhonathan; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2017). Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 149, 130–138.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.122>
- Robayo, Rafael; Mulford, Alexandra; Munera, Jorge; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2016). Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 128, 163–169.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023>
- Sargent, Paul; Hughes, Paul; Rouainia, Mohamed; White, Maggie (2013). The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. *Engineering Geology*, 152, 96–108.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.013>

- Sekhar, Darshan; Nayak, Sitaram; Preetham, H. K. (2017). Influence of Granulated Blast Furnace Slag and Cement on the Strength Properties of Lithomargic Clay. *Indian Geotechnical Journal*, 47(3), 384–392. <https://doi.org/10.1007/s40098-017-0228-8>
- Senol, Aykut; Edil, Tuncer; Bin-Shafique, Sazzad; Acosta, Hector; Benson, Craig (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(4), 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.08.005>
- Shi, Caijun; Jiménez, A. F.; Palomo, Angel (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41, 750–763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
- Silva, Rui; Soares, Edgar; Oliveira, Daniel; Miranda, Tiago; Cristelo, Nuno; Leitão, Dinis (2015). Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 75, 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.038>
- Singh, G. V. P. B.; Subramaniam, K. V. L. (2019). Influence of processing temperature on the reaction product and strength gain in alkali-activated fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 95, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.010>
- Singhi, Binod; Laskar, Aminul; Ahmed, Mokaddes (2017). Mechanical Behavior and Sulfate Resistance of Alkali Activated Stabilized Clayey Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5), 1907–1920. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0216-x>
- Sivapullaiah, P. V.; Moghal, A. A. B. (2010). Role of Gypsum in the Strength Development of Fly Ashes with Lime. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(2), 197–206. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000158](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000158)
- Syed-Zuber, S. Z.; Kamarudin, H.; Mustafa, A.; Abdullah, M.M.A.B; Bingussain, M; Salwas, M. (2013). Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7, 258-265.
- Torres-Carrasco, Manuel; Puertas, F. (2014). Sodium silicate solutions from dissolution of glasswastes. Statistical analysis. *Materiales de Construcción*, 64(314), e014. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.05213>
- Torres-Carrasco, Manuel; Puertas, F. (2015). Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. *Journal of Cleaner Production*, 90, 397–408.
- Tremblay, Hélène; Duchesne, Josée; Locat, Jacques; Leroueil, Serge (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 535–546. <https://doi.org/10.1139/t02-002>
- Trussell, S.; Spence, R. D. (1994). A Review of Solidification/Stabilization Interferences. *Waste Management*, 14(6), 507–519. [https://doi.org/doi:10.1016/0956-053X\(94\)90134-1](https://doi.org/doi:10.1016/0956-053X(94)90134-1)
- U.S.Department of Transportation. (1992). *Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations*. Volume II, Mixture Desing Considerations. 400 Seventh Street, SW.: Washington, D.C. 20590.

- Wu, Yanguang; Lu, Bowen; Bai, Tao; Wang, Hao; Du, Feipeng; Zhang, Yunfei; Cai, Lu; Jiang, Can; Wang, Wenjun (2019). Geopolymer, green alkali-activated cementitious material synthesis, applications and challenges. *Construction and Building Materials*, 224, 930–949.
<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.112>
- Yi, Yaolin; Zheng, Xu; Liu, Songyu; Al-Tabbaa, Abir (2015). Comparison of reactive magnesia- and carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil. *Applied Clay Science*, 111, 21–26.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.023>
- Yunus, Mohd; Zurairahetty, Nor (2007). *Stabilization of Organic Clay Using Lime-Added Salt*. Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Civil Engineering. Retrieved from
<http://eprints.utm.my/id/eprint/11383/>
- Zhang, Mo; Guo, Hong; El-Korchi, Tahar; Zhang, Guoping; Tao, Mingjiang (2013). Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 47, 1468–1478.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>
- Zhao, Honghua; Ge, Louis; Petry, Thomas; Sun, Yi-Zhen (2014). Effects of chemical stabilizers on an expansive clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), 1009–1017.
<https://doi.org/10.1007/s12205-013-1014-5>

Materiales vitrocerámicos obtenidos a partir de residuos sólidos tales como cenizas, escorias y vidrio: revisión

Glass-ceramic obtained from solid waste such as ash, slag, and glass waste: review

Estefanía Montoya - Quesada¹
Mónica A. Villaquirán-Caicedo²
Ruby Mejía de Gutiérrez³

¹Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: estefania.montoya.quesada@correounivalle.edu.co
orcid: 000-0002-5502-0370

²Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: monica.villaquiran@correounivalle.edu.co
orcid: 0000-0001-5145-0472

³Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: ruby.mejia@correounivalle.edu.co
orcid: 0000-0002-5404-2738

Recibido: 08-01-2020 Aceptado: 25-06-2020

Cómo citar: Montoya-Quesada, Estefanía; Villaquirán-Caicedo, Mónica; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2020). Materiales vitrocerámicos obtenidos a partir de residuos sólidos tales como cenizas, escorias y vidrio: revisión. *Informador Técnico*, 84(2), 227-248.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2900>

Resumen

El uso de residuos y subproductos industriales como reemplazo parcial o total de materias primas vírgenes para la producción de nuevos materiales, se ha convertido en una parte vital de la gestión de desechos, lo cual ha dado lugar a tecnologías innovadoras que permiten extender su aplicación al desarrollo de nuevos productos, contribuyendo así a la menor contaminación ambiental y a los conceptos de la economía circular. En los últimos años, la tecnología de vitrificación de residuos se ha considerado un procedimiento atractivo para el tratamiento de diferentes tipos y mezclas de residuos para la obtención de vidrios y vitrocerámicas. El presente artículo realizó una revisión de investigaciones relacionadas con la producción de vitrocerámicas densas realizadas entre 1994 y 2019, específicamente las que han utilizado cenizas, escorias y residuos de vidrio. La revisión revela que se han acumulado considerables conocimientos y experiencia en el proceso de transformación de los desechos base silicatos, en productos útiles de vidrio y vitrocerámicas con propiedades similares o incluso superiores a los obtenidos a partir de materias primas no renovables, abriendo nuevos campos de aplicación en cerámicas avanzadas.

Palabras clave: vitrificación; cristalización; vidrio; tratamiento térmico; subproductos industriales.

Abstract

The use of industrial waste and by-products as a partial or total replacement of raw materials for the production of new materials has become an important part of waste management, which has given rise to innovative technologies that allow its application to be extended to the development of new products, thus contributing to less environmental pollution and the concepts of the circular economy. In recent years, waste vitrification technology has been considered an interesting alternative for treating of different waste to obtain glass and glass-ceramics. This manuscript conducted a review of research related to the production of dense glass-ceramics carried out between 1994 and 2019 years. Specifically, those that have used fly ash, granulated blast-furnace slag, and glass cullet wastes. The review reveals that considerable knowledge and experience have

been accumulated in the process of transformation silicate-based wastes into a useful glass and glass-ceramic products with properties similar or even superior to those obtained from non-renewable raw material, opening up new fields of application in advanced ceramics.

Keywords: vitrification; crystallization; glass; heat treatment; industrial wastes.

1. Introducción

Los materiales vitrocerámicos son materiales policristalinos de grano fino, formados cuando los vidrios de composiciones adecuadas son tratados térmicamente y llevados mediante una cristalización controlada al estado de menor energía, el estado cristalino (Rawlings; Wu; Boccaccini, 2006). Estos materiales combinan las propiedades especiales de las cerámicas sinterizadas convencionales con las distintivas características de los vidrios en un solo material (Höland; Beall, 2012), por lo que se consideran materiales cerámicos sofisticados debido a las características especialmente atractivas del producto final, tales como alta dureza, mínima porosidad y elevado módulo de elasticidad (Shackelford, 2005).

Históricamente, la producción de vitrocerámicas se remonta al año 1789, cuando el químico francés René-Antoine Ferchault produjo vidrio parcialmente cristalizado a partir de vidrio sódico-cálcico de botellas, dando como resultado un material opaco. Sin embargo, debido a la cristalización superficial incontrolada, el producto se deformó y presentó baja resistencia, por lo que la idea se desechó (Montazerian; Singh; Dutra, 2015). Fue a mediados de los años 50, cuando se otorgó la primera patente de invención de materiales vitrocerámicos, al químico Stanley Donald Stookey por descubrir las vitrocerámicas accidentalmente por la cristalización de fotoform, un vidrio de silicato de litio fotosensible que contiene nanopartículas de plata dispersas en la matriz (Höland; Beall, 2012; Montazerian *et al.*, 2015; Rincón; Romero, 1996). El material obtenido y patentado fue comercializado por Corning Glass Works en 1957 bajo el nombre de Pyroceram (código de vidrio 9606) (Deubener *et al.*, 2018). Desde entonces, los materiales vitrocerámicos han sido objeto de investigación en cuanto al desarrollo de nuevas composiciones químicas, implementación de agentes nucleantes, tratamientos térmicos, microestructuras, propiedades y aplicaciones como materiales de construcción (Montazerian *et al.*, 2015). Sin embargo, la escasez de ciertas reservas minerales ha conducido a la búsqueda de nuevas materias primas, entre las cuales algunos subproductos y residuos industriales han venido siendo investigados como una contribución al uso eficiente de los recursos del mundo. En particular el reciclaje y el aprovechamiento de desechos sólidos, no solo puede resolver la contaminación ambiental, sino también lograr productos con un alto valor agregado (Lu; Lu; Peng; Li; Jiang; 2014).

La producción anual de desechos sólidos es tan grande que la mayoría de estos desechos mayormente son depositados en vertederos (Lu *et al.*, 2014). De acuerdo a lo reportado por Karamberi y Moutsatsou (2004), el uso de materiales de desecho como reemplazo parcial o total de materias primas vírgenes para la producción de diferentes materiales, se ha convertido en una parte vital de la gestión de desechos en los países desarrollados. Grandes cantidades de desechos sólidos son generados en la actividad industrial y doméstica, los cuales deben ser eliminados de manera segura y económica. Es por ello, que se han implementado tecnologías innovadoras que permitan extender la utilización de residuos y subproductos, en especial los tipo aluminosilicatos, para la obtención de nuevos productos (Karamberi; Moutsatsou 2004). Las aplicaciones incluyen diferentes sectores industriales, siendo el área de materiales de construcción una de las más atractivas debido al gran volumen de materiales involucrados y la capacidad de uso del material a granel (Karamberi; Moutsatsou 2004; Lu *et al.*, 2014).

2. Metodología de la revisión de literatura

Este documento presenta una revisión de las investigaciones realizadas entre los años 1994 – 2019 para la obtención de vitrocerámicas densas a partir de residuos y subproductos industriales, tales como, cenizas, escorias siderúrgicas y residuos de vidrio, con el objetivo de conocer los alcances y las tendencias de las investigaciones que se han presentado a lo largo de las últimas décadas, complementando de esta manera las revisiones de literatura ya existentes. Las palabras claves utilizadas para la búsqueda fueron “*glass-ceramic*”, “*ash*”, “*glass-cullet*”, “*ashes*”. La ecuación de búsqueda para la revisión en la base de datos Scopus fue la siguiente:

Your query : (TITLE-ABS-KEY(“*glass-ceramic*” AND “*wastes*” AND “*ash*” OR “*slag*” OR “*glass cullet*” OR “*glass waste*” OR “*ashes*” AND NOT “*porous*” AND NOT “*foam*”) AND (EXCLUDE (PUBYEAR,2020)) AND (EXCLUDE (DOCTYPE,“cp”) OR EXCLUDE (DOCTYPE,“re”) OR EXCLUDE (DOCTYPE,“cr”) OR EXCLUDE (DOCTYPE,“tb”)))

Al examinar en la base de datos Scopus, las publicaciones encontradas que contenían al menos uno de los desechos mencionados anteriormente, se aclara que fueron excluidas los resultados de búsqueda sobre materiales espumados y vitrocerámicas porosas; finalmente el número total de publicaciones fue de 288 artículos (Figura 1). Como se observa en la Figura 1. la tendencia en este tema es creciente, debido a que cada vez son más fuertes las regulaciones ambientales sobre disposición de residuos y se promueve aún más una economía circular donde prima la conciencia ambiental con reutilización y valorización de residuos.

De los 288 artículos encontrados, 184 utilizan cenizas, 107 escorias siderúrgicas y 69 reportan el uso de residuo de vidrio para la obtención de vitrocerámicas densas. China se ubica como el primer país con más publicaciones sobre la temática con aproximadamente el 26 %, seguido de un 16 % por Italia y un 9 % correspondiente a España de acuerdo con las fuentes de la base de datos de SCOPUS. En el continente americano la suma de las publicaciones solo corresponde a un 8 % del total.

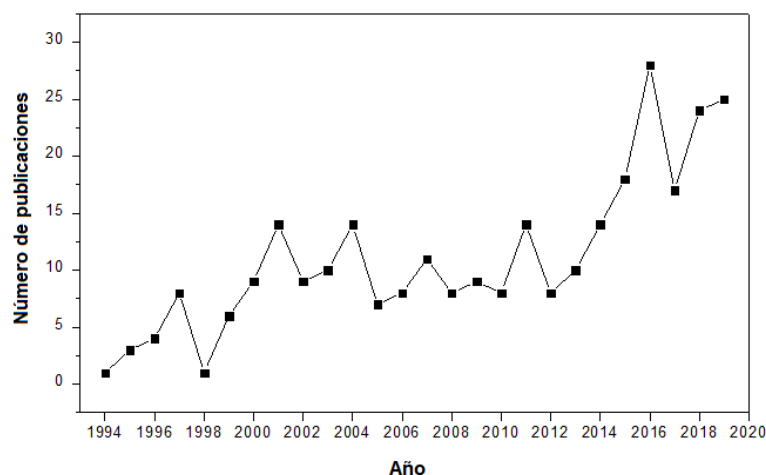


Figura 1. Número de publicaciones sobre vitrocerámicas densas obtenidas a partir de desechos tales como cenizas, escorias y residuos de vidrios examinados entre los años 1994-2019
Fuente: datos extraídos de la base de datos Scopus (2020).

La extensa literatura sugiere que las tecnologías de vidrio y vitrocerámica pueden convertir composiciones químicas complejas derivadas de los residuos de silicato en materiales útiles con aplicaciones prometedoras en el mercado, permitiendo al mismo tiempo el manejo de residuos peligrosos (Chinnam; Francis; Will; Bernardo; Boccaccini, 2013). Según lo reportado por Colombo, Brusatin, Bernardo y Scarinci (2003), la vitrificación es una tecnología bien establecida que implica la conversión de los desechos en un vidrio estable y

homogéneo (silicato), a través de un tratamiento térmico de fusión. Entre las ventajas de esta técnica se destaca la alta estabilidad química, la inmovilización de metales pesados y elementos radiactivos, la destrucción de componentes orgánicos y también que el proceso permite una gran reducción del volumen de residuos de diferente composición y forma, como líquidos, lodos, sólidos o sus mezclas, permitiendo el tratamiento de diferentes tipos de desechos, con o sin un tratamiento previo (Colombo *et al.*, 2003; Karamberi; Moutsatsou 2004).

Es así como el desarrollo de nuevos vidrios y materiales vitrocerámicos, producidos mediante el reciclaje de residuos sólidos, adquiere una importancia particular. La vitrocerámica fabricada con desechos ha demostrado su potencial para competir con productos convencionales obtenidos a partir de materias primas naturales, especialmente cuando se consideran las propiedades mecánicas y aplicaciones estructurales (Chinnam *et al.*, 2013).

3. Proceso de fabricación de vitrocerámicas

La mayoría de los vidrios inorgánicos pueden transformarse desde un estado no cristalino a un estado cristalino por un tratamiento térmico a elevada temperatura. Este proceso denominado desvitrificación, produce un material policristalino en una matriz vítrea y, por lo tanto, no es transparente (Callister, 2001). Es de resaltar, que no todos los vidrios desvitrifican, sólo algunas composiciones específicas son precursoras adecuadas para los vitrocerámicos, ya que algunos vidrios son muy estables, mientras que otros cristalizan muy rápido de manera no controlada, lo que resulta en microestructuras no deseadas (Rawlings *et al.*, 2006). Sin embargo, en algunos vidrios, esta transformación de desvitrificación puede ser controlada hasta el punto de que puede producirse un material de grano muy pequeño, el cual, esté libre de tensiones residuales sin vacíos, microgrietas u otra porosidad (Callister, 2001).

En general, la producción de las vitrocerámicas se realiza en dos pasos que involucran la obtención de un vidrio a través de la técnica de enfriamiento por fusión a altas temperaturas (1100 – 1600 °C). Posteriormente, el vidrio recocido o triturado se vuelve a calentar a una temperatura específica para que ocurra una cristalización parcial en el vidrio (Karmakar; Rademann; Stepanov, 2016; Sarrigani; Amiri, 2019). El control estricto de la composición química del vidrio original y los parámetros del proceso (velocidad de calentamiento, tratamiento térmico, tiempo de retención y velocidad de enfriamiento), son muy importantes ya que proporcionan las condiciones para la precipitación de las fases cristalinas en los vidrios y microestructura que garantizan las propiedades físicas y operativas de los materiales (Francis, 2004; Sarrigani; Amiri, 2019; Suzdal'tsev, 2002).

Para la síntesis de materiales vitrocerámicos existe una amplia variedad de métodos entre los principales se pueden señalar los siguientes: método convencional, método convencional modificado y método petrúrgico. A continuación, se describe cada uno.

3.1. Método convencional

El tratamiento térmico del vidrio sólido es la vía tradicionalmente utilizada (Callister, 2001). Es el método denominado convencional para producir vitrocerámicas mediante la desvitrificación controlada de un vidrio en dos etapas. La primera etapa es un tratamiento térmico a baja temperatura (T_N), la cual, facilita una alta velocidad de nucleación formando así una alta densidad de núcleos en todo el interior del vidrio. La segunda etapa consiste en un tratamiento térmico a altas temperaturas (T_C) para promover el crecimiento de los cristales a una velocidad razonable. En la Figura 2 se observa la dependencia de las velocidades de nucleación y crecimiento de los cristales con respecto a la temperatura (Rawlings *et al.*, 2006).

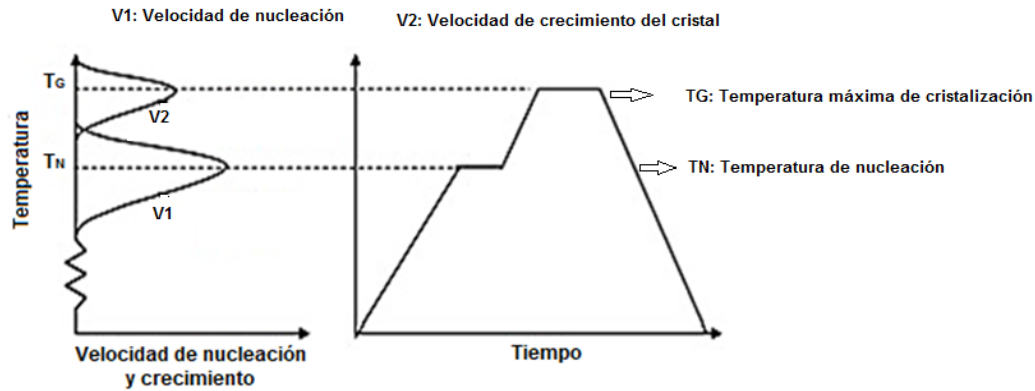


Figura 2. Cristalización de un vidrio para formar un vitrocerámico mediante el método convencional
Fuente: adaptada de Rawlings *et al.* (2006, p. 734).

La representación de la formación/no formación de fases cristalinas o núcleos en la matriz cristalina en función de la temperatura y el tiempo de tratamiento, da lugar a las denominadas curvas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación), las cuales, permiten visualizar fácilmente los intervalos de nucleación y crecimiento cristalino. Autores como Barbieri, Corradi y Lancellotti (2001) determinaron las curvas TTT en vidrios obtenidos a partir de mezclas de diferentes residuos como ceniza volante, vidrio y escoria de dolomita para encontrar los rangos de cristalización relativos, así como las curvas de desvitrificación de estos vidrios. Los diagramas se construyeron a partir de los resultados de difracción de rayos X (DRX). A partir de ello fue posible determinar la cinética de cristalización y la velocidad de enfriamiento crítica (rango de 12 ° - 42 °C/min) (Barbieri *et al.*, 2001).

3.2. Método convencional modificado

La razón del tratamiento térmico en dos etapas del vidrio es una consecuencia de la limitada superposición entre las curvas de nucleación y velocidad de crecimiento (Figura 3). Si existe una superposición extensa de las curvas de velocidad, entonces la nucleación y el crecimiento pueden tener lugar durante un tratamiento térmico de una sola etapa a temperatura T_{NG} como se indica en la Figura 3. Las curvas de velocidad, particularmente la curva de velocidad de nucleación, son sensibles a la composición y optimizando la composición de vidrio, en algunos casos, es posible obtener la superposición necesaria mediante la correcta elección de los agentes nucleantes. Esto se logró por primera vez para el sistema de vitrocerámica conocida como “Silceram” (Rawlings *et al.*, 2006).

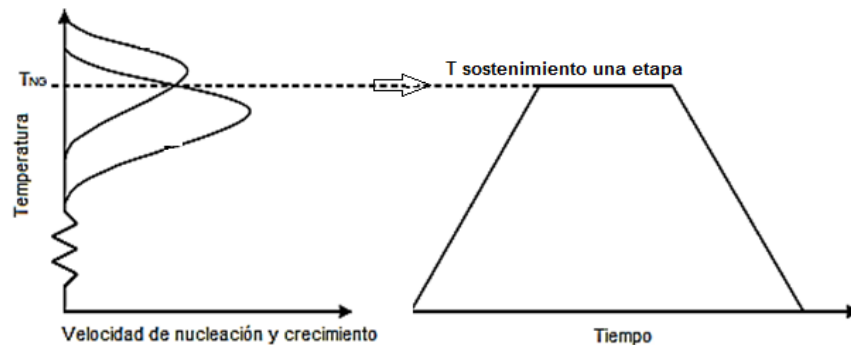


Figura 3. Cristalización de un vidrio para formar un vitrocerámico mediante el método convencional modificado (1 sola etapa)

Fuente: adaptada de Rawlings *et al.* (2006, p. 735).

3.3. Método petrúrgico

Este método consiste en el enfriamiento lento de un vidrio desde el estado fundido (*temperatura liquidus*) causando la nucleación y el crecimiento de ciertas fases cristalinas hasta temperatura ambiente (Figura 4) (Isa, 2011). La vía petrúrgica es la más comúnmente aplicada en la obtención de vitrocerámicas, a partir de materias primas naturales o residuos industriales (Rawlings *et al.*, 2006; Rincón; Romero, 1996).

De acuerdo con lo reportado por Rincón y Romero (1996), en el método petrúrgico es necesario un riguroso control de la composición química inicial, la cual, debe favorecer la obtención de fundidos en los que puedan cristalizar fases con facilidad de sustituciones isomorfas, ya que la desvitrificación va a depender de la capacidad de los constituyentes para organizarse entre sí y formar estructuras cristalinas estables. Además, se debe tener un estricto control en las velocidades de enfriamiento, ya que estas influyen en la microestructura y obtención de fases cristalinas (Francis; Rawlings; Boccaccini, 2002).

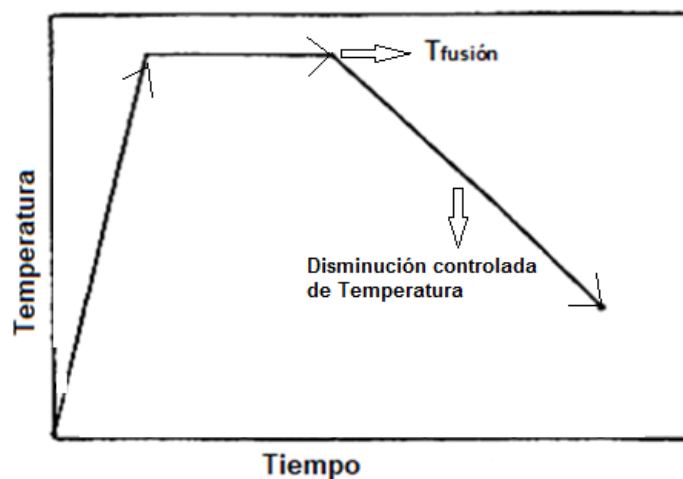


Figura 4. Método petrúrgico

Fuente: adaptada de Rincón y Romero (1996, p. 94).

La microestructura de las vitrocerámicas fabricadas a partir de 100 % de ceniza volante difiere significativamente al variar la velocidad de enfriamiento. A 1 °C/min presentan una fase cristalina dendrítica (fase hematita) distribuida en la matriz multifásica, mientras que en las muestras enfriadas a 10 °C/min, se ha evidenciado una morfología de los cristales tipo listones. La morfología de la fase cristalina resultante de la adición de 40 % en peso de vidrio a un velocidad de enfriamiento de 1 °C/min, se caracterizó por una red dendrítica, que se atribuyó a la fase plagioclasa, mientras que la muestra con un 40 % en peso de vidrio enfriada a 10 °C/min tiene una estructura en forma de fibra dispersa que se asocia a la fase magnetita, ya que la rápida velocidad de enfriamiento de 10 °C/min, no permitió el tiempo suficiente para que los átomos de hierro se reorganizaran y alcanzarán el grado de orden de cristalización que facilitan la formación de augita y plagioclasa. Sin embargo, Francis, Rawlings y Boccaccini (2002) reportan que velocidades de enfriamiento más rápidas (10 °C/min) favorece la cristalización de la fase magnetita y, en consecuencia, las muestras presentan propiedades magnéticas.

De acuerdo a Francis, Rawlings y Boccaccini (2002), el método petrúrgico representa una ruta simple y económica para la obtención de vitrocerámicas, a partir de residuos de silicato con altos contenidos de hierro. Tanto el método convencional modificado (una sola etapa) como el método petrúrgico son más económicos en comparación con el método convencional que involucra dos etapas.

3.4. Sinterización y cristalización de polvos vítreos

Consiste en la conformación por compactación en frío de un polvo, seguido de un tratamiento térmico a alta temperatura para sinterizar el compacto. Los polvos se densifican a temperaturas relativamente bajas aprovechando un mecanismo de sinterización de flujo viscoso; después de la densificación, el material se somete a un tratamiento térmico de cristalización para obtener la microestructura de vitrocerámica requerida. Tanto la densificación como la cristalización pueden tener lugar durante un solo paso de sinterización (Isa, 2011).

Las fases presentes y la microestructura final del material vitrocerámico, son una función del método o ruta de obtención seleccionada, de ahí la importancia de seleccionar el método que más se adapte al alcance de la investigación y/o recursos presentes. En cada uno de los procesos de obtención de vitrocerámicas mencionados con anterioridad, se pueden obtener materiales desde transparentes hasta opacos y en una gran variedad de colores dependiendo de las materias primas empleadas, los cuales, con un diseño adecuado de composición y microestructura, pueden tener numerosas aplicaciones en el campo doméstico, industrial y arquitectónico (Rincón; Romero, 1996).

4. Vitrocerámicas obtenidas a partir de residuos

El reciclaje de residuos sólidos mediante la aplicación de tecnologías modernas representa una opción eficaz para utilizar con seguridad los materiales desechados. El procesamiento de materiales secundarios usualmente requiere menos energía y produce menos contaminación que la producción de cantidades equivalentes de materias primas naturales (Chinnam *et al.*, 2013). De acuerdo con lo reportado por Silva, de Brito, Lynn y Dhir (2019), se estimó en el 2012 una producción mundial de residuos sólidos municipales de aproximadamente 1.300 millones de toneladas y se espera que aumente a 2.200 millones de toneladas para 2025. Estos residuos sólidos incluyen una amplia gama de componentes: alimentos, plásticos, papel, metales, vidrio y textiles, cuya cantidad varía de acuerdo con las prácticas de las diferentes culturas, políticas y legislación sobre el manejo de los desechos y, en general, sectores económicos de diferentes regiones (Silva *et al.*, 2019).

El proceso de vitrificación y desvitrificación de vitrocerámicas permite neutralizar diferentes desechos industriales potencialmente peligrosos y, además, estabilizar y reducir el volumen de desechos entre un 20 % y un 97 % dependiendo de su naturaleza, obteniendo de esta manera un valor agregado de los desechos (Dávalos; Bonilla; Villaquirán-Cacedo; Mejía de Gutiérrez, 2020). Aunque el diseño de materiales vitrocerámicos mediante residuos industriales, en particular a partir de escorias, se desarrolló en los años 60's en la antigua Unión Soviética por parte de Kitaigorodski y Pavlushkin (Karamanov, 2009), algunas de estas vitrocerámicas se han convertido en productos comerciales como el Slagsitall (desvitrificado en forma de cristales de wollastonita y anortita), Slageram, Slagkyston o en productos preindustriales como el Silceram (desvitrificado en piroxeno) (Karamanov, 2009).

Al utilizar desechos industriales como materia prima para la obtención de vitrocerámicas, el proceso se justifica económicamente solo si se obtienen materiales con valor comercial (Karamanov, 2009). Al incorporar residuos sólidos en las formulaciones iniciales de los productos cerámicos, debido a la heterogeneidad de los mismos, es importante adaptar los residuos a la producción de vidrios precursores de materiales vitrocerámicos mediante el control estricto de la composición química, logrando que cada residuo contribuya con una cantidad apropiada de diferentes óxidos, porque las mezclas deben contener los componentes típicos como: formadores de la red vítrea (SiO_2 , Al_2O_3 ...), elementos modificadores (Na_2O , K_2O ...) y estabilizadores (CaO , MgO , ZnO , PbO ...) que dan lugar a la formación de vidrios estables (Barbieri *et al.*, 2001; Montoya-Quesada; Villaquirán-Cacedo; Mejía de Gutiérrez, 2019). Aunque la versatilidad del proceso de producción de materiales vitrocerámicos a partir de residuos industriales ha sido reportada en diferentes investigaciones, es de destacar el uso de escorias (Ayala; Gómez; Roether; Boccacini, 2019; Francis, 2004; Mihailova; Djambazki; Mehandjiev, 2011; Wang; Ni; Jia; Zhu; Huang, 2010; Yang *et al.*, 2014), ceniza de carbón (Barbieri *et al.*, 2001; Leroy *et al.*, 2001; Francis *et al.*,

2002; Cheng; Ueng; Chen; Chiu, 2002; Luan; Li; Su; Cui, 2010; Hieu; Wang; Chen; Xuan; Hoang, 2012; Montoya-Quesada *et al.*, 2019), residuos de vidrio (Kalirajan; Ranjeeth; Vinothan; Vidyavathy; Srinivasan, 2016), residuos de bagazo de caña (Teixeira *et al.*, 2014), residuos de cobre (Yang *et al.*, 2014) e inclusive mezclas de diferentes residuos (Barbieri *et al.*, 1999; Barbieri *et al.*, 2000; Francis; Rawlings; Sweeney; Boccaccin, 2004; Yoon; Yun, 2008; Cedillo, 2010; Ljati; Kamusheva; Grozdanov; Paunovi; Karamanov, 2015). En general, estos estudios reportan propiedades similares o incluso superiores a los obtenidos en vitrocerámicas convencionales.

En la presente revisión se abordarán principalmente las vitrocerámicas obtenidas a partir de ceniza de carbón, escoria y residuo de vidrio; debido a los altos volúmenes generados de estos materiales en Colombia, que los hace residuos potencialmente aptos para su aplicación en procesos industriales y particularmente en la producción de vitrocerámicas densas. Se estima que el 40 % de la energía generada en el mundo es procedente de la quema de carbón, lo cual equivale a 7.700 millones de toneladas de este mineral consumido anualmente (World Energy Council, 2016). De acuerdo con lo reportado por Mejía, Rodríguez y Mejía De Gutiérrez (2014), en Colombia, las termoeléctricas más importantes (e.g., Termozipa, Termopaipa y Termosochagota) generan alrededor de 600 kt/año de residuos procedentes de la quema de carbón mineral más conocido como ceniza volante, un subproducto rico en sílice y alúmina. Por otra parte, en el año 2012, se estimó una producción de aceros en Colombia de 1,3 millones de toneladas (Sánchez, 2014) y de acuerdo con Rondón *et al.* (2018), por cada tonelada de acero producida aproximadamente alrededor del 20 % en peso, corresponde a subproductos como escoria siderúrgica y en el mundo se estima que son producidas anualmente 250 toneladas de escoria siderúrgica (Zeynel, 2018). Las cantidades mostradas anteriormente indican que la producción de escorias es importante, y este residuo se caracteriza principalmente por poseer altos contenidos de óxido de calcio (Sánchez, 2014). El residuo de vidrio por su parte, es un material 100 % reciclable rico en sílice y con cantidades considerables de Na₂O (material ampliamente conocido como fundente), del cual estadísticamente no hay información clara sobre la cantidad total de residuos producidos en el mundo, pero se estima que el 7 % de los residuos sólidos urbanos corresponden a desechos de vidrio (Jani; Hogland, 2014).

4.1. Producción de vitrocerámicas basadas en cenizas

En la literatura se encuentran resultados con diferentes tipos de cenizas, entre las cuales se encuentran las cenizas de carbón, cenizas de diferentes residuos agrícolas y cenizas de residuos municipales. A continuación, se describen los principales hallazgos.

La ceniza volante es un subproducto de las calderas industriales a base de carbón de centrales eléctricas y centrales térmicas. Las composiciones elementales de las cenizas volantes varían según el tipo de carbón, el grado de pulverización y el tipo de colectores utilizados, incluso cuando las cenizas volantes se obtienen de la misma fuente (Ayala *et al.*, 2019). De acuerdo con lo reportado por Liu, Yang y Zhang (2019), las cenizas volantes y las cenizas de fondo representan del 20 % al 30 % del peso total durante el proceso de incineración. La principal diferencia entre las cenizas volantes y las cenizas de fondo es el menor contenido residual de carbono en las primeras, una proporción mayor de partículas esféricas, finas y con una distribución de tamaño de partícula más estrecha (Benavidez; Grasselli; Quaranta, 2003). Estos residuos, especialmente las cenizas volantes, contienen una cantidad considerable de sales, metales pesados lixiviables y compuestos orgánicos tóxicos (Liu *et al.*, 2019). Adicionalmente, son materiales que contienen altos contenidos de sílice (Isa, 2011) y, en ocasiones, alto contenido de óxido de hierro, lo cual les permite ser residuos potenciales para desarrollar vitrocerámicas con fases magnéticas bajo un procesamiento adecuado (Chinnam *et al.*, 2013).

DeGuire y Risbud (1984) comenzaron a usar cenizas volantes de carbón de Illinois como materia prima para la preparación de vitrocerámicas mediante el método convencional. En artículos reportados por autores como Francis, Rawlings, Sweeney y Boccaccini (2002); Kalirajan *et al.* (2016); Lu *et al.* (2014), la ceniza volante utilizada para la fabricación de vitrocerámicas generalmente es calcinada a 800 °C durante 2 h para eliminar cualquier compuesto volátil, incluidos azufre y carbono, y, en ocasiones, es necesario adicionar otros residuos

u otros óxidos sintéticos para mejorar las condiciones de fusión y la estabilidad del vidrio obtenido. En un estudio reportado por Romero y Rincón (2000), se sintetizaron vitrocerámicas a partir de cenizas volantes de centrales térmicas y, debido a la baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y bajo contenido en CaO y MgO que generalmente presentaba esta ceniza, se adicionó residuo de vidrio y dolomita (desechos de la extracción de minerales de zinc) compensando de esta manera el déficit en estos compuestos. Por otra parte, Barbieri, Manfredini, Queralt, Rincon y Romero (1997) mezclaron cenizas volantes con dolomita flotante para obtener vidrios amorfos a 1.550 °C y con la posterior recristalización de este vidrio fueron obtenidos materiales parcialmente cristalizados. Tanto los vidrios originales como la vitrocerámica mostraron mejores propiedades térmicas y mecánicas que los vidrios convencionales y/o vitrocerámica comercial.

El estudio reportado por Barbieri *et al.* (2000), demuestra la posibilidad de vitrificar y desvitrificar hasta un 40-50 % en peso de cenizas volantes mezcladas con vidrio reciclado y dolomita, haciendo que el tratamiento de vitrificación sea un procedimiento de eliminación adecuado de estos desechos. Estos autores reportan la obtención de fases cristalinas como dióxido, augita, albita, anortita y espinela de hierro. Por su parte, Francis *et al.* (2002) mostraron que mezclas que contienen ceniza y vidrio en una proporción de 50/50 y sinterizadas a 1500 °C durante 5 horas, presentan los mejores resultados en términos de densificación y desarrollo de la microestructura. Además, estas muestras exhibieron propiedades magnéticas que se relacionaron con la presencia de una fase tipo ferrita.

Erol, Küçükbayrak y Ersoy-Meriçboyu (2007), vitrificaron tres cenizas volantes de diferente procedencia sin ningún aditivo. La fase amorfa desapareció y se produjo una fase cristalina dióxido en las muestras tratadas térmicamente. Las propiedades mecánicas, físicas y químicas de las muestras de vidrio tratadas térmicamente son mejores que las originales de las muestras de vidrio; pero tanto el vidrio como la vitrocerámica obtenida presentaron propiedades deseables para su uso industrial.

Hieu *et al.* (2012) encontraron que el tiempo de enfriamiento y las proporciones de los materiales iniciales son factores dominantes en el control de la cristalización, microestructura, características químicas y físicas de la vitrocerámica final. En su estudio determinaron las condiciones experimentales óptimas para la obtención de vitrocerámicas por el método petrórgico utilizando una mezcla de 80 % en peso de ceniza de fondo de carbón y 20 % de ceniza volante a una temperatura de fusión de 950 °C y velocidad de calentamiento de 10 °C/min, con un tiempo de enfriamiento de 1 hora. Los principales minerales que se formaron en la vitrocerámica fueron gehlenita, akermanita y wollastonita, por lo que la vitrocerámica obtenida pudo ser considerada apta para aplicaciones en el sector de construcción.

Zeng, Sun, Peng y Zheng (2019) evaluaron el efecto del tamaño de partícula de la ceniza volante en la sinterización y las propiedades de las vitrocerámicas, observando que las propiedades de absorción de agua, resistencia a la flexión y resistencia química de la vitrocerámica, mejoraron con la disminución del tamaño de partícula y alcanzaron los estándares de los materiales de decoración arquitectónica. Las principales fases cristalinas de las vitrocerámicas preparadas fueron anortita, cuarzo y mullita, a lo cual se atribuyó la buena resistencia a ácidos y álcalis a temperatura ambiente.

Chen *et al.* (2019) evaluaron la incorporación de La_2O_3 sobre la microestructura y propiedades de vitrocerámicas $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ obtenidas a partir de ceniza volante. Las muestras con 2 % La_2O_3 presentaron las mejores propiedades mecánicas (resistencia a la flexión de 238 MPa y dureza Vickers 7,57 GPa) y durabilidad química (resistencia a ácidos y álcalis de 97,5 % y 98,9 %, respectivamente).

Montoya-Quesada *et al.* (2019) evaluaron el empleo de ceniza volante, escoria siderúrgica y vidrio en una mezcla estándar con relación molar CaO/SiO_2 de 0,36 variando el contenido de ZnO como agente fluidizante entre el 4-10 % en peso. Los materiales fueron obtenidos mediante el método de sinterización, la temperatura para su cristalización fue encontrada a partir de las curvas DSC para cada muestra. Los materiales vitrocerámicos obtenidos presentan como fases principales anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), albita ($\text{Na (AlSi}_3\text{O}_8)$). La incorporación del

agente fluidizante en porcentaje superior al 7 % induce la cristalización de fases de hardystonita ($\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$) y willemite (Zn_2SiO_4). Estas vitrocerámicas presentaron buena durabilidad a álcalis con pérdidas inferiores al 1,5 % en peso.

Dávalos *et al.* (2020) estudiaron la producción de vitrocerámicas a partir de mezclas de cenizas volantes, con ceniza de cascarilla de arroz y cal viva. Evaluaron relaciones molares CaO/SiO_2 entre 0,25 – 0,39 encontrando que, vitrocerámicas con densidades entre 2.607–2.739 kg/m^3 pueden ser satisfactoriamente producidas a partir de residuos. Además, las vitrocerámicas presentaron buenas propiedades mecánicas: durezas vickers de 600 MPa y módulo de elasticidad de 96 GPa, con una tenacidad a la fractura de entre 0,39 – 0,59 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Adicionalmente, los materiales presentaron buena durabilidad química, al presentar una pérdida en masa no superior al 0,5 mg/cm^2 , haciéndolas buenas candidatas para aplicaciones en sector de la construcción.

Lee *et al.* (2017) Implementaron la utilización de ceniza de cascarilla de arroz blanca (RHA) tratada térmicamente a 1000 °C por 2 horas como fuente de sílice para obtener materiales vitrocerámicos en el sistema $\text{ZnO}-\text{SiO}_2$, ya que este sistema de vidrio tiene una gran variedad de aplicaciones por su alto nivel de inercia química y también da varias tonalidades que pueden usarse en los paneles de visualización de plasma (PDP) y fósforo de rayos catódicos. El análisis de difracción de rayos X de la ceniza tratada muestra la fase cristobalita, sin embargo, en el sistema $(\text{ZnO})_x$ (WRHA) 1-x ($x=0,55, 0,60, 0,65$ y $0,70$ % en peso) las muestras con $x=0,55$ presentaron una fase amorfa mientras que las muestras restantes presentaron la fase $\alpha\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$. Los resultados evidenciaron un aumento en la brecha de banda óptica (E_{opt}) debido a la transición prohibida directa. Por lo tanto, la E_{opt} del sistema disminuye de 4,50 a 4,41 eV en orden creciente de ZnO y la disminución es causada por la naturaleza covalente del enlace Zn-O.

Khaidir *et al.* (2019) investigaron la fotoluminiscencia y propiedades ópticas de vidrios y vitrocerámicas de silicato de zinc dopado con europio ($\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{3+}$) derivado de cenizas de cáscara de arroz blanco como fuente potencial de sílice mediante el método de sinterización. El análisis difracción de rayos X (XRD) reveló la formación de fases amorfas, α o $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{3+}$ en las muestras de vidrio y vitrocerámica. Los resultados muestran que los valores de separación de la banda óptica para muestras no dopadas aumentan de 2,97 eV a 3,39 eV.

4.2. Producción de vitrocerámicas basadas en escorias

Las escorias son un tipo de residuo sólido generado por la industria metalúrgica, entre estas se encuentran reportes de la producción de vitrocerámicas empleando escoria siderúrgica de alto horno y escorias de diferentes procesos metalúrgicos como cobre, titanio, fosforo, plomo.

La escoria de alto horno se caracteriza por sus altos contenidos en CaO , SiO_2 , MgO y Al_2O_3 (Jia *et al.*, 2019). La escoria de alto horno fue el primer residuo de silicato que se investigó a fondo como materia prima para la obtención de vitrocerámica (Rawlings *et al.*, 2006). El primer intento de comercializar una vitrocerámica a partir de escoria fue realizado por British Iron and Steel Research Association a finales de la década de 1960, con el nombre de Slagceram, la cual fue producida mediante el método convencional de tratamiento térmico de dos etapas (Rawlings *et al.*, 2006; Sarrigani; Amiri, 2019). Un material similar, “Slagsitall”, se desarrolló en la antigua Unión Soviética aproximadamente al mismo tiempo (Isa, 2011). Debido a la composición química de la escoria de alto horno (amorfa y rica en Ca), varios estudios demuestran la viabilidad de sintetizar vitrocerámicas con una proporción > 90 % en peso de este residuo (Barbieri *et al.*, 2000; Erkmen; Çataklı; Öveçoğlu, 2009; Francis, 2004; Öveçoğlu, 1998).

La escoria de acero, el principal desecho sólido metalúrgico, es más difícil de utilizar debido a su pobre molienda e inestabilidad de volumen, que se caracteriza por una gran cantidad de óxidos de hierro y CaO/MgO . Sin embargo, bajo la acción de un modificador o activador químico, por ejemplo, cenizas volantes,

arena de cuarzo, Na_2SiO_3 , entre otros, la escoria de acero se convierte en un buen candidato para su uso en vitrocerámicas y cemento (Liu *et al.*, 2015). De acuerdo con lo reportado por Liu *et al.* (2015), es posible ajustar la composición de una escoria mediante reducción térmica de carbono para reducir los óxidos de hierro en la escoria fundida, implementando además modificadores como cenizas volantes o relaves, que contienen sílice y alúmina para reducir la viscosidad y la basicidad de la vitrocerámica. Después del proceso de fusión y temple de la mezcla, se separa magnéticamente el hierro sólido de la frita, debido a la generación de magnetita cuando el hierro fundido y reducido reacciona con el agua en condiciones de alta temperatura. Posteriormente, la frita se convierte en vitrocerámica mediante un posterior tratamiento térmico del polvo. Durante el proceso de reducción, el estado de ocurrencia de hierro en la escoria se debe controlar de acuerdo con los requisitos de la cerámica de vidrio. Por lo general, Fe^{3+} por debajo del 3 % en peso o Fe^{2+} por debajo del 4,5 % en peso en vitrocerámica tendría un efecto favorable en sus propiedades (Liu *et al.*, 2015).

En algunos casos es necesario implementar agentes nucleantes para favorecer la cristalización en las muestras. Das *et al.* (2012) desarrollaron vitrocerámicas a partir de escoria de alto horno y evaluaron el efecto de tres agentes nucleantes por separado TiO_2 , ZrO_2 y P_2O_5 en una proporción del 4 % en peso. Los resultados evidenciaron que la escoria de alto horno se puede convertir en vitrocerámica utilizando agentes nucleantes, siendo la gehlenita la fase cristalina principal detectada en la muestra de vitrocerámica con P_2O_5 como agente nucleante y sin ningún aditivo (muestra 100 % escoria), mientras que la melilita es la fase cristalina principal en la muestra de vitrocerámica con TiO_2 , ZrO_2 .

La escoria de cobre se caracteriza por su contenido en SiO_2 y un alto contenido de hierro, principalmente en forma de material no magnético, de ahí que su uso para la obtención de vitrocerámicas esté tan limitada por su bajo contenido en agentes formadores de redes de vidrio, siendo necesario mezclarla con otras materias primas o residuos para obtener un vidrio con propiedades adecuadas o reducir el contenido de hierro en la escoria (Çoruh; Ergun; Cheng 2006; Yang *et al.*, 2013).

Çoruh *et al.* (2006) y Karamanov, Aloisi y Pelino (2007), disminuyeron con éxito el contenido de hierro en este tipo de escoria mediante un tratamiento térmico y lograron producir vitrocerámicas al mezclar la escoria de cobre con otros desechos industriales o arena; pero esto resultó en una baja tasa de utilización de la escoria de cobre en el vidrio o en la producción de la vitrocerámica. Yang *et al.* (2013) sintetizaron vitrocerámicas a partir de escoria de cobre, pero debido al alto contenido de hierro 41,55 % en peso, optaron por separarlo durante el proceso de fusión de la mezcla. Para ello, incorporaron coque durante el proceso de fusión y los iones de hierro se redujeron, posteriormente la masa fundida se dividió en dos capas con el hierro reducido fundido en la parte inferior y la escoria fundida sin hierro (vidrio fundido) en la parte superior, logrando de esta manera transformar la escoria residual en vitrocerámicas de color claro.

La escoria de plomo posee como componentes principales SiO_2 , CaO y Fe_2O_3 , que pueden usarse como materias primas para vitrocerámica al agregar ciertos compuestos, debido a que la vitrocerámica tiene un buen efecto en la inmovilización de los elementos tóxicos en la escoria de plomo, el valor agregado del producto aumenta (Pan *et al.*, 2019). Pan, Zhang, Bao, Guo y Liu (2015) patentaron un método para la obtención de vitrocerámica de Hedenbergita, a partir de escoria de plomo como materia prima principal junto con residuos de vidrio y cenizas volantes. La vitrocerámica se preparó en diferentes colores mediante la adición de diferentes colorantes y cumplió con el estándar de la vitrocerámica industrial, además, las pruebas de toxicidad demostraron una alta inmovilización de los elementos tóxicos.

Wang y Liang (2007) usaron escoria de titanio, ceniza volante y MgCO_3 obteniendo en la vitrocerámica producida como fase principal cordierita. El coeficiente de expansión térmica de la vitrocerámica $(25 \pm 1) \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ resultó un poco más alta que la de la vitrocerámica a base de cordierita pura $(20 \pm 1) \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. La radiación infrarroja y el coeficiente de expansión térmica de este material demuestran que el material vitrocerámico tiene potencial para su aplicación en una amplia gama de materiales infrarrojos de calentamiento y secado.

Cao y Wang (2013) utilizaron 62 % de escoria de fósforo como materia prima principal para la obtención de vitrocerámicas e incorporaron óxido de sodio, arena de cuarzo, magnesita y óxido de zinc. El mecanismo de cristalización de los vidrios se vio afectado principalmente por el aumento en el contenido de Na_2O , pasando de una cristalización superficial a cristalización en masa. Las fases cristalinas predominantes en ambos vidrios fueron β - CaSiO_3 y $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$; sin embargo, a $T \geq 1250$ °C la fase $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$ desaparece y aparece α - CaSiO_3 en el vidrio con 15 % de Na_2O .

Yang *et al.* (2014) evaluaron el efecto de la relación CaO/SiO_2 sobre la cristalización de vitrocerámicas obtenidas a partir de escoria de cobre y aditivos de alta pureza, utilizando calorimetría diferencial de barrido (DSC), difracción de rayos X (XRD), espectroscopia infrarroja (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (SEM). El resultado de la cinética de cristalización muestra un aumento en las energías de activación de la cristalización con un aumento en la relación CaO/SiO_2 hasta 0,38 y, posteriormente, una disminución con un aumento adicional en la relación CaO/SiO_2 hasta 0,42. En general, en todas las muestras vitrocerámicas con diferentes proporciones de CaO/SiO_2 las fases principales fueron anortita y diópsido, sin embargo, las mejores propiedades integrales de la vitrocerámica se obtuvieron para una relación CaO/SiO_2 de 0,42: baja porosidad (0,11 %), alta densidad (2,75 g/cm³) y alta dureza (85,75 HBa). Los colores de las vitrocerámicas resultantes varían de gris claro a amarillo.

De otra parte, Jia *et al.*, (2019) evaluaron el efecto de la relación SiO_2/CaO sobre la viscosidad, la estructura y las propiedades mecánicas de vitrocerámicas obtenidas a partir de escoria de alto horno utilizando óxidos de grado analítico: CaO , MgO y Al_2O_3 , arena de cuarzo y 1,5 % de Cr_2O_3 como agente nucleante. Los resultados indicaron que al disminuir la relación SiO_2/CaO , la viscosidad y el grado de polimerización del vidrio fundido disminuyen significativamente y, por lo tanto, en la cristalización de las muestras se obtienen diferentes fases cristalinas. Muestras con una mayor relación SiO_2/CaO (1,67-2,27) evidenciaron diópsido como fase cristalina principal, para las muestras con una relación SiO_2/CaO de 1,44 predomina la augita, mientras que con una relación SiO_2/CaO de 1,25 predominan la augita y gehlenita. A su vez, al disminuir la relación SiO_2/CaO , las densidades de las vitrocerámicas aumentan considerablemente, mientras que la resistencia a la flexión disminuye. La muestra con SiO_2/CaO de 2,27 exhibió el mejor desempeño integral: resistencia a la flexión de 182,9 MPa, microdureza de 7,34 GPa, resistencia en ácido sulfúrico al 20 % en peso del 95,21 % y resistencia a los álcalis del 98,43 %. Así, la vitrocerámica preparada puede utilizarse como material de revestimiento en tuberías de industrias químicas, fábricas de cemento e industrias de energía eléctrica.

Igualmente se ha reportado que es posible obtener vitrocerámicas derivadas de escoria con Fe_2O_3 que presenten propiedades fotocatalíticas para descomponer el colorante azul de metileno bajo luz visible e irradiación de luz solar. De acuerdo con un estudio realizado por Ali *et al.* (2019a), una mezcla de escoria con Fe_2O_3 en proporciones de 11, 30 y 5,0 % en masa permite obtener vitrocerámicas con actividad fotocatalítica, la cantidad precipitada de hematita aumenta con el porcentaje de Fe_2O_3 . En el mismo año, el mismo autor Ali *et al.* (2019b) investigó el efecto fotocatalítico activado por luz visible de vitrocerámicas de escoria de desechos domésticos simulados con diferentes proporciones de Fe_2O_3 , luego de tratamiento térmico a 900 °C durante 100 min. La razón de la alta fotoactividad de esta muestra fue asociada a la presencia de nanopartículas de componentes magnéticos como CaFe_2O_4 y α - Fe_2O_3 , que son esenciales para exhibir un efecto catalítico activado por luz visible.

4.3. Producción de vitrocerámicas basadas en residuos de vidrio

La industria del vidrio presenta un alto grado de reciclabilidad de su producto. El vidrio triturado de los contenedores posteriores al consumo (es decir, botellas y frascos) y los desechos de vidrio plano pueden reciclarse repetidamente en productos similares, prácticamente sin pérdida de pureza o calidad (Silva; de Brito; Lynn; Dhir, 2017). Siendo el vidrio sódico-cálcico el tipo de vidrio más reconocido, dado que se utiliza en

cristales de ventanas, recipientes de vidrio (botellas y frascos) para bebidas y alimentos, y algunos artículos básicos. La composición mayoritaria de este vidrio es óxidos de silicio (hasta 75 % en peso), óxidos de calcio y óxidos de sodio (Sarrigani; Amiri, 2019).

Autores como Pelino, Cantalini y Rincón (1997) sintetizaron vitrocerámicas a partir de residuos de vidrio, residuos de granito y goethita (Fe-O-OH). El alto contenido de hierro de la goethita en el vidrio favoreció la rápida formación de una gran cantidad de núcleos de magnetita. Las composiciones de vidrio con un contenido de Fe_2O_3 entre 25 % y 30 % y un contenido de alúmina superior al 3 % favorecieron la cristalización durante el vertido de la masa fundida; por su parte, las vitrocerámicas presentaron una tenacidad a la fractura (K_{Ic}) de $1,78 \text{ MPam}^{1/2}$. Romero, Rincón González, Ovidio y Esparza (2001) también sintetizaron vitrocerámicas a partir de goethita (Fe-O-OH) dolomita y vidrio sódico cálcico, que también presentaban altos contenidos de Fe_2O_3 entre 15-29 % en peso, por lo que evaluaron las propiedades magnéticas y encontraron que con un bajo contenido de Fe_2O_3 , se presenta un comportamiento paramagnético, mientras que, a concentraciones más altas, un comportamiento ferromagnético. Por encima del 18 %, se presenta un comportamiento mixto, los cúmulos magnéticos precipitados contribuyen a una respuesta superparamagnética, mientras que los átomos de Fe disueltos se comportan paramagnéticamente y contribuyen a la magnetización a campos magnéticos muy elevados.

Francis *et al.* (2004) sintetizaron vitrocerámicas a partir de una mezcla de vidrio sódico cálcico (20 – 60 % en peso) y ceniza volante rica en hierro, encontrando que la formación de plagioclasa aumenta con el contenido del vidrio, sin embargo, el pico de magnetita disminuye en intensidad. A velocidades de enfriamiento rápido ($10 \text{ }^\circ\text{C/min}$) no se alcanza el grado de orden de cristalización que producía las fases de augita y plagioclasa, tal como fue observado a la velocidad de enfriamiento lenta ($1 \text{ }^\circ\text{C/min}$). Por lo tanto, fue confirmado que la velocidad de enfriamiento y la cantidad de vidrio sódico-cálcico añadido, son factores dominantes en el control de la cristalización y la microestructura de las vitrocerámicas ricas en hierro.

Romero, Kovacova y Rincón (2008) evaluaron este efecto en vitrocerámicas a partir de 60 % residuo de vidrio, 30 % de residuo de lixiviación de Níquel y 10 % de dolomita. Estos autores encuentran que, el modo de cristalización y la dimensionalidad de los cristales dependen fuertemente del tamaño de partícula del vidrio, siendo $100 \text{ }\mu\text{m}$ el tamaño crítico, ya que si el tamaño de partícula es superior, hay un crecimiento tridimensional del cristal controlado por difusión, mientras que, si es menor el mecanismo de reacción, se da en la interfaz con crecimiento bidimensional de cristales.

Bernardo, Pontikes y Angelopoulos (2012), evaluaron la incorporación de diferentes tipos de vidrios sódico-cálcico y borosilicato, mezclados con ceniza volante y escoria metalúrgica para obtener vitrocerámicas. Los autores reportan que las vitrocerámicas que contienen residuo de vidrio de borosilicato muestran una mayor resistencia a la flexión en comparación con las vitrocerámicas producidas con residuos de vidrio sódico-cálcico. Por otra parte, Hanpongpan, Jiemsirilers, Thavorniti (2007) prepararon vitrocerámicas mezclando residuos de la hidrometalurgia de zinc con dos tipos de vidrio: vidrio transparente y ámbar mediante el método de sinterización en polvo; a pesar de que los dos vidrios utilizados eran de naturaleza sódico-cálcica se evidenció un efecto diferente en la resistencia a la flexión lo cual atribuyen a la diferencia en composición química.

Chen-Shiuan y Kung-Cheh (2013) evaluaron el uso de desechos de vidrio de pantalla de cristal líquido, lodos de fluoruro de calcio como fundente y MgO como agente modificante, y reportan que al aumentar el contenido de MgO los vidrios exhiben temperaturas de cristalización más bajas y la densificación se ve considerablemente obstaculizada por el inicio de la cristalización, dando como resultado una disminución en la densidad aparente y la resistencia a la flexión. Sugieren que estos materiales pueden usarse como materia prima para producir cerámica de vidrio aislante.

Ponsot *et al.* (2014) sintetizaron vitrocerámicas a partir de una mezcla de vidrio de borosilicato y escorias metalúrgicas en proporciones de 75:25 y 50:50 utilizando el método de sinterización en polvo. Los resultados

evidenciaron que el vidrio de borosilicato no solo encapsuló las escorias en una matriz de vidrio sino que promovió transformaciones de fase ricas en Fe. Las muestras con una proporción 50:50 presentaron un aumento en la densidad y disminución en la porosidad.

Vitrocerámicas de wollastonita fueron preparadas por Lu *et al.* (2014), a partir de una mezcla de residuos de vidrio (60 % en peso) y cenizas volantes (30 %), con adición de cal utilizando el método de sinterización en polvo. Los autores investigaron el efecto del tamaño de partícula de las materias primas en el proceso de sinterización, la cinética de cristalización y las propiedades mecánicas de la vitrocerámica, encontrando que las vitrocerámicas sinterizadas a partir de polvos finos (6 mm) presentaron velocidad de sinterización rápida, alta densidad aparente y energía de activación de sinterización reducida. La resistencia a la flexión de las vitrocerámicas de wollastonita a partir de polvos finos se incrementó en más del 50% en comparación con las de polvos gruesos, como resultado de la mayor densificación y el alto grado de cristalinidad.

Kalirajan *et al.* (2016) evaluaron el efecto del MgO en una proporción del 5 – 25 % en peso sobre vitrocerámicas producidas por el método de sinterización en polvo a partir de residuo de vidrio (70 % en peso) y ceniza volante (30 % en peso). Las fases cristalinas presentes en la vitrocerámica fueron piroxeno y forsterita. Los autores reportan que, al aumentar el contenido de magnesita, aumentó la temperatura de cristalización de las muestras (T_p) y la resistencia a la flexión, sin embargo, a valores superiores al 10 % de MgO, la resistencia empezó a disminuir. La resistencia máxima fue de 78 MPa a 10 % de MgO, muy superior a la de la porcelana tradicional (35 MPa). El proceso de sinterización simple y la relativamente alta resistencia de la vitrocerámica, le garantizan una posible aplicación en baldosas de construcción.

Silva *et al.* (2017) encontraron que al incorporar residuo de vidrio para la obtención de materiales vitrocerámicos, se consigue una mayor densificación de la matriz, lo que se asocia al aumento de las cantidades de Na_2O y CaO aportadas por el vidrio y la consiguiente disminución del Al_2O_3 . Esto da lugar a la formación de una fase de vidrio con menor viscosidad capaz de llenar los poros más fácilmente, causando la mayor cristalización, disminución de la porosidad y un mejor desempeño mecánico.

Un estudio sobre el efecto de la temperatura de sinterización en el material físico y estructural de vitrocerámicas de fluoruro de silicato de aluminio (ASF) fue llevado a cabo por Wan *et al.* (2019), a partir de concha de almeja (CS) y vidrio sódico cálcico a través de la técnica convencional de enfriamiento por fusión. El alto contenido de Ca y Si del vidrio y la concha de almeja promueve la producción de la composición de vitrocerámicas ASF. La densidad y la contracción lineal de las muestras variaron con la temperatura de sinterización. Además, los resultados de XRD mostraron que la fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) es la fase principal en todas las muestras, lo que las hace un excelente candidato para aplicaciones dentales.

Ayala *et al.* (2019) sintetizaron vitrocerámicas por el método convencional utilizando tres mezclas con diferentes proporciones de escoria (GBFS), ceniza volante (FA) y residuo de vidrio (G): M1: 10 % GBFS 20 % FA y 70 % G, M2: 10 % GBFS, 35 % FA y 55 % G, M3: 55 % GBFS, 35 % FA y 10 % G. Las fases cristalinas principales resultantes fueron dióxido y anortita, con una pequeña cantidad de enstatita y gehlenita. Los resultados de resistencia a la fractura fueron inferiores a 10,8 MPa, lo que representa una limitación para aplicaciones estructurales.

Savvilitidou, Kritikaki, Stratakis, Komnitsas y Gidaracos (2019) prepararon mezclas con desecho de vidrio fotovoltaico (G) y cenizas volantes (FA) en las siguientes proporciones: 70 % G+ 30 % FA y 80 % G + 20 % FA. Las fases cristalinas predominantes para los productos 70G30FA fueron nefelina y piroxeno, mientras que para los productos 80G20FA la fase principal fue wollastonita. Los vidrios sinterizados a 700 y 800 °C se transformaron en vitrocerámicas sin poros con una absorción de agua insignificante y alta densidad (2,41 - 2,83 g/cm³). La resistencia a la compresión y la microdureza aumentó en proporción a la temperatura de sinterización y la vitrocerámica 70G30FA exhibió el mejor desempeño mecánico respecto a la muestra 80G20FA. En general, los valores de microdureza estuvieron en un rango de 5,47 - 8,89 GPa.

El porcentaje de las materias primas de desecho que pueden usarse para la obtención de vitrocerámicas, depende principalmente de su composición química y de la fase cristalina principal deseada, por lo que en algunos casos se requerirá de la incorporación de óxidos para compensar el déficit de ciertos óxidos precursores de vidrios. De acuerdo con lo reportado por Karamanov, Gutzow, Chomakov, Christov y Kostov (1994), en el caso de una materia prima residual con una alta concentración de CaO, es aconsejable sintetizar material formando principalmente CaO-SiO₂ o soluciones sólidas sobre su base. En presencia de grandes cantidades de MgO y FeO (o Fe₂O₃), es mejor buscar productos en los que prevalezcan las soluciones sólidas de piroxeno. El alto porcentaje de composición de Al₂O₃ no permite el uso de una gran cantidad de este producto de desecho si cabe esperar las fases principales de wollastonita, dióxido y anortita (Karamanov *et al.*, 1994).

La gran cantidad de estudios de investigación llevados a cabo durante la última década, se han centrado en encontrar una solución efectiva para el tratamiento de residuos, logrando que algunos de estos se conviertan en nuevas materias primas para la obtención de nuevos materiales. En términos generales, un desarrollo sostenible depende de la adopción de medidas respetuosas con el medio ambiente, que minimice el uso de recursos no renovables, así como la generación y gestión de desechos, incluidos todos los procesos de fabricación intermedios. Las políticas ambientales cada vez más restrictivas buscan fundamentalmente eliminar o reducir la generación de residuos y la contaminación, es por ello que, el reciclaje es una forma racional de hacer uso de recursos que de otro modo serían arrojados y/o descartados. Esta revisión corrobora el hecho de que es posible obtener nuevos materiales a partir de residuos o mezclas de residuos con resultados prometedores e incluso superiores a la de materiales convencionales.

5. Conclusiones

Actualmente, la principal materia prima para fabricación de vidrio y cerámica en Colombia se obtiene principalmente de fuentes no renovables de energía conduciendo a la distorsión del medio ambiente. La gestión y el reciclaje de residuos ricos en silicatos es un campo importante y poco explorado en Colombia para la producción de vidrio y vitrocerámicas. Adicionalmente, es importante desde el punto de vista de la disminución del impacto ambiental, ya que reduce la explotación de recursos naturales. Por ello, la utilización de desechos ricos en sílice, calcio y alúmina para la producción de vitrocerámicas a nivel mundial ha adquirido gran importancia a lo largo de los últimos años, lo cual se pudo evidenciar por el incremento del número de publicaciones a partir del año 2.000. La disminución en la explotación de recursos naturales y la implementación de materias primas alternativas como cenizas, escorias y residuo de vidrio, entre otros, disminuirá el impacto ambiental y podría llegar a reducir el costo de producción en las industrias de la vitrocerámica.

Al emplearse residuos como los anteriormente nombrados, y debido a la diferente composición química y morfológica de los mismos, son necesarias rutas y condiciones específicas de procesamiento. Entre los factores a considerar se señalan la disponibilidad del residuo, tamaño de partícula, método de procesamiento, y un diseño de mezclas adecuado y ajustado. Al tener un control adecuado de estos parámetros sería posible la obtención de vitrocerámicas con características similares e incluso superiores a las comerciales.

Los resultados de esta revisión muestran el proceso vitrocerámico como una alternativa real y útil para el reciclado de residuos industriales, destacando principalmente los estudios que reemplazan en un 100 % la materia prima no renovable por desechos industriales, dando lugar a nuevos materiales verdes o amigables al ambiente, además, permite obtener productos o materiales avanzados, con altas características físicas y tecnológicas. El método seleccionado para la obtención de materiales vitrocerámicos dependerá en gran medida de las propiedades requeridas del producto final, así como de la composición de los materiales utilizados.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle por su financiación a través de los recursos de la Vicerrectoría de Investigaciones a través del proyecto C.I. 2998, titulado “Obtención de materiales vitrocerámicos a partir de desechos industriales colombianos”.

Referencias

- Ali, Ahmed; Ishikawa, S.; Nomura, Kiyoshi; Kuzmann, Erno; Homonnay, Zoltan; Scrimshire, Alex; ... Kubuki, Shiro (2019a). Mössbauer and photocatalytic studies of CaFe_2O_4 nanoparticle-containing aluminosilicate prepared from domestic waste simulated slag. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322(3), 1469–1476.
<https://doi.org/10.1007/s10967-019-06715-2>
- Ali, Ahmed; Nomura, Kiyoshi; Homonnay, Zoltan; Kuzmann, Erno; Scrimshire, Alex; Bingham, Paul; ... Kubuki, Shiro (2019b). The relationship between local structure and photo-Fenton catalytic ability of glasses and glass-ceramics prepared from Japanese slag. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322(2), 751–761.
<https://doi.org/10.1007/s10967-019-06726-z>
- Ayala, Diana; Gómez, Jairo; Roether, Judith; Boccaccini, Aldo (2019). Development and characterization of glass-ceramics from combinations of slag, fly ash, and glass cullet without adding nucleating agents. *Materials*, 12(12), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/ma12122032>
- Barbieri, Luisa; Manfredini, T.; Queralt, Ignasi; Rincon, Jesús; Romero, Maximina (1997). Vitrification of fly ash from thermal power stations. *Glass Technology*, 38(5), 165–170.
[https://doi.org/10.1016/s0140-6701\(98\)80577-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6701(98)80577-8)
- Barbieri, Luisa; Corradi, A.; Lancellotti, Isabella (2001). Residuos para la producción de vidrios y vitrocerámicos. *Materiales de Construcción*, 51(253–264), 197–208.
- Barbieri, Luisa; Ferrari, Anna; Lancellotti, Isabella; Leonelli, Cristina; Rincón, Jesús; Romero, Maximina (2000). Crystallization of $(\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO})-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ Glassy Systems Formulated from Waste Products. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(10), 2515–2520.
- Barbieri, Luisa; Lancellotti, Isabella; Manfredini, Tiziano; Pellacani, Gian; Rincón, Jesús; Romero, Maximina (2001). Nucleation and Crystallization of New Glasses from Fly Ash Originating from Thermal Power Plants. *Journal of the American Ceramic Society*, 58, 1851–1858.
- Barbieri, Luisa; Lancellotti, Isabella; Manfredini, Tiziano; Queralt, Ignasi; Rincón, Jesús; Romero, Maximina (1999). Design, obtainment and properties of glasses and glass-ceramics from coal fly ash. *Fuel*, 78, 271–276.
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00134-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00134-3)
- Benavidez, E.; Grasselli, C.; Quaranta, N. (2003). Densification of ashes from a thermal power plant. *Ceramics International*, 29(1), 61–68.
[https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00090-1)
- Bernardo, E.; Pontikes, Y.; Angelopoulos, G. N. (2012). Optimisation of low temperature sinter crystallisation of waste derived glass. *Advances in Applied Ceramics*, 111(8), 472–479.
<https://doi.org/10.1179/1743676112Y.0000000037>

- Callister, Wiliam (2001). *Fundamentals of materials science and engineering*. New York, EE.UU.: Wiley.
- Cao, Jianwei; Wang, Zhi (2013). Effect of Na₂O and heat-treatment on crystallization of glass-ceramics from phosphorus slag. *Journal of Alloys and Compounds*, 557, 190–195.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.013>
- Cedillo, Erika (2010). Síntesis y caracterización de materiales vitrocerámicos a partir de escorias metalúrgicas y su posible aplicación tecnológica (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Mexico.
- Chen-Shiuan, Fan; Kung-Cheh, Li (2013). Production of insulating glass ceramics from thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) waste glass and calcium fluoride sludge. *Journal of Cleaner Production*, 57, 335–341.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.002>
- Chen, Hua; Li, Baowei; Zhao, Ming; Zhang, Xuefeng; Du, Yongsheng; Shi, Yu; McCloy, John (2019). Lanthanum modification of crystalline phases and residual glass in augite glass ceramics produced with industrial solid wastes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 524(May), 119638.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.119638>
- Cheng, Ta-Wui; Ueng, T.; Chen, Y. S.; Chiu, J. P. (2002). Production of glass-ceramic from incinerator fly ash. *Ceramics International*, 28, 779–783. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00043-3).
- Chinnam, R. K.; Francis, A. A.; Will, J.; Bernardo, E.; Boccaccini, A. R. (2013). Review. Functional glasses and glass-ceramics derived from iron rich waste and combination of industrial residues. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 365, 63–74.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.12.006>
- Colombo, P.; Brusatin, G.; Bernardo, E.; Scarinci, G. (2003). Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 7(3), 225–239.
<https://doi.org/10.1016/j.cossms.2003.08.002>
- Çoruh, Semra; Ergun, Osman; Cheng, Ta-Wui (2006). Treatment of copper industry waste and production of sintered glass-ceramic. *Waste Management and Research*, 24(3), 234–241.
<https://doi.org/10.1177/0734242X06062600>
- Das, K.; Raha, S.; Chakraborty, D.; Burhanuddin S.; Saheb Ali, S. (2012). Effect of nucleating agents on the crystallization and microstructural characteristics of blast furnace slag derived glass-ceramics. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 71(3), 137–142.
<https://doi.org/10.1080/0371750X.2012.738482>
- Dávalos, Julián; Bonilla, Ashley; Villaquirán-Cacedo, Mónica; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2020). Preparation of glass–ceramic materials from coal ash and rice husk ash: Microstructural, physical and mechanical properties. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, In Press.
<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.02.002>
- DeGuire, Eileen; Risbud, Subhash (1984). Crystallization and properties of glasses prepared from Illinois coal fly ash. *Journal of Materials Science*, 19(6), 1760–1766.
- Deubener, J.; Allix, M.; Davis, M. J.; Duran, A.; Höche, T.; Honma, T.; ... Zhou, S. (2018). Updated definition of glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 501, 3–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.033>
- Erkmen, Z. E.; Çatakli, E.; Öveçoğlu, L. M. (2009). Characterisation and crystallisation kinetics of glass ceramics developed from Erdemir blast furnace slags containing Cr₂O₃ and TiO₂ nucleants. *Advances in Applied*

Ceramics, 108(1), 57–66.

<https://doi.org/10.1179/174367608X364294>

Erol, M; Küçükbayrak, S; Ersoy-Meriçboyu, A. (2007). Characterization of coal fly ash for possible utilization in glass production. *Fuel*, 86, 706–714.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.09.009>

Francis, A. A. (2004). Conversion of blast furnace slag into new glass-ceramic material. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(9), 2819–2824.

<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.08.019>

Francis, A. A.; Rawlings, Rees; Boccaccini, Aldo (2002). Glass-ceramics from mixtures of coal ash and soda-lime glass by the petrucic method. *Journal of Materials Science*, 21, 975–980.

[https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(03\)81931-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(03)81931-8)

Francis, A. A.; Rawlings, Rees; Sweeney, R.; Boccaccini, Aldo (2002). Processing of coal ash into glass ceramic products by powder technology and sintering. *Glass Technology*, 43(2), 58–62.

Francis, A. A.; Rawlings, Rees; Sweeney, R; Boccaccini, Aldo (2004). Crystallization kinetic of glass particles prepared from a mixture of coal ash and soda-lime cullet glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 333, 187–193.

<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2003.09.048>

Hanpongpun, Wilasinee; Jiemsirilers, Sirithan; Thavorniti, P. (2007). Effects of Clear and Amber Cullet on Physical and Mechanical Properties of Glass-Ceramics Containing Zinc Hydrometallurgy Waste. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 1(11), 1305–1312.

<https://doi.org/10.1299/jmmp.1.1305>

Hieu, Dinh; Wang, Kuen-Sheng; Chen, Jung-Hsing; Xuan, Bui; Hoang, Bui (2012). Glass – ceramic from mixtures of bottom ash and fly ash. *Waste Management*, 32, 2306–2314.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.040>

Höland, Wolfram; Beall, George (2012). *Glass-Ceramic Technology* (2da Edición). EE.UU: Wileys.

Isa, Hauwa (2011). A review of glass-ceramics production from silicate wastes. *International Journal of Physical Sciences*, 6(30), 6781–6790.

<https://doi.org/10.5897/IJPS11.153>

Jani, Yahya; Hogland, William (2014). Waste glass in the production of cement and concrete - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1767–1775.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>

Jia, Ruidong; Deng, Leibo; Yun, Fei; Li, Hao; Zhang, Xuefeng; Jia, Xiaolin (2019). Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 233(March), 155–162.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065>

Kalirajan, M.; Ranjeeth, R.; Vinothan, R.; Vidyavathy, S. M.; Srinivasan, N. R. (2016). Influence of glass wastes on the microstructural evolution and crystallization kinetics of glass-ceramic glaze. *Ceramics International*, 42(16), 18724–18731.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.011>

Karamanov, Alexander (2009). Granite like materials from hazardous wastes obtained by sintercrystallisation of glass frits. *Advances in Applied Ceramics*, 108(1), 14–21.

<https://doi.org/10.1179/174367608X364302>

- Karamanov, Alexander; Aloisi, Mirko; Pelino, Mario (2007). Vitrification of copper flotation waste. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1–2), 333–339.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.040>
- Karamanov, Alexander; Gutzow, Ivan; Chomakov, Ivan; Christov, Jancho; Kostov, Lyubomir (1994). Synthesis of wall-covering glass-ceramics from waste raw materials. *Glass Science and Technology Frankfurt*, 67(8), 227–230.
[https://doi.org/10.1016/0140-6701\(95\)80729-2](https://doi.org/10.1016/0140-6701(95)80729-2)
- Karamberi, A.; Moutsatsou, A. (2004). Characterization of glass and glass-ceramics obtained from industrial by-products. *Waste Management and the Environment*, 78(9), 377–385. 10.2495/WM040371
- Karmakar, B.; Rademann, Klaus; Stepanov, Andrey (2016). *Glass nanocomposites: Synthesis, properties and applications*. EE.UU: Elsevier.
- Khaidir, Rahayu; Fen, Yap; Zaid, Mohd; Matori, Khamirul; Omar, Nur; Anuar, Muhammad; ... Azman, Aisyah (2019). Optical band gap and photoluminescence studies of Eu 3+ -doped zinc silicate derived from waste rice husks. *Optik*, 182, 486–495.
<https://doi.org/10.1016/j.jileo.2019.01.061>
- Lee, Chee; Matori, Khamirul; Aziz, Sidek; Kamari, Halimah; Ismail, Ismayadi; Zaid, Mohd (2017). Fabrication and characterization of glass and glass-ceramic from rice husk ash as a potent material for opto-electronic applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(23), 17611–17621.
- Leroy, C.; Ferro, M.C.; Monteiro, R.C.C.; Fernandes, M.H.V. (2001). Production of glass-ceramics from coal ashes. *Journal of the European Ceramic Society*, 21, 195–202.
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00193-X](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00193-X)
- Li, Yu; Dai, Wen-Bin (2018). Modifying hot slag and converting it into value-added materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 175, 176–189.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.171>
- Liu, Bo; Yang, Qiang; Zhang, Shen (2019). Integrated utilization of municipal solid waste incineration fly ash and bottom ash for preparation of foam glass-ceramics. *Rare Metals*, 38(10), 914–921.
<https://doi.org/10.1007/s12598-019-01314-2>
- Liu, Zhaobo; Zong, Yanbing; Feng, Huan; Cang, Daqiang (2015). Influence of Ferrum on Crystallization and Microstructure of Steel Slag Based Glass-Ceramics. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 74(1), 29–34. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2014.988831>
- Ljati, Ejup; Kamusheva, Alexandra; Grozdanov, Anita; Paunovi, Perica; Karamanov, Alexander (2015). Optimal thermal cycle for production of glass – ceramic based on wastes from ferronickel manufacture. *Ceramics International*, 41, 11379–11386.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.098>
- Lu, Jinshan; Lu, Zhangyang; Peng, Changhao; Li, Xibao; Jiang, Hongliu (2014). Influence of particle size on sinterability, crystallisation kinetics and flexural strength of wollastonite glass-ceramics from waste glass and fly ash. *Materials Chemistry and Physics*, 148(1–2), 449–456.
- Luan, Jingde; Li, Aimin; Su, Tong; Cui, Xiaobo (2010). Synthesis of nucleated glass-ceramics using oil shale fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 173, 427–432.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.099>
- Mejía, Johanna; Rodríguez, Erich; Mejía De Gutiérrez, Ruby (2014). Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros. *Ingeniería y Universidad*, 18(2), 309–327.

- Mihailova, Irena; Djambazki, P. R.; Mehandjiev, D. (2011). The effect of the composition on the crystallization behavior of sintered glass-ceramics from blast furnace slag. *Bulgarian Chemical Communications*, 43(2), 293–300.
- Montazerian, Maziar; Singh, Shiv; Dutra, Edgar (2015). An analysis of glass-ceramic research and commercialization. *American Ceramic Society Bulletin*, 94(4), 30–35.
- Montoya-Quesada, Estefanía; Villaquirán-Caicedo, Mónica; Mejía de Gutiérrez, Ruby; Muñoz-Saldaña, J. (2019). Effect of ZnO content on the physical, mechanical and chemical properties of glass-ceramics in the CaO–SiO₂–Al₂O₃ system. *Ceramics International*.
<https://doi.org/10.1016/j.CERAMINT.2019.10.154>
- Öveçoğlu, M. L. (1998). Microstructural characterization and physical properties of a slag-based glass-ceramic crystallized at 950 and 1100 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, 18(2), 161–168.
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(97\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(97)00094-0)
- Pan, De'an; Zhang, S. G.; Bao, H. B.; Guo, B.; Liu, B. (2015). A method for preparing Hedenbergite Glass Ceramics by Lead Slag. China. Patente CN104773958A
- Pan, De'an; Li, Lili; Tian, Xi; Wu, Yufeng; Cheng, Na; Yu, Hailiang (2019). A review on lead slag generation, characteristics, and utilization. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 140–155.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.036>
- Pelino, M.; Cantalini, C.; Rincón, J. M. (1997). Preparation and properties of glass-ceramic materials obtained by recycling goethite industrial waste. *Journal of Materials Science*, 32(17), 4655–4660.
- Ponsot, Inès; Pontikes, Yiannis; Baldi, Giovanni; Chinnam, Rama; Detsch, Rainer; Boccaccini, Aldo; Bernardo, Enrico (2014). Magnetic Glass Ceramics by Sintering of Borosilicate Glass and Inorganic Waste. *Materials*, 7, 5565–5580.
- Rawlings, R. D.; Wu, J. P.; Boccaccini, Aldo (2006). Glass-ceramics : Their production from wastes — A Review. *Journal of Materials Science*, 41, 733–761.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-6554-3>
- Rincón, J. M.; Romero, M. (1996). Los materiales vitrocerámicos en la construcción. *Materiales de Construcción*, 46(242–243), 91–106.
- Romero, Maximina; Rincón, Jesús; González, Carlos; D'Ovidio, Carlos; Esparza, Daniel (2001). Magnetic properties of glasses with high iron oxide content. *Materials Research Bulletin*, 36(7–8), 1513–1520.
[https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(01\)00630-4](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(01)00630-4)
- Romero, Maximina; Kovacova, M.; Rincón, Jesús (2008). Effect of particle size on kinetics crystallization of an iron-rich glass. *Journal of Materials Science*, 43(12), 4135–4142.
<https://doi.org/10.1007/s10853-007-2318-y>
- Romero, Maximina; Rincón, Jesús (2000). El proceso de vitrificación/cristalización controlada aplicado al reciclado de residuos industriales inorgánicos. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 39(1), 155–163.
- Rondón, H.; Fernández, W.; Patiño, D.; Ruge, J.; Vacca, H.; Reyes, F. (2018). Characterization of blast furnace slag for road projects. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 83–92.
- Sánchez, Hector (2014). Estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. In *V congreso de Ingeniería Civil* (pp. 1–14).
- Sarrigani, Gholamreza; Amiri, Iraj (2019). Literature Review of Glass-Ceramic and Willemite Production

- from Waste Materials. In: *Willemite-Based Glass Ceramic Doped by Different Percentage of Erbium Oxide and Sintered in Temperature of 500-1100C* (pp. 13-27). Cham: Springer Briefs in Electrical and Computer Engineeri.
- https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-10644-7_2
- Savvilotidou, Vasiliki; Kritikaki, Anna; Stratakis, Antonios; Komnitsas, Konstantinos; Gidakos, Evangelos (2019). Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash. *Waste Management*, 90, 46–58.
- <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.022>
- Shackelford, James (2005). *Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros* (6ta Edición). Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Silva, R. V.; de Brito, J.; Lye, C. Q.; Dhir, R. K. (2017). The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review. *Journal of Cleaner Production*, 167(20), 346–364.
- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.185>
- Silva, R. V.; de Brito, J.; Lynn, C. J.; Dhir, R. K. (2019). Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 140(June 2018), 23–35.
- <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.011>
- Suzdal'tsev, E. I. (2002). Effect of temperature on the structuring and properties of glass and glass ceramic of lithium aluminosilicate composition. *Refractories and Industrial Ceramics*, 43, 127–135.
- Teixeira, S. R.; Magalhães, R. S.; Arenales, A.; Souza, A. E.; Romero, M.; Rincón, J. M. (2014). Valorization of sugarcane bagasse ash: Producing glass-ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, 134, 15–19.
- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.029>
- Wan, Wan; Matori, Khamirul; Mohd, Mohd; Zainuddin, Norhazlin; Ahmad, Mohammad; Abdul, Nadia; ... Kul, Esra (2019). Effect of sintering temperature on physical and structural properties of Alumino-Silicate-Fluoride glass ceramics fabricated from clam shell and soda lime silicate glass. *Results in Physics*, 12, 1909–1914.
- <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.077>
- Wang, Shuming; Liang, Kaiming (2007). High infrared radiance glass-ceramics obtained from fly ash and titanium slag. *Chemosphere*, 69(11), 1798–1801.
- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.06.016>
- Wang, Zhong; Ni, Wen; Jia, Yan; Zhu, Li; Huang, Xiao (2010). Crystallization behavior of glass ceramics prepared from the mixture of nickel slag, blast furnace slag and quartz sand. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(31–32), 1554–1558.
- <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.05.063>
- World Energy Council. (2016). *World Energy Resources 2016*. Recuperado de: https://doi.org/http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf
- Yang, Zhihong; Lin, Qiao; Lu, Shengchun; He, Yong; Liao, Guangdong; Ke, Yi (2014). Effect of CaO/SiO₂ ratio on the preparation and crystallization of glass-ceramics from copper slag. *Ceramics International*, 40(5), 7297–7305.
- <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.12.071>

- Yang, Zhihong; Lin, Qiao; Xia, Jixiang; He, Yong; Liao, Guangdong; Ke, Yi (2013). Preparation and crystallization of glass-ceramics derived from iron-rich copper slag. *Journal of Alloys and Compounds*, 574, 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.05.091>
- Yoon, S. D.; Yun, Y. H. (2008). Chemical durability of glass-ceramics obtained from waste glass and fly ash. *Journal of Ceramic Processing Research*, 9(2), 135–139.
- Zeng, Li; Sun, Hong-juan; Peng, Tong-jiang; Zheng, Wen-miao (2019). The sintering kinetics and properties of sintered glass-ceramics from coal fly ash of different particle size. *Results in Physics*, 15(October), 102774. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102774>
- Zeynel, C. (2018). *Global slag 2018 review*. Recuperado de <http://www.globalslag.com/about-us/24-global-slag/conferences/672-global-slag-2018-review>

Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización

Wastewater treatment of the pharmaceutical industry through the ozone technique

Juliana Andrea Jaimes Urbina¹
Javier Augusto Vera Solano²

¹ Universidad de Pamplona (Colombia). Correo electrónico: jandrea.jaimes11@gmail.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3566-4427>

² Universidad de Pamplona (Colombia). Correo electrónico: javier.vera@unipamplona.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3415-146X>

Recibido: 08-08-2019 Aceptado: 18-02-2020

Cómo citar: Jaime-Urbina, Juliana; Vera-Solano, Javier (2020). Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. *Informador Técnico*, 84(2), 249-263.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2305>

Resumen

La industria farmacéutica es en la actualidad un valioso elemento de sanidad a nivel mundial. La manufactura de medicamentos y la limpieza de equipos, generan un agua residual con contaminantes emergentes de difícil eliminación con tratamientos tradicionales, provocando impactos ambientales sobre los ecosistemas. El siguiente artículo analiza el tratamiento con ozono en las aguas residuales de la industria farmacéutica. Se realizó una revisión de la literatura científica sobre las aguas residuales de la industria farmacéutica, la implementación de tratamientos tradicionales, los impactos medioambientales que ocasionaban los vertidos de dicha industria, y específicamente acerca de la implementación del ozono para remover los residuos farmacéuticos de los cuerpos de agua. Los resultados sugieren que el tratamiento de ozonización es eficiente en la remoción de compuestos farmacéuticos, especialmente de antiinflamatorios, antibióticos y estrógenos.

Palabras clave: contaminante emergente; medicamentos; residuos farmacéuticos; ozonización.

Abstract

The pharmaceutical industry is now a valuable global health element. The manufacture of medicines and the cleaning of equipment, generate wastewater with emerging pollutants of difficult elimination with traditional treatments, producing environmental impacts on the ecosystems. The following study analyses ozone treatment in the wastewater of the pharmaceutical industry. A review of the scientific literature is made on the wastewater of the pharmaceutical industry, the implementation of traditional treatments, the environmental impacts caused by discharges from that industry, and specifically on the implementation of ozone to remove pharmaceutical waste from water bodies. It was concluded that the ozone treatment is efficient in the removal of pharmaceutical compounds, especially anti-inflammatory, antibiotics and estrogen.

Keywords: emerging pollutants; medicines; pharmaceutical waste; ozonation.

1. Introducción

La industria farmacéutica es uno de los sectores de la economía general que se dedica de manera exclusiva a la fabricación, distribución, comercialización y también la preparación de productos químicos farmacéuticos. Este sector está formado por diversas organizaciones de índole privado y público, cuyo objetivo y finalidad es satisfacer las necesidades de salubridad en humanos y animales a través de una gran gama de medicamentos (Remington; Gennaro, 1990). En el siglo XX la medicina eliminó muchas enfermedades, aumentando así la esperanza de vida, esto debido al descubrimiento de las vacunas antitetánica y antidiftérica (Torres, 2010). Un estudio realizado por Lichtenberg (2014) determinó que la innovación del sector farmacéutico aumentó la esperanza de vida hasta en 1.73 y 3.7 años en los países con mayor demanda de medicamentos. Es así, que con la creación de los medicamentos, se consigue curar enfermedades tales como: sarampión, malaria y hepatitis C, e incluso son enfermedades que pueden llegar a erradicarse, por ejemplo la polio, la viruela y la peste bovina (Confederación Española de Organizaciones Empresariales [CEOE], 2019).

En la industria farmacéutica, el agua utilizada es la materia prima y se le denomina “agua de uso farmacéutico” con diferentes tipos: agua purificada, agua altamente purificada y agua para inyección (Carpiuc, 2015). Para ilustrar mejor la utilización del agua en la manufactura de medicamentos, en el proceso de granulación, se requiere de agua purificada (Instituto Nacional de Medicamentos, 2014). No obstante, el agua es utilizada en los procesos de saneamiento de los equipos, los recipientes y los envases primarios, como consecuencia, se obtiene agua residual, caracterizada por contener residuos de productos químicos, como sobrantes de fármacos y/o detergentes utilizados en la limpieza (Martínez *et al.*, 2018). Tras lo anterior, la Organización Mundial de la Salud (2019) asegura que como resultado de los diversos procedimientos efectuados en la industria farmacéutica, una gran diversidad de residuos farmacéuticos logran mezclarse con los cuerpos de agua, a través de los efluentes de las instalaciones de fabricación o producción. Como consecuencia estos residuos se han convertido en motivo de creciente preocupación para el público, debido a que podrían llegar a las fuentes de agua potable.

Las aguas residuales provenientes de esta industria, presentan variabilidad en su cantidad y componentes (Tuset, 2019). En este sentido, y debido a que se presentan distintas modalidades en las operaciones, la generación de residuos es variada en concentración y en composición (Ramos; Espinosa; López; Pellón, 2005). De igual modo, la composición del agua vertida al medio ambiente varía en función del proceso por el cual sea derivado (Ramos, 2009). Se intuye entonces, que la cantidad de residuos farmacéuticos vertidos puede ser baja, pero su entrada continua al ecosistema, puede aumentar la concentración de contaminantes en los cuerpos de agua, lo que genera a largo plazo un riesgo para los organismos acuáticos y terrestres (Klavarioti; Mantzavinos; Kassinos, 2009). De esta forma, se puede establecer que el problema primordial es la carencia tanto de técnicas como de tecnologías, que permitan además de tratar, conocer los componentes y concentraciones del agua residual para esta industria (Ramos, 2009).

En los últimos años, se han hallado residuos de más de 150 medicamentos de uso humano y animal en entornos tan remotos como el Ártico (Rodríguez, 2013). Por ejemplo, en el estudio realizado por Schwaiger, Ferling, Mallow, Wintermayr y Negele (2004), determinaron que a bajas concentraciones de diclofenaco ($1\mu\text{L}$) se empiezan a observar alteraciones en las truchas arcoíris, detectándose alteraciones en los riñones y branquias, además de la acumulación del compuesto estudiado en sus órganos. Así mismo, la presencia de altas concentraciones de propanolol en el agua puede interferir en la capacidad de los peces de intercambiar oxígeno con el medio ambiente (Owen *et al.*, 2007).

El desconocimiento de los componentes que están presentes en el agua residual de la industria farmacéutica, dificulta la aplicación de un determinado tratamiento (Martínez *et al.*, 2018). En definitiva, los procesos de tratamiento biológico son considerados los más económicos y usuales para el tratamiento de aguas residuales (Arslan-Alaton; Caglayan, 2006). Sin embargo, Akmehmet-Balcioğlu y Ötker (2003) aseguran que

presencia de determinados compuestos impide que se dé una completa eliminación por medio de tratamientos biológicos. Por ejemplo, la presencia de antibióticos y desinfectantes en los vertimientos de las industrias, afectan la efectividad del tratamiento biológico del agua residual (Ramos, 2009). Así mismo, la descarga de efluentes sin tratar, dificulta la eliminación de determinados compuestos mediante procesos de tratamiento biológicos convencionales (Gharbani *et al.*, 2010). A este respecto, los procesos con ozono tienen la capacidad de eliminar contaminantes tóxicos y los llamados “contaminantes emergentes”, los cuales comprenden residuos farmacéuticos (Ramos, 2009) y de la industria de la limpieza (Pinheiro; Salla; Bolaños, 2018) hasta convertirlos en productos menos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente acuático (Quiroga; Quero-Pastor; Acevedo, 2015). El uso del ozono ha demostrado efectividad a la hora de eliminar de manera eficaz los productos farmacéuticos de las aguas residuales (Lester; Mamane; Zucker; Avisar, 2013).

El agua es un bien que pertenece a todos, pero muchas veces no se tiene en cuenta. Todos los días son arrojados a los ríos toneladas y toneladas de compuestos químicos que destruyen ecosistemas acuáticos y una de las industrias que contribuye a este fenómeno es la farmacéutica. Para tratar de mitigar los impactos que se producen por este tipo de contaminación aparecen los tratamientos de oxidación avanzada y entre ellos la ozonización. Es por ello que desde el enfoque de la revisión sistemática se analizó y reflexionó acerca de cómo la ozonización es una herramienta sencilla y respetuosa que se puede utilizar en bien del medio ambiente.

Hasta este punto queda planteado que el tratamiento de aguas residuales de la industria farmacéutica, es un tema que debe ser indagado a fondo en la medida en que el vertimiento de aguas de esta industria, genere problemáticas medioambientales de gran magnitud. De acuerdo a todo lo expuesto, la siguiente pregunta es el eje central del presente artículo de revisión bibliográfica ¿Cómo la técnica de la ozonización contribuye con la reducción de la contaminación por la generación de contaminantes emergente relacionados con la industria farmacéutica?

2. Contaminantes emergentes (CE)

De la misma manera como se encuentran remanentes de distintos tipos de contaminantes en las aguas residuales urbanas, también se observa la presencia de restos de fármacos, plaguicidas y otras sustancias, las cuales son llamadas contaminantes emergentes (CE), compuestos que se vierten en el agua y que no están regulados. Los contaminantes emergentes, también llamados microcontaminantes, son compuestos químicos producto de las actividades humanas que se realizan en el diario vivir, como la higiene personal o el cuidado de la salud, que pueden provocar efectos negativos en el ecosistema, generando alteraciones sobre el medio ambiente. Se trata de sustancias de diferente origen y composición química de las que se conoce relativamente poco con respecto al impacto que tienen en el ambiente y en el ser humano, sustancias que son reconocidas con el nombre de contaminantes emergentes (Ramírez; Chicaiza; Ramos; Álvarez; 2019).

Corrientemente se liberan al ambiente en pequeñas cantidades, pero con el tiempo, su uso intensivo y generalizado, se van acumulando en el entorno. Actualmente también son llamados contaminantes de interés emergente, no son necesariamente nuevos productos químicos y generalmente incluyen contaminantes que a menudo han estado presentes en el medioambiente, pero cuya presencia, importancia y efectos (toxicidad) están siendo evaluados (Arbeláez, 2015). De todos los contaminantes emergentes, los que posiblemente suscitan mayor preocupación son los medicamentos, por lo que su estudio se halla entre las líneas de investigación prioritarias de los principales organismos dedicados a la protección de la salud pública y medioambiental (Información Farmacoterapéutica de la Comarca [INFAC], 2016). La mayoría de los casos contaminantes no han sido regulados, razón por la cual, son candidatos a futuras regulaciones, dependiendo de estudios que muestren los potenciales efectos sobre la salud y el monitoreo de su ocurrencia (Verlicchi; Galletti; Petrovic; Barceló, 2010). Entre los contaminantes emergentes presentes en el agua cabe destacar fármacos, compuestos perfluorados, hormonas, drogas de abuso, productos de cuidado y de higiene personal; también podremos encontrarlos en plaguicidas, fármacos de uso tanto humano como de animal, antisépticos, retardantes de llama y surfactantes

conocidos también como tensoactivos. En consecuencia, la principal fuente de entrada de estos compuestos en el medio ambiente acuático es por las aguas residuales, aunque también cabe destacar el papel de la agricultura y la ganadería como fuentes de contaminación difusa de pesticidas y antibióticos, respectivamente.

3. Industria farmacéutica

La industria farmacéutica es uno de los grandes sectores económicos encargados de desarrollar y vender miles de toneladas de químicos farmacéuticos que en la actualidad son bienes de consumo esenciales no solo para la humanidad sino también para los animales. Es un sector avanzado ya que para la creación de sus productos invierten sumas significativas de dinero en investigación con el objetivo de desarrollar curas contra enfermedades. Resulta oportuno resaltar que como toda industria para el desarrollo de sus fármacos y medicamentos existen procesos los cuales tienen unas entradas y unas salidas. Para el caso de esta industria las entradas son la materia prima para la elaboración de los fármacos y las salidas son los productos y subproductos del proceso de transformación sumado a los desechos de la producción.

3.1. Medicamentos

El concepto de fármaco o medicamento es un término que se debe emplear exclusivamente para denotar el principio activo, no el producto farmacéutico. Como “principio activo” generalmente se emplea sobre todo al referirse a operaciones de formulación y fabricación. Se recomienda que el término “fármaco” se use para referirse a aquellas situaciones en las cuales el principio activo se encuentra en contacto con sistemas biológicos. También se puede designar a un medicamento como un producto farmacéutico empleado para la prevención, diagnóstico o tratamiento de una enfermedad (Arias, 1999). Los medicamentos están conformados básicamente de dos componentes, los principios activos y los excipientes. Los primeros pueden ser uno o varios, y esencialmente son los encargados de producir el efecto medicinal en el organismo. Los segundos, son sustancias inactivas que se agregan al principio activo para así, poder administrar los medicamentos (Asociación Española de Medicamentos Genéricos [AESEG], 2013). En determinados casos, algunos medicamentos contienen coadyuvantes que son los responsables de que los fármacos sean de fácil absorción (Martínez; Turégano, 2014). Además de los principios activos y los adyuvantes de formulación, en algunas ocasiones, los pigmentos y los colorantes también son componentes del fármaco (Kümmerer, 2001).

3.2. Desechos de productos farmacéuticos

La generación de residuos por parte de la manufactura farmacéutica, varía en función de las características y concentraciones utilizadas en la producción, incluso en la época del año en la que se encuentre. Se concibe que los principales residuos son originados por la limpieza de equipos, además que al efluente se le adicionaran todos los compuestos utilizados en el proceso de limpieza (Martínez *et al.*, 2018). Como lo afirma Trecco *et al.* (2011), durante el desarrollo y la producción de productos farmacéuticos, se genera una gran cantidad de residuos sanitarios, siendo la naturaleza de estos desechos muy variada, ya que pueden llegar a contener residuos biológicos, radioactivos, químicos puros y ácidos, entre otros. A pesar de que es difícil identificar las características de los efluentes provenientes de las industrias farmacéuticas, se infiere que las aguas residuales, originadas en plantas de síntesis orgánica presentan una alta concentración de demanda química de oxígeno (DQO) y salinidad (Gadipelly *et al.*, 2014).

Los hospitales son una gran fuente de contaminantes emergentes. De acuerdo con Grisales, Ortega y Rodríguez (2012) se debe a diversas actividades, como residuos de laboratorio, excreción de los pacientes, actividades de investigación, entre otros. Los productos farmacéuticos que son desechados por fuentes hospitalarias, son aquellos que, generalmente se encargan de tratar patologías más graves (Moreno-Ortiz *et*

al., 2013). Los vertimientos hospitalarios no controlados, introducen antibióticos, citotóxicos y desinfectantes provenientes de los centros de salud, siendo fuentes importantes para los cuerpos de agua (Grisales *et al.*, 2012); (Kümmerer, 2001). Los antineoplásicos (citotóxicos), son utilizados para el tratamiento de cáncer (Moreno-Ortiz *et al.*, 2013), este producto se ha detectado en concentraciones de entre 5 y 50 g/L en los vertimientos hospitalarios (Kümmerer, 2001). Los productos farmacéuticos pueden generar residuos, luego de ser consumidos, como lo exponen Snyder, Vanderford y Drewes (2009), ya que son excretados por el ser humano, presentando dos casos, el compuesto está completamente metabolizado o parcialmente metabolizado. Se estima que después de la etapa de consumo, en la excreción se presentan residuos entre un 30% y 90% de la dosis ingerida (Mudgal *et al.*, 2013). Los antibióticos pueden ser desechados hasta en un 90% por los humanos luego de su consumo, permitiendo así que estos compuestos lleguen a las aguas residuales propagándose por el medio ambiente (Akmehmet-Balcioğlu; Ötger, 2003).

4. Proceso de oxidación avanzada (POA)

Los procesos químicos de oxidación avanzada usan oxidantes (químicos) para reducir los niveles de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO), y el índice de biodegradabilidad se puede expresar como (DBO/DQO). En este caso, el índice de biodegradabilidad se relaciona directamente con la concentración de materia orgánica presente en el agua y su separación los componentes orgánicos y los componentes inorgánicos oxidables. Los procesos pueden oxidar totalmente los materiales orgánicos como carbón (C) y agua (H₂O), aunque no es a menudo necesario operar estos procesos hasta este nivel de tratamiento. Estos se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, implicando generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical hidroxilo (OH⁻). Además, la generación de radicales se genera a partir de oxígeno, agua oxigenada y catalizadores soportados, por lo que los subproductos de reacción son únicamente agua y dióxido de carbono (Bes; Silva; Bengoa, 2018).

Entre las principales tecnologías de procesos de oxidación avanzada se observan en la Tabla 1 los procesos de fenton que consiste en la adición de sales de hierro en presencia de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en medio ácido, para la formación de radicales OH⁻. A la combinación de H₂O₂ y sales de hierro se le denomina reactivo fenton. La oxidación electroquímica que se produce mediante reacciones anódicas en las que el oxígeno es transferido desde el disolvente (agua) a los productos que deben oxidarse y la ozonización que es una tecnología avanzada de oxidación, que no es exclusiva para la potabilización de agua, ya que tiene numerosas aplicaciones para el tratamiento de aguas residuales, debido a que mejora su biodegradabilidad haciendo más fácil el tratamiento biológico convencional (Patiño; Arroyave; Marín, 2012).

Tabla 1.

Principales tecnologías de procesos de oxidación avanzada

Tecnologías de oxidación avanzada	
Ozonización	Oxidación en agua sub/supercrítica
Ozono/ peróxido de hidrógeno	Fotólisis ultravioleta de vacío (UVV)
Procesos de fenton	Ultravioleta/peróxido de hidrogeno
Oxidación electroquímica	Ultravioleta ozono
Plasma no térmico	Fotólisis/ fenton
Ultrasonido	Fotocatálisis heterogénea

Fuente: elaboración propia.

5. Tratamiento de agua residual farmacéutica aplicando ozono

La presencia de medicamentos en el medio ambiente, ha sido investigada por distintos profesionales. Se calcula que aproximadamente la mitad de las aguas, provenientes de las industrias farmacéutica en el mundo se vierten sin un tratamiento específico (Enick; Moore, 2007; Lange *et al.*, 2006), lo que genera la presencia de residuos farmacéuticos en los ecosistemas. En 1970 se reportó por primera vez la presencia de fármacos cardiovasculares, analgésicos y anticonceptivos en aguas residuales de EE.UU. (Tambosi; Yamanaka; José; Muniz; Schröder, 2010). La importancia de detectar estos productos se debe a que los compuestos farmacéuticos liberados en el medio ambiente pueden ser tóxicos, afectando cualquier nivel de la jerarquía biológica (células, órganos, organismos, población, ecosistemas o ecosfera) (Klavarioti *et al.*, 2009). Por su parte, los tratamientos convencionales se ven limitados por las distintas características y componentes que presenta el agua residual farmacéutica. La presencia de estos residuos en el ambiente y en los sistemas acuáticos, constituyen un serio problema ya que son extremadamente resistentes a la degradación biológica y usualmente escapan intactos al tratamiento de plantas convencionales (Oller; Malato; Sánchez-Pérez, 2011). De este modo, por medio de la técnica de la ozonización se eliminan residuos de medicamentos presentes en aguas residuales, es el caso de fármacos como el ibuprofeno, diclofenaco y propofol, entre otros, y se mejora la biodegradabilidad de las aguas residuales farmacéuticas (Huang *et al.*, 2020). En la Tabla 2 se indica el uso generalizado que permite la descarga continua de los mismos y sus productos.

Tabla 2.

Fármacos presentes en aguas residuales que han sido tratados por medio de la técnica de ozonización

Fármaco	Nombre sistemático
Ibuprofeno	(RS)-2-(4-(2-methylpropyl) phenyl) ácido propanoico
Paracetamol	N-acetil-4-aminofenol
Diclofenaco	Diclofenac 2-(2, 6-dicloroanilino)
Propofol	(2,6-Bis(1-metiletil) fenol)
Codeína	3-metilmorfinas

Fuente: elaboración propia.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) generalmente son ineficientes, ya que determinados compuestos farmacéuticos salen del tratamiento sin verse afectados, lo cual provoca la aplicación de tratamientos posteriores (Klavarioti *et al.*, 2009). Una combinación recomendada por Mascolo *et al.* (2010) es la de integrar al proceso biológico, la ozonización, ya que consideran que el proceso biológico reduce la carga de contaminantes y la ozonización oxidaría los productos restantes.

Resulta oportuno indicar que el ozono es un gas incoloro, de olor fuerte, con alto poder oxidante, es la forma triatómica del oxígeno (Teixeira, 2002), el mismo es utilizado como un proceso de oxidación avanzado (POA) homogéneo y es el segundo oxidante más poderoso (el flúor lo supera por su potencial de oxidación) (Grisales *et al.*, 2012). Su uso ha permitido un notable mejoramiento del gusto, color, características de filtración y biodegradabilidad del agua (Muñoz; Malato; Rodríguez; Domènech, 2008), además, de inhibir el crecimiento de hongos y algas, y reducir la turbiedad (Ponce, 2005). Es generalmente utilizado para eliminar los contaminantes presentes en el agua. En ese mismo sentido su proceso puede realizarse mediante reacción directa. El ozono está disponible como ozono molecular y reacciona con los compuestos orgánicos disueltos en agua o mediante la reacción de estos compuestos orgánicos con radicales OH⁻, generados a partir de la descomposición del ozono cuando se disuelve en agua (reacción indirecta) (Quiroga *et al.*, 2015). Es necesario recalcar que el ozono en solución acuosa puede reaccionar con la mayoría de contaminantes que están en las aguas residuales industriales de dos diferentes maneras: 1) por reacción directa del ozono molecular o 2) por reacción de las especies formadas por la descomposición del ozono en el agua (radicales libres) (Masten; Davies, 1994; Hoigné; Bader, 1977).

El proceso de ozonización permite degradar compuestos orgánicos tóxicos aumentando así la biodegradabilidad del efluente, ya que el ozono es un oxidante eficaz, así mismo también es capaz de reducir las concentraciones de muchos productos farmacéuticos (Bahr *et al.*, 2007; Kim; Tanaka, 2010; Snyder; Wert; Rexing; Zegers; Drury, 2006). Algunos estudios demuestran, que los compuestos presentan una gran reactividad con el ozono, por ejemplo, los antibióticos y anticonceptivos, se transforman rápidamente con el ozono, así mismo se ha demostrado que los antiinflamatorios que contienen grupos amino y los antiepilépticos con doble cadena muestran una alta reacción con el ozono (Grisales *et al.*, 2012). Diversos estudios recalcan la importancia del tratamiento por medio de ozono de trazas de residuos farmacéuticos en aguas residuales. En la Tabla 3 se indican algunas de esas investigaciones como Quiroga *et al.*, (2015) en donde hacen referencia a la ozonización como tratamiento avanzado para la eliminación de fármacos, o el estudio piloto realizado por Huber *et al.* (2005) sobre la oxidación de productos farmacéuticos durante la ozonización de efluentes de aguas residuales municipales.

Tabla 3.

Otros estudios sobre tratamiento con ozono de fármacos presentes en aguas residuales

Artículo	Autor/Año
Tratamientos avanzados para la eliminación de fármacos en aguas superficiales	Quiroga et al., (2015)
Ozonation of pharmaceutical compounds: Rate constants and elimination in various water matrices	Benítez; Acero; Real y Roldán (2009)
Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater effluents: A pilot study.	Huber et al. (2005)
Revisión de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales incluyendo algunos fármacos	Miceli-Montesinos; Nájera-Aguilar; Rojas-Valencia; Quintero-López y Orantes-García (2014)
Tratamiento de Efluentes Industriais por Processos Oxidativos na presença de ozônio	Almeida; Assalin; Rosal; Durán (2004)
Tecnologías para la eliminación de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión	Barrios; Gaviria; Agudelo; Cardona (2015)
Contaminantes emergentes y su impacto en la salud	Reinoso; Serrano; Orellano (2017)
Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán	Robledo-Zacarías; Velázquez-Machuca; Montañez-Soto; Pimentel-Equihua; Vallejo-Cardona; López-Calvillo; Venegas-González (2017)

Fuente: elaboración propia.

6. Persistencia de los fármacos

La presencia de los productos farmacéuticos en una fuente de agua, pueden variar de un lugar a otro en función del tipo de productos y el volumen de la descarga en las masas de agua. En consecuencia, la persistencia de estos contaminantes en la naturaleza depende, entre otros factores, de las características de los fármacos, del volumen excretado y de las características de los compartimentos medioambientales. Por ejemplo, los fármacos liposolubles pueden acumularse en el tejido graso animal e incorporarse a la cadena alimentaria (etinilestradiol es un candidato potencial para bioacumularse en grandes depredadores (Mudgal *et al.*, 2013). En algunos de estos fármacos, se ha confirmado su persistencia durante el tratamiento a las aguas residuales, detectando concentraciones, por ejemplo, de iopromide, por encima de 20 mg L⁻¹. Así, el diatrizoato, el iopromido, el iopomidol y el ácido amidotrizoico se cuantificaron en concentraciones de µg L⁻¹ (Ramos, 2009). La persistencia de estos compuestos en las aguas residuales puede deberse a sus mezclas y características fisicoquímicas, así como de su procedencia. Aunque estas sustancias están presentes en las aguas en bajas concentraciones, pueden llegar a tener una importante huella en los ecosistemas, en general, la presencia de restos farmacéuticos en el ambiente y en los sistemas acuáticos, constituyen un serio problema, ya que son extremadamente resistentes a la degradación biológica, siendo a veces ineficaces los tratamientos con reactores biológicos convencionales de las plantas de tratamiento de agua residual.

7. Metodología

Para realizar localización de los documentos bibliográficos se utilizaron varias fuentes documentales. Se procedió a realizar una revisión sistemática enfocada a los artículos que nos pudieran arrojar luces sobre los tratamientos de los contaminantes emergentes que se encuentra en las aguas residuales farmacéuticas por medio del tratamiento de la ozonización. Las unidades de análisis fueron todos aquellos documentos sobre el tema encontrados en las bases de datos Google académico, Redalyc, Scielo, Redib y ScieniceDirect. Los algoritmos o criterios de búsqueda incluyeron los siguientes descriptores: ozonización, aguas farmacéuticas, contaminante emergente, medicamentos, residuos farmacéuticos y tratamiento de aguas residuales farmacéuticas. Estos descriptores fueron combinados de diversas formas al momento de la exploración con el objetivo de ampliar los criterios de búsqueda. Al realizar la búsqueda de los documentos en cada una de las bases de datos se preseleccionaron 68 artículos de los cuales se escogieron 56 de acuerdo a los criterios de inclusión y exclusión. No se tomaron en consideración para el análisis aquellos artículos que no hacían alusión a los núcleos temáticos y/ o aquellos que no se encontraban en revistas indexadas. Para la organización de los documentos se realizó una matriz en Excel con los siguientes datos: nombre, autor, doi o URL, objetivo, descripción, metodología, resultados, conclusiones, revista, país, disciplina, algoritmo de búsqueda y buscador. Finalmente se realizó un análisis global de cada uno de los artículos mediante el cual se identificaron los puntos esenciales del análisis, se formularon preguntas, los resultados y conclusiones.

En la Figura 1 se puede observar la distribución de los artículos revisados desde el 2010, cabe destacar que fueron los años 2013 y 2015, en los que más publicaciones sobre el tema se encontraron en la revisión realizada.

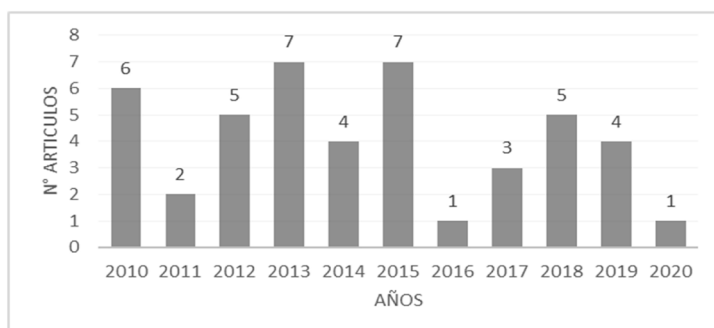


Figura 1. Distribución de artículos desde el 2010
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2 se puede apreciar el número de documentos por idioma. Para el caso de nuestra revisión sistemática se encontraron en inglés treinta y tres (33) el de mayor numero, seguido del idioma español con veintidós (22) y uno (1) artículo en idioma portugués.

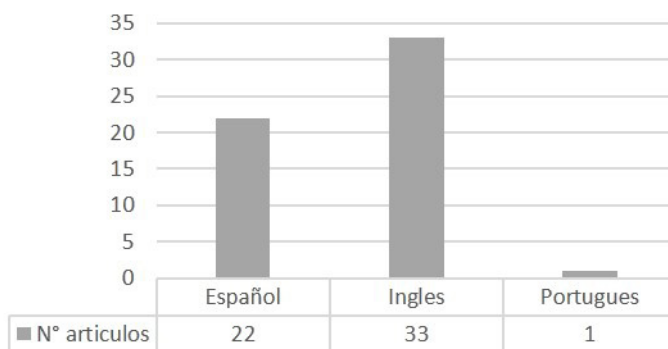


Figura 2. Número de artículos revisados por idioma
Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 4 se pueden evidenciar las principales revistas científicas indexadas de donde se extrajo la información para la revisión, identificándose las revistas internacionales de países como Alemania, Corea, Turquía, Italia entre otras.

Tabla 4.

Principales revistas por país utilizadas en la revisión

Revista	País
Journal of hazardous materials	Egipto
Water Science and Technolog	Alemania
Science of the Total Environment	Corea
Chemosphere	Turquia
Toxicology Letters	Reino Unido
Journal of Bioremediation & Biodegradation	Italia
Water Research	Grecia
Environmental Toxicology: An International Journal	EE.UU
Regulatory Toxicology and Pharmacology	Dinamarca

Fuente: elaboración propia.

En la revisión también se evidencio las disciplinas académicas que han realizado un mayor número de estudios en relación a los tratamientos de fármacos por medio de ozonización, entre ellas tenemos la toxicología y la ingeniería química, seguidas del medio ambiente, la ecoquímica y la ingeniería civil.

8. Resultados más relevantes

Entre los medicamentos más frecuentes en aguas residuales farmacéuticas y que han sido objeto de tratamientos por medio de la ozonización podemos encontrar: diclofenaco, el ibuprofeno, amoxicilina, paracetamol, carbamazepina. Metoprolol, fenacetina, codeína, sulfaclorpiridazina, sulfadimetoxina, sulfamerazina, sulfametazina. sulfatiazol y trimetoprim.

Como resultado de la revisión se pudo evidenciar como la ozonización en un alto número de estudios resulta ser efectiva cuando hablamos de la capacidad de eliminar contaminantes tóxicos de las aguas residuales farmacéuticas. Hay que mencionar además que el nivel de concentración de los residuos de fármacos depende de la fuente donde se estén generando, ya que los podemos encontrar no solo en la industria farmacéutica, sino en actividades tan simples como higiene personal, las actividades pecuarias, las labores de limpieza y desinfección entre otras. El proceso de ozonización es altamente beneficioso para la mitigación de la contaminación de cuerpos aguas superficiales con medicamentos ya que permite la biodegradación del efluente, siendo el ozono un oxidante altamente eficaz, así mismo contribuyendo a inhibir el crecimiento de algas y hongos en las mismas. De igual modo hay que destacar entre los resultados de la revisión es que se menciona notablemente en varios de los documentos la alta persistencia de los residuos emergentes en aguas residuales, lo que muchas veces lleva a generar impactos relevantes como la afectación la fauna acuática presente en aguas superficiales.

9. Conclusiones

Los residuos emergentes despiertan actualmente un gran interés para nuevos estudios e investigaciones, ya que su presencia en el medio ambiente puede producir alteraciones potencialmente nocivas para los humanos y animales, además se conoce muy poco de ellos, por lo que se hace necesario aumentar el nivel de investigación respecto a estos. Los tratamientos convencionales de aguas residuales han demostrado ser ineficientes en la

remoción de contaminantes farmacéuticos, por lo cual es necesario buscar e investigar sobre nuevos tratamientos avanzados en aguas residuales, que permitan contribuir a eliminar o reducir de manera eficiente el porcentaje de contaminación que este tipo de contaminantes genera al medio ambiente.

La técnica de ozonización apunta a dar ventajas ambientales, sanitarias y económicas para la eliminación de la contaminación. Con el uso de tratamientos terciarios avanzados, se logran extraer compuestos emergentes o microcontaminantes, especialmente las sustancias farmacológicas que hoy tienen el riesgo viable de amenazar la calidad de las aguas de consumo humano. Es esencial reducir el uso de productos químicos, por ejemplo, con el uso de dosis mínimas de fármacos para proteger la salud del medio ambiente acuático y reducir los costes que se puedan generar de la depuración del agua, sobre todo en las industrias farmacéuticas adaptándose a las características y especificaciones de sus efluentes, evitando así, que estos contaminantes lleguen a las plantas de tratamiento de agua residual o potable. Esto debido a que la presencia de fármacos o contaminantes emergentes en los cuerpos de agua, genera una problemática ambiental de gran magnitud, ya que estos productos suelen intervenir en las cadenas tróficas de las especies allí presentes, modificando parte de su fisiología, su comportamiento, e incluso, en el caso de las bacterias volviéndolas resistentes.

Referencias

- Arbeláez, Paula (2015). *Contaminantes emergentes en aguas residuales y de río y fangos de depuradora* (tesis doctoral). Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, España.
- Arias, Tomás (1999). *Glosario de medicamentos: Desarrollo, evaluación y uso*. Washington, D.C.: Organización Panamericana de la Salud.
- Almeida, Edna; Assalin, Márcia; Rosa, Maria; Durán, Nelson (2004). Tratamiento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. *Química Nova*, 27(2), 818-824.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000500023>
- Asociación Española de Medicamentos Genéricos (2013). *¿Qué es un principio activo?* Recuperado de:
<https://www.engenerico.com/que-es-un-principio-activo/>
- Akmehmet-Balcioğlu, Işıl; Ötöker, Merih (2003). Treatment of pharmaceutical wastewater containing antibiotics by O₃ and O₃/H₂O₂ processes. *Chemosphere*, 50(1), 85-95.
[https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00534-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00534-9)
- Arslan-Alaton, Idil; Caglayan, Ali (2006). Toxicity and biodegradability assessment of raw and ozonated procaine penicillin G formulation effluent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 63(1), 131-140.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.02.014>
- Bahr, Carsten; Schumacher, Jochen; Ernst, Mathias; Luck, Francis; Heinzmann, B.; Jekel, Martin (2007). SUVA as control parameter for the effective ozonation of organic pollutants in secondary effluent. *Water Science and Technology*, 55(12), 267-274.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.2007.418>
- Barrios-Ziolo, L.F.; Gaviria-Restrepo, L.F.; Agudelo, E.A.; Cardona-Gallo, S.A. (2015). Technologies for the removal of dyes and pigments present in wastewater. A review. (2015) *DYNA*, 82 (191), 118-126.
[10.15446/dyna.v82n191.42924](https://doi.org/10.15446/dyna.v82n191.42924)
- Benítez, Javier; Acero, Juan; Real, Francisco; Roldán, Gloria (2009). Ozonation of pharmaceutical compounds: Rate constants and elimination in various water matrices. *Chemosphere*, 77(1), 53-59.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.05.035>

- Bes, Sarai; Silva, Adrián; Bengoa, Christophe (2018). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. España: CYTED.
- Carpiuc, Lucia (19 de julio de 2015). *Agua de uso farmacéutico*. Recuperado de: <https://vdocuments.mx/agua-de-uso-farmacutico.html>
- Reinoso, Julieta; Serrano, Clara; Orellana Danilo (2017). Contaminantes emergentes y su impacto en la salud. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad de Cuenca*, 35(2), 55-59.
- Confederación Española de Organizaciones Empresariales (5 de abril de 2019). *La industria farmacéutica y sus contribuciones a la salud mundial*. Recuperado de: <https://www.ceoe.es/es/contenido/actualidad/noticias/la-industria-farmacutica-y-sus-contribuciones-a-la-salud-mundial>
- Enick, Oana; Moore, Margo (2007). Assessing the assessments: pharmaceuticals in the environment. *Environmental Impact Assessment Review*, 27(8), 707-729. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.01.001>
- Farmacontaminación. Impacto ambiental de los medicamentos (2016). Información Farmacoterapéutica de la Comarca [INFAC], 24(2), 59-64.
- Forero, Jorge; Ortiz, Olga; Ríos, Fabián (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales de refinería. *Ciencia Tecnología y Futuro*, 3(1), 97-109.
- Gadipelly, Chandrakanth; Pérez-González, Antía; Yadav, Ganapati; Ortiz, Inmaculada; Ibáñez, Raquel; Rathod, Virendra; Marathe, Kumudini (2014). Pharmaceutical industry wastewater: Review of the technologies for water treatment and reuse. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(29), 11571-11592. <https://doi.org/10.1021/ie501210j>
- Gharbani, P.; Khosravi, M.; Tabatabaie, S.; Zare, K.; Dastmalchi, S.; Mehrizad, A. (2010). Degradation of trace aqueous 4-chloro-2-nitrophenol occurring in pharmaceutical industrial wastewater by ozone. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7, 377-384. <https://doi.org/10.1007/BF03326147>
- Grisales, Dayana; Ortega, Joela; Rodríguez, Tatiana (2012). Remoción de la materia orgánica y toxicidad en aguas residuales hospitalarias aplicando ozono. *DYNA*, 79(173), 109-115.
- Huber, Marc; Göbel, Anke; Joss, Adriano; Hermann, Nadine; Löffler, Dirk; McArdell, Christa; Ried, Achim; Siegrist, Hansruedi; Ternes, Thomas; Gunten, Urs von (2005). Oxidation of Pharmaceuticals during Ozonation of Municipal Wastewater Effluents: A Pilot Study. *Environmental Science & Technology*, 39(11), 4290-4299. <https://doi.org/10.1021/es048396s>
- Hoigné, J.; Bader, H. (1977). Ozonation of Water: Selectivity and Rate of Oxidation of Solutes. *Ozone: Science & Engineering*, 1, 73-85. <https://doi.org/10.1080/01919517908550834>
- Huang, Yuanxing; Jiang, Jiewen; Ma, Luming; Wang, Yaowei; Liang, Manli; Zhang, Zhiguo; Li, Liang. (2020). Iron foam combined ozonation for enhanced treatment of pharmaceutical wastewater. *Environmental Research*, 83, 109-205. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109205>

- Instituto Nacional de Medicamentos (2014). *Farmacopea argentina* (7 ed.) Recuperado de:
http://www.anmat.gov.ar/webanmat/fna/flip_pages/Farmacopea_Vol_IV/files/assets/basic-html/toc.html
- Kim, Ilho; Tanaka, Hiroaki (2010). Use of ozone-based processes for the removal of pharmaceuticals detected in a wastewater treatment plant. *Water Environment Research*, 82(4), 294–301.
[doi: 10.2307/25679780](https://doi.org/10.2307/25679780)
- Klavarioti, Maria; Mantzavinos, Dionissios; Kassinos, Despo (2009). Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *Environment International*, 35(2), 402–417.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.009>
- Kümmerer, Klaus (2001). Drugs in the environment: Emission of drugs, diagnostic aids and disinfectants into wastewater by hospitals in relation to other sources - A review. *Chemosphere*, 45(6–7), 957–969. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00144-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00144-8)
- Lange, Franziska; Cornelissen, Sjeff; Kubac, David; Sein, Myint M.; Sonntag, Justus von; Hannich, Christoph B.; Sonntag, Clemens von (2006). Degradation of macrolide antibiotics by ozone: a mechanistic case study with clarithromycin. *Chemosphere*, 65(1), 17–23.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.014>
- Lester, Yaal; Mamane, Hadas; Zucker, Ines; Avisar, Dror (2013). Treating wastewater from a pharmaceutical formulation facility by biological process and ozone. *Water Research*, 47(13), 4349–4356.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.04.059>
- Lichtenberg, Frank (2014). Pharmaceutical Innovation and Longevity Growth in 30 Developing and High-income Countries, 2000–2009. *Health Policy and Technology*, 3(1), 36–58.
<https://doi.org/10.1016/j.hlpt.2013.09.005>
- Masten, Susan; Davies, Simón (1994). The use of Ozonation to degrade organic contaminants in wasterwaters. *Environmental Science & Technology*, 28 (4), 180–186.
<https://doi.org/10.1021/es00053a718>
- Martínez, Fernando; Molina, R.; Rodríguez, Ivan; Pariente, Isabel; Segura, Yolanda; Melero, Juan (2018a). Techno-economical assessment of coupling Fenton/biological processes for the treatment of a pharmaceutical wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 485–4.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.008>
- Martínez, Francisco; Turégano, Juan (2014). *Ciencia para el Mundo Contemporáneo: Guía de Recursos Didácticos*. Recuperado de:
http://www3.gobiernodecanarias.org/aciisi/cienciasmc/web/pdf/u5_salud_y_enfermedad.pdf
- Mascolo, Giuseppe; Laera, Giuseppe; Pollice, Alfieri; Cassano, Daniela; Pinto, Appio; Salerno, Carlo; Lopez, Antonio (2010). Effective organics degradation from pharmaceutical wastewater by an integrated process including membrane bioreactor and ozonation. *Chemosphere*, 78(9), 1100–1109.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.042>
- Moreno-Ortiz, Victor; Martínez-Núñez, Juan; Kravzov-Jinich, Jaime; Pérez-Hernández, Luis; Moreno-Bonett, Consuelo; Altagrancia-Martínez; Marina (2013). Los medicamentos de receta de origen sintético y su impacto en el medio ambiente. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 44(4), 17–29.

- Mudgal, Shailendra; De Toni, Arianna; Lockwood, Sarah; Salès, Katherine; Backhaus, Thomas; Halling Bent (2013). *Study on the environmental risks of medicinal products Executive*. Francia: Bio Intelligence Service.
- Muñoz, Ivan; Malato, Sixto; Rodríguez, Amadeo; Domènech, Xavier (2008). Integration of environmental and economic performance of processes. Case study on advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 11(2), 270–275.
<https://doi.org/10.1515/jaots-2008-0211>
- Miceli-Montesinos, Auzania; Nájera-Aguilar, Hugo; Rojas-Valencia, María; Quintero-López, Luz; Orantes-García, Carolina (2014). Revisión de Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales incluyendo algunos fármacos. *Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 3(5), 73-96.
[doi: 10.31644/IMASD.5.2014.a04](https://doi.org/10.31644/IMASD.5.2014.a04)
- Oller, Isabel; Malato, S.; Sánchez-Pérez, José (2011). Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination—a review. *Science of the Total Environment*, 409(20), 4141–4166.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.061>
- Organización Mundial de la Salud (2019). *Agua, Saneamiento e Higiene: Productos farmacéuticos en el agua potable*. Recuperado de:
https://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/es/
- Owen, Stewart; Giltrow, Emma; Huggett, Duane; Hutchinson, Thomas; Saye, JoAnne; Winter, Matthew; Sumpter, John (2007). Comparative physiology, pharmacology and toxicology of β -blockers: mammals versus fish. *Aquatic Toxicology*, 82(3), 145–162.
<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.02.007>
- Patiño, Kelly; Arroyave, Sandra; Marín, Juan (2012). Oxidación Electroquímica y Ozonización Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel. *Informacion tecnologica*, 23(2), 41-52.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000200006>
- Martins Pinheiro, A., Salla, M. R., & Bolanos Rojas, M. L. (2019). Tratamiento de aguas residuales provenientes de industria de productos de limpieza y desinfectantes por ozonización convencional y catalítica. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(2), 223-235.
- Ponce, Efraín. (2005). *Diseño de un tren de potabilizacion para una planta generadora de agua embotellada* (tesis de pregrado). Universidad de las Américas Puebla, Mexico.
- Quiroga; José; Quero-Pastor, Maria; Acevedo, Asunción (2015). Tratamientos avanzados para la eliminación de fármacos en aguas superficiales, *Revista de Salud Ambiental (Espec. Congr.)*, 15, 12-64.
- Ramírez, Lenin; Chicaiza, Sabrina; Ramos, Allan; Álvarez, Cesar (2019). Detección de antibióticos betalactámicos, tetraciclinas y sulfamidas como contaminantes emergentes en los ríos San Pedro y Pita del cantón Rumiñahui. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 30(2), 88-102.
- Ramos, Caridad; Espinosa, Maria; López, Matilde; Pellón, Alexis (2005). Tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria de medicamentos. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 36(1), 39–44.
- Ramos, Caridad (2009a). Medicamentos de consumo humano en el agua, propiedades físico-químicas. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 47(2), 1-18.

- Remington, Joseph; Gennaro, Alfonso (1990). *Remington's Pharmaceutical Sciences* (18 ed.) Easton, Pensilvania: Mack Publishing Company.
- Robledo Zacarías, V. H., Velázquez Machuca, M. A., Montañez Soto, J. L., Pimentel Equihua, J. L., Vallejo Cardona, A. A., López Calvillo, M. D., & Venegas González, J. (2017). Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(2), 221-235.
- Rodríguez, Rita (2013). *Influencia de los fármacos presentes en el agua residual sobre la resistencia de la bacteria Escherichia coli y su eliminación por oxidación avanzada* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Schwaiger, Julia; Ferling, Hermann; Mallow, U.; Wintermayr, H.; Negele, Rolf (2004). Toxic effects of the non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac: Part I: histopathological alterations and bioaccumulation in rainbow trout. *Aquatic Toxicology*, 68(2), 141-150.
<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.03.014>
- Snyder, Shane; Wert, Eric; Rexing, David; Zegers, Ronald; Drury, Douglas (2006). Ozone oxidation of endocrine disruptors and pharmaceuticals in surface water and wastewater. *Ozone: Science and Engineering*, 28(6), 445-460.
<https://doi.org/10.1080/01919510601039726>
- Snyder, S.; Vanderford, B. J.; Drewes, J. (2009). *State of knowledge of endocrine disruptors and pharmaceuticals in drinking water*. Estados Unidos: Water Environment Research Foundation.
- Tambosi, José; Yamanaka, Leonardo; José, Humberto; Muniz, Regina de Fátima; Schröder, Horst (2010). Recent research data on the removal of pharmaceuticals from sewage treatment plants (STP). *Química Nova*, 33(2), 411-420.
- Teixeira, Claudia (2002). *Estudo comparativo de tipos diferentes de processos oxidativos avançados* (tesis doctoral). Universidade Estadual de Campinas, Brasil.
- Torres, Amarilys (2010). Medicamentos y transnacionales farmacéuticas: impacto en el acceso a los medicamentos para los países subdesarrollados. *Revista Cubana de Farmacia*, 44(1), 97-110.
- Trecco, Cecilia; Castello, Vanesa; Kedikian, Romina; Sobrero, Cecilia; Sisti, Ada; Oviedo, Sergio (2011). Efficient management of waste within the best practices of the pharmaceutical industries. *Producción + Limpia*, 6(2), 32-46.
- Tuset, Sergio (11 de febrero de 2019). *Tratamiento de aguas residuales en la industria farmacéutica* [Mensaje en un blog]. Recuperado de:
<https://blog.condorchem.com/tratamiento-de-aguas-residuales-en-la-industria-papelera/>
- Verlicchi, Paola; Galletti, Alessio; Petrovic, Mira; Barceló, Damiá (2010). Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options. *Journal of Hydrology*, 389(3-4), 416-428.