

Síntesis y Caracterización de Materiales Cerámicos a Partir de Lodos Residuales del Tratamiento  
de Agua Potable

Giselle Carolina Barón Gualdrón

Trabajo de grado presentado para optar por el título de Química

Directora

Ángela Marcela Montaña Angarita

Doctora en Química.

Codirectora

Claudia Paulina González Cuervo

Doctora en Ciencias-Física.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Bucaramanga

2018

### **Agradecimientos**

A la planta de tratamiento Algodonal por la colaboración en la recolección, almacenamiento y posterior envío de la materia prima.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por su apoyo económico a través del proyecto de convocatoria interna numero 1869 titulado Elaboración de materiales cerámicos a partir de lodos generados en una planta de tratamiento de agua potable.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	16
1 Marco de referencia .....	18
1.1 Marco de antecedentes .....	18
1.2 Marco teórico .....	20
2 Propuesta y plan de trabajo .....	23
2.1 Hipótesis .....	23
2.2 Objetivos .....	24
2.2.1 Objetivo general .....	24
2.2.2 Objetivos específicos .....	24
2.3 Metodología .....	25
2.3.1 Materias primas .....	25
2.3.1.1 Arcilla roja. ....	25
2.3.1.2 Lodo. ....	25
2.3.1.3 Bentonita. ...	26
2.3.2 Ensayos preliminares .....	26
2.3.3 Elaboración de cerámicos .....	27

2.3.4 Caracterización mecánica .....	29
2.3.4.1 Resistencia a la compresión .....	30
2.3.4.2 Absorción de agua, ensayo de inmersión durante 24 horas .....	30
2.3.4.3 Absorción de agua y coeficiente de saturación, ensayo de inmersión en ebullición 1 hora .....	31
2.3.4.4 Resistencia a ácidos .....	32
2.3.4.5 Resistencia a bases .....	33
2.3.5 Técnicas de identificación y caracterización estructural .....	33
2.3.5.1 Fluorescencia de rayos X .....	33
2.3.5.2 Difracción de rayos X de muestras policristalinas (DRX) e identificación.....	34
2.3.5.3 Termodifracción de rayos X de muestras policristalinas e identificación .....	35
2.3.5.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de dispersión de energía (EDS) .....	36
2.3.5.5 Espectroscopía ultravioleta visible (UV-Vis) .....	36
3 Resultados y análisis .....	37
3.1 Caracterización mecánica .....	37
3.1.1 Resistencia a la compresión .....	37
3.1.2 Absorción de agua, ensayo de inmersión durante 24 horas .....	40
3.1.3 Absorción de agua y coeficiente de saturación, ensayo de inmersión en ebullición 1 hora	43
3.1.4 Ataque químico .....	45

3.1.4.1 Resistencia a ácidos .....	45
3.1.4.2 Resistencia a bases .....	47
3.2 Caracterización estructural.....	49
3.2.1 Fluorescencia de rayos X.....	49
3.2.2 Difracción de rayos X de muestras policristalinas (DRX) e identificación.....	50
3.2.3 Termodifracción de rayos X de muestras policristalinas e identificación. ....	54
3.2.3.1 Termodifracción del lodo.....	55
3.2.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de dispersión de energía (EDS) .....	57
3.3 Remoción de colorantes .....	63
4. Conclusiones .....	66
Referencias Bibliográficas .....	67
Apéndices.....	74

### Lista de Figuras

Figura 1: Estructura de la caolinita .....	21
Figura 2: Estructura de una esméctita .....	22
Figura 3: Promedio de la resistencia mecánica de las unidades formadas .....	38
Figura 4: Ensayo de inmersión en agua fría.....	41
Figura 5: Ensayo de inmersión en agua caliente.....	43
Figura 6: Promedio de la resistencia mecánica luego de ataque ácido .....	46
Figura 7: Promedio de la resistencia mecánica luego de ataque básico .....	48
Figura 8: Difractograma mezcla 8 .....	51
Figura 9: Difractograma mezcla 3 .....	52
Figura 10: Difractograma mezcla 7 .....	53
Figura 11: Difractogramas termodifracción del lodo; A) lodo sin sinterizar, B) lodo a 105 °C, C) lodo a 600 °C, D) lodo a 900 °C, E) lodo a 1100 °C y F) lodo a 25 °C luego de sinterizar.....	56
Figura 12: Micrografías SEM de la arcilla con aumentos de 100x y 400 x respectivamente.....	57
Figura 13: Micrografías SEM de la mezcla 8 con aumentos de 100x y 400 x respectivamente ..	58
Figura 14: Micrografías SEM de la mezcla 3 con aumentos de 100x y 400 x respectivamente ..	59
Figura 15: Micrografías SEM de la mezcla 7 con aumentos de 100x y 400 x respectivamente ..	60
Figura 16: Análisis EDS de la mezcla 1 en dos puntos .....	61
Figura 17: Análisis EDS de la mezcla 8 en dos puntos .....	61
Figura 18: Análisis EDS de la mezcla 3 en dos puntos .....	62

**Lista de Tablas**

Tabla 1: Proporción de materias primas en cada mezcla.....	28
Tabla 2: Promedio de la resistencia a la compresión de las unidades formadas.....	37
Tabla 3: Promedio ensayo de inmersión de agua en frío .....	40
Tabla 4: Promedio ensayo de inmersión de agua en ebullición.....	43
Tabla 5: Promedio de la resistencia a la compresión después de ataque ácido .....	45
Tabla 6: Promedio de resistencia a la compresión después de ataque básico.....	47
Tabla 7: Concentración de naranja de metilo luego de inmersión.....	63
Tabla 8: Concentración corregida de naranja de metilo luego de inmersión.....	64

**Lista de Apéndices**

Apéndice 1. Tabla de resistencia mecánica de mezclas arcilla-lodo .....	74
Apéndice 2. Gráfico de resistencia mecánica de mezclas arcilla-lodo .....	74
Apéndice 3. Tabla de resistencia mecánica de mezclas arcilla-dopante, siendo los dopantes: Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B).....	75
Apéndice 4. Gráfico de resistencia mecánica de mezclas arcilla-dopante, siendo los dopantes: Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B).....	75
Apéndice 5. Tabla de resistencia mecánica de mezclas lodo-dopante, siendo los dopantes: Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B).....	76
Apéndice 6. Gráfico de resistencia mecánica de mezclas lodo-dopante, siendo los dopantes: Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B).....	76
Apéndice 7. Difractograma de la arcilla sin calentamiento .....	77
Apéndice 8: Fases mineralógicas de la arcilla sin calentamiento .....	77
Apéndice 9: Difractograma de la arcilla sinterizada (preliminar) .....	78
Apéndice 10: Fases mineralógicas de la arcilla sinterizada (preliminar) .....	78
Apéndice 11: Difractograma del lodo.....	79
Apéndice 12: Fases mineralógicas del lodo.....	79
Apéndice 13: Difractograma del lodo sinterizado (preliminar).....	80
Apéndice 14: Fases mineralógicas del lodo (preliminar) .....	80

Apéndice 15: Fluorescencia de Rayos X de la arcilla.....	81
Apéndice 16: Fluorescencia de Rayos X del lodo .....	82
Apéndice 17: Difractograma de la bentonita .....	83
Apéndice 18: Fases mineralógicas de la bentonita .....	83
Apéndice 19: Valores críticos del parámetro $r_{11}$ para la prueba de Dixon(Rorabacher, 1991).....	84
Apéndice 20: Resistencia a la compresión Mezcla 1 .....	85
Apéndice 21: Resistencia a la compresión Mezcla 2.....	86
Apéndice 22: Resistencia a la compresión Mezcla 3.....	87
Apéndice 23: Resistencia a la compresión Mezcla 4.....	88
Apéndice 24: Resistencia a la compresión Mezcla 5.....	89
Apéndice 25: Resistencia a la compresión Mezcla 6.....	90
Apéndice 26: Resistencia a la compresión Mezcla 7 .....	91
Apéndice 27: Resistencia a la compresión Mezcla 8.....	92
Apéndice 28: Ensayo de inmersión agua en frio Mezcla 1.....	93
Apéndice 29: Ensayo de inmersión agua en frio Mezcla 2.....	94
Apéndice 30: Ensayo de inmersión agua en frio Mezcla 3.....	95
Apéndice 31: Ensayo de inmersión agua en frio Mezcla 4.....	96
Apéndice 32: Ensayo de inmersión agua en frio Mezcla 5.....	97
Apéndice 33: Ensayo de inmersión agua en frio Mezcla 6.....	98
Apéndice 34: Ensayo de inmersión agua en frio Mezcla 7.....	99
Apéndice 35: Ensayo de inmersión agua en frio Mezcla 8.....	100
Apéndice 36: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 1 .....	101
Apéndice 37: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 2 .....	102

Apéndice 38: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 3 .....	103
Apéndice 39: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 4 .....	104
Apéndice 40: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 5 .....	105
Apéndice 41: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 6 .....	106
Apéndice 42: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 7 .....	107
Apéndice 43: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 8 .....	108
Apéndice 44: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 1 .....	109
Apéndice 45: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 2 .....	110
Apéndice 46: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 3 .....	111
Apéndice 47: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 4 .....	112
Apéndice 48: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 5 .....	113
Apéndice 49: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 6 .....	114
Apéndice 50: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 7 .....	115
Apéndice 51: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 8 .....	116
Apéndice 52: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 1 .....	117
Apéndice 53: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 2 .....	118
Apéndice 54: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 3 .....	119
Apéndice 55: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 4 .....	120
Apéndice 56: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 5 .....	121
Apéndice 57: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 6 .....	122
Apéndice 58: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 7 .....	123
Apéndice 59: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 8 .....	124
Apéndice 60: Fases mineralógicas de la mezcla 8.....	125

Apéndice 61: Fases mineralógicas de la mezcla 3.....	125
Apéndice 62: Difractograma del lodo a 25 °C.....	126
Apéndice 63: Fases mineralógicas del lodo a 25 °C.....	126
Apéndice 64: Difractograma del lodo a 105 °C.....	127
Apéndice 65: Fases mineralógicas del lodo a 105 °C.....	127
Apéndice 66: Difractograma del lodo a 600 °C.....	128
Apéndice 67: Fases mineralógicas del lodo a 600 °C.....	128
Apéndice 68: Difractograma del lodo a 900 °C.....	129
Apéndice 69: Fases mineralógicas del lodo a 900 °C.....	129
Apéndice 70: Difractograma del lodo a 1100 °C.....	130
Apéndice 71: Fases mineralógicas del lodo a 1100 °C.....	130
Apéndice 72: Difractograma del lodo a 25 °C sinterizado .....	131
Apéndice 73: Fases mineralógicas del lodo a 25 °C sinterizado .....	131
Apéndice 74: Absorbancias de las soluciones para la curva de calibración de naranja de metilo .....	132
Apéndice 75: Curva de calibración de naranja de metilo .....	132
Apéndice 76: Ecuación para la determinación de la concentración de naranja de metilo .....	132
Apéndice 77: Publicación de Resultados.....	133
Apéndice 78: Certificado de participación en el 4th International Meeting for Researches in Materials and Plasma Technology .....	134
Apéndice 79: Certificado de participación en la XIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Cristalografía.....	135
Apéndice 80: Certificado de participación en el IX Congreso Internacional de Materiales .....	136

**RESUMEN**

**Título:** SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS A PARTIR DE LODOS RESIDUALES DEL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE\*

**Autor:** Giselle Carolina Barón Gualdrón\*\*

**Palabras Calve:** Minerales, Lodo, Bentonita, Colorantes, XRD, SEM

**Resumen:** En el presente trabajo se muestran los resultados de la inclusión de lodos residuales del tratamiento de agua potable y bentonita como aditivos para unidades cerámicas; así como el análisis químico, mecánico y estructural para las materias primas y las unidades formadas. Para ello se fabricaron morteros usando como blanco arcilla roja y sustituyendo en un 10% y 20% la cantidad de lodo y bentonita, logrando llegar a reemplazar hasta un 40% la materia prima. Los especímenes fueron sinterizados hasta 1100 °C llevando un proceso de calentamiento durante 20 h.

Los cerámicos obtenidos fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión, absorción de agua y coeficiente de saturación según lo establecido en la NTC 4017 y a ensayos de corrosión según la NTC 489, para llegar a ser catalogados según la NTC 4205 como unidades de mampostería no estructural. A las materias primas se les realizó un análisis mediante termodifracción de rayos X, logrando un seguimiento de las transformaciones de las fases cristalinas presentes en la arcilla y el lodo. Las unidades formadas fueron caracterizadas mediante difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de energía dispersiva (EDS), logrando observar la morfología de las diferentes mezclas y su composición química; finalmente se realizó un estudio de remoción del colorante naranja de metilo mediante espectroscopia ultravioleta visible (UV-Vis).

Los resultados obtenidos demuestran que el lodo y la bentonita pueden ser incorporado en proporciones de 10% y 20% respecto a la cantidad de arcilla, la morfología es variada observándose amorfos procedentes de la bentonita y cristales procedentes de la arcilla y el lodo; adicional el material puede remover hasta en un 45% del colorante naranja de metilo.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Directora: Ángela Marcela Montaña Angarita, PhD Química. Codirectora: Claudia Paulina González Cuervo, PhD Ciencias-Física.

**ABSTRACT**

**Title:** SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF CERAMIC MATERIALS FROM WASTED SLUDGE OF DRINKING WATER TREATMENT\*

**Author:** Giselle Carolina Barón Gualdrón\*\*

**Keywords:** Minerals, Sludge, Bentonite, Days, XRD, SEM

**Abstract:** In the present work, the results of the inclusion of residual sludge from water treatment and bentonite as additives for ceramic units are presented; as well as chemical, mechanical and structural analysis for raw materials and units formed. For this purpose, cubic units of 5cm X 5cm X 5cm were made using red clay as a target and replacing the amount of sludge and bentonite by 10% and 20%, achieving to replace up to 40% the raw material, the specimens were sintered up to 1100 ° C, carrying a process of heating for 20 h.

The ceramics obtained were subjected to tests of compressive strength, water absorption and saturation coefficient as established in NTC 4017 and to corrosion tests according to NTC 489, in order to be cataloged according to NTC 4205 as non-masonry units. structural; the raw materials were analyzed by means of X-ray thermodiffraction, achieving a follow-up of the transformations of the crystalline phases present in the clay and the mud; the units formed were characterized by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (FRX), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), observing the morphology of the different mixtures and their chemical composition; finally, a study of the removal of the orange dye of methyl by means of visible ultraviolet spectroscopy (UV-Vis) was carried out.

The results indicated that sludge and bentonite can be incorporated in 10% and 20% with respect to the amount of clay, the morphology is varied observing amorphous bentonite and crystals of clay and mud; In addition, the material can remove up to 45% of the orange methyl dye.

---

\*Bachelor thesis.

\*\*Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Directora: Ángela Marcela Montaña Angarita, PhD Química. Codirectora: Claudia Paulina González Cuervo, PhD Ciencias-Física.

## Introducción

Durante el proceso de sinterización, los minerales presentes, dependiendo de la temperatura a la cual están siendo sometidos, sufren ciertas transformaciones cristalinas ligadas a su vez a la pérdida de agua en la estructura, logrando así pasar de tener un material plástico a uno con mayor resistencia.

El presente trabajo se basa en la inclusión de lodos aluminosos en mezclas arcillosas, estos lodos son residuos del proceso de potabilización del agua en una planta de tratamiento (PTAP); en las PTAP durante el proceso de potabilización de agua a esta se le adiciona una cantidad conocida de coagulante (Sulfato de Aluminio), el cual contribuye a la formación de lodos producto de la sedimentación de partículas presentes; en estos gran parte de la composición se le atribuye a sustancias inorgánicas, feldespatos, limos y arenas, caracterizados por poseer altas concentraciones de óxido de silicio y óxido de aluminio.

El estudio desarrollado consistió en la inclusión de lodos y bentonita en las mezclas arcillosas, caracterización de las materias primas mediante Difracción de Rayos X, Espectroscopia de Energía Dispersiva y Microscopía Electrónica de Barrido, seguimiento del proceso de cocción mediante Termodifracción de Rayos X, identificando las transformaciones de fase en cada temperatura de

la sinterización. Posteriormente se realizaron pruebas de remoción de colorantes, resistencia a la compresión, ataque ácido y ataque básico y absorción de agua a los morteros fabricados como objetos de estudio, con el fin de determinar las propiedades químicas y mecánicas del material según la NTC-4017.

## **1 Marco de referencia**

### **1.1 Marco de antecedentes**

Durante la potabilización del agua para el consumo humano, las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) agregan coagulantes al agua que captan de los ríos para ayudar a la desestabilización y posterior formación de “flocks” que permiten una rápida sedimentación del material suspendido, el cual no ha quedado en los filtros. Los coagulantes de mayor uso a nivel mundial son aquellos a base de aluminio (Edzwald, 1993), la química de las especies formadas por la interacción depende de la concentración de aluminio en solución, el número de ligandos a los que este enlazado y los aniones presentes (Hernández, Villegas, Castaño, & Paredes, 2006). Una vez agregado el coagulante comienza la formación de complejos (en el caso del sulfato de aluminio moléculas de agua unidas generalmente a hidróxido de aluminio) y la sedimentación se inicia, generando un aumento considerable de lodo (Ramirez, 2003); al ser analizados presentan altos contenidos de óxidos de aluminio, silicio, hierro, magnesio entre otros (Toya, Nakamura, Kameshima, Nakajima, & Okada, 2007), los cuales son minerales naturales, y al estar presentes en el lodo resultante este puede ser considerado como una mezcla arcillosa natural (T. Ahmad, Ahmad, & Alam, 2016).

En Colombia, no se encuentra reglamentada la disposición final de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable, es por ello que comúnmente estos residuos son desechados nuevamente al río metros más abajo de la bocatoma (Bernal, Cabezas, Espitia, Mojica, & Quintero, 2003; Hernández et al., 2006; Torres, Hernández, & Paredes, 2012); debido al alto contenido de óxidos presente estos lodos representa un riesgo para el cauce hídrico, ya que al entrar en contacto con dichas fuentes se forman sedimentos los cuales aíslan la capa bentónica (Sánchez, Herzig, Peters, Marquéz, & Zambrano, 2007; Teixeira et al., 2011), comprometiendo así el desarrollo y crecimiento normal de plantas y animales (T Ahmad, Ahmad, & Alam, 2016; Kaggwa, Mulalelo, Denny, & Okurut, 2001; Sánchez et al., 2007).

En vista de la composición y las características que poseen los lodos provenientes del tratamiento de agua (Caner & Güney, 2017; Singh & Sharma, 2016; Teixeira et al., 2011; Velraj, Tamilarasu, & Ramya, 2015), algunos autores los han llegado a catalogar como arcillas secundarias, definición según Avgustinik en su libro titulado *Cerámica* (Avgustinik, 1983); se ha estudiado la viabilidad de ser reutilizados en la industria cerámica (Hernández et al., 2006; Perilla Sastoque, 2015; Ramirez, 2003; Rozo Rincón, Sánchez Molina, & Gelves Díaz, 2015; Xu, Zou, & Li, 2009), como agregados en hormigones a base de cemento Portland, aplicaciones vitrocerámicas, coagulante mediante un tratamiento con ácido sulfúrico, adsorbentes de metales pesados y en la recuperación de suelos como compostaje y fertilizantes (T. Ahmad et al., 2016; Tarique Ahmad, Ahmad, Ahad, & Alam, 2016; Benlalla, Elmoussaouiti, Dahhou, & Assafi, 2015; Castillo Lara, Antoni, Alujas Díaz, Scrivener, & Martirena Hernández, 2011; El-Didamony, Khalil, & Heikal, 2014; Kizinievič, Žurauskiene, Kizinievič, & Žurauskas, 2013; Lin, Wu, & Ho, 2006; Wolff, Keller Schwabw, & Vieira Conceicao, 2015).

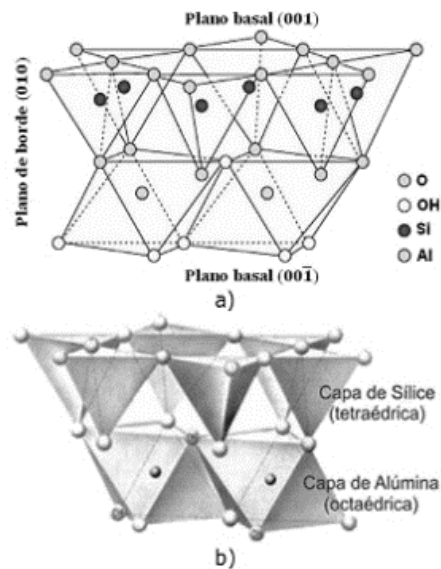
## 1.2 Marco teórico

Las arcillas son minerales naturales conocidos como aluminosilicatos (Bernal et al., 2003), materia orgánica y sustancias coloidales producto de la descomposición química de rocas ígneas a través de los años, esta descomposición se debe a procesos geológicos de envejecimiento del planeta por lo cual las arcillas se consideran como un material corriente y bastante abundante en la naturaleza (Santos Amado, Malagón Villafrades, & Córdoba Tuta, 2011).

Se denominan arcillas secundarias a aquellas que resultan del transporte de la roca ígnea por acción del agua, viento o del hielo, estos minerales secundarios están conformados por capas laminares polimerizadas tetraédricamente (ion silicio) unidas a láminas de octaedros (alúmina), a través de hidrógenos o cationes (Muñoz Chaves, Muñoz Menese, Mancill, & Rodríguez Páez, 2007). La forma en que se unen las láminas conforma la unidad cristalina básica, al unirse entre sí, forman la denominada arcilla (Nuñez, 1981); esta red estructural no es perfecta, en su mayoría se generan vacancias por falta de iones. En general, las arcillas transportadas por el agua sufren dos procesos durante su transporte, primero su tamaño disminuye debido al desgaste por rozamiento entre las partículas lo cual hace que posean un alto grado de plasticidad y segundo al llegar a aguas tranquilas pasan por un proceso de selección en donde las partículas se separan por sedimentación, logrando así que las más pequeñas continúen suspendidas en el agua; debido a estos arrastres las arcillas quedan con una alta concentración de óxidos y feldespatos lo cual hace que se disminuya su grado de pureza; finalmente estas son las que llegan a la planta de tratamiento (Malagón, 2005). Debido al recorrido que han tenido, confiere una distribución granulométrica la cual es una variable muy importante, debido a que, de esta depende el grado de empaquetamiento de la celda unidad, con lo cual a menor tamaño de

partícula mayor será el grado de compactación de las láminas, de esto dependen algunas de las propiedades como la dureza, la refractariedad, la resistencia a la compresión y plasticidad (Amin, Abdel Hamid, El-Sherbiny, Sibak, & Abadir, 2017; Bergaya & Lagaly, 2006; Ferrandis, 1973).

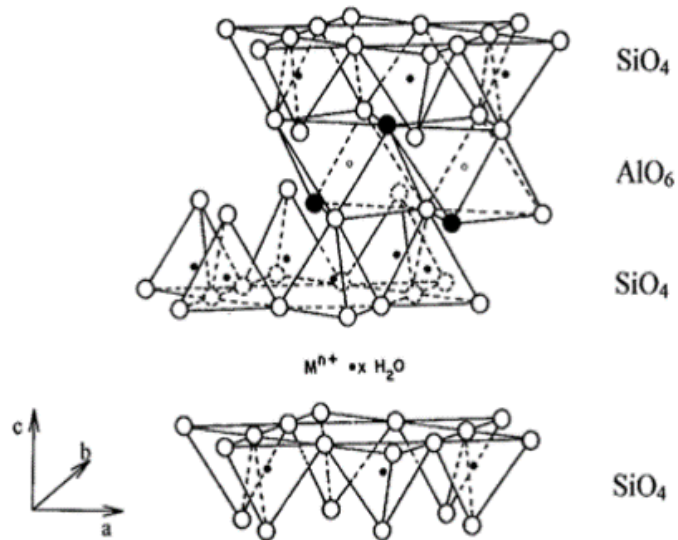
A su vez estos minerales pueden ser clasificados como filosilicatos bilaminares o trilaminares; los bilaminares son aquellos constituidos por una lámina tetraédrica en la cual el átomo de Si puede ser sustituido por Al o Fe, seguida de una lámina octaédrica en donde el Al puede ser sustituido por el Mg unido a O u OH como se observa en la Figura 1; en este grupo se encuentran las arcillas de la familia Kandita y Serpentinias (Bernal et al., 2003).



*Figura 1:* Estructura de la caolinita tomada de :X. Ma, W. J. Bruckard, and R. Holmes, “Effect of collector, pH and ionic strength on the cationic flotation of kaolinite,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 93, no. 1, pp. 54-58, 2009.

Los trilaminares son aquellas constituidas por dos capas tetraédricas que encierran una octaédrica como se ve en la Figura 2, estas arcillas se caracterizan por ser de carácter expandible,

a excepción de las tipo mica, y poseen un alto índice de plasticidad debido a formación de enlaces de hidrogeno (Al-Shahrani, 2014).



*Figura 2:* Estructura de una esméctita tomada de Pergher, Sibebe B. C., Corma, Avelino, & Fornes, Vicente., “Materiales laminares pilareados: preparación y propiedades.,” Quím. Nova., vol. 22, no. 5, pp. 693-709, 1999.

En este grupo se encuentran las arcillas tipo esméctitas conocidas comercialmente como bentonitas, son compuestas principalmente por silicatos aluminicos y/o magnésicos de Na, Ca, Mg y Fe hidratados. Estos minerales son conocidos por su capacidad absorbente, alcalinidad y acidez variable, alta plasticidad e hinchamiento interno, lo que le produce una gran capacidad de intercambio iónico y de retención de especies voluminosas en sus espacios interlaminares haciéndola muy usada en remoción de metales pesados y colorantes en aguas (Al-Shahrani, 2014; Manohar, Noeline, & Anirudhan, 2006; Ramírez Llamas, Jacobo Azuara, & Martínez Rosales, 2015; Tyagi, Chudasama, & Jasra, 2006).

Otro tipo de minerales son las conocidas tipo clorita, cuya unidad estructural incluye cuatro capas, una octaédrica de brucita y otra de brucita o gibbsita, entre dos tetraédricas, unidas generalmente entre sí por cationes de  $K^+$  o  $Na^+$  (Laguna E, Molina G, Moreno, & Molina G, 2008), y finalmente los feldespatos los cuales presentan una baja plasticidad y son considerados para la elaboración de cerámicos como desengrasantes (Salmang, 1955); el más conocido la sílice.

## **2 Propuesta y plan de trabajo**

### **2.1 Hipótesis**

Los lodos generados en el proceso de potabilización de agua en la empresa de servicios públicos ESPO S.A. al contener alta composición de materiales ricos en silicio y aluminio, y poseer buena plasticidad, pueden ser utilizados como agregados en la elaboración de materiales puzolánicos.

## 2.2 Objetivos

### 2.2.1 Objetivo general

Realizar materiales cerámicos puzolánicos a partir de lodos aluminosos generados en una planta de tratamiento de agua potable.

### 2.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar mediante FRX y DRX las materias primas
- Determinar las transformaciones mineralógicas producto de la rata de calentamiento del lodo mediante termodifracción de Rayos X
- Realizar mezclas entre lodo y arcilla para determinar el porcentaje óptimo de sustitución que permita elaborar cerámicos
- Realizar sustituciones de bentonita en mezclas de arcilla y lodo para determinar el porcentaje óptimo de sustitución para elaborar cerámicos
- Aplicar ensayos a las unidades fabricadas conforme la Norma Técnica Colombiana 4017 y 489 para el respectivo monitoreo de calidad
- Caracterizar mediante DRX y SEM los materiales obtenidos
- Realizar ensayos de remoción de colorantes en las mezclas obtenidas

## 2.3 Metodología

### 2.3.1 Materias primas

**2.3.1.1 Arcilla roja.** Esta es proveniente del abanico aluvial de la ciudad de Bucaramanga, y utilizada por la ladrillera “Arcillas el Fical”, la cual se encuentra ubicada en el sector de Río Frio en el municipio de Girón-Santander, como componente en sus mezclas arcillosas; cabe resaltar que en la elaboración de materiales de mampostería se utiliza una mezcla de arcillas y desengrasantes dependiendo de la plasticidad que presenten las arcillas a utilizar. La arcilla se pasó por un tamiz # 40 para obtener un tamaño de partícula menor a 50  $\mu\text{m}$  (Santos Amado et al., 2011).

**2.3.1.2 Lodo.** Con el objetivo de reutilizar los lodos generados durante el proceso de potabilización de agua, se recolectaron lodos sedimentados de la planta de tratamiento Algodonal, ubicada en la vía al Batallón Santander en el municipio de Ocaña, Norte de Santander. Los lodos fueron transportados a la ciudad de Bucaramanga en donde fue removida la materia orgánica utilizando peróxido de hidrogeno al 30% y secados a 30 °C durante 1 semana.

Posteriormente se llevaron a un molino de cuerpos moledores durante 3 horas y se pasó por un tamiz # 40 para obtener un tamaño de partícula menor a 50  $\mu\text{m}$  (Santos Amado et al., 2011) evitando que el material se convierta en un desengrasante para la mezcla.

**2.3.1.3 Bentonita.** Debido a la resistencia mecánica presentada por los especímenes con este material, se adquirió una mezcla de arcillas tipo bentonita de QUIMROSE cuya composición corresponden a la de aluminosilicatos de Sodio, Potasio y Calcio.

**2.3.2 Ensayos preliminares.** Se realizaron mezclas de arcilla lodo y se sometieron a calentamiento (25 °C a 105 °C 120 min, de 105 °C a 600 °C 120 min, de 600 °C a 1100 °C 180 min) hasta obtener cerámicos de dimensiones 5cm X 5cm X 5cm, los cuales fueron sometidos al ensayo de resistencia a la compresión en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, los resultados de esta prueba se encuentran reportados en el Apéndice 1. Tabla de resistencia mecánica de mezclas arcilla-lodo. Posteriormente se escogieron los porcentajes de sustitución cuya resistencia mecánica cumpliera lo establecido en la Norma Técnica Colombiana 4205 “Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos” (mínimo de 100 kgf/cm<sup>2</sup> para materiales no estructurales) (ICONTEC, 2005c); alterno a este ensayo se realizaron mezclas arcilla-dopante y lodo-dopante. Como agente dopante se usaron calamina, silicato de sodio, cenizas volantes y bentonita, con sustituciones de 10% y 20% de cada dopante respecto la arcilla y al lodo. Los cerámicos se sometieron al ensayo de resistencia a la compresión y los resultados se encuentran reportados en los Apéndice 3. Tabla de resistencia mecánica de mezclas arcilla-dopante, siendo los dopantes: Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B) y Apéndice 5. Tabla de resistencia mecánica de mezclas lodo-dopante, siendo los dopantes: Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B) respectivamente.

Simultáneamente a los ensayos de resistencia a la compresión, fueron tomados los perfiles de DRX y FRX de la arcilla y el lodo, sin calentamiento y luego del proceso de sinterización, en los Apéndice 7: Difractograma de la arcilla sin calentamiento, Apéndice 9: Difractograma de la arcilla sinterizada (preliminar), Apéndice 11: Difractograma del lodo y Apéndice 13: Difractograma del lodo sinterizado (preliminar), se encuentran los difractogramas de la arcilla y el del lodo, en los Apéndice 8: Fases mineralógicas de la arcilla, Apéndice 10: Fases mineralógicas de la arcilla sinterizada (preliminar), Apéndice 12: Fases mineralógicas del lodo y Apéndice 14: Fases mineralógicas del lodo (preliminar), se encuentran reportadas las fases mineralógicas de cada uno de los materiales y en los Apéndice 15: Fluorescencia de Rayos X de la arcilla y Apéndice 16: Fluorescencia de Rayos X del lodo el análisis elemental.

Finalmente se corroboró mediante DRX las fases mineralógicas presentes en la bentonita, en el Apéndice 17: Difractograma de la bentonitase encuentra el difractograma y en el Apéndice 18: Fases mineralógicas de la bentonita las respectivas fases.

**2.3.3 Elaboración de cerámicos.** Para la elaboración de los productos cerámicos se realizaron muestras de arcilla-lodo-bentonita sustituyendo en un 10% y 20% la cantidad de lodo y bentonita en las mezclas, obteniendo un total de 9 mezclas como se muestra en la Tabla 1: Proporción de materias primas en cada mezcla.

A cada mezcla arcillosa se agregó un 25% de agua para la obtención de una masa moldeable, y se procedió de forma manual a llenar moldes de madera en forma de cubos, se compacta la mezcla para evitar espacios vacíos, se secaron los especímenes en una estufa MERMET semiautomática

a 30 °C durante 4 horas antes de ser desmoldados, una vez fuera del molde se secan bajo sombra durante 1 semana para la eliminación total del agua superficial; durante este proceso se observó que la mezcla número 9 requería proporciones de agua y tiempo de curado diferentes a los demás especímenes, razón por la cual para los ensayos propuestos en este trabajo, no se tendrá en cuenta esta mezcla.

Una vez secas las piezas estaban listas para ser llevadas a un horno mufla de altas temperaturas marca ACEQUILABS modelo MF2005, para esto se realizó una modificación de la rata de calentamiento utilizada en los ensayos preliminares permitiendo un mayor tiempo de exposición del material a altas temperaturas; finalmente la rata de calentamiento utilizada fue: de 25 °C a 105 °C 120 min, de 25 °C a 600 °C 240 min, en 600 °C durante 120 min, de 600 °C a 900 °C 360 min, de 900 °C a 1100 °C 360 min para concluir con un descenso desde 1100 °C a 25 °C 600 min.

Tabla 1: *Proporción de materias primas en cada mezcla.*

<b>Mezcla #</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Bentonita</b>	<b>Lodo</b>
1	100	0	0
2	90	0	10
3	80	0	20
4	80	10	10
5	70	10	20
6	70	20	10
7	60	20	20
8	90	10	0
9	80	20	0

**2.3.4 Caracterización mecánica.** La caracterización mecánica se hizo con base en la Norma Técnica Colombiana NTC-4017 “Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla” (ICONTEC, 2005a) y NTC-489 “Resistencia Química de Morteros” (ICONTEC, 2005b).

A su vez para el análisis de los datos se empleó el test de Dixon (Rorabacher, 1991; Rubinson & Runbinson, 2001) para la determinación de “datos anómalos”; éste determina si los valores extremos de un muestreo son o no anómalos, para ello se supone que los datos representan una distribución normal, y para el caso estadístico de pruebas bilaterales (menor y mayor) se utilizan los valores de Q reportados en la tabla  $r_{11}$  (presente en el artículo citado) y que se encuentra en el Apéndice 19: Valores críticos del parámetro  $r_{11}$  para la prueba de Dixon con un nivel de confianza del 95%, siendo estos para  $n=8$   $Q_{tab}=0,570$  y para  $n=15$   $Q_{tab}=0,430$ .

Para llevar a cabo el test de Dixon se ordenan los datos en forma creciente para observar los valores atípicos a la serie y se calcula un valor el cual se denota como  $Q_{cal}$  y que viene definido por la ecuación (1), siendo  $d$  la diferencia entre el posible valor atípico y el resultado más cercano a este valor y  $w$  la diferencia entre los valores extremos, el valor se rechaza si  $Q_{cal} > Q_{tab}$  (Rubinson & Runbinson, 2001).

$$Q_{cal} = \frac{d}{w} \quad (1)$$

**2.3.4.1 Resistencia a la compresión.** El proceso de determinación de la resistencia a la compresión de los especímenes se realizó según la NTC-4017; el ensayo se realiza sobre cinco (5) unidades completas y secas, la toma de datos se realizó por triplicado por lo cual se midieron quince (15) unidades, en una máquina de ensayos universal HSM58 manual ubicada en el laboratorio 11E de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

La resistencia del espécimen a la compresión (C) fue calculada mediante la ecuación (2), donde W es la carga máxima (en N o kgf) soportada por la unidad y A el promedio de las áreas brutas de las superficies, inferior y superior (en cm<sup>2</sup>).

$$C = \frac{W}{A} \quad (2)$$

**2.3.4.2 Absorción de agua, ensayo de inmersión durante 24 horas.** El ensayo de inmersión durante 24 h para determinar el porcentaje de absorción de los especímenes se realizó según la NTC-4017; el ensayo se realiza sobre cinco (5) unidades completas y secas, la toma de datos se realizó por triplicado por lo cual se midieron quince (15) unidades, las cuales fueron sumergidas totalmente en agua destilada a 30 °C durante 24 horas; seguido a esto se retiraron del agua y se secaron con un paño húmedo, el pesaje se realizó antes de los 300 s.

El porcentaje de absorción (% absorción) de cada espécimen se calcula mediante la ecuación (3), donde W<sub>s</sub> es la masa seca del espécimen antes de la inmersión (en g), W<sub>ss</sub> la masa del espécimen saturado luego de la inmersión en agua fría (en g).

$$\% \text{ absorción} = \frac{100 \times (W_{ss} - W_s)}{W_s} \quad (3)$$

#### ***2.3.4.3 Absorción de agua y coeficiente de saturación, ensayo de inmersión en ebullición***

**1 hora.** El ensayo de inmersión en ebullición se utiliza para el cálculo del coeficiente de saturación del espécimen, para esto se requiere que sean los mismos del ensayo de inmersión durante 24 horas y una vez finalizado ese ensayo, se dio inicio al de ebullición.

La toma de datos se realizó a todos los especímenes de la prueba de inmersión anteriormente mencionada inmediatamente terminó el pesaje anterior; en un recipiente se calentó agua destilada hasta ebullición y se introdujeron las unidades durante 1 h; una vez finalizado el tiempo se dejó enfriar el agua hasta 30 °C por pérdida natural de calor; luego se retiraron del agua y se secaron con un paño húmedo, el pesaje se realizó antes de los 300 s.

El porcentaje de absorción (% absorción) de cada espécimen se calcula mediante la ecuación (4), donde  $W_s$  es la masa seca del espécimen antes de la inmersión (en g),  $W_b$  la masa del espécimen saturado luego de la inmersión en ebullición (en g).

$$\% \text{ absorción} = \frac{100 \times (W_b - W_s)}{W_s} \quad (4)$$

El coeficiente de saturación (CS) de cada espécimen se calcula mediante la ecuación (5), donde  $W_s$  es la masa seca del espécimen antes de la inmersión (en g),  $W_{ss}$  la masa del espécimen saturado luego de la inmersión agua fría (en g) y  $W_{bs}$  la masa saturada del espécimen después de la inmersión de 1 h en ebullición (en g).

$$CS = \frac{(W_{ss} - W_s)}{(W_{bs} - W_s)} \quad (5)$$

**2.3.4.4 Resistencia a ácidos.** El proceso de determinación de la resistencia a corrosión química de los especímenes se realizó según la NTC-483. El ensayo se realiza sobre tres (3) unidades completas y secas, la toma de datos se realizó por triplicado por lo cual se midieron nueve (9) unidades, para ello se pesaron y midieron estas antes de ser sumergidas totalmente en una solución al 20% de ácido clorhídrico (HCl) durante un periodo de 1 h, una vez transcurrido este tiempo se sacaron, secaron y pesaron los especímenes. Se curaron al aire libre durante una semana y posteriormente se tomaron las dimensiones, se calcula el cambio de peso y el cambio en la resistencia a la compresión (procedimiento descrito en el numeral 2.3.4.1).

**2.3.4.5 Resistencia a bases.** El proceso de determinación de la resistencia a corrosión química de los especímenes se realizó según la NTC-483. El ensayo se realiza sobre tres (3) unidades completas y secas, la toma de datos se realizó por triplicado por lo cual se midieron nueve (9) unidades, para ello se pesaron y midieron estos antes de ser sumergidos totalmente en una solución al 20% de hidróxido de sodio (NaOH) durante un periodo de 1 h, una vez transcurrido este tiempo se sacaron, secaron y pesaron los especímenes. Se curan al aire libre durante una semana y posteriormente se tomaron las dimensiones, se calcula el cambio de peso y el cambio en la resistencia a la compresión (procedimiento descrito en el numeral 2.3.4.1).

### **2.3.5 Técnicas de identificación y caracterización estructural.**

**2.3.5.1 Fluorescencia de rayos X.** Los análisis cuantitativos se realizaron para las muestras sin sinterizar en un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X marca Bruker modelo S8 TIGER, los datos fueron registrados usando longitud de onda dispersiva de 4 kW, utilizando como fuente de radiación un tubo de rodio (Rh) y detectores de centelleo (para elementos pesados) y de flujo (para elementos livianos), los análisis fueron realizados mediante el método QUANTUM-EXPRESS (parámetros fundamentales). Este equipo se encuentra en el laboratorio de rayos X de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará (PTG).

**2.3.5.2 Difracción de rayos X de muestras policristalinas (DRX) e identificación.** Los patrones de difracción fueron tomados a las materias primas sin sinterizar y sinterizadas así como a las muestras que presentaron mayor resistencia mecánica, esto se hizo en un difractómetro de polvo marca Bruker modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci, usando un portamuestras de polimetilmetacrilato (PMMA), una radiación de cobre ( $\text{Cu K } \alpha \text{ } \lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) y un detector lineal LynxEye; los datos se registraron con un paso de  $0,02035^\circ$  ( $2\theta$ ) entre  $3,5^\circ - 70,0^\circ$  ( $2\theta$ ) con una velocidad de 0,8 seg/paso, operando con un voltaje de 40 kV y una corriente de 40 mA. Este equipo se encuentra en el laboratorio de rayos X de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará (PTG).

Los patrones de difracción obtenidos fueron visualizados mediante el programa POWDER X, con el cual se realizó el refinamiento del perfil, seguido a esto se llevó el perfil refinado al programa DIFFRAC.EVA el cual realiza un proceso de búsqueda de fases cristalinas basado en la superposición de perfiles indexados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*.

**2.3.5.3 Termodifracción de rayos X de muestras policristalinas e identificación.** Los patrones de difracción fueron tomados para muestras sin sinterizar en un difractor de polvo marca Bruker modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci, usando una lámina de platino/rodio de la cámara de altas temperaturas MTC-HIGHTEMP, una radiación de cobre ( $\text{Cu K}\alpha$   $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) y un detector lineal LynxEye; los datos se registraron con un paso de  $0,02035^\circ$  ( $2\theta$ ) entre  $2,0^\circ - 55,0^\circ$  ( $2\theta$ ) con una velocidad de  $0,6 \text{ seg/paso}$ , operando con un voltaje de  $40 \text{ kV}$  y una corriente de  $40 \text{ mA}$ , con rampa de calentamiento variable siendo las temperaturas descritas a continuación:  $25^\circ \text{C}$  a  $105^\circ \text{C}$  ( $v= 1,2^\circ \text{C/min}$ ), de  $105^\circ \text{C}$  a  $600^\circ \text{C}$  ( $v=3^\circ \text{C/min}$ ), de  $600^\circ \text{C}$  a  $900^\circ \text{C}$  ( $v=1,8^\circ \text{C/min}$ ), de  $900^\circ \text{C}$  a  $1100^\circ \text{C}$  ( $v=1,2^\circ \text{C/min}$ ) y de  $1100^\circ \text{C}$  a  $25^\circ \text{C}$  ( $v=300^\circ \text{C/min}$ ); este equipo se encuentra en el laboratorio de rayos X de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará (PTG).

Los patrones de difracción obtenidos fueron visualizados mediante el programa POWDER X, con el cual se realizó el refinamiento del perfil, seguido a esto se llevó el perfil refinado al programa DIFRRAC.EVA el cual realiza un proceso de búsqueda de fases cristalinas basado en la superposición de perfiles indexados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*.

**2.3.5.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de dispersión de energía (EDS).** Para este análisis se recubrió con grafito cada una de las muestras, en un equipo de recubrimiento Quorum 150ES, las micrográficas fueron obtenidas en un microscopio Quanta Feg 650 con una fuente de electrones tipo FEG (Field Emission Gun), el equipo operó a bajo vacío con un voltaje de aceleración de 25 kV y un detector de imagen de electrones dispersados tipo SSD. Para el análisis químico tipo EDS se hizo uso del detector EDAX APOLO X cuya resolución es de 126,1 eV, utilizando una radiación de Mn, y obteniendo la información semi-cuantitativa mediante el software EDX Genesis. Estos equipos se encuentran en el laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará (PTG)

**2.3.5.5 Espectroscopía ultravioleta visible (UV-Vis).** Mediante la espectroscopía ultravioleta visible se pretende estudiar la remoción de colorantes, en este caso la remoción de naranja de metilo en solución acuosa empleando un método colorimétrico directo, para ello se hizo uso de un espectrómetro SHIMADZU UV-2401PC el cual se encuentra en el laboratorio de docencia de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander; para la solución de naranja de metilo se utilizó agua destilada como blanco y se realizó una curva de calibración entre 0,1 mg/L y 1 mg/L, se determinó la absorción a 466 nm haciendo un barrido desde 600 nm a 200 nm; los especímenes se introdujeron en una solución de 1 mg/L durante 1 hora y se registró la absorbancia de la solución final (Ramírez Llamas et al., 2015).

Para determinar la concentración de las soluciones se utilizó la ecuación (6), donde C es la concentración de naranja de metilo en mg/L, Abs la absorbancia y k, b son las constantes de ajuste.

$$C = k * Abs + b \quad (6)$$

### 3 Resultados y análisis

#### 3.1 Caracterización mecánica

Los datos presentados en esta sección para cada una de las mezclas *Tabla 1*: Proporción de materias primas en cada mezcla., son el resultado del promedio de los obtenidos, las tablas con todos los datos recolectados se encuentran en la sección de Apéndices y para determinar el dato promedio se hizo una estadística la cual incluye el test de Dixon para detección de “datos anómalos”.

##### 3.1.1 Resistencia a la compresión

Tabla 2: Promedio de la resistencia a la compresión de las unidades formadas

Mezcla #	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1	21,60±0,67	3679,76±84,67	170,56±4,38
2	21,72±0,45	2967,33±75,27	136,77±3,98
3	21,53±0,38	2189,13±52,63	131,04±3,06

4	21,69±0,57	3509,81±92,09	161,85±1,96
5	21,74±0,44	3265,76±112,49	152,20±5,17
6	21,70±0,78	3679,76±129,49	169,73±4,35
7	20,80±0,51	3061,55±62,23	147,47±4,74
8	21,47±0,52	3390,16±66,03	158,04±3,53

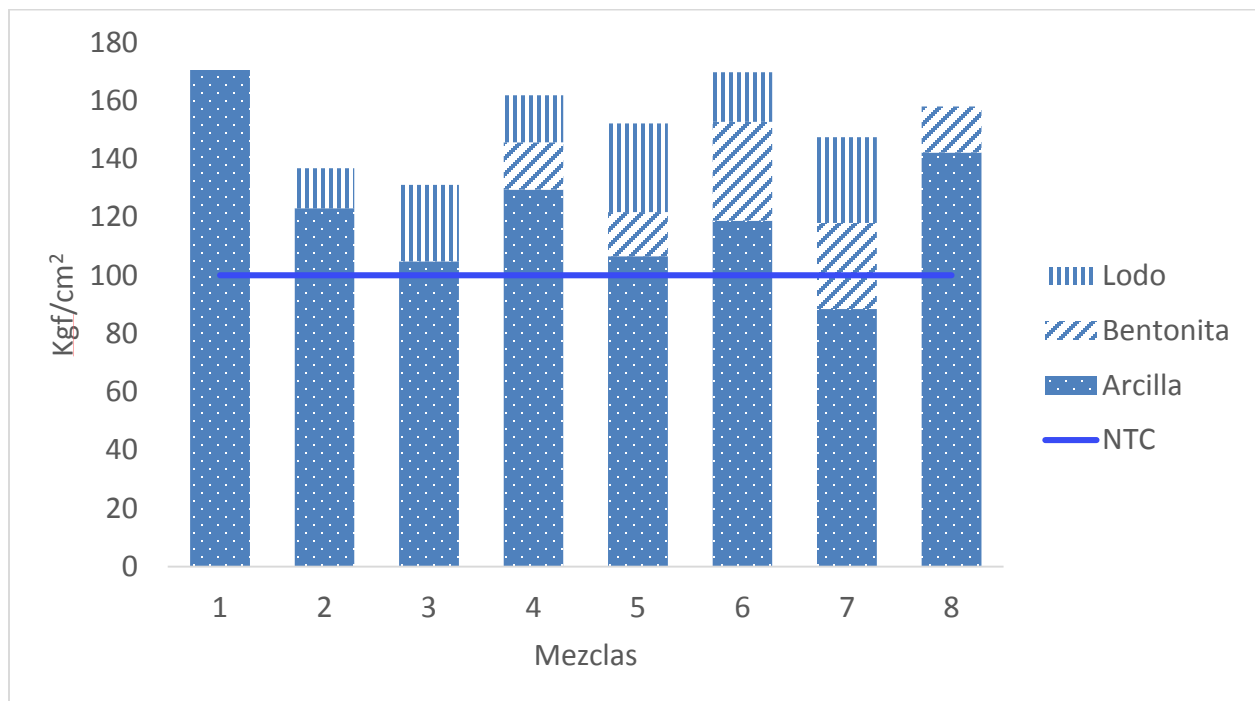


Figura 3: Promedio de la resistencia mecánica de las unidades formadas

De acuerdo a los resultados obtenidos y como era de esperarse, el mortero con mayor resistencia mecánica es aquel en el cual no hubo sustitución de material arcilloso cuya composición se encuentra en el Apéndice 8: Fases mineralógicas de la arcilla, seguido a esto se observa cómo disminuye la resistencia de los especímenes en función de la sustitución, siendo las unidades en las que se incorporó lodo las que presentan menor resistencia mecánica.

Cuando se realiza la sustitución con bentonita se observa que la resistencia del material disminuye, para la unidad con 20% de bentonita, alrededor de 10 kgf/cm<sup>2</sup>, y 20 kgf/cm<sup>2</sup> para la sustituida con el 10% en la resistencia mecánica en comparación con el blanco, teniendo así que a mayor porcentaje de sustitución de bentonita se observan mejoras en las propiedades mecánicas; mientras que para las sustituciones con lodo disminuye alrededor de 34 kgf/cm<sup>2</sup>, para la unidad con 10% de lodo y 39 para la unidad de 20%, teniendo así que, a mayor porcentaje de sustitución de lodo, disminuye la resistencia mecánica del material.

Al realizar morteros que contienen los tres materiales, es de esperarse que las que contienen menor porcentaje de lodo presenten mayor resistencia que las que se encuentran sustituidas al 20%, al observar el comportamiento de las muestras, se observa que las unidades que se encuentran sustituidas en un 10% de lodo y 20% de bentonita presentan mayor resistencia que los demás especímenes a excepción del blanco y los que se encuentran sustituidos a un 20% de bentonita y 20% de lodo presentan la menor resistencia con respecto a las unidades que contienen los tres materiales, pero mayor con respecto a las de solo lodo. Las unidades que contienen un 10% de bentonita presentan valores intermedios de resistencia mecánica con respecto a las demás las unidades; indicando así que la adición de mezclas de lodo-bentonita a las unidades generan mayor resistencia mecánica, siendo las unidades que contienen bajo porcentaje de lodo las que presentan mejor resistencia, teniendo entonces que a una mayor adición de lodo los especímenes presentan una menor resistencia mecánica.

Finalmente, si se comparan las resistencias obtenidas con las especificadas en la Norma Técnica Colombiana 4205 todos los especímenes pueden ser clasificados como materiales de construcción

no estructurales, debido a que según la norma, la resistencia a la compresión mínima que deben tener los especímenes es de 100 kgf/cm<sup>2</sup> y las unidades formadas sobrepasan este valor, lo cual dice que el lodo puede utilizarse como agregado a las mezclas arcillosas, favoreciendo así al medio ambiente, ya que su disposición final no serían las fuentes hídricas.

### 3.1.2 Absorción de agua, ensayo de inmersión durante 24 horas

Tabla 3: Promedio ensayo de inmersión de agua en frío

Mezcla #	Ws (g)	Wss (g)	% Absorción agua
1	165,58±7,42	183,87±8,29	11,06±0,97
2	163,18±4,68	189,61±4,39	16,25±0,97
3	136,15±11,76	157,66±13,65	15,83±1,17
4	153,02±7,16	179,19±8,59	17,09±0,70
5	139,59±4,71	162,63±5,02	16,54±0,51
6	134,14±4,30	152,25±4,91	13,51±1,13
7	116,73±4,63	135,26±5,64	15,85±0,72
8	161,34±5,14	178,41±5,75	10,56±0,26

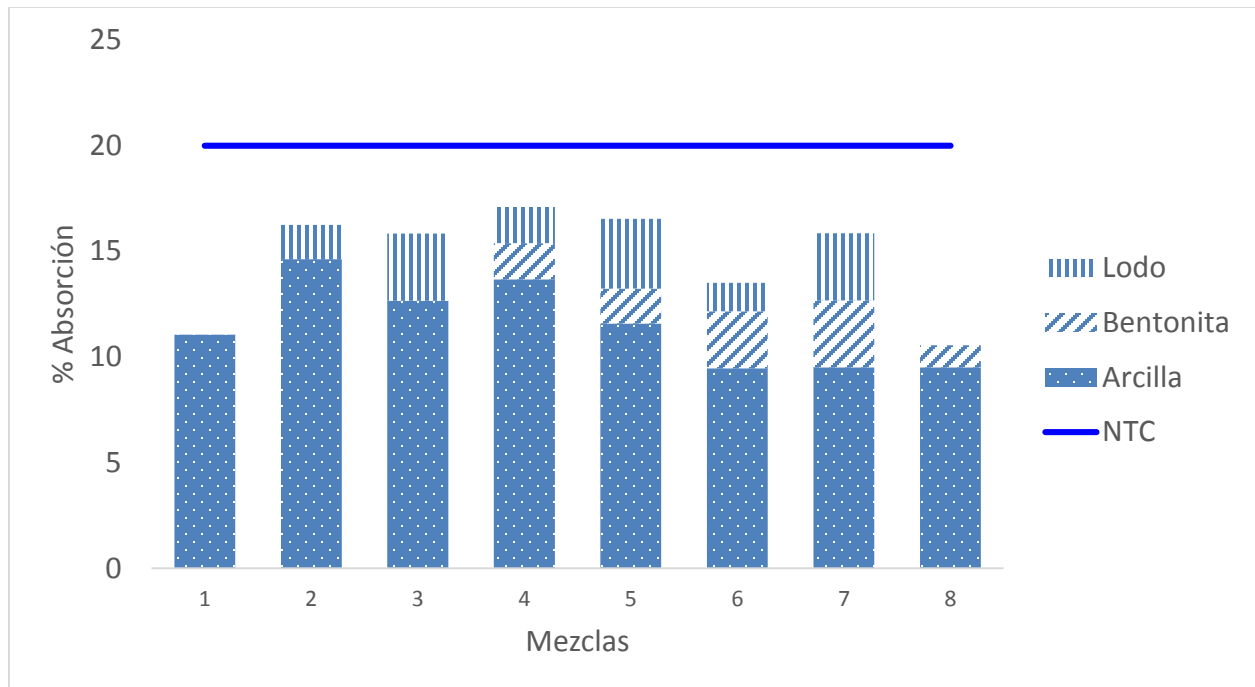


Figura 4: Ensayo de inmersión en agua fría

El porcentaje de absorción de agua, según la Norma Técnica Colombiana 4205, es el ensayo encargado de clasificar el ambiente en el que debe ser utilizado el producto de mampostería, este indica que, si el porcentaje es mayor o igual a 20 se utiliza para interiores, mientras que si es mínimo 14 es utilizado en exteriores. Todos los especímenes analizados en este trabajo cumplen con los requisitos para ser unidades utilizadas en el exterior siendo el blanco (muestras solo arcilla) uno de los que presenta menor porcentaje de absorción, lo cual es de vital importancia ya que no almacena una cantidad de agua considerable después de la inmersión; la presencia de lodo y bentonita hace que las unidades presenten mayor absorción, es decir mayor retención de agua en su estructura, la mezcla con sustitución de 20% bentonita es la que presenta menor porcentaje de absorción siendo esto congruente con el carácter antiplástico de este tipo de minerales. A su vez las unidades con sustituciones de 10% y 20% lodo presentan un porcentaje de absorción elevado

lo cual indica que es un material muy absorbente. Era de esperarse que la mezcla con porcentaje de sustitución de 20% de lodo presentara una mayor absorción como lo evidencian las otras muestras con este porcentaje, por lo cual este dato se considera “anómalo”, el error en esta medición puede ser debido a factores como humedad y temperatura de almacenamiento de los especímenes.

Para la mezcla con 20% de bentonita se observa que no cumple con los requerimientos de la norma, por lo cual este tipo de unidades no podrían formar parte de los materiales no estructurales para exteriores, sin embargo, al ser mezclado con porcentajes de lodo aumenta considerablemente la absorción pudiendo clasificarse estas mezclas dentro del tipo de materiales descritos anteriormente, presentando absorciones semejantes a las de las mezclas con solo lodo. Para la relación que contiene el 20% de sustitución de bentonita se observa un porcentaje menor que para el de 10%, a mayor cantidad de bentonita mayor será el porcentaje de absorción de la muestra.

Finalmente se puede concluir que las unidades fabricadas debido a la absorción presentada, son piezas las cuales tienen buena estabilidad, ya que, al no absorber grandes cantidades de agua en su estructura, evitan problemas de humedad y roturas por congelamiento.

**3.1.3 Absorción de agua y coeficiente de saturación, ensayo de inmersión en ebullición**

**1 hora**

Tabla 4: Promedio ensayo de inmersión de agua en ebullición

Mezcla #	W <sub>b</sub> (g)	% Absorción de agua	Coefficiente de Saturación
1	180,29±8,06	1,94±0,42	1,26±0,07
2	189,61±4,39	1,35±0,16	1,12±0,01
3	155,90±13,39	1,10±1,08	1,09±0,09
4	176,78±8,35	1,34±0,27	1,10±0,02
5	160,10±5,21	1,57±0,32	1,13±0,03
6	151,20±4,87	0,69±0,20	1,06±0,02
7	133,20±5,77	1,51±0,23	1,13±0,03
8	176,00±5,73	1,35±0,10	1,17±0,01

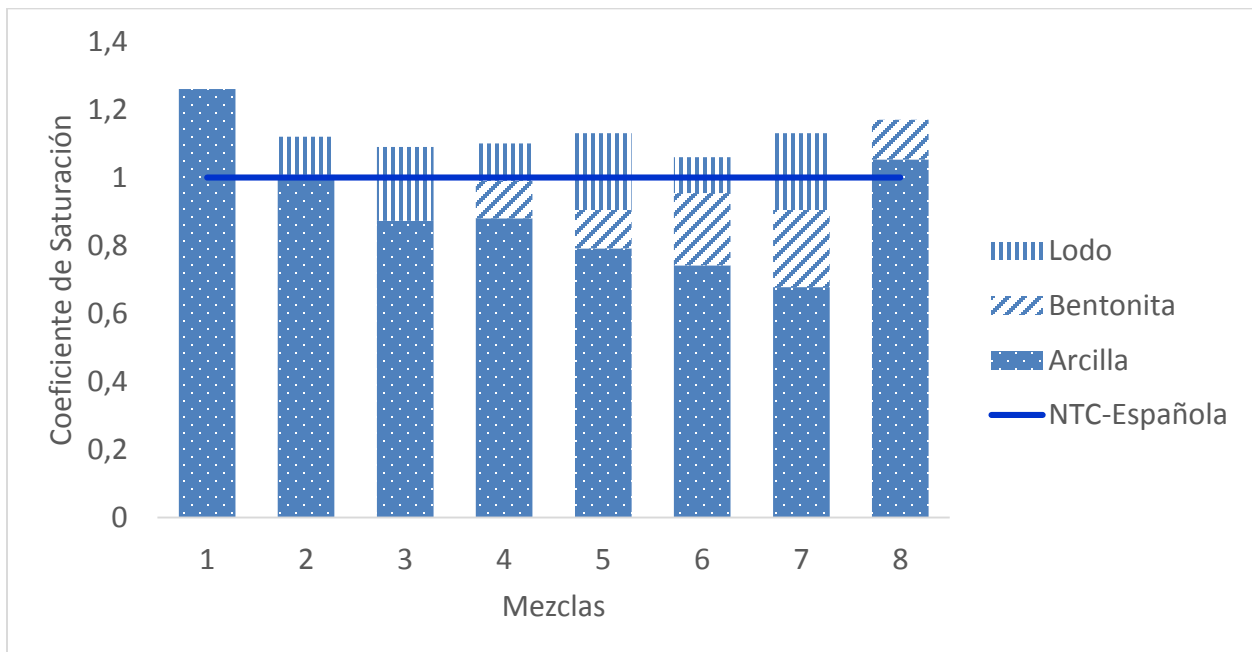


Figura 5: Ensayo de inmersión en agua caliente

El objetivo de este análisis es determinar el coeficiente de saturación, el cual es considerado junto con el ensayo anterior, como una medida de la durabilidad de los especímenes cuando se encuentra a la intemperie, este valor tiende a ser menor a 1 para unidades estructurales (Gallegos & Cassabone, 2005).

En la Figura 5 se observa que el valor del coeficiente de absorción para todas las muestras es superior a 1, lo cual era de esperarse ya que no son unidades aptas como estructurales, según la resistencia a la compresión presentada por las mismas. Adicionalmente las muestras presentan un bajo porcentaje de absorción de agua, lo que indica que el material una vez se encuentre en presencia de calor realizará un intercambio de agua generando así nuevas vacancias.

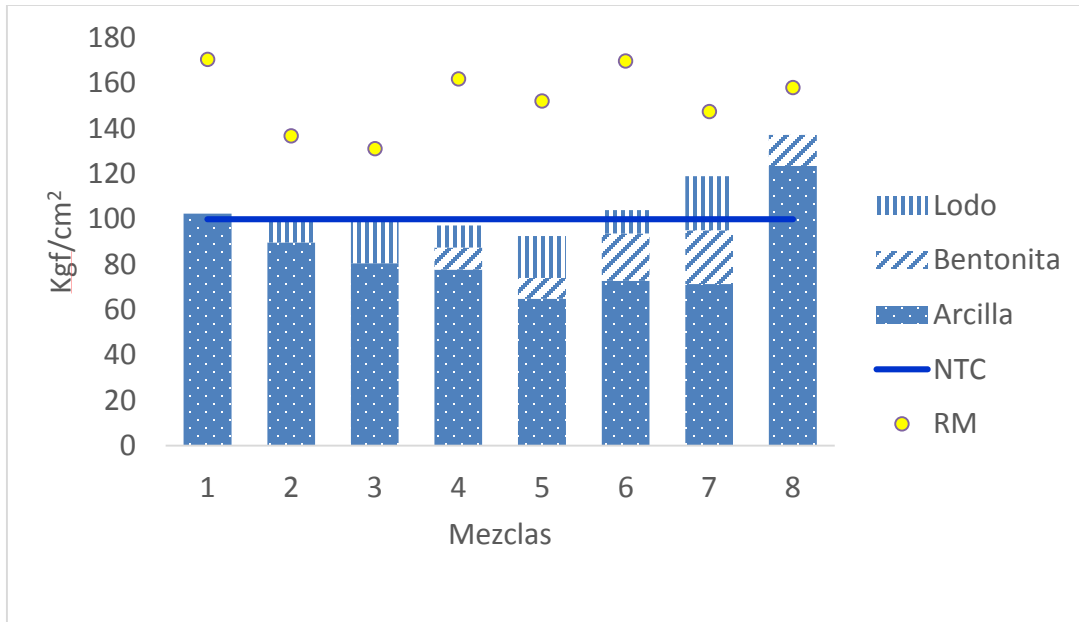
La muestra blanco es la que mayor coeficiente de saturación presenta, esto puede ser atribuido a la cantidad de poros generados por la materia orgánica luego del proceso de sinterización, lo cual permite se generen espacios interlaminares los cuales son ocupados por las moléculas de agua; seguido a esto se observa cómo a medida que se comienza a introducir material antiplástico este porcentaje disminuye. Cuando se realiza inclusión de bentonita y lodo a la mezcla arcillosa el coeficiente de saturación comienza a disminuir considerablemente hasta llegar a valores cercanos a 1; no obstante, debido al comportamiento de la mezcla 3 y la mezcla 8 era de esperarse que la relación que tiene mayor porcentaje de sustitución (mezcla seis) presentara menor coeficiente de saturación, sin embargo se observa que su coeficiente de saturación es uno de los más altos, por lo cual no se puede estimar una tendencia del material respecto a los porcentajes de sustitución.

**3.1.4 Ataque químico.** Las arcillas al entrar en contacto con soluciones acidas o básicas generan hidrolisis de los minerales presentes, afectando principalmente a los cationes que unen la red de estructuras de los aluminosilicatos. Los más abundantes son cationes de magnesio, de calcio, de potasio y sodio, siendo estos liberados en forma de hidróxidos y óxidos (Madejová, Pentrák, Pálková, & Komadel, 2009; Tyagi et al., 2006).

#### *3.1.4.1 Resistencia a ácidos*

Tabla 5: Promedio de la resistencia a la compresión después de ataque ácido

<b>Mezcla #</b>	<b>Área [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Carga de Rotura [kgf]</b>	<b>Resistencia Mecánica [kgf/cm<sup>2</sup>]</b>
1	21,57±0,79	2203,69±177,27	102,46±9,85
2	22,36±1,06	2226,35±139,29	99,72±6,59
3	20,81±0,70	2094,92±193,20	100,72±8,96
4	21,11±0,78	2048,46±237,35	97,16±11,74
5	20,06±0,84	1855,86±145,81	92,61±7,04
6	21,99±0,61	2286,39±66,04	104,05±2,94
7	20,96±0,55	2488,19±8,24	118,90±10,3
8	20,50±0,63	2805,31±140,03	137,12±9,37



*Figura 6:* Promedio de la resistencia mecánica luego de ataque ácido

Durante el ataque con ácido clorhídrico se puede apreciar que el material inmerso absorbe inicialmente una gran cantidad de ácido, esto debido a su porosidad, y posteriormente este proceso pasa a ser lento. Una vez transcurrido una hora de inmersión y 7 días de curado el material adquiere una tonalidad oscura respecto a la inicial; con respecto al tamaño este no varía considerablemente ya que el material es mínimamente corroído por el ácido luego del proceso de sinterización, generando así leves deformaciones en las puntas del cubo debido a pequeñas partes desprendidas. Seguido a esto se procedió a medir la resistencia mecánica de los especímenes.

La tendencia muestra que todos los especímenes disminuyeron la resistencia a la compresión con respecto a las unidades sin ser expuestas a ambientes corrosivos; los especímenes blanco poseen una resistencia mecánica media con respecto a las demás unidades. Para las unidades con 20% de bentonita se presenta una alta resistencia mecánica lo cual puede atribuirse a la

cristalinidad de este tipo de arcillas, ya que en su mayoría son amorfas lo cual reduce los posibles espacios de hidrólisis. Las mezclas entre arcilla y lodo, son los que menor resistencia presentan luego del ataque, como era de esperarse, su cristalinidad favorece que, una vez realizada la hidrólisis, en los espacios queden moléculas de agua las cuales, luego del curado a temperatura ambiente, se evaporan generando huecos en la red cristalina, lo que hace que disminuya la resistencia.

Para las mezclas que incluyen porcentajes de lodo y bentonita, se presenta un comportamiento que depende de la cantidad de bentonita sustituida: las que poseen 20% de minerales de este tipo presentan altas resistencias mecánicas disminuyendo su resistencia conforme disminuye el porcentaje de lodo presente en las unidades. Finalmente se observa que todas las unidades pueden ser utilizadas como materiales cerámicos en ambientes altamente corrosivos.

### 3.1.4.2 Resistencia a bases

Tabla 6: Promedio de resistencia a la compresión después de ataque básico

Mezcla #	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1	21,88±0,56	2658,02±220,59	121,66±33,60
2	22,20±0,67	2641,02±9,97	118,93±6,50
3	20,81±0,70	2642,16±157,07	127,01±6,58
4	22,09±0,53	2548,12±166,25	115,53±8,94
5	20,50±0,63	2378,17±145,81	115,83±10,87
6	21,68±0,65	1544,28±42,75	71,38±3,68
7	20,96±0,68	1918,17±185,01	91,69±9,63
8	21,01±0,67	2687,48±200,20	128,36±12,71

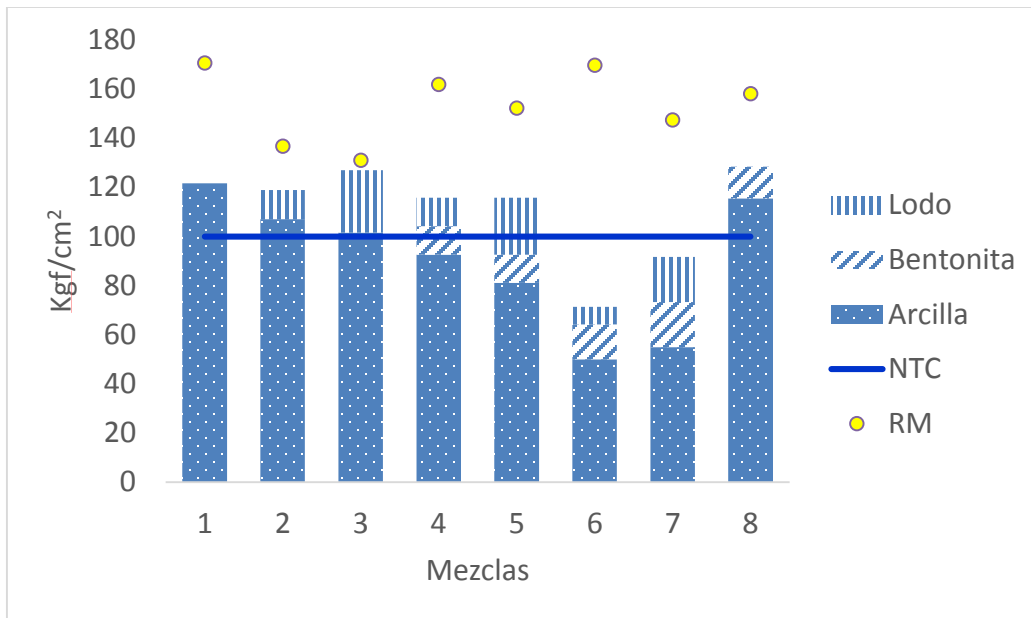


Figura 7: Promedio de la resistencia mecánica luego de ataque básico

Después del ataque básico, se observa un comportamiento contrario al del ataque ácido, siendo para este caso los especímenes con mezclas de lodo-bentonita las que presentan resistencias mecánicas más bajas, dependiendo estas del porcentaje de bentonita sustituido; las unidades con 20% de bentonita y 10% y 20% de lodo presentan menor resistencia mecánica, (con valores muy por debajo de la norma) a las que están sustituidas solo en 10% de bentonita manteniendo los porcentajes de lodo.

Teniendo en cuenta que el blanco es la mezcla 1, solo dos de los especímenes presentan una mejora en la respuesta mecánica: las que poseen solo bentonita y 20% de lodo, para las demás mezclas se observan valores variables de resistencia mecánica los cuales van disminuyendo dependiendo del porcentaje de bentonita y lodo, teniendo así que a mayor porcentaje de bentonita

en este tipo de unidades menor es la resistencia, mientras que para las unidades con mayor porcentaje de lodo mayor es la resistencia mecánica.

Finalmente debido a la resistencia mecánica no es recomendable utilizar las unidades de las mezclas 6 y 7 en ambientes altamente alcalinos, mientras que el resto de unidades si pueden ser utilizados para tales ambientes.

### **3.2 Caracterización estructural**

**3.2.1 Fluorescencia de rayos X.** En los Apéndice 15: Fluorescencia de Rayos X de la arcilla y Apéndice 16: Fluorescencia de Rayos X del lodo se observa que, tanto para la arcilla como para el lodo, el óxido de silicio y el óxido de aluminio se encuentran en una mayor concentración respecto al resto de los óxidos encontrados en las muestras. El análisis elemental refleja que los elementos Si y Al son los que se encuentran en mayor proporción respecto a los demás elementos, la arcilla posee una relación Si/Al aproximada de 2 mientras que el lodo presenta una menor relación siendo esta aproximadamente 1, por lo cual en la arcilla hay más presencia de capas tetraédricas debidas al oxido de silicio que las octaédricas que están dadas por la disposición del óxido de aluminio. En el lodo se encuentra aproximadamente la misma cantidad de capas tetraédricas que de octaédricas con lo cual se esperaría que este posea mayor porosidad respecto a la arcilla.

**3.2.2 Difracción de rayos X de muestras policristalinas (DRX) e identificación.** En el Apéndice 7. Difractograma de la arcilla sin calentamiento se pueden identificar las fases cuarzo (Q), moscovita (M), caolinita (C), encontrándose en menor proporción las fases microclina (Mi), albita (A), cristobalita (C), hematita (H) y montmorillonita (Mo); el porcentaje en la muestra de material cristalino es elevado (83,1%). El análisis de la arcilla luego del proceso de sinterización presenta las fases cuarzo (Q), hematita (H), microclina (Mi), illita (I), mullita (Mu) y albita (A); como se puede observar debido a la alta temperatura del proceso de sinterización se presenta una pérdida de las fases moscovita (M), cristobalita (C) y montmorillonita (Mo), y aparición de las fases illita (I) y mullita (Mu), todo esto lleva a que la cantidad de material cristalino luego del proceso de sinterización disminuya hasta un valor de 51,9%.

Se esperaba que la fase de cuarzo no estuviese presente en la arcilla sinterizada (ver Apéndice 9: Difractograma de la arcilla sinterizada (preliminar)) ya que ésta a 870 °C pasa a ser tridimita y a aproximadamente 1000 °C cristobalita, la caolinita se esperaba pasara a mullita primaria a aproximadamente 979 °C (Rozo Rincón et al., 2015), debido a que es una fase metaestable y teniendo en cuenta el tiempo de la rata de calentamiento, la otra parte de la caolinita pasa a ser amorfa. Las transformaciones esperadas no se obtuvieron a pesar de ser llevado el proceso de sinterización a las temperaturas reportadas en la literatura (Vieira, Sánchez, & Monteiro, 2008), esto pudo ser debido a la presencia de microclina y albita en la arcilla, estos dos minerales se caracterizan por tener un efecto térmico de corrimiento, haciendo que las transformaciones de fases no ocurran a la temperatura esperada si no a unas más altas (Santos Amado et al., 2011).

El lodo Apéndice 11: Difractograma del lodo y Apéndice 13: Difractograma del lodo sinterizado (preliminar) contiene en mayor proporción la fase caolinita (C) y en menor proporción las fases cuarzo (Q), moscovita (M), microclina (Mi), albita (A), magnesiornblenda (Mg), gibbsita (G) y vermiculita (V), en el proceso de sinterización se observa la formación de fases como lo son magnesioblenda.

El análisis de la bentonita se encuentra reportado en el Apéndice 17: Difractograma de la bentonita, en donde se evidencia que la muestra es en su mayoría amorfa, por lo cual el porcentaje de cristalinos solo alcanzo a ser de 26,5 %, en esta mezcla se encuentra como fase mayoritaria la albita alta (AA), la cual luego del proceso de sinterización puede llegar a transformarse en montmorillonita, calitas o zeolitas, seguida de la moscovita (M) y el cuarzo (Q); como fases minoritarias se encuentran la pirita (P), la calcita (Ca) y la montmorillonita (Mo).

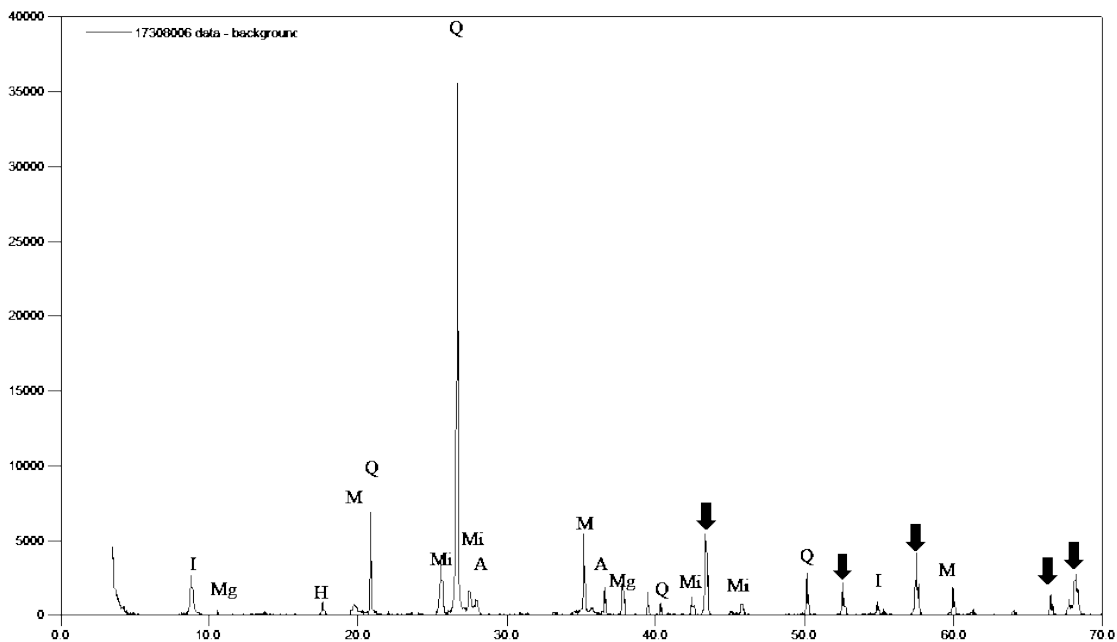


Figura 8: Difractograma mezcla 8

En las unidades producto de las mezclas se observa que en la composición mineralógica hay minerales tipo feldespatos, los plagioclasa son altamente reactivos y son considerados como un fundente poderoso, estos tienden a favorecer el proceso de sinterización y posterior formación de fases cristalinas y los potásicos a los cuales se les caracterizan por proporcionar mayor resistencia mecánica a las unidades formadas, reducir la conductividad eléctrica, y mejorar el módulo de ruptura entre otros (Vieira et al., 2008). En la Figura 8: *Difractograma mezcla 8*, se observa que las fases mayoritarias que componen la mezcla son cuarzo (Q), seguida de paragonita 2M1 (Pa), moscovita 2M1 (M), illita (I) y anhidrita (An), en menores concentraciones se encuentran las fases hematita (H) y albita (A); la fase albita tratada térmicamente se encuentra no cuantificada y proviene de la materia prima bentonita sin sinterizar.

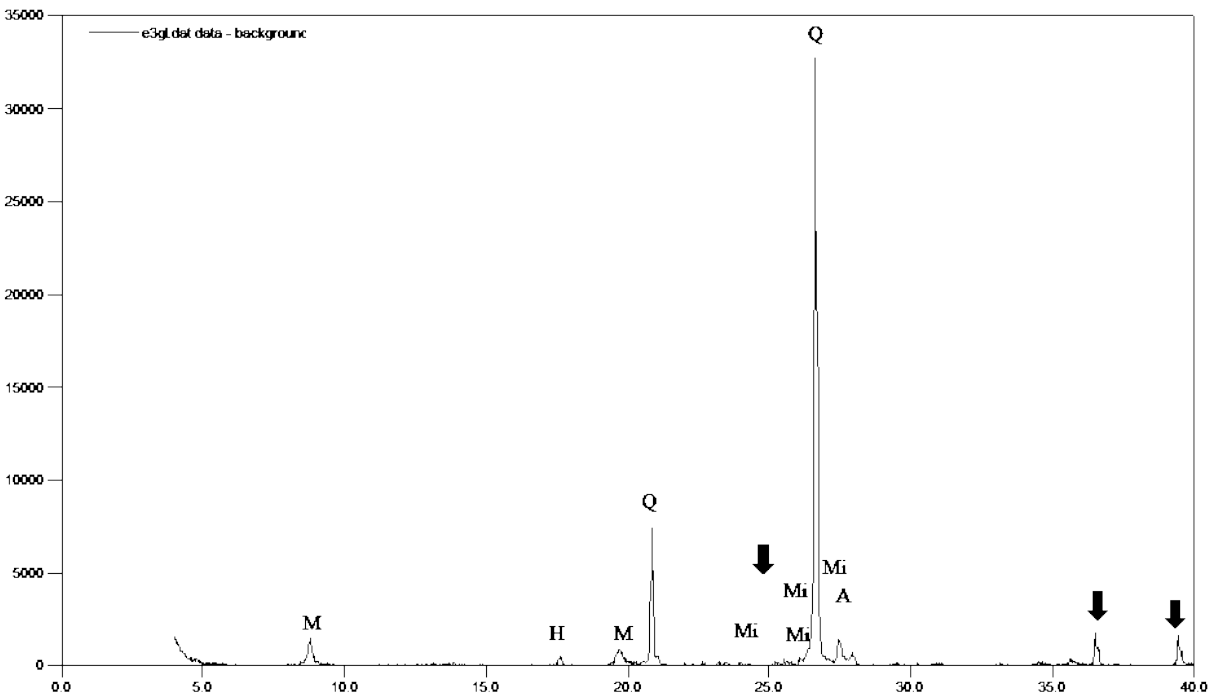


Figura 9: Difractograma mezcla 3

En la Figura 9: Difractograma mezcla 3, se observa, como al igual que en las demás muestras, que la fase de cuarzo (Q) es mayoritaria, siendo en este caso del 59,9% respecto al total de cristalinos de la muestra, a su vez se encuentran fases como la albita (A), hematita (H), microclina (Mi) y cristobalita (Cr). Las cuales provienen de la arcilla, las fases provenientes del lodo en esta mezcla no lograron ser cuantificadas, aunque si se observan en la Figura 10: Difractograma mezcla 7, donde el porcentaje de cuarzo (Q) disminuye significativamente en comparación con la mezcla de solo lodo, conservando un porcentaje elevado de albita tratada térmicamente (A) proveniente de la bentonita, trazas de illita (I), moscovita 2M (M), microclina (Mi) y magnesiohornblenda (Mg).

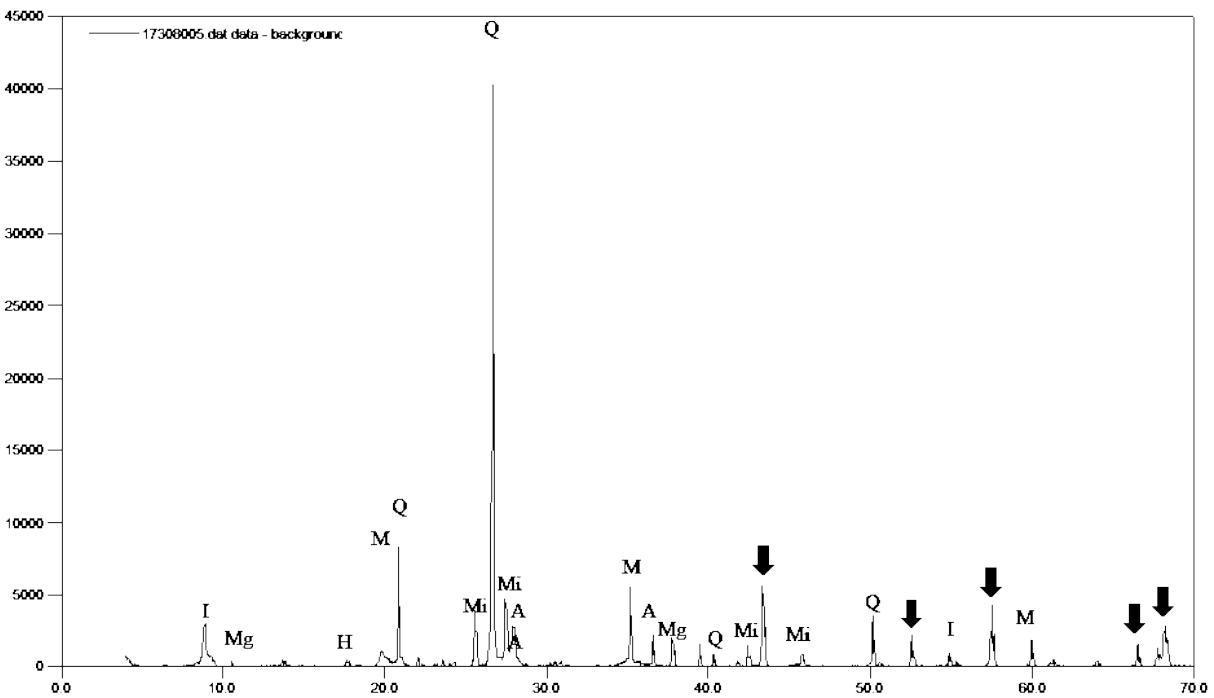


Figura 10: Difractograma mezcla 7

**3.2.3 Termodifracción de rayos X de muestras policristalinas e identificación.** Al exponer las arcillas a calor, estas presentan cambios de contracción o expansión debido a la pérdida de agua en su estructura y transformación de las fases cristalinas; mediante termodifracción de rayos x se pretende seguir las transformaciones de las fases de la arcilla y el lodo a través de la rata de calentamiento utilizada para la elaboración final de las unidades de mampostería, comenzando desde la materia prima sin tratamiento, hasta llegar a 1100 °C, punto en el cual hay formación de materiales vítreos(Macías López, 2006; Santos Amado et al., 2011).

La mayoría de autores han reportado las transformaciones de fases de arcillas, pero no es común encontrar la transformación de una mezcla arcillosa, por esto se tendrán en cuenta los datos de temperatura reportados, esperando que la mezcla se comporte de manera similar, logrando las transformaciones a temperaturas cercanas.

Alrededor de los 100 °C en las pastas cerámicas ocurre la eliminación de agua superficial, esta es la que se encuentra adherida a las redes cristalinas sin llegar a formar algún tipo de enlace, pasando esta temperatura alrededor de 160 °C, ya ha ocurrido la eliminación completa de este tipo de agua(Vieira et al., 2008). Por encima de 260 °C comienza la descomposición de hidróxidos de Fe y Al, generando así fases como la gibsita, geolita y lepidocrita(Singh & Sharma, 2016; Velraj et al., 2015); una de las fases más estudiadas es la colinita, la cual se transforma a metacaolín, entre 450 °C(Macías López, 2006; Santos Amado et al., 2011) y a 975 °C(Bernal et al., 2003). El cuarzo pasa de alfa a beta alrededor de los 570 °C generando cambios de volumen debido a la nueva celda unidad, posteriormente a 870 °C se convierte en tridimita y finalmente a temperaturas mayores a 1400 °C en cristobalita, la calcita se descompone a óxido y dióxido de oxígeno al alcanzar

temperaturas de 700 °C. La caolinita comienza a descomponerse a 800 °C (Urquiza & Maspoch, 2009), y la illita comienza a perder agua de su estructura a 400 °C; finalmente se reporta que la mullita, fase de interés debido a sus propiedades, comienza a formarse a 900 °C (Ramírez Llamas et al., 2015; Tuesta, Vivas, Sun, & Gutarra, 2005), pero como se observa en los difractogramas tanto de lodo como arcilla luego del proceso de sinterización, no se logra esta fase quizás por la presencia de otras fases cristalinas.

**3.2.3.1 Termodifracción del lodo.** Las fases mineralógicas más importantes presentes en el lodo a 25 °C (Imagen A) sin sinterización fueron: cuarzo (Q), moscovita (Mo), caolinita (C), vermiculita (V), illita (I), microclina (Mi) y montmorillonita (Mo), estas son las que se seguirán durante el proceso de sinterización; cuando el lodo alcanza la temperatura de 105 °C (Imagen B) se observa que no hay formación de nuevas fases, todas las anteriores se conservan y el único cambio que presentan las muestras es la eliminación de agua. A 600 °C (Imagen C) el pico representativo de caolinita disminuye drásticamente y ocurre un corrimiento a valores de  $2\theta$  más altos, lo cual es característico de la transformación de fase a metacaolinita (Me), la fase de cuarzo disminuye observándose la aparición de picos los cuales pueden ser debidos a la presencia de albita, a su vez comienza la aparición de un pico alrededor de los  $10^\circ$  característico de la fase magnesiohornblenda (Mg). A 900 °C (Imagen D) el difractograma presenta abundante amorficidad y no hay presencia de nuevas fases cristalinas. A 1100 °C (Imagen E) se observa que el perfil recobra cristalinidad e intensidad en los picos de cuarzo y los del patrón de corindón, se intensifican los picos de albita (A) y sobre los  $35^\circ$  (valores de  $2\theta$ ) se intensifican los picos de albita (A), moscovita (M) y magnesiohornblenda (Mg).

Finalmente, luego del proceso de sinterización (Imagen F) se observa la presencia de hematita (H), como consecuencia de la solución interestratal de silicatos. En los Apéndices 62 al 73 se encuentran los respectivos difractogramas y fases mineralógicas del lodo a cada temperatura.

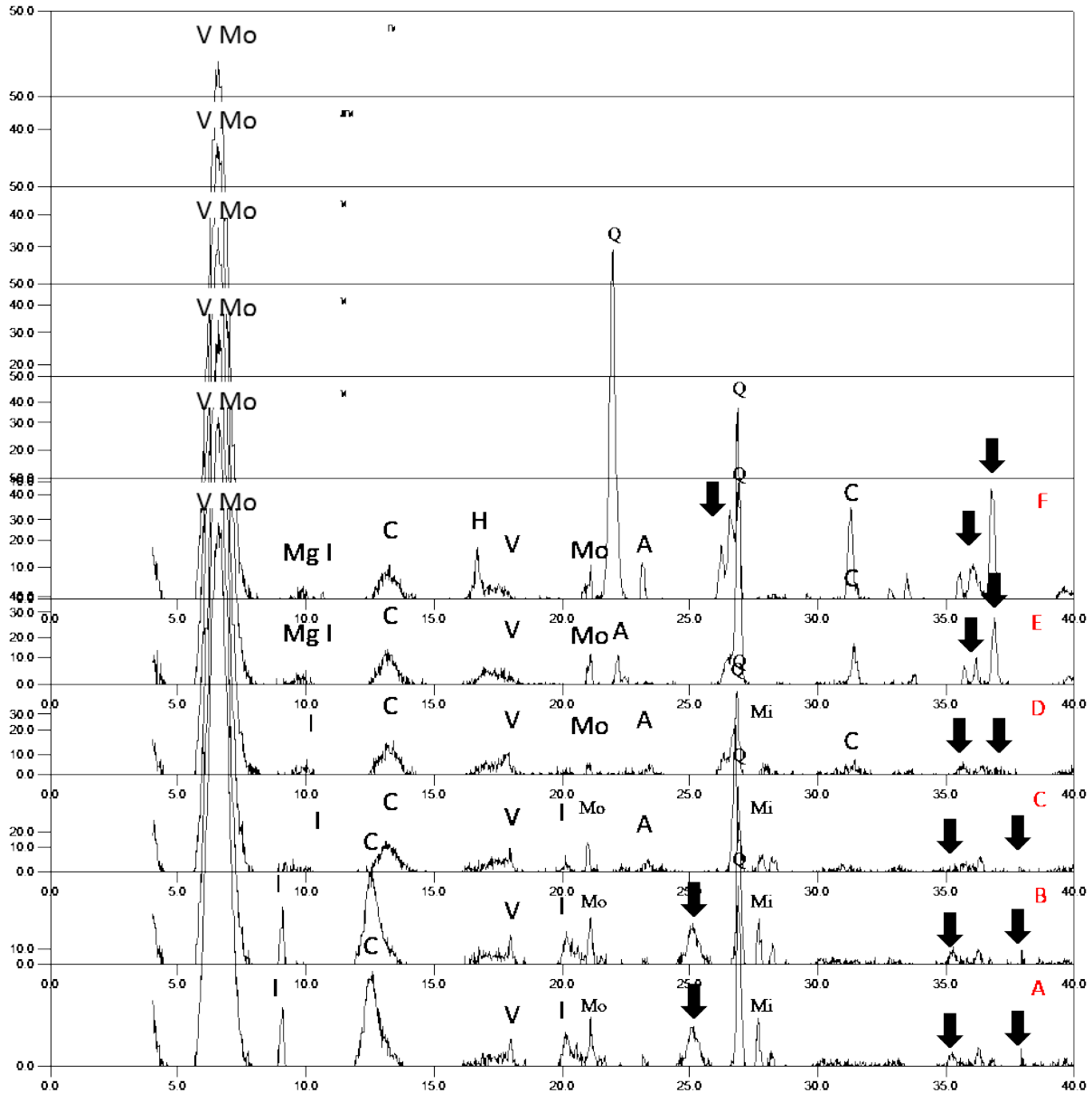
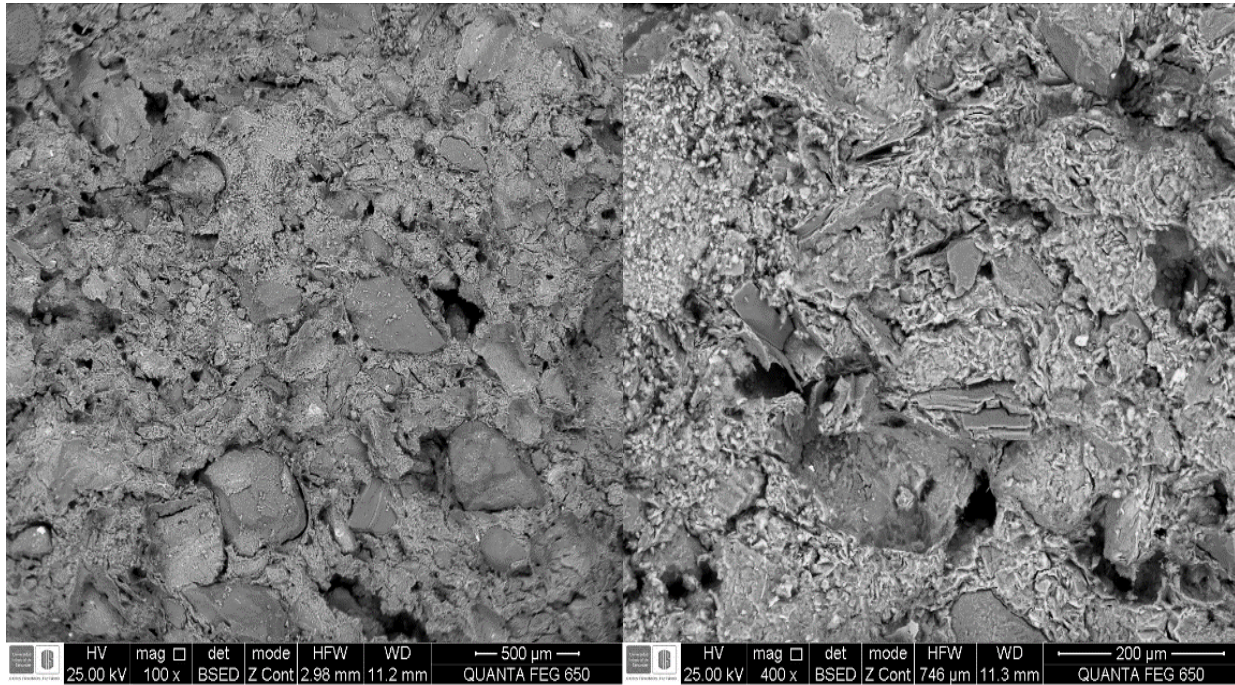


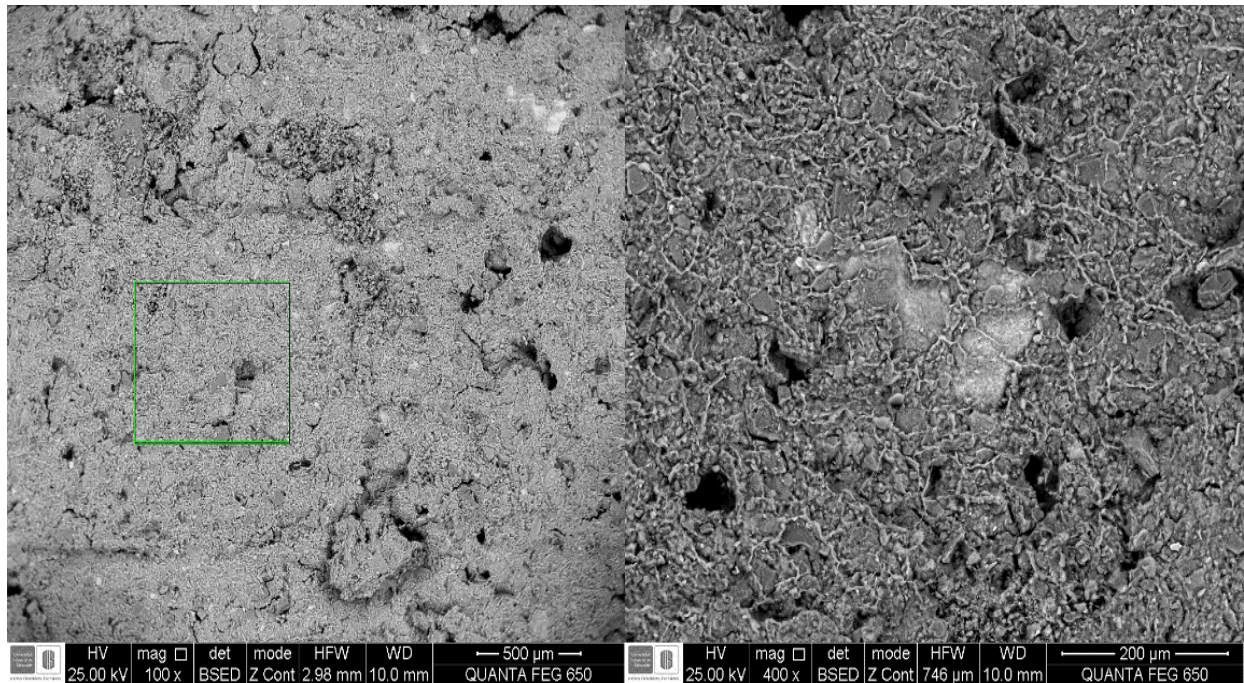
Figura 11: Difractogramas termodifracción del lodo; A) lodo sin sinterizar, B) lodo a 105 °C, C) lodo a 600 °C, D) lodo a 900 °C, E) lodo a 1100 °C y F) lodo a 25 °C luego de sinterizar

**3.2.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de dispersión de energía (EDS).** Las micrografías y análisis químico presentados se realizaron sobre los especímenes una vez sinterizados.



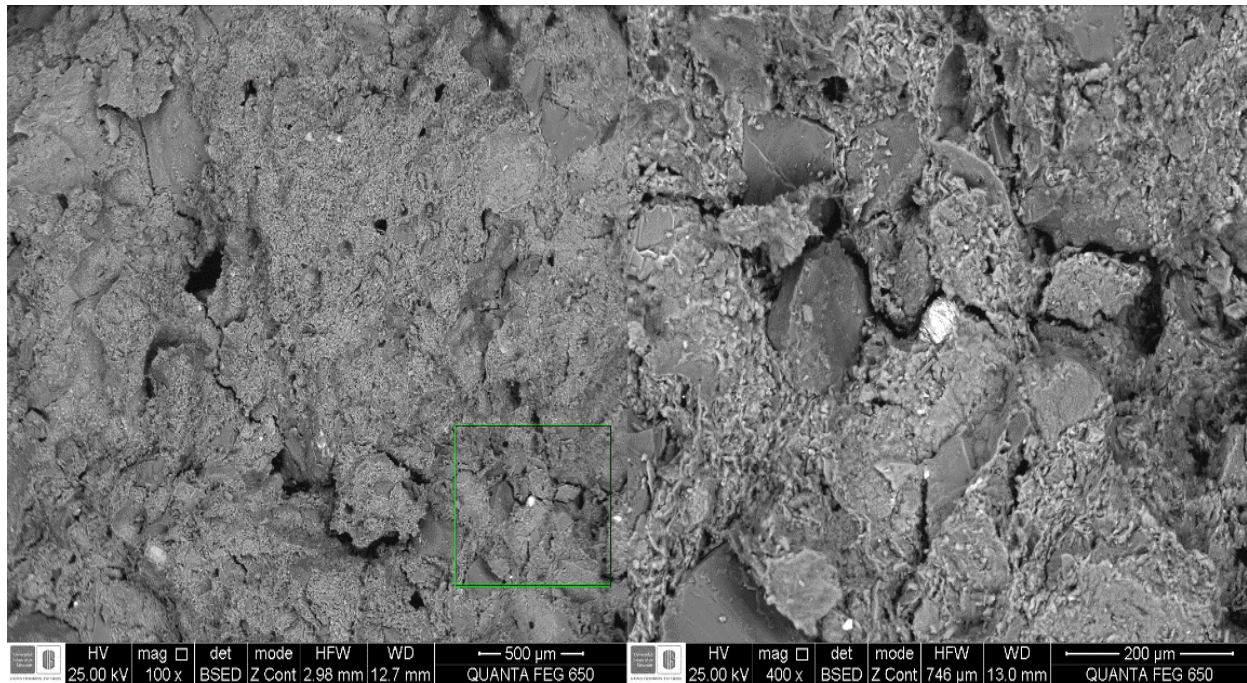
*Figura 12:* Micrografías SEM de la arcilla con aumentos de 100x y 400 x respectivamente

La Figura 12 muestra la micrografía de la arcilla en esta se observa que la morfología presente es variada debido a la presencia de cristales con diversos tamaños y formas, dando así una superficie irregular con alta porosidad como era de esperarse, ya que la materia orgánica presente en la arcilla ha sufrido un proceso de oxidación (Ramírez Llamas et al., 2015; Tuesta et al., 2005) debido a la temperatura alcanzada en la mufla, mientras que para las unidades formadas esta morfología cambia drásticamente dependiendo del grado de sustitución de lodo y bentonita.



*Figura 13:* Micrografías SEM de la mezcla 8 con aumentos de 100x y 400 x respectivamente

En la Figura 13 se observa el caso de la mezcla 8, en esta no hay presencia de cristales en la superficie, esto puede ser atribuido a que la mayor parte de la bentonita se encuentra amorfa y posee un tamaño de partícula menor, lo cual hace que pueda ubicarse alrededor de los cristales formando una capa protectora que al ser sometida a altas temperaturas hace que estas partículas se tornen porosas y esponjosas (Urquiza & Maspocho, 2009).



*Figura 14:* Micrografías SEM de la mezcla 3 con aumentos de 100x y 400 x respectivamente

En la Figura 14 se observa el caso de la mezcla 3, en esta hay presencia de cristales de diferente tamaño provenientes tanto de la arcilla como del lodo, se aprecia además que hay una disminución de la porosidad, esta es atribuida a la presencia en la materia orgánica de la muestra arcillosa sin sinterizar, ya que la materia orgánica le fue removida al lodo previamente a la sinterización (Al-Shahrani, 2014; Manohar et al., 2006).

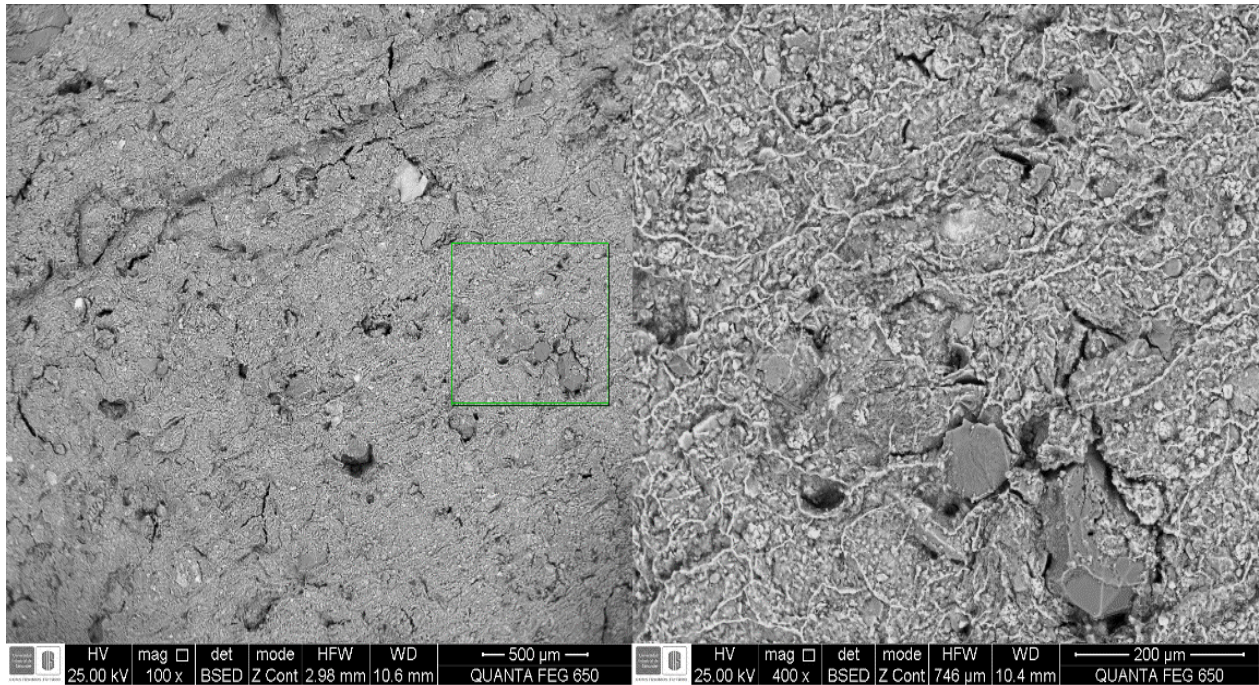


Figura 15: Micrografías SEM de la mezcla 7 con aumentos de 100x y 400 x respectivamente

Finalmente, en la Figura 15 se observa el caso de la mezcla 7, se observa que ésta es un intermedio entre las descritas anteriormente, ya que posee cristales visibles provenientes de la mezcla de fases cristalinas de la arcilla y el lodo y poca porosidad debido a la formación de las fases vítreas y a las propiedades conferidas por la bentonita al formar amorfos sobre las superficies cristalinas.

El análisis químico se realizó para la arcilla y las mezclas obtenidas como se muestra en las figuras 16 a 19, se observa que están constituidas principalmente por Si y Al, y algunas trazas de Ca, Na, Mg, K, y Ti; estas trazas provienen de las diferentes fases cristalinas que se encuentran en cada una de las materias primas encontrándose dispersas y en forma aleatoria en la microestructura.

También hay presencia de óxidos de hierro, el cual es el responsable de los tonos marrones de las piezas finales y de titanio el cual suele ser agregado a materiales cerámicos (Rocha, Armendariz, Rodriguez, & Esparza, 2017).

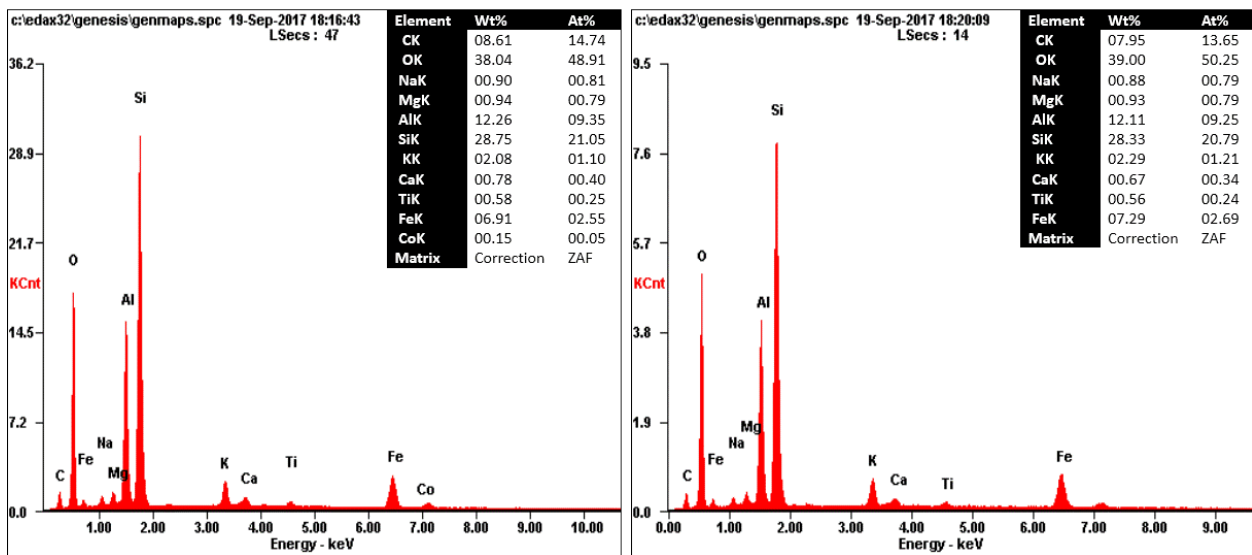


Figura 16: Análisis EDS de la mezcla 1 en dos puntos

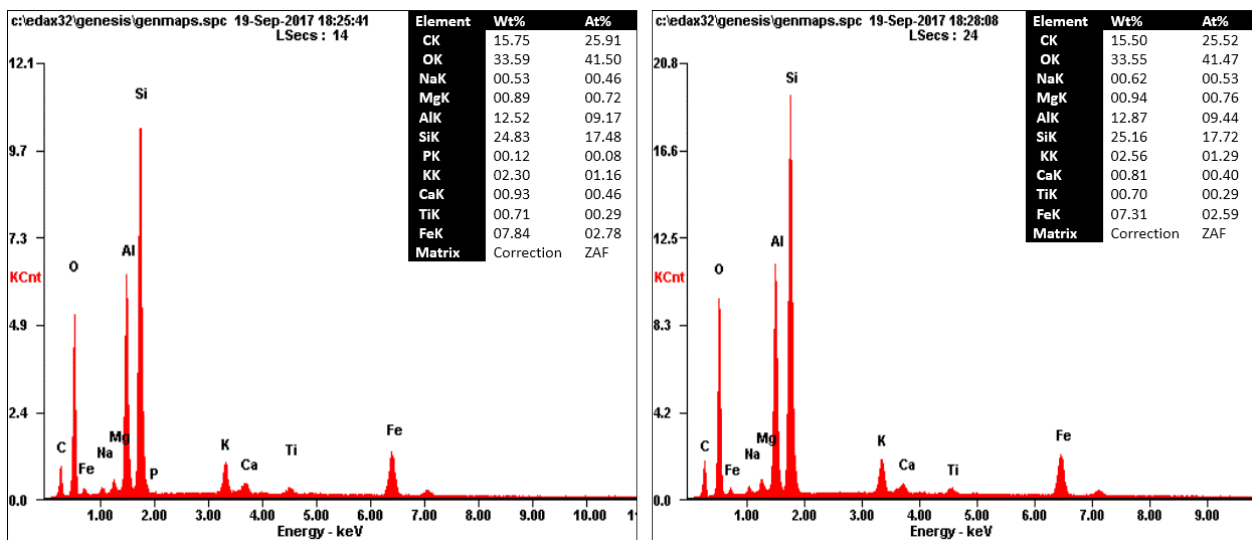


Figura 17: Análisis EDS de la mezcla 8 en dos puntos

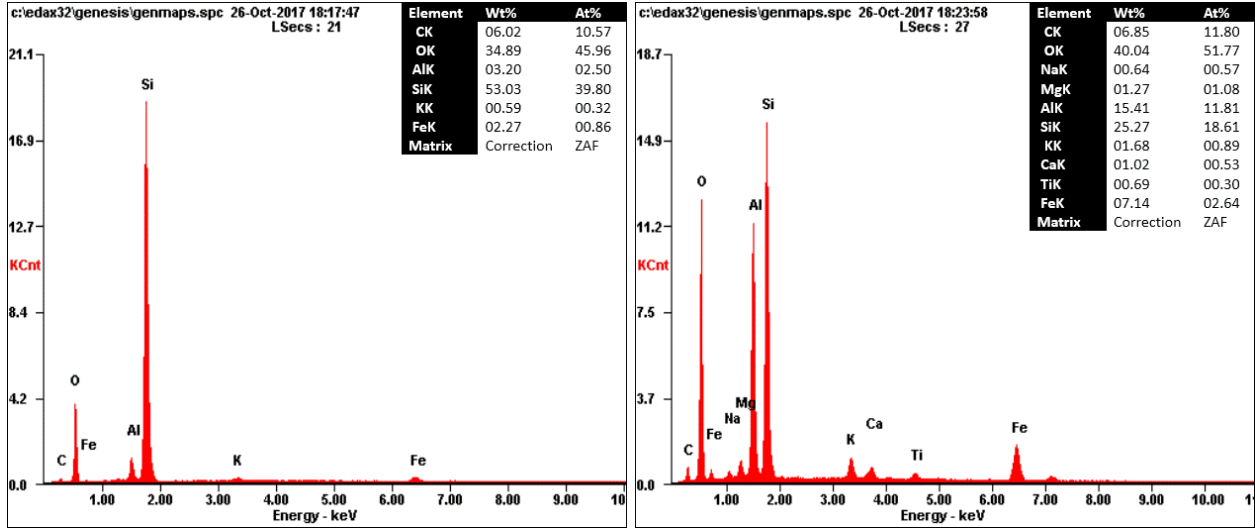


Figura 18: Análisis EDS de la mezcla 3 en dos puntos

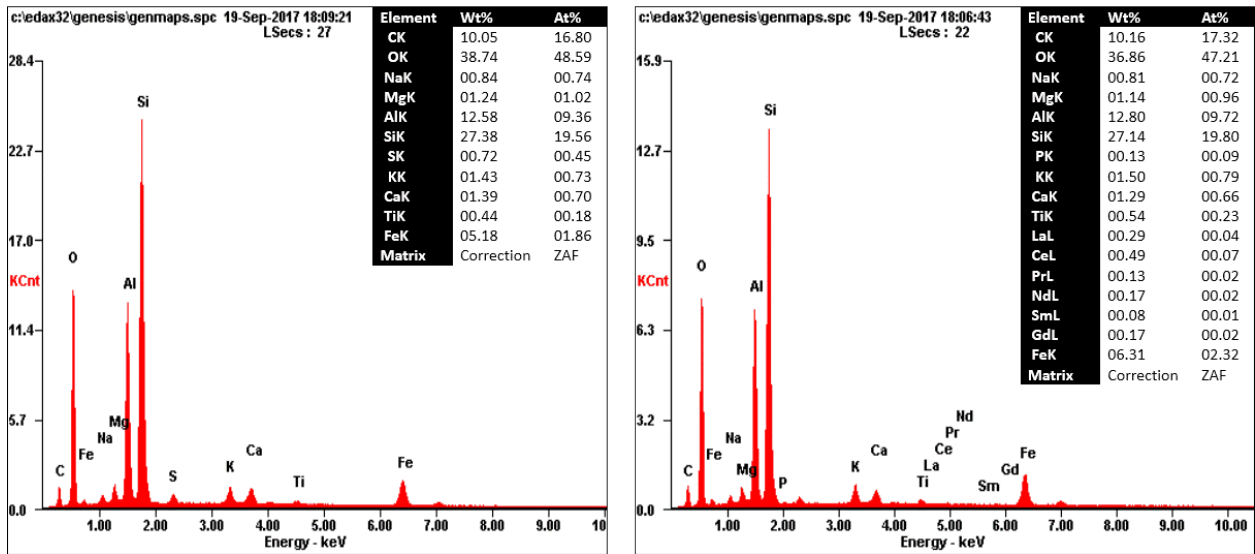


Figura 19: Análisis EDS de la mezcla 7 en dos puntos

### 3.3 Remoción de colorantes

Una vez obtenida la curva de calibración y de realizar la regresión lineal se obtuvo la ecuación para determinar la concentración de las soluciones tras inmersión, los datos de absorbancia obtenidos se encuentran en el Apéndice 74: Absorbancias de las soluciones para la curva de calibración de naranja de metilo y la ecuación en el Apéndice 76: Ecuación para la determinación de la concentración de naranja de metilo. Los datos de absorción obtenidos de cada solución tras pasar por cada muestra se encuentran en la *Tabla 7: Concentración de naranja de metilo luego de inmersión*.

Tabla 7: *Concentración de naranja de metilo luego de inmersión*

<b>Mezcla #</b>	<b>Absorbancia</b>	<b>Concentración [mg/L]</b>	<b>% de Remoción</b>
1	0,065	1,09	-8,75
2	0,051	0,87	13,13
3	0,030	0,54	45,94
4	0,048	0,82	17,81
5	0,042	0,73	27,19
6	0,048	0,82	17,81
7	0,040	0,70	30,31
8	0,038	0,67	33,44

Se observó que la solución final del espécimen de solo arcilla presenta mayor concentración que la solución inicial, debido a esto se sometieron todos los especímenes a inmersión en agua destilada a temperatura ambiente durante una hora, luego a la solución final se le midió la absorbancia a 460 nm con el objetivo de encontrar las muestras en las que la concentración de naranja de metilo debía modificarse, finalmente se obtuvo que la única solución que absorbió a

460 nm fue la de la mezcla 1, siendo esta absorbancia de 0,012; una vez obtenido este dato, se procedió a restar este valor de la absorción de la solución de naranja de metilo, con el objetivo de conocer la concentración real de remoción de naranja de metilo, teniendo los datos reportados a continuación.

Tabla 8: *Concentración corregida de naranja de metilo luego de inmersión*

Mezcla #	Absorbancia	Concentración [mg/L]	% de Remoción
1	0,053	0,90	10,00
2	0,051	0,87	13,13
3	0,030	0,54	45,94
4	0,048	0,82	17,81
5	0,042	0,73	27,19
6	0,048	0,82	17,81
7	0,040	0,70	30,31
8	0,038	0,67	33,44

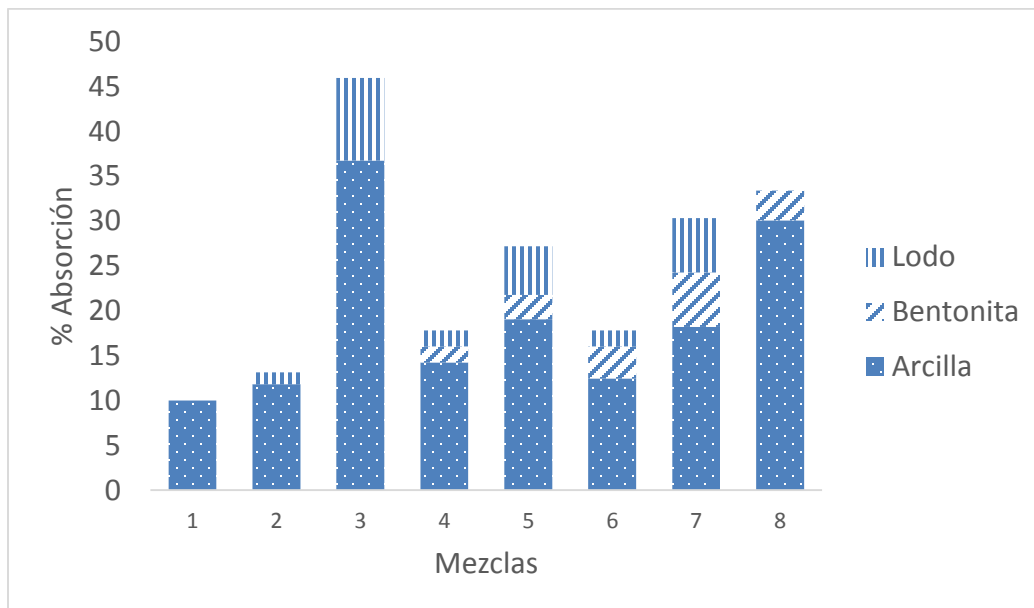


Figura 20: Porcentaje de remoción de naranja de metilo

Como era de esperarse la relación que contuviese mayor proporción de materiales absorbentes y adsorbentes tendrían el mayor porcentaje de remoción de colorante; es así como se encuentra que para la muestra que posee mayor cantidad de lodo es la que mayor porcentaje de remoción presenta, el lodo como se observa en los análisis de DRX presenta mayoritariamente luego del proceso de sinterización la fase moscovita, la cual es un gran absorbente. A su vez se observa que la relación que contiene solo bentonita presenta el segundo mayor porcentaje de remoción, esto debido a la presencia de la fase montmorillonita la cual actúa como adsorbente debido a su hinchamiento interno luego del contacto con agua (Gallegos & Cassabone, 2005).

Finalmente se observa como las mezclas de arcilla-bentonita-lodo logran remover naranja de metilo en porcentajes menores a los de las relaciones arcilla-bentonita y arcilla-lodo, sin embargo, tienden a presentar mayor porcentaje de remoción a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de lodo y bentonita en el material, siendo estos porcentajes mayores a los de la arcilla sola; considerándose que pueden realizar el proceso de remoción de colorantes en aguas (Madejová et al., 2009; Tyagi et al., 2006).

#### 4. Conclusiones

Los lodos residuales del tratamiento de agua potable, sirven como agregados en materiales puzolanicos.

Los materiales cerámicos obtenidos con sustituciones de lodo del 10% y 20% pueden clasificarse según la NTC 4205 como materiales de mampostería no estructurales para exteriores.

Los minerales tipo bentonita en sustituciones del 10% y 20% mejoran la resistencia mecánica de unidades a base de lodos residuales.

Las unidades de mampostería pueden ser expuestas a ambientes corrosivos, en donde presentan valores de resistencia mecánica cercanos a los establecidos por la norma.

Debido a las fases cristalinas presentes, las unidades pueden realizar la remoción del colorante naranja de metilo, hasta en un 45%.

### Referencias Bibliográficas

- Ahmad, T., Ahmad, K., Ahad, A., & Alam, M. (2016). Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. *Journal of Environmental Management*, 182, 606–611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.010>
- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950–955. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.088>
- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, 124, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>
- Al-Shahrani, S. S. (2014). Treatment of wastewater contaminated with cobalt using Saudi activated bentonite. *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.10.006>
- Amin, S. K., Abdel Hamid, E. M., El-Sherbiny, S. A., Sibak, H. A., & Abadir, M. F. (2017). The use of sewage sludge in the production of ceramic floor tiles. *HBRC Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.hbrej.2017.02.002>
- Avgustinik, A. I. (1983). *Cerámica*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Dahhou, M., & Assafi, M. (2015). Utilization of water treatment

- plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, 118, 171–177.  
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (2006). Chapter 1 General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science. *Developments in Clay Science*, 1(C), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01001-9](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01001-9)
- Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J., & Quintero, J. (2003). Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales (ACCEFYN)*, 27, 569–578.
- Caner, E., & Güney, B. A. (2017). Characterization of ceramic ware fragments from Aizanoi-Turkey by micro Raman, XRPD and SEM-EDX spectrometry. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 177, 135–139.  
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.01.052>
- Castillo Lara, R., Antoni, M., Alujas Díaz, A., Scrivener, K., & Martirena Hernández, J. F. (2011). Study of the addition of calcined clays in the durability of concrete. *Revista Ingeniería de Construcción*, 26(1), 25–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732011000100002>
- Edzwald, J. K. (1993). Coagulation in drinking water treatment: particules, organics and coagulants. *Water Science & Technology*, 27(11), 21–35.
- El-Didamony, H., Khalil, K. A., & Heikal, M. (2014). Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag–fired drinking water sludge composite cement pastes. *HBRC Journal*, 10(1), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.09.004>
- Farmer, V. C. (1968). Infrared Spectroscopy in Clay Mineral Studies. *Clay Minerals*, 7(4), 373–387. <https://doi.org/10.1180/claymin.1968.007.4.01>

- Ferrandis, V. A. (1973). Importancia de la cerámica, 34. Retrieved from <http://boletines.secv.es/upload/197413025.pdf>
- Gallegos, H., & Cassabone, C. (2005). *Albañilería Estructural* (Tercera). Lima: Fondo editorial de la Universidad Católica del Perú.
- Hernández, D., Villegas, J., Castaño, J., & Paredes, D. (2006). Aprovechamiento De Lodos Aluminosos Generados En Sistemas De Potabilización, Mediante Su Incorporación Como Agregados En Materiales De Construcción. *Revistas Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(8), 119–132.
- ICONTEC. (2005a). Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. In *Norma Técnica Colombiana-4017* (pp. 1–30).
- ICONTEC. (2005b). Resistencia química de morteros. In *Norma Técnica Colombiana-489*.
- ICONTEC. (2005c). Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos. In *Norma Técnica Colombiana 4205* (pp. 1–7).
- Kaggwa, R. C., Mulalelo, C. I., Denny, P., & Okurut, T. O. (2001). The impact of alum discharges on a natural tropical wetland in Uganda. *Water Research*, 35(3), 795–807. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00301-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00301-8)
- Kizinievič, O., Žurauskiene, R., Kizinievič, V., & Žurauskas, R. (2013). Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Construction and Building Materials*, 41, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041>
- Laguna E, O. H., Molina G, C. M., Moreno, S., & Molina G, R. (2008). *Naturaleza Mineralógica De Esmectitas Provenientes De La Formación Honda (Noreste Del Tolima-Colombia)*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*.

- Lin, C. F., Wu, C. H., & Ho, H. M. (2006). Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials. *Waste Management*, 26(9), 970–978. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.014>
- Macías López, M. A. (2006). *Estudio de las transformaciones en estado sólido de las arcillas de San José de Cúcuta utilizadas en la fabricación de baldosas mediante caracterización mineralógica por Difracción de Rayos X de muestras policristalinas*. Universidad Industrial de Santander.
- Madejová, J., Pentrák, M., Pálková, H., & Komadel, P. (2009). Near-infrared spectroscopy: A powerful tool in studies of acid-treated clay minerals. *Vibrational Spectroscopy*, 49(2), 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2008.08.001>
- Malagón, E. C. V. (2005). *Materiales Ceramicos. Propiedades, Aplicaciones Y Elaboracion*. UNAM.
- Manohar, D. M., Noeline, B. F., & Anirudhan, T. S. (2006). Adsorption performance of Al-pillared bentonite clay for the removal of cobalt(II) from aqueous phase. *Applied Clay Science*, 31(3–4), 194–206. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2005.08.008>
- Muñoz Chaves, J. A., Muñoz Menese, R. A., Mancill, P., & Rodríguez Páez, J. E. (2007). Estudio del procesamiento cerámico de las arcillas de la vereda “ La Codicia ” ( Guapi , Colombia ) para potencializar su uso en la elaboración de piezas cerámicas. *Fac. Ing. Univ. Antioquia.*, 42, 68–78.
- Nuñez, J. (1981). *Fundamentos de Edafología* (Universida). San José de Costa rica: Euned.
- Perilla Sastoque, J. E. (2015). *Estrategias para el reusó de los lodos en la zona dos de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá y plantas de tratamiento de aguas potables y*

*residuales*. Universidad Militar Nueva Granada.

Ramirez, G. (2003). *Manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, planta ii, del municipio de cartago, Valle*. Universidad Nacional de Colombia.

Ramírez Llamas, L. A., Jacobo Azuara, A., & Martínez Rosales, J. M. (2015). Adsorción del naranja de metilo en solución acuosa sobre hidróxidos dobles laminares. *Acta Universitaria Is a Multidisciplinary Scientific Journal*, 25(3), 25–34. <https://doi.org/10.15174/au.2015.778>

Rocha, E., Armendariz, E., Rodriguez, A., & Esparza, S. (2017). *Reforzamiento de cerámicos base alúmina con nanopartículas de titanio*. (E. A. Española, Ed.).

Rorabacher, D. B. (1991). Statistical Treatment for Rejection of Deviant Values: Critical Values of Dixon's "Q" Parameter and Related Subrange Ratios at the 95% Confidence Level. *Analytical Chemistry*, 63(2), 139–146. <https://doi.org/10.1021/ac00002a010>

Rozo Rincón, S. M., Sánchez Molina, J., & Gelves Díaz, J. F. (2015). Evaluación de minerales alumino silicatos de Norte de Santander para fabricar piezas cerámicas de gran formato. *Facultad de Ingeniería*, 24(38), 53–61. Retrieved from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-11292015000100005&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292015000100005&lng=en&nrm=iso&tlng=es)

Rubinson, K. a., & Runbinson, J. F. (2001). *Analisis Instrumental* (2001st ed.). PEARSON EDUCACIÓN S.A.

Salmang, H. (1955). *Los fundamentos físicos y químicos de la cerámica : estructuras química y física de los silicatos y arcillas. Cerámica de la sílice, feldespatos, vidriados, ladrillos, refractarios, terracotas, grez, loza, porcelana, aislantes eléctricos* (Reverté). Barcelona.

Sánchez, O., Herzig, M., Peters, E., Marquéz, R., & Zambrano, L. (2007). *Perspectivas sobre*

*conservación de ecosistemas acuáticos en México. México.*

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Santos Amado, J. D., Malagón Villafrades, P. Y., & Córdoba Tuta, E. M. (2011). Caracterización De Arcillas Y Preparación De Pastas Cerámicas Para La Fabricación De Tejas Y Ladrillos En La Región De Barichara, Santander. *Dyna*, 78(3), 50–58. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25762/39346>

Singh, P., & Sharma, S. (2016). Thermal and spectroscopic characterization of archeological pottery from Ambari, Assam. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 557–563. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.01.002>

Teixeira, S. R., Santos, G. T. A., Souza, A. E., Alessio, P., Souza, S. A., & Souza, N. R. (2011). The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Applied Clay Science*, 53(4), 561–565. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.004>

Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3), 145–154. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732012000300003>

Toya, T., Nakamura, A., Kameshima, Y., Nakajima, A., & Okada, K. (2007). Glass-ceramics prepared from sludge generated by a water purification plant. *Ceramics International*, 33(4), 573–577. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.11.009>

Tuesta, E., Vivas, M., Sun, R., & Gutarra, A. (2005). Modificación Química De Arcillas Y Su Aplicación En La Retención De Colorantes. *Rev. Soc. Quím. Perú*, 71(1), 26–36.

Tyagi, B., Chudasama, C. D., & Jasra, R. V. (2006). Determination of structural modification in

acid activated montmorillonite clay by FT-IR spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 64(2), 273–278.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2005.07.018>

Urquiza, E. a F., & Maspoch, L. M. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos. *Ingenierias*, XII(44), 35–41.

Velraj, G., Tamilarasu, S., & Ramya, R. (2015). FTIR, XRD and SEM-EDS Studies of Archaeological Pottery Samples from Recently Excavated Site in Tamil Nadu, India. *Materials Today: Proceedings*, 2(3), 934–942. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.06.012>

Vieira, C. M. F., Sánchez, R., & Monteiro, S. N. (2008). Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Construction and Building Materials*, 22(5), 781–787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.006>

Wolff, E., Keller Schwabw, W., & Vieira Conceicao, S. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. *Journal of Cleaner Production*, 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>

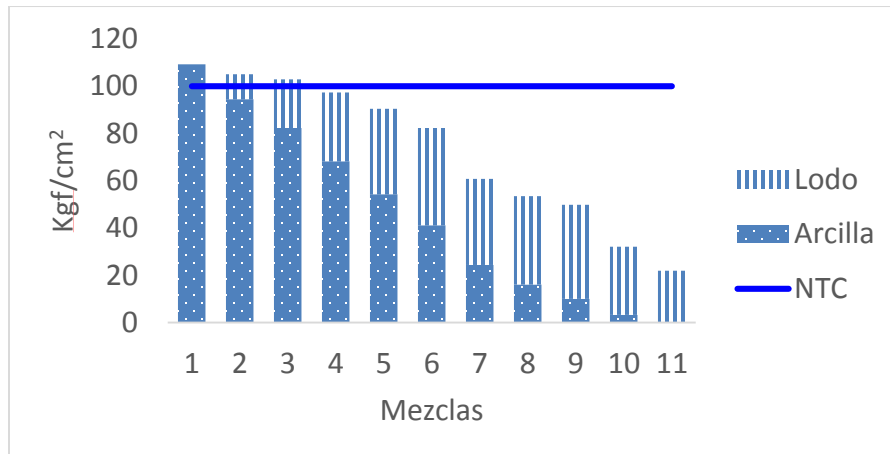
Xu, G. R., Zou, J. L., & Li, G. B. (2009). Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ . *Water Research*, 43(11), 2885–2893. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.046>

**Apéndices**

*Apéndice 1. Tabla de resistencia mecánica de mezclas arcilla-lodo*

<b>Relación Arcilla-Lodo</b>	<b>Área [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Carga de Rotura [kgf]</b>	<b>Resistencia Mecánica [kgf/cm<sup>2</sup>]</b>
100:0	25	2731,22	109,24
90:10	25	2625,1	105
80:20	25	2572,58	102,9
70:30	25	2433,15	97,32
60:40	25	2258,48	90,34
50:50	25	2057,31	82,29
40:60	25	1517,96	60,72
30:70	25	1335,25	53,41
20:80	25	1244,42	49,78
10:90	25	802,58	32,1
0:100	25	623,38	21,95

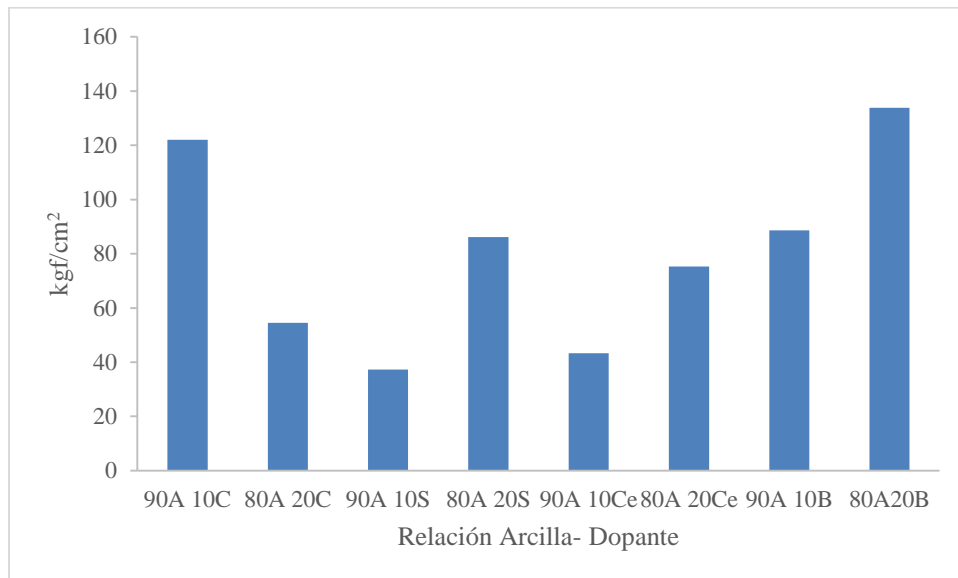
*Apéndice 2. Gráfico de resistencia mecánica de mezclas arcilla-lodo*



Apéndice 3. Tabla de resistencia mecánica de mezclas arcilla-dopante, siendo los dopantes: Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B)

Proporción Arcilla-Dopante	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]
90A 10C	25	3049,37	121,97
80A 20C	25	1362,20	54,48
90A 10S	25	2183,50	37,34
80A 20S	25	2154,00	86,16
90A 10Ce	25	1081,25	43,25
80A 20Ce	25	1882,68	75,31
90A 10B	25	1214,75	88,59
80A20B	25	3340,50	133,82

Apéndice 4. Gráfico de resistencia mecánica de mezclas arcilla-dopante, siendo los dopantes: Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B)



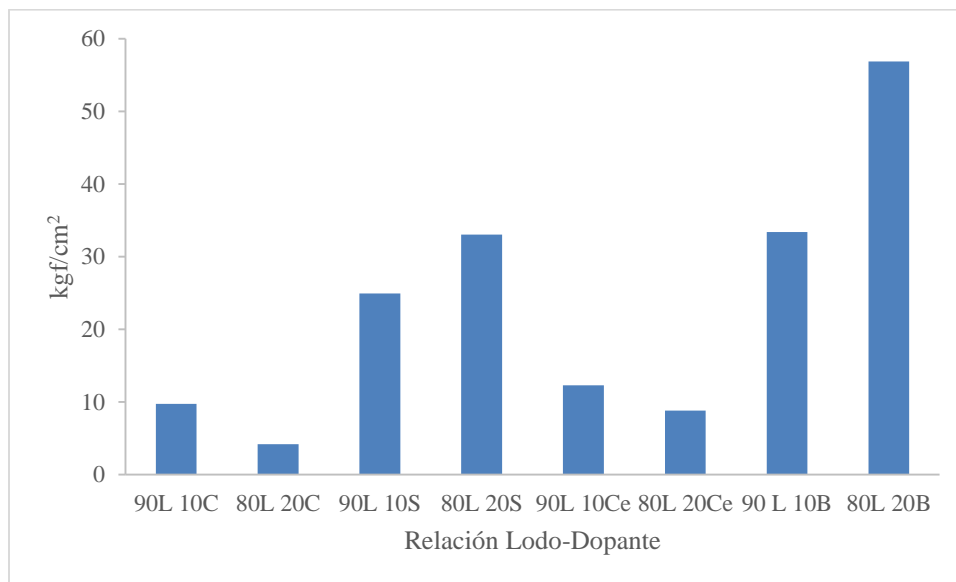
Apéndice 5. Tabla de resistencia mecánica de mezclas lodo-dopante, siendo los dopantes:

*Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B)*

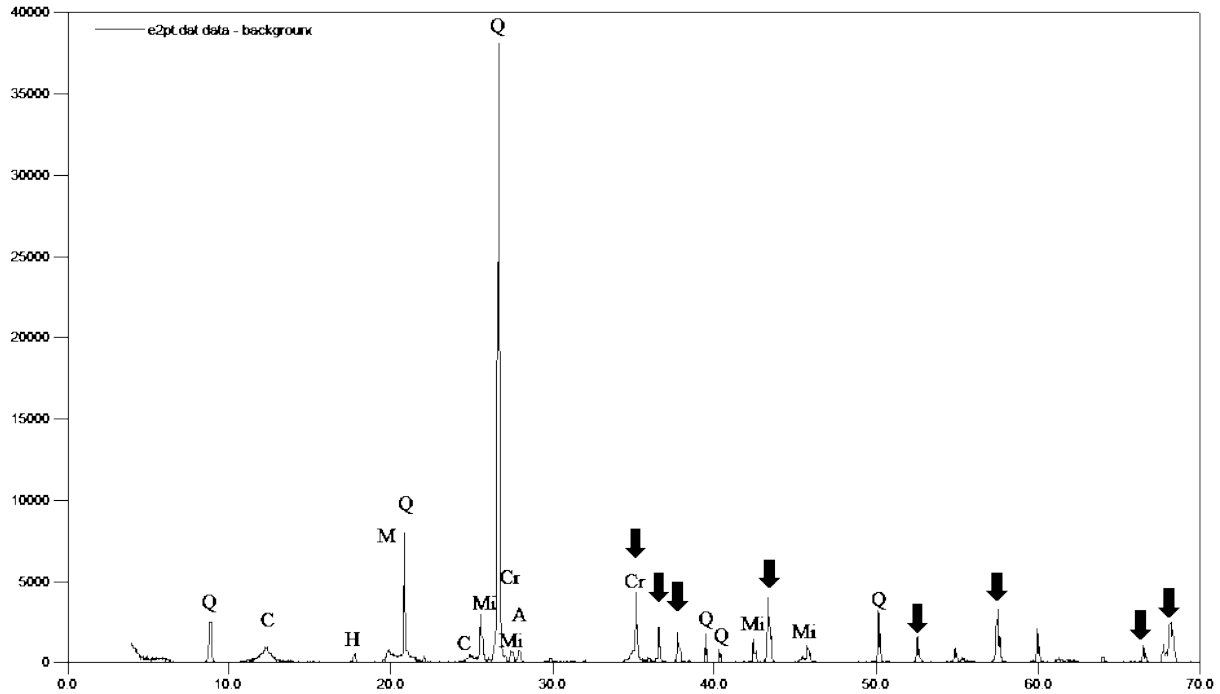
<b>Proporción Lodo-Dopante</b>	<b>Area [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Carga de Rotura [kgf]</b>	<b>Resistencia Mecánica [kgf/cm<sup>2</sup>]</b>
90L 10C	25	243,46	9,73
80L 20C	25	103,15	4,20
90L 10S	25	623,25	24,93
80L 20S	25	826,75	33,07
90L 10Ce	25	307,57	12,30
80L 20Ce	25	220,69	8,83
90 L 10B	25	835,50	33,42
80L 20B	25	1421,75	56,87

Apéndice 6. Gráfico de resistencia mecánica de mezclas lodo-dopante, siendo los dopantes:

*Calamina (C), Silicato de Sodio (S), Cenizas Volantes (Ce), Bentonita (B)*



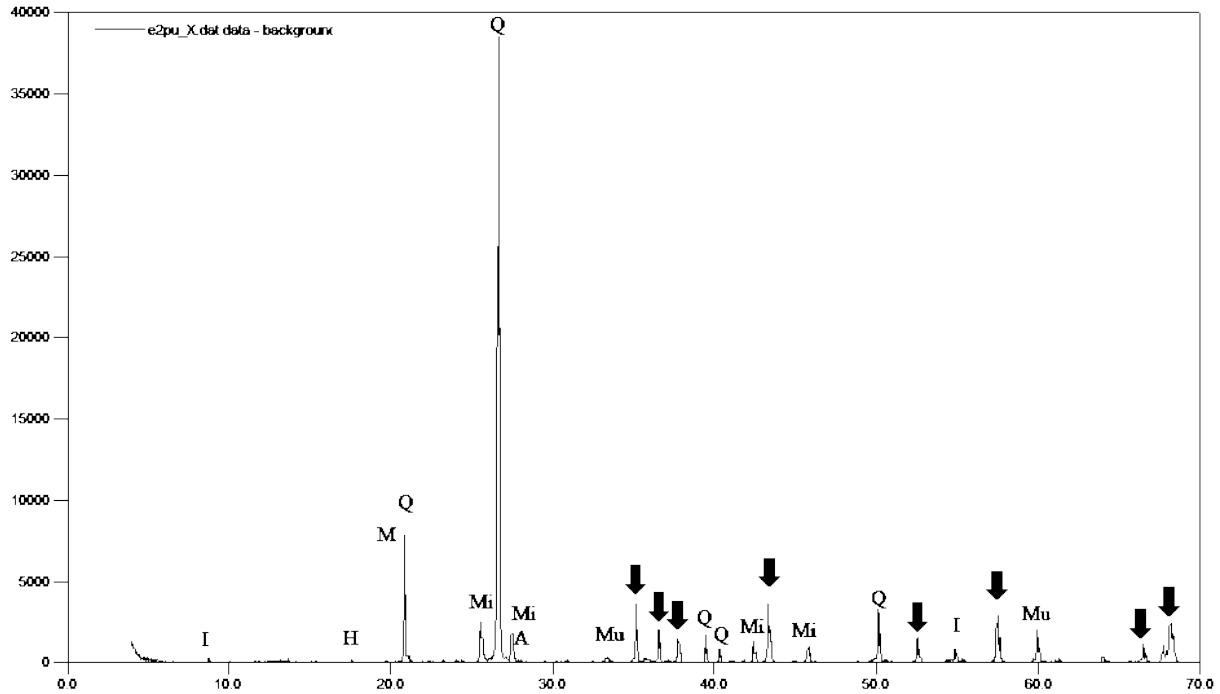
Apéndice 7. Difractograma de la arcilla sin calentamiento



Apéndice 8: Fases mineralógicas de la arcilla sin calentamiento

Fase	PDF N°	Nombre	Cuantitativo
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo	37,3%
(K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.1</sub> )(Al <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.07</sub> Mg <sub>0.06</sub> Ti <sub>0.01</sub> )(Si <sub>3.02</sub> Al <sub>0.98</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-82-3725	Moscovita 2M1	10,6%
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-79-6476	Caolinita 1A	30,2%
K(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>8</sub>	010-76-1238	Microclina	2,3%
Na(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>8</sub>	010-75-1142	Albita	2,5%
SiO <sub>2</sub>	010-77-8628	Cristobalita	N.C
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	010-76-8398	Hematita	N.C
Ca <sub>0.5</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH))	010-76-8291	Montmotillonita	0,2%
Total Cristalino			83,1%
Amorfos y Otros			16,9%

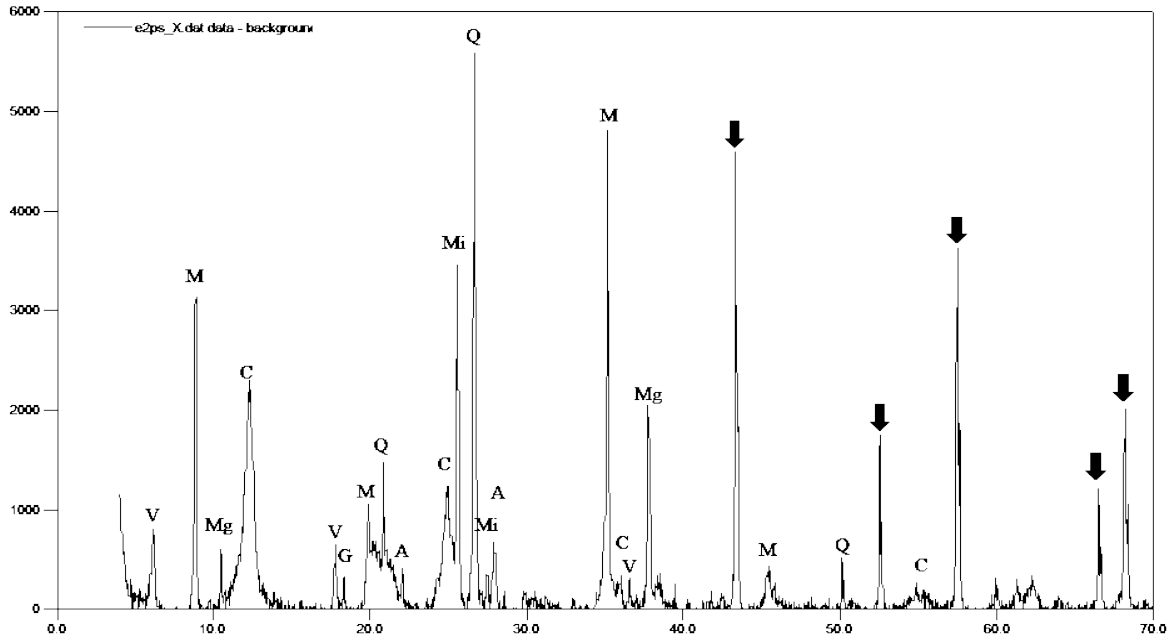
Apéndice 9: Difractograma de la arcilla sinterizada (preliminar)



Apéndice 10: Fases mineralógicas de la arcilla sinterizada (preliminar)

Fase	PDF N°	Nombre	Cuantitativo
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo	40,9%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	010-72-6226	Hematita	3,5%
K(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>8</sub>	010-72-1114	Microclina	6,3%
(K <sub>0,74</sub> Ca <sub>0,03</sub> )(Al <sub>1,92</sub> Mg <sub>0,09</sub> Fe <sub>0,01</sub> )(Si <sub>3,22</sub> Al <sub>0,78</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-78-5137	Illita 1M	1,2%
Al <sub>4,984</sub> Si <sub>1,016</sub> O <sub>9,508</sub>	010-79-1451	Mullita	N.C
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-89-6424	Albita	N.C
Total Cristalino			51,9%
Amorfos y Otros			48,1%

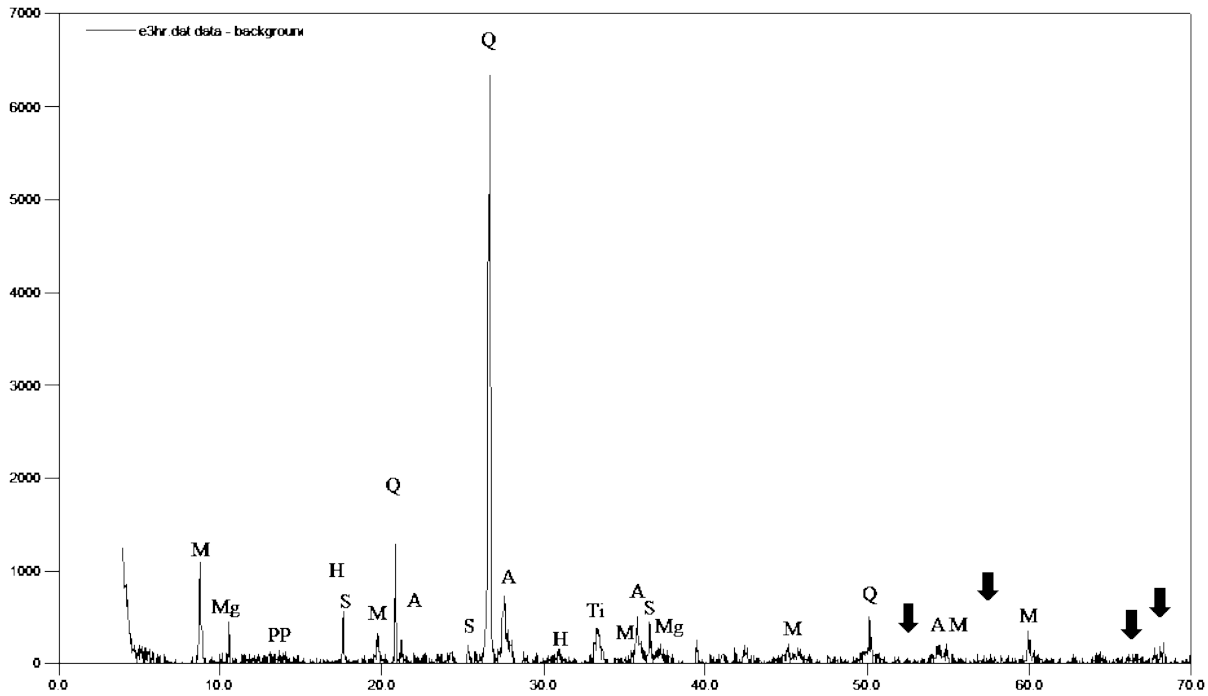
Apéndice 11: Difractograma del lodo



Apéndice 12: Fases mineralógicas del lodo

Fase	PDF N°	Nombre	Cuantiativo
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo	5,2%
(K <sub>0,86</sub> Na <sub>0,1</sub> )(Al <sub>1,9</sub> Fe <sub>0,07</sub> Mg <sub>0,06</sub> Ti <sub>0,01</sub> )(Si <sub>3,02</sub> Al <sub>0,98</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-82-3725	Moscovita 2M	6,5%
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-80-0885	Caolinita 1A	51,5%
K(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>8</sub>	010-76-1238	Microclina	1,2%
Na(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>8</sub>	010-75-1142	Albita	2,5%
(Na <sub>0,4</sub> K <sub>0,1</sub> )(Ca <sub>1,8</sub> Fe <sub>0,2</sub> )(Mg <sub>3,1</sub> Fe <sub>1,5</sub> Al <sub>0,4</sub> )(Si <sub>7</sub> AlO <sub>22</sub> )(OH) <sub>2</sub>	010-83-0735	Magnesiohornblenda	0,5%
Al(OH) <sub>3</sub>	010-74-1775	Gibbsita	1,2%
(Mg <sub>2,46</sub> Al <sub>0,3</sub> Fe <sub>0,22</sub> Ti <sub>0,021</sub> ) <sub>2</sub> (Mg <sub>0,38</sub> Ca <sub>0,03</sub> Na <sub>0,02</sub> ) <sub>2</sub> ((Si <sub>2,83</sub> Al <sub>1,17</sub> )O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>34</sub>	010-78-4316	Vermiculita	0,7%
Total Cristalino			69,3%
Amorfos y Otros			30,7%

Apéndice 13: Difractograma del lodo sinterizado (preliminar)



Apéndice 14: Fases mineralógicas del lodo (preliminar)

Fase	PDF N°	Nombre	Cuantiativo
SiO <sub>2</sub>	000-87-2096	Cuarzo	33,8%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	000-84-0308	Hematita	16,0%
FeOHSO <sub>4</sub>	000-73-1580	Sulfato ácido de hierro	5,7%
(K <sub>0,92</sub> Na <sub>0,18</sub> ) (Fe <sub>0,03</sub> Al <sub>1,97</sub> ) (AlSi <sub>3</sub> ) O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	000-80-07-43	Moscovita	22,7%
(Ca, Na) <sub>2,26</sub> (Mg, Fe, Al) <sub>5,15</sub> (Si, Al) <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	000-20-04-81	Magnesio blenda	1,8%
(Na <sub>0,98</sub> Ca <sub>0,02</sub> ) (Al <sub>1,02</sub> Si <sub>2,98</sub> O <sub>8</sub> )	000-70-3752	Albita	12,1%
TiO <sub>2</sub>	000-65-1118	Óxido de titanio	N.C
KPO <sub>3</sub>	000-74-0513	Fosfato de potasio	7,9%
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	000-05-0613	Sulfato de potasio	N.C
Total Cristalino			49,74%
Amorfos y Otros			50,26%

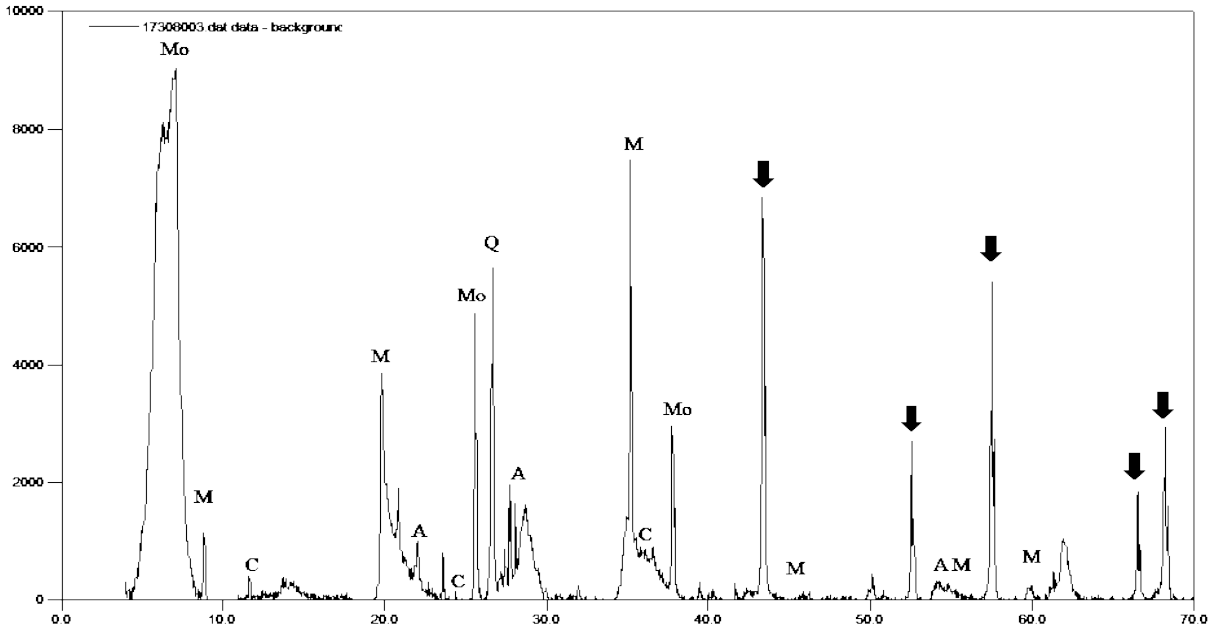
*Apéndice 15: Fluorescencia de Rayos X de la arcilla*

<b>Elementos y Óxidos mayoritarios</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Concentración (%)</b>	<b>Óxidos</b>	<b>Concentración (%)</b>
Si	24,78	SiO <sub>2</sub>	59,43
Al	10,88	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,55
Fe	4,65	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,65
K	1,97	K <sub>2</sub> O	2,37
Ti	0,57	TiO <sub>2</sub>	0,95
Mg	0,37	MgO	0,62
Ca	0,20	CaO	0,29
Na	0,20	Na <sub>2</sub> O	0,28
Ba	0,13	BaO	0,15
Mn	0,05	MnO	0,07
Zr	0,03	SO <sub>2</sub>	0,06
S	0,02	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05
Cu	0,02	ZrO <sub>2</sub>	0,04
P	0,02	CuO	0,03
Zn	0,02	ZnO	0,03
V	0,01	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
Rb	0,01	Rb <sub>2</sub> O	0,01
<b>Elementos y Óxidos minoritarios</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Concentración (mg/Kg)</b>	<b>Óxidos</b>	<b>Concentración (mg/Kg)</b>
Sr	80	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	114
Cr	78	SrO	94
Pb	43	NiO	53
Ni	42	PbO	46
Y	31	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39
Ga	23	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31
Nb	12	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	17

*Apéndice 16: Fluorescencia de Rayos X del lodo*

<b>Elementos y Óxidos mayoritarios</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Concentración (%)</b>	<b>Óxidos</b>	<b>Concentración (%)</b>
Si	18,39	SiO <sub>2</sub>	39,33
Al	15,40	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,10
Fe	5,30	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,58
K	1,42	K <sub>2</sub> O	1,71
Mg	0,63	MgO	1,05
Ca	0,52	TiO <sub>2</sub>	0,81
Ti	0,49	CaO	0,72
Na	0,34	Na <sub>2</sub> O	0,45
P	0,11	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26
Mn	0,09	MnO	0,11
Ba	0,05	BaO	0,06
V	0,02	SO <sub>2</sub>	0,04
Zn	0,02	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
S	0,02	ZnO	0,02
Cu	0,01	CuO	0,02
Zr	0,01	ZrO <sub>2</sub>	0,01
<b>Elementos y Óxidos minoritarios</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Concentración (mg/Kg)</b>	<b>Óxidos</b>	<b>Concentración (mg/Kg)</b>
Rb	94	RbO <sub>2</sub>	103
Sr	60	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	87
Cr	59	SrO	71
Ni	43	NiO	55
Y	35	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45
Ga	32	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43
Pb	32	PbO	34
Nb	13	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18

Apéndice 17: Difractograma de la bentonita



Apéndice 18: Fases mineralógicas de la bentonita

Fase	PDF N°	Nombre	Cuantitativo
SiO <sub>2</sub>	010-89-8934	Cuarzo	6,1%
(Ca, Na) <sub>0,3</sub> Al <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> X(H <sub>2</sub> O)	000-58-2039	Montmorillonita cálcica	N.C
(Ca, Na) <sub>0,3</sub> Al <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> X(H <sub>2</sub> O)	000-60-0318	Montmorillonita	N.C
K <sub>0,77</sub> Al <sub>1,93</sub> (Al <sub>0,5</sub> Si <sub>3,5</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-70-1869	Moscovita 2M2	6,2%
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	010-75-1593	Caolinita 1A	N.C
Ca(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	010-70-0982	Yeso	N.C
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-71-1151	Albita alta	8,9%
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-80-2107	Sanidina	4,3%
Ca(CO <sub>3</sub> )	010-80-3277	Calcita	0,2%
(Na, Ca) <sub>0,3</sub> (Al, Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> X(H <sub>2</sub> O)	000-03-0010	Montmorillonita	N.C
FeS <sub>2</sub>	010-71-4470	Pirita	0,8%
Total Cristalino			26,5%
Amorfos y Otros			73,5%

*Apéndice 19: Valores críticos del parámetro  $r_{11}$  para la prueba de Dixon (Rorabacher, 1991)*

**Table II. Critical Values of Dixon's  $r_{11}$  Parameter As Applied to a Two-Tailed Test at Various Confidence Levels, Including the 95% Confidence Level**

N <sup>a</sup>	confidence level					
	80% ( $\alpha = 0.20$ )	90% ( $\alpha = 0.10$ )	95% ( $\alpha = 0.05$ )	96% ( $\alpha = 0.04$ )	98% ( $\alpha = 0.02$ )	99% ( $\alpha = 0.01$ )
4	0.910	0.955	<b>0.977</b>	0.981	0.991	0.995
5	0.728	0.807	<b>0.863</b>	0.876	0.916	0.937
6	0.609	0.689	<b>0.748</b>	0.763	0.805	0.839
7	0.530	0.610	<b>0.673</b>	0.689	0.740	0.782
8	0.479	0.554	<b>0.615</b>	0.631	0.683	0.725
9	0.441	0.512	<b>0.570</b>	0.587	0.635	0.677
10	0.409	0.477	<b>0.534</b>	0.551	0.597	0.639
11	0.385	0.450	<b>0.505</b>	0.521	0.566	0.606
12	0.367	0.428	<b>0.481</b>	0.498	0.541	0.580
13	0.350	0.410	<b>0.461</b>	0.477	0.520	0.558
14	0.336	0.395	<b>0.445</b>	0.460	0.502	0.539
15	0.323	0.381	<b>0.430</b>	0.445	0.486	0.522
16	0.313	0.369	<b>0.417</b>	0.432	0.472	0.508
17	0.303	0.359	<b>0.406</b>	0.420	0.460	0.495
18	0.295	0.349	<b>0.396</b>	0.410	0.449	0.484
19	0.288	0.341	<b>0.386</b>	0.400	0.439	0.473
20	0.282	0.334	<b>0.379</b>	0.392	0.430	0.464
21	0.276	0.327	<b>0.371</b>	0.384	0.421	0.455
22	0.270	0.320	<b>0.364</b>	0.377	0.414	0.446
23	0.265	0.314	<b>0.357</b>	0.371	0.407	0.439
24	0.260	0.309	<b>0.352</b>	0.365	0.400	0.432
25	0.255	0.304	<b>0.346</b>	0.359	0.394	0.426
26	0.250	0.299	<b>0.341</b>	0.354	0.389	0.420
27	0.246	0.295	<b>0.337</b>	0.349	0.383	0.414
28	0.243	0.291	<b>0.332</b>	0.344	0.378	0.409
29	0.239	0.287	<b>0.328</b>	0.340	0.374	0.404
30	0.236	0.283	<b>0.324</b>	0.336	0.369	0.399

<sup>a</sup> Sample size.

Apéndice 20: Resistencia a la compresión Mezcla 1

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,62	3660,723	169,321138	0,005957235
2	21,15	3426,192	161,994894	0,025791325
3	21,62	3711,708	171,679371	0,004387938
4	22,56	3905,451	173,113963	0,065507221
5	22,08	3742,299	169,488179	0,005957235
6	21,16	3630,132	171,556333	0,004387938
7	22,56	3813,678	169,046011	0,009811917
8	22,56	3752,496	166,334043	0,00560681
9	21,16	3446,586	162,882136	0,005850584
10	22,09	3864,663	174,950792	0,065507221
11	23,04	3813,678	165,524219	0,028880911
12	19,8	3762,693	190,035	0,240434829
13	21,62	3599,541	166,491258	0,00560681
14	19,36	3548,556	183,293182	0,240434829
15	21,62	3517,965	162,718085	0,005850584
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>21,6</b>	<b>3679,7574</b>	<b>170,561907</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	1,00561992	148,663861	7,69049239	
<b>n-1</b>	14	14	14	
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	0,57273444	84,6690795	4,37999464	
<b>LC</b>	<b>21,60±0,57</b>	<b>3679,76±84,67</b>	<b>170,56±4,38</b>	

Apéndice 21: Resistencia a la compresión Mezcla 2

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	20,25	2997,918	148,045333	0,028192804
2	21,16	3120,282	147,461342	0,028192804
3	23,04	3089,691	134,101172	0,021365936
4	22,09	3303,828	149,562155	0,073226193
5	21,6	2906,145	134,54375	0,01486326
6	22,08	2946,933	133,466168	0,006166672
7	21,62	2814,372	130,174468	0,01626375
8	20,25	2895,948	143,009778	0,16425343
9	21,62	2844,963	131,589408	0,068307748
10	22,54	2926,539	129,837578	0,01626375
11	21,15	2814,372	133,067234	0,013092318
12	22,08	2844,963	128,847962	0,047774764
13	22,08	2977,524	134,85163	0,01486326
14	22,56	3008,115	133,338431	0,006166672
15	21,62	3018,312	139,607401	0,16425343
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>21,716</b>	<b>2967,327</b>	<b>136,766921</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	0,78606434	132,168226	6,99683526	
<b>n-1</b>	14	14	14	
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	0,44769014	75,2742595	3,98493352	
<b>LC</b>	<b>21,72±0,45</b>	<b>2967,33±75,27</b>	<b>136,77±3,98</b>	

Apéndice 22: Resistencia a la compresión Mezcla 3

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,15	2855,16	134,995745	0,031440349
2	21,15	2814,372	133,067234	0,056838768
3	21,62	2742,993	126,872942	0,027173913
4	21,62	2977,524	137,720814	0,018527668
5	20,7	2722,599	131,526522	0,031929348
6	20,24	2793,978	138,042391	0,018527668
7	22,08	2844,963	128,847962	0,027740036
8	22,09	2732,796	123,711906	0,044326241
9	21,15	2967,327	140,299149	0,130023057
10	21,15	2671,614	126,317447	0,004830918
11	21,62	2732,796	126,401295	0,004830918
12	22,56	2895,948	128,366489	0,027740036
13	22,08	2916,342	132,080707	0,031929348
14	21,16	2844,963	134,450047	0,031440349
15	22,56	2773,584	122,942553	0,044326241
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>21,5286667</b>	<b>2819,1306</b>	<b>131,04288</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	0,66182504	92,4074451	5,37528092	
<b>n-1</b>	14	14	14	
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	0,37693167	52,6291547	3,06140367	
<b>LC</b>	<b>21,53±0,38</b>	<b>2819,13±52,63</b>	<b>131,04±3,06</b>	

Apéndice 23: Resistencia a la compresión Mezcla 4

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	22,56	3640,329	161,362101	0,05393359
2	21,16	3426,192	161,918336	0,05393359
3	22,09	3528,162	159,71761	0,074922159
4	23,04	3660,723	158,885547	0,005756161
5	20,7	3242,646	156,649565	0,085365854
6	21,62	3558,753	164,604672	0,011890244
7	19,36	3222,252	166,438636	0,050834005
8	21,62	3405,798	157,529972	0,020960366
9	21,62	3609,738	166,962905	0,050834005
10	23	3783,087	164,482043	0,011890244
11	22,56	3558,753	157,746144	0,020960366
12	22,56	3721,905	164,978059	0,004446138
13	20,7	3415,995	165,023913	0,004446138
14	21,62	3436,389	158,944912	0,005756161
15	21,15	3436,389	162,477021	0,054171085
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>21,6906667</b>	<b>3509,8074</b>	<b>161,848096</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	0,99823034	161,69791	3,44892263	
<b>n-1</b>	14	14	14	
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	0,56852582	92,0924102	1,96427769	
<b>LC</b>	<b>21,69±0,57</b>	<b>3509,81±92,09</b>	<b>161,85±1,96</b>	

Apéndice 24: Resistencia a la compresión Mezcla 5

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	22,56	3365,01	149,158245	0,01139712
2	22,56	3487,374	154,582181	0,002830157
3	21,16	3579,147	169,146834	0,187668363
4	21,15	3048,903	144,15617	0,146020819
5	21,62	2916,342	134,890934	0,113015065
6	21,62	3466,98	160,359852	0,008566963
7	21,15	3130,479	148,013191	0,007037148
8	21,15	3385,404	160,066383	0,008566963
9	22,56	3130,479	138,762367	0,113015065
10	21,62	3517,965	162,718085	0,068841664
11	20,7	3201,858	154,67913	0,002830157
12	20,24	3161,07	156,179348	0,043794424
13	22,56	3344,616	148,254255	0,005022163
14	20,7	3079,494	148,767826	0,014992185
15	20,7	3171,267	153,201304	0,040310619
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>21,47</b>	<b>3265,7592</b>	<b>152,19574</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	0,77987178	197,519213	9,07883789	
<b>n-1</b>	14	14	14	
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	0,44416327	112,493849	5,17070419	
<b>LC</b>	<b>21,47±0,44</b>	<b>3265,76±112,49</b>	<b>152,20±5,17</b>	

Apéndice 25: Resistencia a la compresión Mezcla 6

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,16	3568,95	168,664934	0,032067278
2	20,25	3487,374	172,216	0,014519101
3	21,16	3834,072	181,194329	0,176419395
4	22,09	3630,132	164,333726	0,020650238
5	21,15	3487,374	164,88766	0,020650238
6	21,15	3365,01	159,102128	5,483856401
7	21,62	3517,965	162,718085	0,0808801
8	24	4068,603	169,525125	0,01583902
9	24,5	3915,648	159,822367	0,026849992
10	22,09	3936,042	178,182073	0,112294617
11	22,08	3752,496	169,95	0,01583902
12	23,04	3976,83	172,605469	0,014519101
13	20,25	3344,616	165,166222	0,031034844
14	21,62	3711,708	171,679371	0,020005126
15	19,36	3599,541	185,926705	0,176419395
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>21,7013333</b>	<b>3679,7574</b>	<b>169,731613</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	1,36945697	227,3551	7,64549725	
<b>n-1</b>	14	14	14	
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	0,7799519	129,486393	4,35436839	
<b>LC</b>	<b>21,70±0,78</b>	<b>3679,76±129,49</b>	<b>169,73±4,35</b>	

Apéndice 26: Resistencia a la compresión Mezcla 7

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,62	3028,509	140,079047	0,034305302
2	20,24	3089,691	152,652717	0,015828848
3	20,7	3273,237	158,127391	0,021870249
4	20,24	2926,539	144,591848	0,0109457
5	21,6	2953,0512	136,715333	0,017405114
6	23,03	3099,888	134,602171	0,072420283
7	20,7	3120,282	150,738261	0,0256986
8	20,25	3191,661	157,612889	0,021870249
9	20,7	2916,342	140,886087	0,034305302
10	21,62	2946,933	136,305874	0,017405114
11	19,36	3028,509	156,43125	0,00547285
12	20,24	3038,706	150,133696	0,0256986
13	21,16	3222,252	152,28034	0,015828848
14	19,8	3099,888	156,56	0,00547285
15	20,7	2987,721	144,334348	0,0109457
$\bar{x}$	<b>20,7973333</b>	<b>3061,54728</b>	<b>147,470084</b>	
$\sigma$	0,90412125	109,258777	8,32010806	
n-1	14	14	14	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,51492753	62,226556	4,73858198	
LC	<b>20,80±0,51</b>	<b>3061,55±62,23</b>	<b>147,47±4,74</b>	

Apéndice 27: Resistencia a la compresión Mezcla 8

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	22,56	3660,723	162,26609	0,009232933
2	21,16	3405,798	160,954537	0,023852641
3	22,09	3456,783	156,486329	0,010636339
4	22,09	3579,147	162,025668	0,009232933
5	21,15	3252,843	153,798723	0,019722616
6	21,15	3303,828	156,209362	0,002012512
7	21,62	3436,389	158,944912	0,077175455
8	20,24	3354,813	165,75163	0,133854909
9	22,56	3446,586	152,774202	0,019621991
10	20,7	3344,616	161,575652	0,017281911
11	20,7	3232,449	156,156957	0,002012512
12	21,62	3314,025	153,285153	0,019722616
13	23,04	3303,828	143,395313	0,360176735
14	19,8	3354,813	169,435	0,141452142
15	21,62	3405,798	157,529972	0,050715299
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>21,4733333</b>	<b>3390,1626</b>	<b>158,0393</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	0,90497566	115,935301	6,19468948	
<b>n-1</b>	14	14	14	
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	0,51541414	66,0290618	3,52808466	
<b>LC</b>	<b>21,47±0,52</b>	<b>3390,16±66,03</b>	<b>158,04±3,53</b>	

Apéndice 28: Ensayo de inmersión agua en frío Mezcla 1

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de agua
1	189,585	203,5975	14,0125	0,0339848	7,391143814
2	149,6572	167,8035	18,1463	0,0006986	12,12524356
3	164,0281	182,1671	18,139	0,0006986	11,05847108
4	170,7954	190,7551	19,9597	0,0049862	11,68632176
5	164,2718	183,9457	19,6739	0,0268356	11,97643174
6	167,5032	187,5150	20,0118	0,0049862	11,94711504
7	161,2419	175,6095	14,3676	0,0339848	8,910587136
8	171,0973	192,5126	21,4153	0,0319558	12,51644532
9	161,5580	181,6279	20,0699	0,0534224	12,42272125
10	194,5088	218,0358	23,527	0,2020997	12,09559670
11	161,7986	182,4267	20,6281	0,0534224	12,74924505
12	163,9497	178,9655	15,0158	0,0304533	9,158784676
13	149,6702	162,7484	13,0782	0,0917888	8,738011976
14	166,7564	187,8378	21,0814	0,0319558	12,64203353
15	147,2134	162,5474	15,334	0,0304533	10,41617135
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>165,575667</b>	<b>183,873033</b>	<b>18,4217778</b>		<b>11,0556216</b>
<b><math>\sigma</math></b>	13,0271704	14,5622261	2,60222518		1,712597948
<b>n-1</b>	14	14	14		14
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	7,41593098	8,28978667	1,48135948		0,974924546
<b>LC</b>	<b>165,58±7,42</b>	<b>183,87±8,29</b>	<b>18,42±1,48</b>		<b>11,06±0,97</b>

Apéndice 29: Ensayo de inmersión agua en frío Mezcla 2

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de agua
1	161,7754	186,1254	24,35	0,0630652	15,05173222
2	156,4681	186,274	29,8059	0,1114391	19,04918638
3	165,3781	190,4961	25,118	0,0203733	15,18822625
4	153,1396	181,9231	28,7835	0,0307818	18,79559565
5	164,8435	189,6213	24,7778	0,009930724	15,03110526
6	170,2217	195,8761	25,6544	0,0765621	15,07116895
7	164,8847	189,8833	24,9986	0,03767532	15,16126117
8	161,4465	190,5993	29,1528	0,063014	18,05725116
9	184,8875	212,0769	27,1894	0,1544893	14,70591576
10	160,4934	189,0965	28,6031	0,0307818	17,82197897
11	159,187	183,1323	23,9453	0,0609054	15,04224591
12	166,214	191,4197	25,2057	0,0149643	15,16460707
13	164,5441	190,574	26,0299	0,0647194	15,81940647
14	165,276	189,9956	24,7196	0,0099307	14,95655752
15	149,0152	177,11	28,0948	0,0867317	18,85364714
$\bar{x}$	<b>163,184987</b>	<b>189,613573</b>	<b>26,6478222</b>		<b>16,25132573</b>
$\sigma$	8,11262387	7,70459586	2,11916678		1,697371602
$n-1$	14	14	14		14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	4,61824455	4,3859679	1,20637054		0,966256698
<b>LC</b>	<b>163,18±4,62</b>	<b>189,61±4,39</b>	<b>26,65±1,21</b>		<b>16,25±0,97</b>

Apéndice 30: Ensayo de inmersión agua en frío Mezcla 3

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de agua
1	70,1616	82,2783	12,1167	0,00072421	17,26970309
2	138,289	157,0354	18,7464	0,13859899	13,5559589
3	135,1806	159,4348	24,2542	0,00149416	17,94207157
4	149,2525	172,6013	23,3488	0,006091006	15,64382506
5	127,8949	140,0021	12,1072	0,00072421	9,466522903
6	137,811	160,2746	22,4636	0,02171111	16,30029533
7	129,8821	151,9694	22,0873	0,07471584	17,00565359
8	133,526	156,2744	22,7484	0,02171111	17,03668199
9	129,6667	150,2312	20,5645	0,11761208	15,85950749
10	153,7064	177,3603	23,6539	0,01716764	15,38901438
11	137,8172	162,0518	24,2346	0,00149416	17,58459757
12	138,1735	161,2409	23,0674	0,0275429	16,69451812
13	148,1959	171,6246	23,4287	0,006609101	15,80927677
14	155,1953	179,7921	24,5968	0,02611738	15,84893357
15	157,5166	182,7415	25,2249	0,04779406	16,01412169
$\bar{x}$	<b>136,151287</b>	<b>157,660847</b>	<b>19,8263444</b>		<b>15,82804547</b>
$\sigma$	20,6505452	23,9813093	4,65502424		2,058930916
$n-1$	14	14	14		14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	11,7556625	13,6517547	2,6499491		1,172080284
<b>LC</b>	<b>136,15±11,76</b>	<b>157,66±13,65</b>	<b>19,83±2,65</b>		<b>15,83±1,17</b>

Apéndice 31: Ensayo de inmersión agua en frío Mezcla 4

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de agua
1	134,355	156,8616	22,5066	0,03034	16,75159093
2	149,5966	178,1464	28,5498	0,0976	19,08452465
3	171,2125	201,7976	30,5851	0,09508	17,8638242
4	173,9281	206,9957	33,0676	0,23506	19,01222402
5	162,5615	188,1052	25,5437	0,03848	15,71325314
6	154,3677	180,6148	26,2471	0,00615	17,00297407
7	156,3344	181,9546	25,6202	0,007243	16,38807582
8	138,7139	161,8056	23,0917	0,02505	16,64699789
9	138,7139	161,541	22,8271	0,02505	16,45624555
10	168,0416	194,2237	26,1821	0,00615	15,58072525
11	151,9213	177,1781	25,2568	0,027165	16,62492356
12	151,1512	180,7318	29,5806	0,09511	19,5702052
13	161,3871	187,3372	25,9501	0,021967	16,07941403
14	139,2247	162,7851	23,5604	0,04438	16,92257193
15	143,8517	167,7795	23,9278	0,03478	16,63365814
$\bar{x}$	<b>153,02408</b>	<b>179,190527</b>	<b>26,4487667</b>		<b>17,08874722</b>
$\sigma$	12,5814845	15,0828655	3,65386664		1,232974383
$n-1$	14	14	14		14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	7,16221693	8,58616923	2,08002367		0,701890944
<b>LC</b>	<b>153,02±7,16</b>	<b>179,19±8,59</b>	<b>26,45±2,08</b>		<b>17,09±0,70</b>

Apéndice 32: Ensayo de inmersión agua en frío Mezcla 5

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de agua
1	133,1527	154,4308	21,2781	0,100287	15,98022421
2	149,8947	172,5913	22,6966	0,040657	15,14169614
3	133,4583	156,4072	22,9489	0,065762	17,19555846
4	151,2203	173,7611	22,5408	0,009943	14,90593525
5	131,3511	153,8474	22,4963	0,00167	17,12684553
6	144,8551	168,0322	23,1771	0,059555	16,00019606
7	142,022	166,8396	24,8176	0,07633	17,47447579
8	128,3586	150,8143	22,4557	0,0125261	17,49450368
9	134,3966	156,8043	22,4077	0,012526	16,67281762
10	143,5391	168,6492	25,1101	0,076331	17,49356099
11	142,4155	164,9182	22,5027	0,0125261	15,80073798
12	147,5417	171,1664	23,6247	0,0506785	16,01221892
13	126,8085	148,4709	21,6624	0,100287	17,08276653
14	134,7236	158,5425	23,8189	0,0506785	17,67982744
15	150,0549	174,1169	24,062	0,063439	16,03546435
$\bar{x}$	<b>139,58618</b>	<b>162,626153</b>	<b>22,7576444</b>		<b>16,5397886</b>
$\sigma$	8,27426863	8,82423725	0,93392122		0,901940896
n-1	14	14	14		14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	4,71026349	5,02334217	0,53165001		0,513444688
LC	<b>139,59±4,71</b>	<b>162,63±5,02</b>	<b>22,76±0,53</b>		<b>16,54±0,51</b>

Apéndice 33: Ensayo de inmersión agua en frío Mezcla 6

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de agua
1	123,2649	139,2534	15,9885	0,071684	12,97084572
2	131,6833	148,5138	16,8305	0,0001165	12,78104361
3	127,7429	141,8599	14,117	0,06366	11,05110343
4	142,0418	164,745	22,7032	0,078369	15,98346402
5	143,0999	164,645	21,5451	0,176426	15,05598536
6	127,9295	143,3025	15,373	0,071684	12,01677486
7	135,1607	151,9902	16,8295	0,0001165	12,45147443
8	137,4706	155,9902	18,5196	0,064836	13,47168049
9	126,8745	148,9048	22,0303	0,078369	17,36385168
10	139,676	160,125	20,449	0,127658	14,64031043
11	128,6523	147,9894	19,3371	0,030374	15,03051247
12	140,2849	157,9028	17,6179	0,091707	12,55865742
13	123,9067	142,983	19,0763	0,030374	15,39569692
14	136,9823	151,6459	14,6636	0,06366	10,70474069
15	147,3945	163,9059	16,5114	0,037047	11,2021819
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>134,14432</b>	<b>152,250453</b>	<b>18,2151889</b>		<b>13,51188823</b>
<b><math>\sigma</math></b>	7,55191259	8,61939447	3,15331415		1,978926245
<b>n-1</b>	14	14	14		14
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	4,29905043	4,90673205	1,79507594		1,126536309
<b>LC</b>	<b>134,14±4,30</b>	<b>152,25±4,91</b>	<b>18,22±1,80</b>		<b>13,51±1,13</b>

Apéndice 34: Ensayo de inmersión agua en frío Mezcla 7

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de agua
1	111,9556	130,6391	18,6835	0,049476	16,68831215
2	116,3265	135,3564	19,0299	0,0116978	16,35904115
3	107,8349	124,7197	16,8848	0,0983103	15,65801053
4	130,077	149,4525	19,3755	0,0376644	14,8954081
5	124,6448	145,6423	20,9975	0,0106837	16,84586922
6	125,0205	144,1323	19,1118	0,0116978	15,28693294
7	116,477	134,3439	17,8669	0,0290089	15,33942323
8	121,2232	142,3068	21,0836	0,0122977	17,39238034
9	112,1804	129,8442	17,6638	0,0290089	15,74588787
10	107,6295	123,726	16,0965	0,0122063	14,95547225
11	111,7071	125,7894	14,0823	0,1656264	12,60645026
12	124,4303	145,353	20,9227	0,0106837	16,81479511
13	114,8617	135,1971	20,3354	0,0838844	17,7042478
14	101,5383	116,7802	15,2419	0,0122063	15,010986
15	125,1025	145,66	20,5575	0,1656264	16,43252533
$\bar{x}$	<b>116,733953</b>	<b>135,26286</b>	<b>18,9663667</b>		<b>15,84904949</b>
$\sigma$	8,12523031	9,908457	1,41947161		1,270612533
$n-1$	14	14	14		14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	4,62542097	5,64055209	0,80805756		0,72331708
<b>LC</b>	<b>116,73±4,63</b>	<b>135,26±5,64</b>	<b>18,97±0,81</b>		<b>15,85±0,72</b>

Apéndice 35: Ensayo de inmersión agua en frío Mezcla 8

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de agua
1	155,1476	171,1565	16,0089	0,0543304	10,31849671
2	179,2558	198,5446	19,2888	0,2105786	10,76048864
3	155,7543	171,5102	15,7559	0,0162217	10,11586839
4	152,666	168,5083	15,8423	0,0162217	10,37709772
5	158,4461	174,745	16,2989	0,0258111	10,2867158
6	159,7407	176,5131	16,7724	0,0685347	10,49976618
7	148,698	164,3952	15,6972	0,0074614	10,55642981
8	171,0928	189,6196	18,5268	0,0339634	10,82850944
9	167,2098	185,3985	18,1887	0,0032609	10,87777152
10	163,4895	181,8934	18,4039	0,0254518	11,25693087
11	164,0286	179,6988	15,6702	0,0074614	9,553333992
12	175,2854	193,4859	18,2005	0,0032609	10,38335195
13	149,2738	165,7982	16,5244	0,0685347	11,06985955
14	157,0932	173,2987	16,2055	0,0258111	10,31585072
15	163,2851	181,5969	18,3118	0,0254518	11,21461787
$\bar{x}$	<b>161,364447</b>	<b>178,41086</b>	<b>16,9311</b>		<b>10,56100594</b>
$\sigma$	9,02302734	10,0995851	1,3716309		0,45190039
n-1	14	14	14		14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	5,1365067	5,74935491	0,78082345		0,257251728
<b>LC</b>	<b>161,36±5,14</b>	<b>178,41±5,75</b>	<b>16,93±0,78</b>		<b>10,56±0,26</b>

Apéndice 36: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 1

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de Agua	Coefficiente de Saturación
1	203,598	201,7	-1,9011	0,006591	0,9337541	1,1569678
2	167,804	165,87	-1,9314	0,006591	1,1509891	1,1191127
3	182,167	179,9	-2,2625	0,004416	1,2419916	1,1425062
4	190,755	186,58	-4,1778	0,061567	2,190138	1,2647210
5	183,946	181,44	-2,5082	0,061327	1,3635546	1,1461170
6	187,515	182,94	-4,5712	0,0855849	2,4377783	1,2960507
7	175,61	170,27	-5,344	0,039768	3,0431155	1,5922248
8	192,513	188,75	-3,7642	0,028412	1,9553006	1,2132558
9	181,628	178,84	-2,7901	0,061327	1,5361627	1,1614660
10	218,036	212,51	-5,5268	0,039768	2,5348131	1,3070410
11	182,427	175,93	-6,4977	0,211221	3,5618141	1,4598384
12	178,966	175,95	-3,0184	0,03087	1,6865821	1,2515878
13	162,748	159,59	-3,1603	0,03087	1,9418317	1,3186461
14	187,838	183,94	-3,8948	0,028412	2,0734911	1,2266184
15	162,547	160,26	-2,2828	0,004416	1,4043904	1,1749111
$\bar{x}$	<b>183,873</b>	<b>180,3</b>	<b>-3,57542</b>		<b>1,9370471</b>	<b>1,2554043</b>
$\sigma$	14,5622	14,16	1,4169035		0,7318267	0,1294285
n-1	14	14	14		14	14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	8,28979	8,0609	0,8065956		0,4166044	0,073679293
LC	<b>183,87±8,29</b>	<b>180,30±8,06</b>	<b>3,58±0,81</b>		<b>1,94±0,42</b>	<b>1,26±0,07</b>

Apéndice 37: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 2

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de Agua	Coefficiente de Saturación
1	186,125	183,8	-2,3241	0,01207018	1,2486743	1,105516687
2	186,274	183,97	-2,3036	0,01207018	1,2366729	1,083760267
3	190,496	188,5	-1,9991	0,03020489	1,0494178	1,086470377
4	181,923	178,94	-2,9797	0,0388601	1,6378899	1,11547524
5	189,621	187,67	-1,9478	0,03020489	1,0272053	1,085317565
6	195,876	192,82	-3,0592	0,01619171	1,5618036	1,135391588
7	189,883	186,56	-3,3248	0,02549458	1,7509702	1,153401803
8	190,599	187,23	-3,3681	0,02549458	1,7671104	1,130623975
9	212,077	209,93	-2,1516	0,08949599	1,0145377	1,085934068
10	189,097	185,45	-3,6462	0,18923692	1,9282218	1,146099876
11	183,132	180,65	-2,4832	0,0936764	1,3559596	1,115701632
12	191,42	188,39	-3,0317	0,01619171	1,5837973	1,136723189
13	190,574	187,82	-2,7526	0,05599387	1,4443733	1,118252546
14	189,996	187,15	-2,8477	0,0388601	1,4988242	1,130199022
15	177,11	174,2	-2,9137	0,0388601	1,6451358	1,115709798
$\bar{x}$	<b>189,614</b>	<b>186,87</b>	<b>-2,742207</b>		<b>1,4500396</b>	<b>1,1163052</b>
$\sigma$	7,7046	7,8181	0,520719		0,286577	0,0229855
n-1	14	14	14		14	14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	4,38597	4,4506	0,296428		0,1631386	0,013084862
<b>LC</b>	<b>189,61±4,39</b>	<b>186,87±4,45</b>	<b>2,74±0,30</b>		<b>1,45±0,16</b>	<b>1,11±0,01</b>

Apéndice 38: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 3

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de Agua	Coefficiente de Saturación
1	82,2783	80,278	-2	0,0001322	-2,430775	1,1976929
2	157,035	156,91	-0,1282	0,1710864	-0,081638	1,0068857
3	159,435	157,61	-1,829	0,0336149	-1,147177	1,0815600
4	172,601	168,96	-3,6431	0,1103210	-2,110703	1,1848754
5	140,002	146,94	6,9347	0,0991111	4,9532828	0,6358189
6	160,275	158,98	-1,2972	0,0445162	-0,809361	1,0612858
7	151,969	149,13	-2,8435	0,0071549	-1,8711	1,1477619
8	156,274	150,01	-6,2601	0,0991111	-4,005838	1,3796692
9	150,231	148,63	-1,6002	0,0336149	-1,065158	1,0843796
10	177,36	175,36	-1,9991	0,0050246	-1,127141	1,0923167
11	162,052	160,12	-1,928	0,0054212	-1,189743	1,0864318
12	161,241	159,28	-1,9649	0,0050246	-1,218611	1,0931122
13	171,625	168,73	-2,8922	0,0071549	-1,68519	1,1408322
14	179,792	177,1	-2,6896	0,0593141	-1,49595	1,1227724
15	182,742	180,45	-2,2879	0,0590171	-1,251987	1,0997471
$\bar{x}$	<b>157,661</b>	<b>155,9</b>	<b>-1,761887</b>		<b>-1,102473</b>	<b>1,0943428</b>
$\sigma$	23,9813	23,515	2,7527341		1,892528	0,1524695
$n-1$	14	14	14		14	14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	13,6518	13,386	1,5670392		1,0773527	0,086795789
LC	<b>157,66±13,6</b> 5	<b>155,90±13,3</b> 9	<b>1,76±1,57</b>		<b>1,10±1,08</b>	<b>1,09±0,09</b>

Apéndice 39: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 4

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de Agua	Coefficiente de Saturación
1	156,862	156,5	-0,3655	0,2982359	-0,233008	1,0165078
2	178,146	175,44	-2,7051	0,0099907	-1,51847	1,1046675
3	201,798	199,96	-1,8341	0,0090664	-0,908881	1,0637926
4	206,996	203,65	-3,3437	0,0900559	-1,615348	1,1124920
5	188,105	185,36	-2,7472	0,0022014	-1,460459	1,1205097
6	180,615	178,81	-1,8028	0,0090664	-0,998146	1,0737513
7	181,955	179,22	-2,7396	0,0022014	-1,50565	1,1197346
8	161,806	159,59	-2,2123	0,095269	-1,367258	1,1059561
9	161,541	158,51	-3,0328	0,02998	-1,877418	1,1532158
10	194,224	190,41	-3,8178	0,137328	-1,965672	1,1707096
11	177,178	175,65	-1,5232	0,037192	-0,8597	1,0641791
12	180,732	177,53	-3,2	0,041624	-1,770579	1,1213013
13	187,337	184,41	-2,9293	0,029998	-1,563651	1,1272458
14	162,785	160,24	-2,5412	0,04747559	-1,561077	1,1208990
15	167,78	166,38	-1,3951	0,037189	-0,831508	1,0619145
$\bar{x}$	<b>179,191</b>	<b>176,78</b>	<b>-2,412647</b>		<b>-1,335788</b>	<b>1,1024584</b>
$\sigma$	15,0829	14,67	0,8943368		0,4729907	0,0397330
n-1	14	14	14		14	14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	8,58617	8,3511	0,5091159		0,2692577	0,022618654
<b>LC</b>	<b>179,19±8,59</b>	<b>176,78±8,35</b>	<b>2,41±0,51</b>		<b>1,34±0,27</b>	<b>1,10±0,02</b>

Apéndice 40: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 5

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de Agua	Coefficiente de Saturación
1	154,431	150,16	-4,2686	0,197243	2,7640859	1,2509539
2	172,591	170,13	-2,4623	0,0013058	1,4266652	1,1216894
3	156,407	154,03	-2,3748	0,0213363	1,5183444	1,1154267
4	173,761	172,38	-1,3762	0,1004691	0,792007	1,0650237
5	153,847	152,09	-1,7595	0,1004691	1,1436657	1,0848492
6	168,032	165,05	-2,9871	0,0142591	1,777695	1,1479495
7	166,84	164,24	-2,5962	0,0079946	1,5561054	1,1168333
8	150,814	148,36	-2,4573	0,0002883	1,6293548	1,1228748
9	156,804	153,76	-3,0415	0,0227255	1,939679	1,1570520
10	168,649	165,13	-3,5161	0,1244004	2,0848602	1,1628276
11	164,918	161,96	-2,9548	0,0227255	1,7916761	1,1511569
12	171,166	168,6	-2,5657	0,0079946	1,4989507	1,1218339
13	148,471	146,01	-2,4562	0,0002883	1,6543309	1,1278858
14	158,543	155,91	-2,6279	0,0083909	1,6575366	1,1240102
15	174,117	173,66	-0,4535	0,2418547	0,2604572	1,0192092
$\bar{x}$	<b>162,626</b>	<b>160,1</b>	<b>-2,526513</b>		<b>1,5663609</b>	<b>1,1259717</b>
$\sigma$	8,82424	9,1491	0,883879		0,5649495	0,0507891
n-1	14	14	14		14	14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	5,02334	5,2083	0,5031626		0,3216068	0,028912522
LC	<b>162,631±5,0</b> 2	<b>160,10±5,2</b> 1	<b>2,53±0,50</b>		<b>1,57±0,32</b>	<b>1,13±0,029</b>

Apéndice 41: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 6

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de Agua	Coefficiente de Saturación
1	139,253	138,19	-1,0628	0,0068072	-0,763213	1,0712060
2	148,514	148,3	-0,213	0,0222904	-0,143421	1,0128178
3	141,86	140,62	-1,2379	0,0456487	-0,872622	1,0961170
4	164,745	163,31	-1,4375	0,1580352	-0,872561	1,0675971
5	164,645	163,9	-0,7477	0,1232648	-0,454129	1,0359516
6	143,303	142,74	-0,563	0,1232648	-0,392875	1,0380149
7	151,99	151,74	-0,2464	0,0222904	-0,162116	1,0148585
8	155,99	154,82	-1,1695	0,0456487	-0,749727	1,0674060
9	148,905	147,23	-1,6743	0,0000667	-1,12441	1,0822509
10	160,125	159,83	-0,2905	0,0294313	-0,181421	1,0144108
11	147,989	146,98	-1,0071	0,0303657	-0,680522	1,0549427
12	157,903	156,23	-1,6744	0,0000667	-1,060399	1,1050209
13	142,983	141,93	-1,0526	0,0068072	-0,736171	1,0584009
14	151,646	149,93	-1,7114	0,0050721	-1,12855	1,1321320
15	163,906	162,2	-1,7041	0,0050721	-1,039682	1,1150851
$\bar{x}$	<b>152,25</b>	<b>151,2</b>	<b>-1,052813</b>		<b>-0,690788</b>	<b>1,0644141</b>
$\sigma$	8,61939	8,5536	0,5410502		0,3482929	0,0372652
n-1	14	14	14		14	14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	4,90673	4,8693	0,3080017		0,1982715	0,021213852
<b>LC</b>	<b>152,25±4,91</b>	<b>151,20±4,87</b>	<b>1,05±0,31</b>		<b>0,69±0,20</b>	<b>1,06±0,02</b>

Apéndice 42: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 7

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de Agua	Coefficiente de Saturación
1	130,639	129,16	-1,4827	0,0247918	-1,134959	1,0861995
2	135,356	134	-1,355	0,0818065	-1,001061	1,0766624
3	124,72	123,04	-1,6828	0,0099936	-1,349266	1,1106960
4	149,453	147,75	-1,6984	0,0099936	-1,136415	1,0960791
5	145,642	143,98	-1,662	0,0133248	-1,141152	1,0859559
6	144,132	142,3	-1,8362	0,0001281	-1,273968	1,1062886
7	134,344	131,43	-2,916	0,2750801	-2,170549	1,1950384
8	142,307	139,83	-2,4726	0,0089686	-1,737514	1,1328569
9	129,844	127,43	-2,4152	0,0073671	-1,860075	1,1583883
10	123,726	121,24	-2,4866	0,0089686	-2,009764	1,1827052
11	125,789	123,47	-2,3221	0,0522742	-1,846022	1,1974541
12	145,353	143,52	-1,8364	0,0001281	-1,263407	1,0962156
13	135,197	133,68	-1,5214	0,0247918	-1,12532	1,0808653
14	116,184	113,78	-2,4037	0,0073671	-2,068875	1,1963502
15	145,66	143,44	-2,2179	0,0667528	-1,522655	1,1209350
$\bar{x}$	<b>135,223</b>	<b>133,2</b>	<b>-2,0206</b>		<b>-1,5094</b>	<b>1,1281794</b>
$\sigma$	9,98878	10,135	0,466868		0,4010196	0,0456314
n-1	14	14	14		14	14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	5,68628	5,7694	0,265772		0,228287	0,025976422
<b>LC</b>	<b>135,22±5,69</b>	<b>133,20±5,77</b>	<b>2,01±0,27</b>		<b>1,51±0,23</b>	<b>1,13±0,03</b>

Apéndice 43: Ensayo de inmersión agua en ebullición Mezcla 8

# Cubo	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia de Masa	QCal	% Absorción de Agua	Coefficiente de Saturación
1	171,157	169,27	-1,8831	0,0476681	-1,100221	1,1333093
2	198,545	196,08	-2,4683	0,04741046	-1,243197	1,1467436
3	171,51	169,2	-2,3142	0,0781585	-1,349308	1,1721657
4	168,508	166,01	-2,4961	0,023877	-1,481292	1,1870270
5	174,745	172,14	-2,6038	0,04002404	-1,490057	1,1901264
6	176,513	173,98	-2,5289	0,03143519	-1,432698	1,1775477
7	164,395	161,98	-2,4131	0,00687108	-1,467865	1,1816533
8	189,62	186,57	-3,0474	0,34097741	-1,607112	1,1968681
9	185,399	182,97	-2,424	0,0093618	-1,307454	1,1537613
10	181,893	179,33	-2,5655	0,03143519	-1,410442	1,1619797
11	179,699	177,29	-2,4051	0,00687108	-1,338406	1,1813104
12	193,486	191,29	-2,1922	0,001116838	-1,133002	1,1369415
13	165,798	163,15	-2,6504	0,04002404	-1,59857	1,1910336
14	173,299	171,11	-2,1909	0,001116838	-1,264233	1,1563298
15	181,597	179,66	-1,9386	0,04766812	-1,067529	1,1184008
$\bar{x}$	<b>178,411</b>	<b>176</b>	<b>-2,408107</b>		<b>-1,352759</b>	<b>1,1656799</b>
$\sigma$	10,0996	10,069	0,2872773		0,1688178	0,0239971
n-1	14	14	14		14	14
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	5,74935	5,7319	0,1635373		0,0961023	0,013660731
<b>LC</b>	<b>178,41±5,75</b>	<b>176,00±5,73</b>	<b>2,41±0,16</b>		<b>1,35±0,10</b>	<b>1,17±0,01</b>

Apéndice 44: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 1

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	23,04	2273,931	98,6949219	0,05995816
2	22,09	2131,173	96,4768221	0,066549171
3	19,8	2212,749	111,755	0,132991208
4	20,7	2365,704	114,285217	0,064596097
5	21,15	2467,674	116,674894	0,064596097
6	21,15	1988,415	94,0148936	0,066549171
7	22,56	1743,687	77,2910904	0,452066438
8	21,62	2314,719	107,063784	0,031436536
9	22,05	2335,113	105,900816	0,031436536
$\bar{x}$	<b>21,5733333</b>	<b>2203,685</b>	<b>102,461938</b>	
$\sigma$	0,99289979	221,854738	12,3293251	
n-1	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,79335738	177,268738	9,85150881	
LC	<b>21,57±0,79</b>	<b>2203,69±177,27</b>	<b>102,46±9,85</b>	

Apéndice 45: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 2

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,15	2273,931	107,514468	0,250607269
2	22,09	2131,173	96,4768221	0,077257471
3	22,08	2212,749	100,215082	0,009228527
4	24	2365,704	98,571	0,077257471
5	24,5	2467,674	100,721388	0,009449895
6	22,09	1988,415	90,0142598	0,06664515
7	22,08	1947,627	88,2077446	0,06664515
8	23,04	2314,719	100,465234	0,009228527
9	20,25	2335,113	115,314222	0,287745027
$\bar{x}$	<b>22,3644444</b>	<b>2226,345</b>	<b>99,7222467</b>	
$\sigma$	1,32052178	174,320988	8,24854936	
$n-1$	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	1,05513739	139,287815	6,59084386	
<b>LC</b>	<b>22,36±1,06</b>	<b>2226,35±139,29</b>	<b>99,72±6,59</b>	

Apéndice 46: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 3

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,62	2314,719	107,063784	0,08537234
2	20,24	1835,46	90,6847826	0,220454545
3	20,7	1580,535	76,3543478	0,387878788
4	20,24	2141,37	105,798913	0,034235977
5	22,08	2294,325	103,909647	0,08537234
6	20,25	2212,749	109,271556	0,093993266
7	20,24	2049,597	101,264674	0,071590909
8	19,8	2243,34	113,3	0,109037037
9	22,08	2182,158	98,8296196	0,065909091
$\bar{x}$	<b>20,8055556</b>	<b>2094,917</b>	<b>100,719703</b>	
$\sigma$	0,8804986	241,795314	11,2130454	
$n-1$	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,70354538	193,20187	8,9595671	
<b>LC</b>	<b>20,81±0,70</b>	<b>2094,92±193,20</b>	<b>100,72±8,96</b>	

Apéndice 47: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 4

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	19,8	2243,34	113,3	0,306818182
2	22,54	1978,218	87,7647737	0,04885942
3	20,7	2620,629	126,600435	0,306818182
4	20,24	1733,49	85,6467391	0,029398189
5	22,56	2243,34	99,4388298	0,012693424
6	20,7	1947,627	94,0882609	0,123428433
7	20,7	1723,293	83,2508696	0,025870406
8	21,62	2161,764	99,9890842	0,012693424
9	21,15	1784,475	84,3723404	0,029398189
$\bar{x}$	<b>21,112222</b>	<b>2048,464</b>	<b>97,1612592</b>	
$\sigma$	0,96088212	297,048098	14,6955978	
n-1	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,76777428	237,350539	11,7422332	
<b>LC</b>	<b>21,11±0,78</b>	<b>2048,46±237,35</b>	<b>97,16±11,74</b>	

Apéndice 48: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 5

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	20,25	1702,899	84,0937778	0,238903447
2	18,49	1682,505	90,9954029	0,013974004
3	19,35	1988,415	102,760465	0,08593812
4	20,25	1866,051	92,1506667	0,026016069
5	20,25	1957,824	96,6826667	0,100549811
6	20,7	1580,535	76,3543478	0,267904509
7	22,09	2019,006	91,3990946	0,013974004
8	20,25	2131,173	105,243111	0,08593812
9	18,92	1774,278	93,777907	0,056327794
$\bar{x}$	<b>20,0611111</b>	<b>1855,854</b>	<b>92,6063822</b>	
$\sigma$	1,05732498	182,480721	8,81500434	
$n-1$	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,84483508	145,807692	7,04345876	
<b>LC</b>	<b>20,06±0,84</b>	<b>1855,86±145,81</b>	<b>92,61±7,04</b>	

Apéndice 49: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 6

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	22,56	2212,749	98,0828457	0,091089109
2	21,16	2161,764	102,16276	0,135428325
3	22,09	2365,704	107,093889	0,079342743
4	21,62	2284,128	105,648844	0,057980198
5	21,62	2335,113	108,007077	0,012673267
6	23	2416,689	105,073435	0,057980198
7	22,56	2233,143	98,9868351	0,091089109
8	22,56	2335,113	103,506782	0,135428325
9	20,7	2233,143	107,881304	0,012673267
$\bar{x}$	<b>21,9855556</b>	<b>2286,394</b>	<b>104,049308</b>	
$\sigma$	0,76087304	82,648836	3,6794302	
$n-1$	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,60796089	66,0389542	2,93997755	
<b>LC</b>	<b>21,99±0,61</b>	<b>2286,39±66,04</b>	<b>104,05±2,94</b>	

Apéndice 50: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 7

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	19,8	2324,916	117,42	0,018197305
2	21,15	2273,931	107,514468	0,061413365
3	21,16	2753,19	130,112949	0,035624522
4	20,25	2661,417	131,428	0,035624522
5	20,7	2620,629	126,600435	0,095153445
6	20,7	2416,689	116,748261	0,018197305
7	21,62	2141,37	99,0457909	0,16800174
8	21,15	2875,554	135,96	0,122771153
9	22,09	2324,916	105,247442	0,061413365
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>20,9577778</b>	<b>2488,068</b>	<b>118,897483</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	0,69006843	248,103718	12,9906405	
<b>n-1</b>	8	8	8	
<b><math>\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}</math></b>	0,55138584	198,242478	10,3799201	
<b>LC</b>	<b>20,96±0,55</b>	<b>2488,07±198,24</b>	<b>118,90±10,38</b>	

Apéndice 51: Resistencia a la compresión luego de ataque ácido Mezcla 8

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	19,8	2885,751	145,745	0,087825876
2	21,62	2549,25	117,911656	0,249814126
3	19,36	2875,554	148,530682	0,000574025
4	20,24	3028,509	149,629891	0,034081417
5	21,16	2916,342	137,823346	0,172403851
6	19,8	2620,629	132,355	0,172403851
7	21,15	2661,417	125,835319	0,058897689
8	21,16	2702,205	127,70345	0,058897689
9	20,25	3008,115	148,548889	0,000574025
$\bar{x}$	<b>20,5044444</b>	<b>2805,308</b>	<b>137,120359</b>	
$\sigma$	0,78721203	175,246388	11,7254371	
n-1	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,62900655	140,027238	9,3689838	
LC	<b>20,50±0,63</b>	<b>2805,31±140,03</b>	<b>137,12±9,37</b>	

Apéndice 52: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 1

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,16	2763,387	130,594849	0,025478594
2	22,09	2457,477	111,248393	0,056806257
3	21,15	2304,522	108,960851	0,056806257
4	21,15	2783,781	131,620851	0,025478594
5	21,62	2722,599	125,929648	0,364577882
6	21,62	3008,115	139,135754	0,212095288
7	23	2273,931	98,8665652	0,384613883
8	22,56	2579,841	114,354654	0,07713742
9	22,56	3028,509	134,24242	0,09057971
$\bar{x}$	<b>21,8788889</b>	<b>2658,018</b>	<b>121,661554</b>	
$\sigma$	0,70202287	276,0733	42,0483309	
n-1	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,5609378	220,591032	33,5979057	
LC	<b>21,88±0,56</b>	<b>2658,02±220,59</b>	<b>121,66±33,60</b>	

Apéndice 53: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 2

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,62	2406,492	111,308603	
2	21,62	2712,402	125,458002	
3	22,08	2753,19	124,691576	
4	24,01	3150,873	131,231695	
5	22,08	2426,886	109,913315	
6	21,16	2692,008	127,22155	
7	23,04	2569,644	111,529688	
8	22,09	2528,856	114,479674	
9	22,08	2528,856	114,531522	
$\bar{x}$	<b>22,1977778</b>	<b>2641,023</b>	<b>118,929514</b>	
$\sigma$	0,85083456	226,754319	8,13322662	
$n-1$	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,6798429	9,9719	6,49869746	
<b>LC</b>	<b>22,20±0,67</b>	<b>2641,02±9,97</b>	<b>118,93±6,50</b>	

Apéndice 54: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 3

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,62	2630,826	121,684829	0,195079364
2	20,24	2600,235	128,470109	0,097213098
3	20,7	2834,766	136,945217	0,366453585
4	20,24	2355,507	116,378804	0,020465915
5	22,08	2824,569	127,924321	0,008300066
6	20,25	2855,16	140,995556	0,164535853
7	20,24	2365,704	116,882609	0,020465915
8	19,8	2528,856	127,72	0,008300066
9	22,08	2783,781	126,077038	0,097213098
$\bar{x}$	<b>20,8055556</b>	<b>2642,156</b>	<b>127,00872</b>	
$\sigma$	0,8804986	196,569786	8,23552165	
$n-1$	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,70354538	157,065286	6,58043432	
<b>LC</b>	<b>20,81±0,70</b>	<b>2642,16±157,07</b>	<b>127,01±6,58</b>	

Apéndice 55: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 4

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,62	2671,614	123,571415	0,033929455
2	22,56	2610,432	115,710638	0,005937655
3	22,08	2559,447	115,916984	0,005937655
4	21,16	2416,689	114,210255	0,007752614
5	22,56	2814,372	124,750532	0,033929455
6	22,56	2253,537	99,8908245	0,047147805
7	21,16	2814,372	133,004348	0,237506185
8	22,09	2528,856	114,479674	0,007752614
9	23,04	2263,734	98,2523438	0,047147805
$\bar{x}$	<b>22,0922222</b>	<b>2548,117</b>	<b>115,531891</b>	
$\sigma$	0,66294377	208,069057	11,1868443	
n-1	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,5297124	166,253556	8,93863162	
LC	<b>22,09±0,53</b>	<b>2548,12±166,25</b>	<b>115,53±8,94</b>	

Apéndice 56: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 5

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	19,8	2233,143	112,785	0,011502485
2	21,62	2508,462	116,025069	0,007900643
3	19,36	1988,415	102,707386	0,22508271
4	20,24	2355,507	116,378804	0,007900643
5	21,16	2804,175	132,522448	0,107631945
6	19,8	2243,34	113,3	0,011502485
7	21,15	1957,824	92,5685106	0,226450994
8	21,16	2906,145	137,341446	0,107631945
9	20,25	2406,492	118,839111	0,054950758
$\bar{x}$	<b>20,5044444</b>	<b>2378,167</b>	<b>115,829753</b>	
$\sigma$	0,78721203	325,257839	13,6003075	
n-1	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,62900655	145,807692	10,8670628	
LC	<b>20,50±0,63</b>	<b>2378,17±145,81</b>	<b>115,83±10,87</b>	

Apéndice 57: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 6

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,16	1509,156	71,321172	0,025281182
2	23,04	1570,338	68,1570313	0,112782648
3	22,09	1468,368	66,4720688	0,00206194
4	21,62	1549,944	71,6902868	0,025281182
5	20,25	1641,717	81,0724444	0,401395806
6	21,62	1509,156	69,8037003	0,112782648
7	22,54	1498,959	66,5021739	0,00206194
8	21,15	1590,732	75,2119149	0,208897468
9	21,62	1560,141	72,1619334	0,032303732
$\bar{x}$	<b>21,6766667</b>	<b>1544,279</b>	<b>71,3769695</b>	
$\sigma$	0,81885591	53,5005191	4,61101062	
$n-1$	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,65429098	42,7485553	3,68433887	
<b>LC</b>	<b>21,68±0,65</b>	<b>1544,28±42,75</b>	<b>71,38±3,68</b>	

Apéndice 58: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 7

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,62	2008,809	92,9143848	0,163978808
2	19,36	2008,809	103,760795	0,029888892
3	20,24	1621,323	80,1048913	0,154301311
4	21,16	2080,188	98,3075614	0,143168728
5	21,62	2222,946	102,818964	0,029888892
6	21,15	1855,854	87,747234	0,163978808
7	22,09	1662,111	75,242689	0,074360508
8	20,25	2161,764	106,753778	0,094981876
9	21,16	1641,717	77,5858696	0,074360508
$\bar{x}$	<b>20,9611111</b>	<b>1918,169</b>	<b>91,6929075</b>	
$\sigma$	0,85488953	231,544011	12,0466136	
n-1	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,68308295	185,010765	9,62561361	
LC	<b>20,96±0,68</b>	<b>1918,17±185,01</b>	<b>91,69±9,63</b>	

Apéndice 59: Resistencia a la compresión luego de ataque básico Mezcla 8

# Cubo	Área [cm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [kgf]	Resistencia Mecánica [kgf/cm <sup>2</sup> ]	QCal
1	21,62	2793,978	129,231175	0,020297961
2	20,7	2916,342	140,886087	0,096855325
3	21,62	2304,522	106,592137	0,045769912
4	21,16	2712,402	128,18535	0,009352982
5	21,62	2253,537	104,233904	0,045769912
6	21,16	2875,554	135,895747	0,096855325
7	21,15	2681,811	126,799574	0,017542922
8	21,16	2702,205	127,70345	0,009352982
9	18,92	2946,933	155,757558	0,288633859
$\bar{x}$	<b>21,0122222</b>	<b>2687,476</b>	<b>128,364998</b>	
$\sigma$	0,84169142	250,559562	15,9055026	
$n-1$	8	8	8	
$\frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$	0,67253725	200,204773	12,7089843	
<b>LC</b>	<b>21,01±0,67</b>	<b>2687,48±200,20</b>	<b>128,36±12,71</b>	

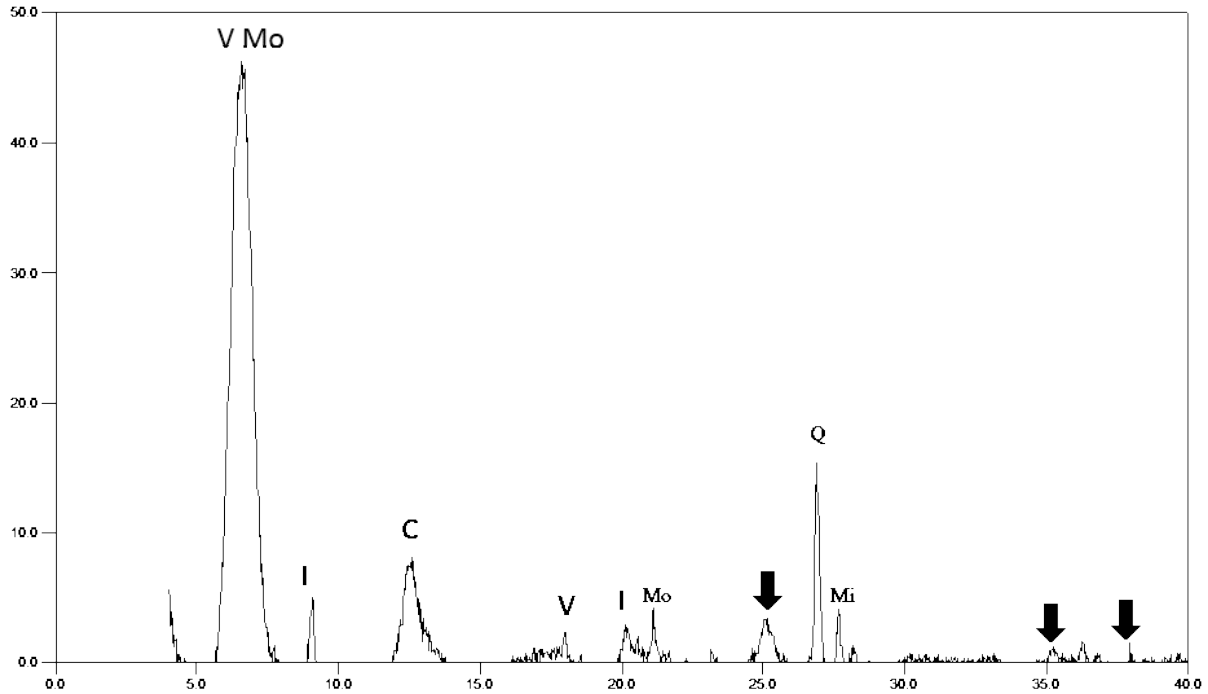
*Apéndice 60: Fases mineralógicas de la mezcla 8*

Fase	PDF N°	Nombre	Cuantiativo
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo	30,0%
Ca(SO <sub>4</sub> )	010-72-0503	Anhidrita	2,1%
(Na <sub>0,98</sub> Ca <sub>0,02</sub> )(Al <sub>1,02</sub> Si <sub>2,98</sub> O <sub>8</sub> )	010-70-3752	Albita	0,9%
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-87-1787	Microclina ordenada	0,3%
KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	010-72-1114	Microclina	4,3%
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-89-6426	Albita tratada térmicamente	N.C
KAl <sub>1,65</sub> Fe <sub>0,35</sub> Mn <sub>0,02</sub> (Al <sub>0,7</sub> Si <sub>3,3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>1,78</sub> F <sub>0,22</sub>	010-73-9857	Moscovita 2M1	5,8%
NaAl <sub>2</sub> ((AlSi <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )	010-76-5968	Paragonita 2M1	6,1%
(K <sub>0,74</sub> Ca <sub>0,03</sub> )(Al <sub>1,92</sub> Mg <sub>0,09</sub> Fe <sub>0,01</sub> )(Si <sub>3,22</sub> Al <sub>0,78</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-78-5137	Illita 1M	3,1%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	010-89-8103	Hematita	0,8%
TiO <sub>2</sub>	010-75-8897	Anatasa	N.C
(Na <sub>0,35</sub> K <sub>0,08</sub> )(Na <sub>0,09</sub> Ca <sub>1,60</sub> Fe <sub>0,31</sub> )(Fe <sub>1,04</sub> Fe <sub>0,3</sub> 3Mg <sub>3,16</sub> Ti <sub>0,17</sub> Al <sub>0,30</sub> )(Si <sub>6,76</sub> Al <sub>1,24</sub> O <sub>22,07</sub> )(OH) 1,93	010-81-0502	Magnesiohornblenda	1,7%
Total Cristalino			55,1%
Amorfos y Otros			44,9%

*Apéndice 61: Fases mineralógicas de la mezcla 3*

Fase	PDF N°	Nombre	Cuantiativo
SiO <sub>2</sub>	000-85-0796	Cuarzo	59,9%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	000-73-0603	Hematita	2,0%
KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	000-72-1114	Microclina	7,9%
KAl <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	000-06-0263	Moscovita	N.C
KFeMg <sub>2</sub> (AlSi <sub>2</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	000-80-1106	Biotita	2,3%
Fe <sup>2+</sup> (OH) <sub>2</sub>	000-46-1436	Bernalita	N.C
KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>2</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	000-79-2363	Moscovita	8,7%
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	000-83-1610	Albita	11,0%
SiO <sub>2</sub>	000-75-0923	Cristobalita	6,5%
Ca((Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> )O <sub>12</sub> )(Cl <sub>2</sub> )	000-85-1038	Chabasita	1,7%
Total Cristalino			59,3%
Amorfos y Otros			40,7%

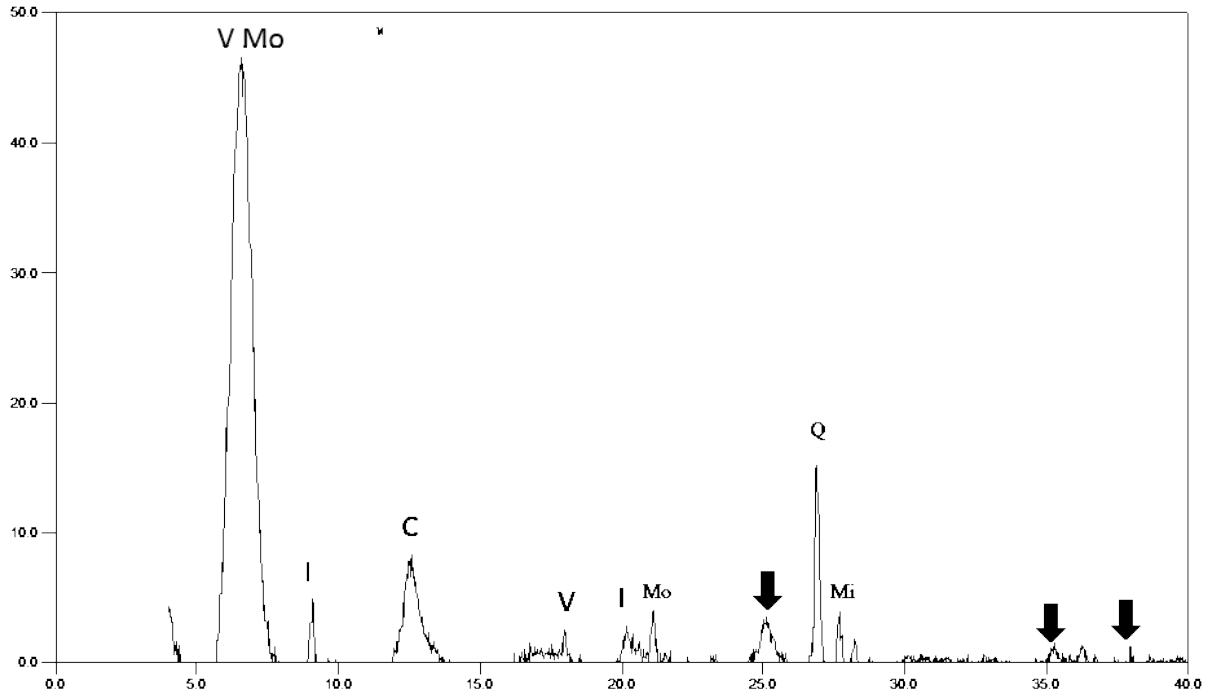
Apéndice 62: Difractograma del lodo a 25 °C



Apéndice 63: Fases mineralógicas del lodo a 25 °C

Fase	PDF N°	Nombre
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo
(K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.01</sub> )(Al <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.07</sub> Mg <sub>0.06</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) (Si <sub>5.02</sub> Al <sub>0.98</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-82-3725	Moscovita 2M
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-80-0885	Caolinita
(Mg <sub>2.46</sub> Al <sub>0.3</sub> Fe <sub>0.22</sub> Ti <sub>0.021</sub> ) <sub>2</sub> (Mg <sub>0.38</sub> Ca <sub>0.03</sub> Na <sub>0.0</sub> 2) <sub>2</sub> ((Si <sub>2.83</sub> Al <sub>1.17</sub> )O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>3.4</sub>	010-78-4316	Vermiculita 2M
(K <sub>0.74</sub> Ca <sub>0.03</sub> )(Al <sub>1.92</sub> Mg <sub>0.09</sub> Fe <sub>0.01</sub> )((Si <sub>3.22</sub> Al <sub>0.78</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )	010-78-5137	Illita
Ca <sub>0.5</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH))	010-76-8291	Montmorillonita
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-76-1238	Microclina

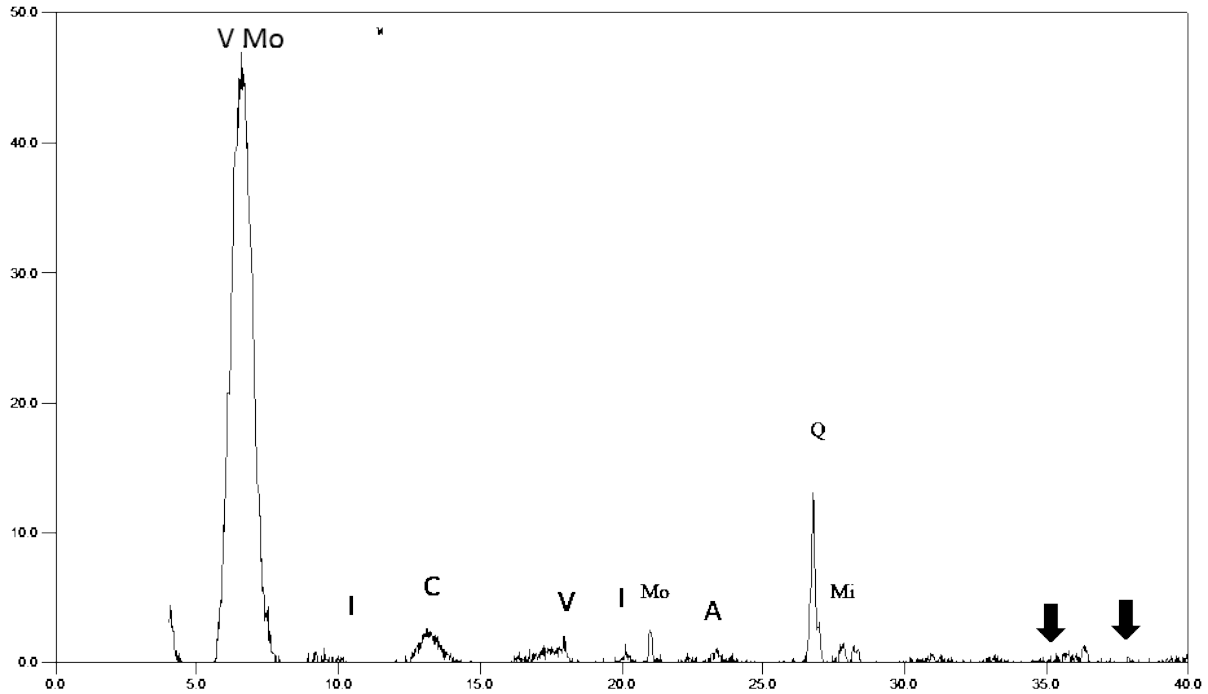
Apéndice 64: Difractograma del lodo a 105 °C



Apéndice 65: Fases mineralógicas del lodo a 105 °C

Fase	PDF N°	Nombre
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo
(K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.01</sub> )(Al <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.07</sub> Mg <sub>0.06</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) (Si <sub>5.02</sub> Al <sub>0.98</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-82-3725	Moscovita 2M
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-80-0885	Caolinita
(Mg <sub>2.46</sub> Al <sub>0.3</sub> Fe <sub>0.22</sub> Ti <sub>0.021</sub> ) <sub>2</sub> (Mg <sub>0.38</sub> Ca <sub>0.03</sub> Na <sub>0.0</sub> 2) <sub>2</sub> ((Si <sub>2.83</sub> Al <sub>1.17</sub> )O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>3.4</sub>	010-78-4316	Vermiculita 2M
(K <sub>0.74</sub> Ca <sub>0.03</sub> )(Al <sub>1.92</sub> Mg <sub>0.09</sub> Fe <sub>0.01</sub> )((Si <sub>3.22</sub> Al <sub>0.78</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )	010-78-5137	Illita
Ca <sub>0.5</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH))	010-76-8291	Montmorillonita
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-76-1238	Microclina

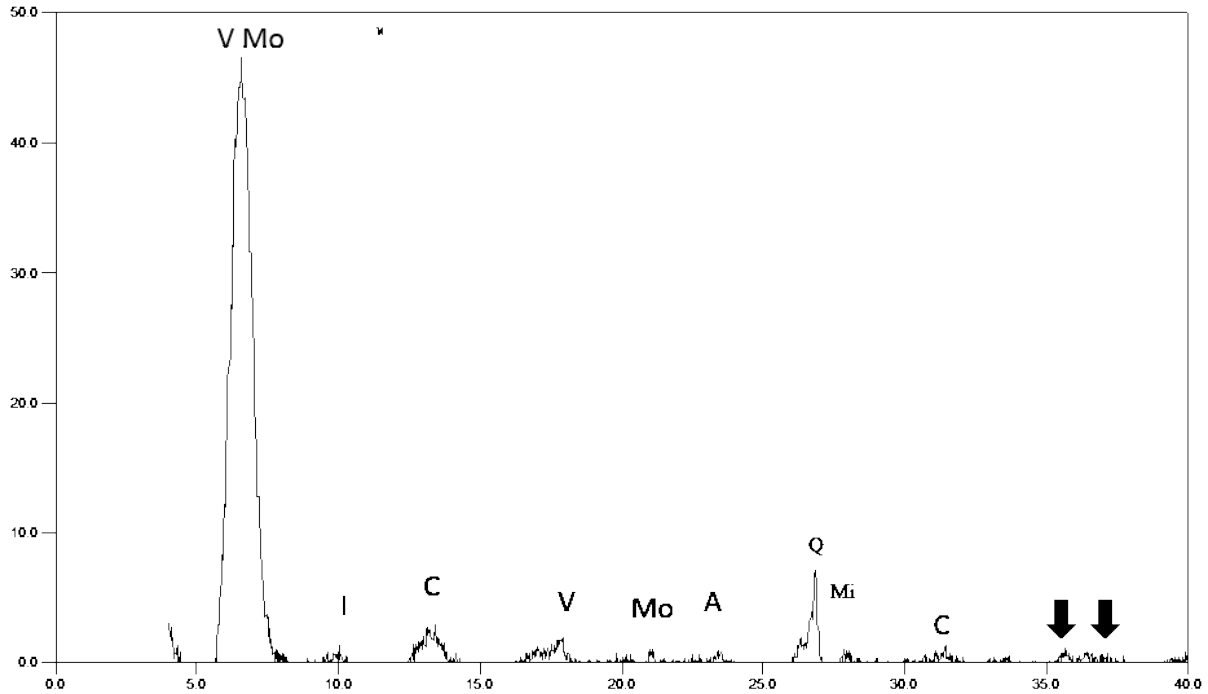
Apéndice 66: Difractograma del lodo a 600 °C



Apéndice 67: Fases mineralógicas del lodo a 600 °C

Fase	PDF N°	Nombre
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo
(K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.01</sub> )(Al <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.07</sub> Mg <sub>0.06</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) (Si <sub>5.02</sub> Al <sub>0.98</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-82-3725	Moscovita 2M
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-80-0885	Caolinita
(Mg <sub>2.46</sub> Al <sub>0.3</sub> Fe <sub>0.22</sub> Ti <sub>0.021</sub> ) <sub>2</sub> (Mg <sub>0.38</sub> Ca <sub>0.03</sub> Na <sub>0.0</sub> 2) <sub>2</sub> ((Si <sub>2.83</sub> Al <sub>1.17</sub> )O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>3.4</sub>	010-78-4316	Vermiculita 2M
(K <sub>0.74</sub> Ca <sub>0.03</sub> )(Al <sub>1.92</sub> Mg <sub>0.09</sub> Fe <sub>0.01</sub> )((Si <sub>3.22</sub> Al <sub>0.78</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )	010-78-5137	Illita
Ca <sub>0.5</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH))	010-76-8291	Montmorillonita
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-76-1238	Microclina
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-75-1142	Albita

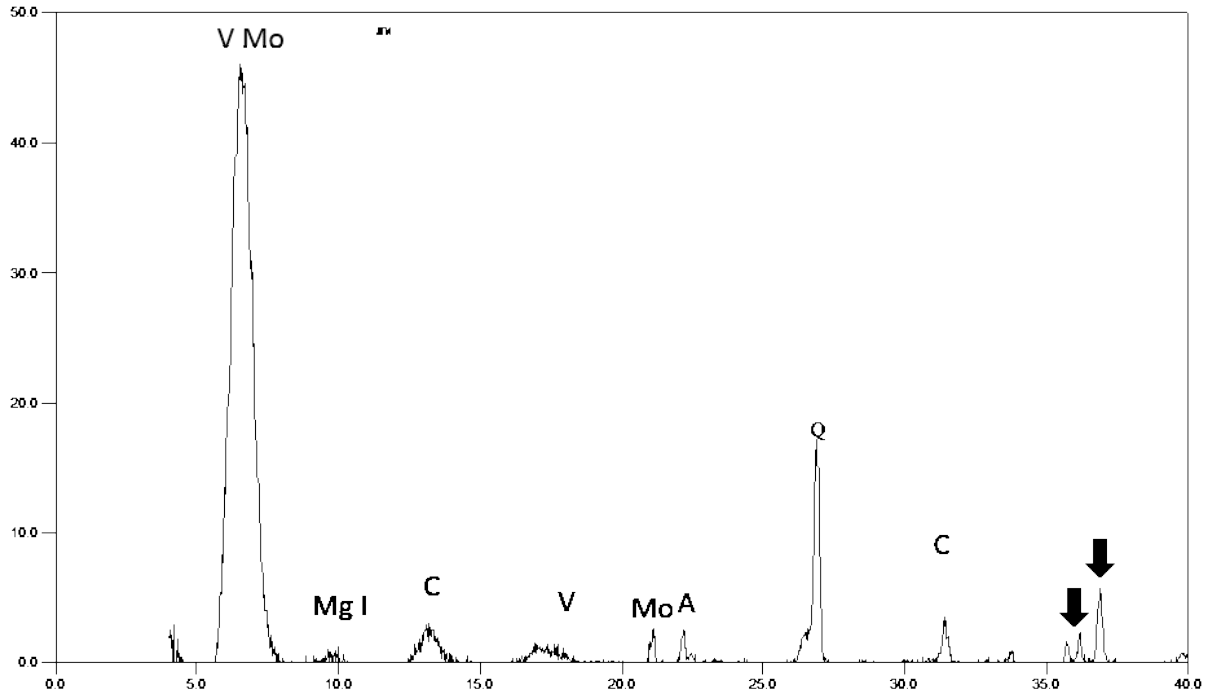
Apéndice 68: Difractograma del lodo a 900 °C



Apéndice 69: Fases mineralógicas del lodo a 900 °C

Fase	PDF N°	Nombre
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo
(K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.01</sub> )(Al <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.07</sub> Mg <sub>0.06</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) (Si <sub>5.02</sub> Al <sub>0.98</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-82-3725	Moscovita 2M
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-80-0885	Caolinita
(Mg <sub>2.46</sub> Al <sub>0.3</sub> Fe <sub>0.22</sub> Ti <sub>0.021</sub> ) <sub>2</sub> (Mg <sub>0.38</sub> Ca <sub>0.03</sub> Na <sub>0.0</sub> 2) <sub>2</sub> ((Si <sub>2.83</sub> Al <sub>1.17</sub> )O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>3.4</sub>	010-78-4316	Vermiculita 2M
(K <sub>0.74</sub> Ca <sub>0.03</sub> )(Al <sub>1.92</sub> Mg <sub>0.09</sub> Fe <sub>0.01</sub> )((Si <sub>3.22</sub> Al <sub>0.78</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )	010-78-5137	Illita
Ca <sub>0.5</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH))	010-76-8291	Montmorillonita
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-76-1238	Microclina
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-75-1142	Albita

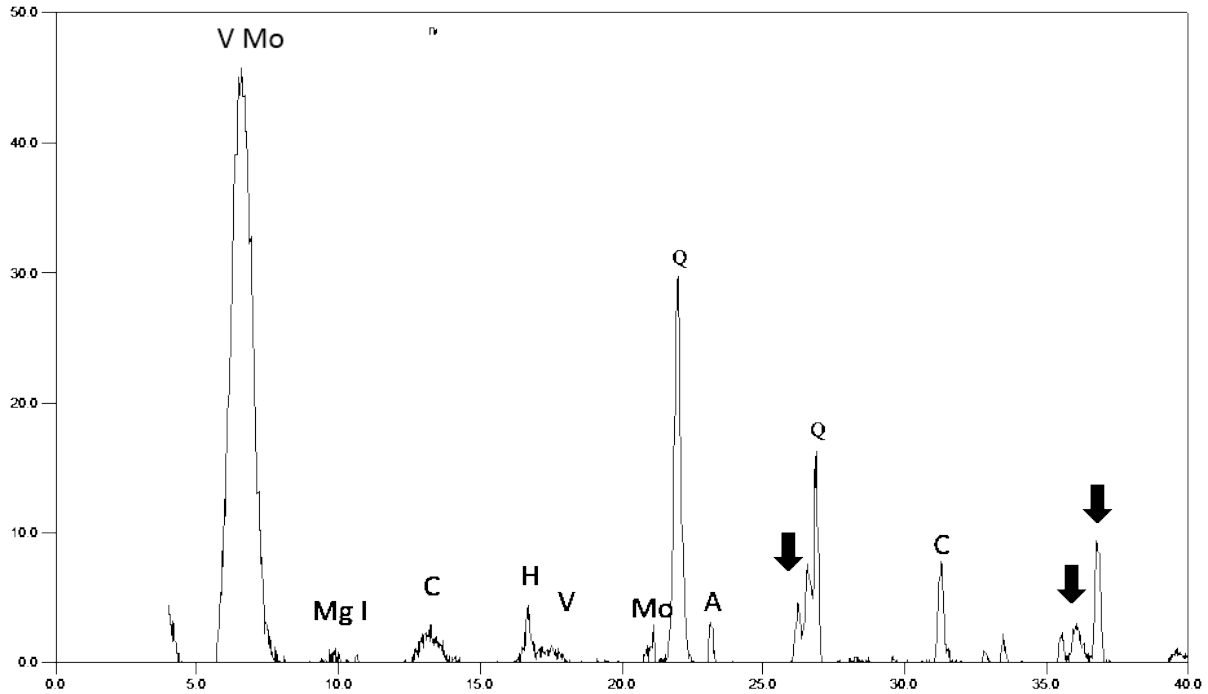
Apéndice 70: Difractograma del lodo a 1100 °C



Apéndice 71: Fases mineralógicas del lodo a 1100 °C

Fase	PDF N°	Nombre
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo
(K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.01</sub> )(Al <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.07</sub> Mg <sub>0.06</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) (Si <sub>5.02</sub> Al <sub>0.98</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-82-3725	Moscovita 2M
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-80-0885	Caolinita
(Mg <sub>2.46</sub> Al <sub>0.3</sub> Fe <sub>0.22</sub> Ti <sub>0.021</sub> ) <sub>2</sub> (Mg <sub>0.38</sub> Ca <sub>0.03</sub> Na <sub>0.0</sub> 2) <sub>2</sub> ((Si <sub>2.83</sub> Al <sub>1.17</sub> )O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>3.4</sub>	010-78-4316	Vermiculita 2M
(K <sub>0.74</sub> Ca <sub>0.03</sub> )(Al <sub>1.92</sub> Mg <sub>0.09</sub> Fe <sub>0.01</sub> )(Si <sub>3.22</sub> Al <sub>0.78</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-78-5137	Illita
Ca <sub>0.5</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH))	010-76-8291	Montmorillonita
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-76-1238	Microclina
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-75-1142	Albita
(Na <sub>0.4</sub> K <sub>0.1</sub> )(Ca <sub>1.8</sub> Fe <sub>0.2</sub> )(Mg <sub>3.1</sub> Fe <sub>1.5</sub> Al <sub>0.4</sub> )(Si <sub>7</sub> Al <sub>1</sub> O <sub>22</sub> )(OH) <sub>2</sub>	010-83-0735	Magnesiohornblenda

Apéndice 72: Difractograma del lodo a 25 °C sinterizado



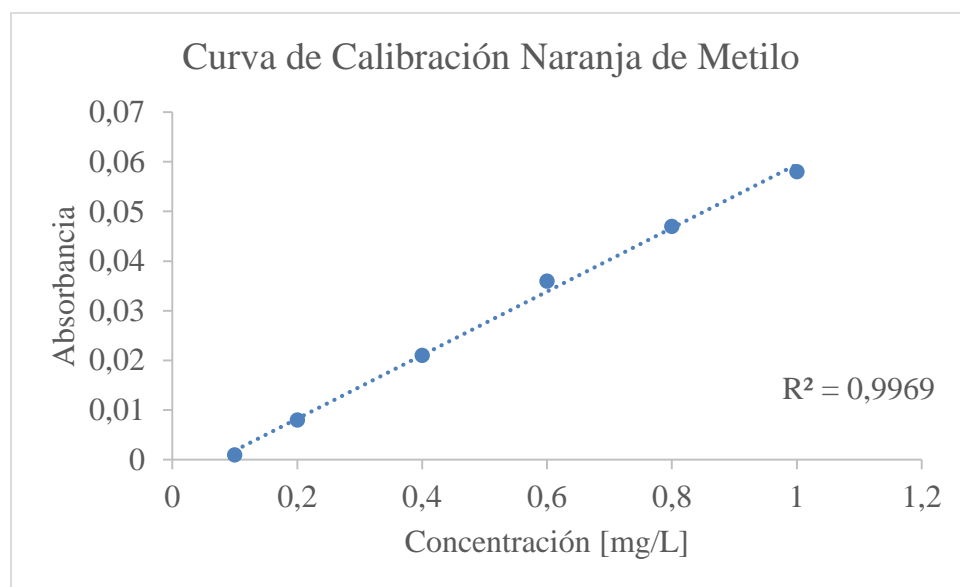
Apéndice 73: Fases mineralógicas del lodo a 25 °C sinterizado

Fase	PDF N°	Nombre
SiO <sub>2</sub>	010-85-0796	Cuarzo
(K <sub>0.86</sub> Na <sub>0.01</sub> )(Al <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.07</sub> Mg <sub>0.06</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) (Si <sub>5.02</sub> Al <sub>0.98</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	010-82-3725	Moscovita 2M
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	010-80-0885	Caolinita
(Mg <sub>2.46</sub> Al <sub>0.3</sub> Fe <sub>0.22</sub> Ti <sub>0.021</sub> ) <sub>2</sub> (Mg <sub>0.38</sub> Ca <sub>0.03</sub> Na <sub>0.0</sub> 2) <sub>2</sub> ((Si <sub>2.83</sub> Al <sub>1.17</sub> )O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>3.4</sub>	010-78-4316	Vermiculita 2M
(K <sub>0.74</sub> Ca <sub>0.03</sub> )(Al <sub>1.92</sub> Mg <sub>0.09</sub> Fe <sub>0.01</sub> )((Si <sub>3.22</sub> Al <sub>0.78</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )	010-78-5137	Illita
Ca <sub>0.5</sub> (Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH))	010-76-8291	Montmorillonita
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-76-1238	Microclina
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-75-1142	Albita
(Na <sub>0.4</sub> K <sub>0.1</sub> )(Ca <sub>1.8</sub> Fe <sub>0.2</sub> )(Mg <sub>3.1</sub> Fe <sub>1.5</sub> Al <sub>0.4</sub> )(Si <sub>7</sub> Al <sub>1</sub> O <sub>22</sub> )(OH) <sub>2</sub>	010-83-0735	Magnesiohornblenda
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	010-76-8398	Hematita

*Apéndice 74: Absorbancias de las soluciones para la curva de calibración de naranja de metilo*

mg/L	Abs
0,1	0,001
0,2	0,008
0,4	0,021
0,6	0,036
0,8	0,047
1	0,058

*Apéndice 75: Curva de calibración de naranja de metilo*



*Apéndice 76: Ecuación para la determinación de la concentración de naranja de metilo*

$$Abs = 0,064 * C - 0,0046$$

*Apéndice 77: Publicación de Resultados*

Participación en el congreso 4th International Meeting for Researches in Materials and Plasma Technology con el trabajo **Characterization of puzolanic materials from residual sludge from water treatment using DRX**, desarrollado en la ciudad de Santa Marta - Colombia del 23 al 26 de mayo de 2017.

Participación en el congreso XIII Reunión de la Asociación Argentina de Cristalografía con el trabajo **Transformación de las fases cristalinas de lodos residuales del tratamiento de agua potable**, desarrollado en Bahía Blanca – Argentina del 1 al 3 de noviembre de 2017.

Participación en el congreso IX Congreso Internacional de Materiales con el trabajo **Elaboración de materiales cerámicos de bajo impacto ambiental a partir de lodos residuales del tratamiento de agua potable**, desarrollado en Barranquilla – Colombia del 14 al 16 de noviembre de 2017.

Publicación en Journal of Physics:Conference Series (JPCS) del artículo **Characterization using XRD of puzolanic materials from residual sludge from water treatment** doi :10.1088/1742-6596/935/1/012049

*Apéndice 78: Certificado de participación en el 4th International Meeting for Researches in  
Materials and Plasma Technology*



**CERTIFICATION**

The chairman of Fourth International Meeting for Researchers in Materials and Plasma Technology (4th IMRMPT) certifies that:

C P González Cuervo, G Baron Gualdron and A M Montañó Angarita

They presented the work entitled:

**Characterization of puzzolanic materials from residual sludge from water treatment  
using XRD**

Conference held 23 to 26 May 2017 in Santa Marta, Colombia.

For its constancy it is signed in Santa Marta 26 May 2017.

A handwritten signature in blue ink, which appears to be 'H. Paredes', is written over a faint circular stamp or watermark.

**HAROLD PAREDES GUTIÉRREZ**  
Chairman  
4th IMRMPT Conference

*Apéndice 79: Certificado de participación en la XIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Cristalografía*



*Apéndice 80: Certificado de participación en el IX Congreso Internacional de Materiales*

# IXCIM -2017-

**IX CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES – CIM 2017**  
**14 al 16 de Noviembre**

Barranquilla, 28 de Noviembre 2017

## A QUIEN INTERESE

Por medio de la presente se informa que **Giselle Carolina Baron Gualdron, Angela Marcela Montaña Angarita y Claudia Paulina Gonzalez Cuervo** participaron como ponentes en presentación tipo poster titulado **ELABORACION DE MATERIALES CERAMICOS DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL A PARTIR DE LODOS RESIDUALES DEL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE** en el marco del IX CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES CIM2017, realizado del 14 al 16 de Noviembre en Barranquilla, Colombia.



**HUMBERTO GÓMEZ**

Presidente Comité Organizador

Congreso Internacional de Materiales IXCIM2017