



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**DESARROLLO DE CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE A  
PARTIR DE RESIDUOS SÍLICO-ALUMINOSOS, COMO  
ALTERNATIVA PARA LA DISMINUCIÓN DE LAS EMISIONES DE  
GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL SECTOR  
CONSTRUCTOR**

Nicolás Steven Pardo Álvarez

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Materiales  
Medellín, Colombia  
2019



Desarrollo de concretos activados alcalinamente a partir de residuos sílico-aluminosos, como alternativa para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector constructor

Nicolás Steven Pardo Álvarez

Informe de investigación como requisito para optar al título de:

Magíster en Ingeniería De Materiales

PhD. María Esperanza López Gómez

Directora

PhD. Guillermo León Penagos García

Codirector

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Materiales  
Medellín, Colombia  
2019

# RESUMEN

El acuerdo de París sobre el Cambio Climático, reafirmado durante las cumbres posteriores, supone un compromiso frente a la disminución de la cantidad de gases de efecto invernadero en todos los sectores productivos. Colombia, en particular, se comprometió con una disminución del 20% de sus emisiones para el año 2030. Debido a su intensidad material y energética, además de su crecimiento sostenido a lo largo de la última década, el sector edificador resulta estratégico en el logro de este propósito. La presente investigación tiene como objetivo sustituir concretos convencionales por concretos conteniendo residuos mineros activados alcalinamente, como una posible alternativa para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y la energía incorporada del ciclo de vida en una edificación del Valle de Aburrá, Colombia.

Para esto, se desarrolló un modelo que permitió la determinación de las emisiones de gases de efecto invernadero y la energía incorporada mediante el software UMBERTO NXT CO2 de las Fases 1 y 2 del ciclo de vida de la edificación, como se describe a continuación: Fase 1, materiales e insumos, lo cual incluye los procesos de extracción de materia prima, fabricación y transporte de materiales a obra. Fase 2, etapa de construcción, la cual incluye los procesos de transportes internos, uso de maquinarias y equipos, instalaciones y transporte y disposición/aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, los cuales son generados hasta antes del comienzo de la fase de operación. Se llevaron a cabo cuatro estimaciones, la primera a partir de la información suministrada por la constructora y la segunda en función de la información exacta contenida en los planos arquitectónicos, estructurales y de instalaciones técnicas (no incluye residuos). Las estimaciones restantes también corresponden a la información contenida en los planos, incluyendo los residuos; sin embargo, la tercera estimación incluyendo los porcentajes de pérdida de materiales utilizados por la constructora en el proyecto y la cuarta considerando la cantidad de residuos reportados por la constructora. Los resultados mostraron que la constructora debe revisar su forma de reportar las cantidades de materiales, ya que las variaciones entre las huellas de carbono y la energía incorporada son muy significativas. Específicamente, es importante la variación presente entre la cantidad de cemento reportada por la constructora y el valor estimado según los planos, además de las diferencias sustanciales entre las cantidades de residuos de construcción y demolición.

De manera paralela, se determinaron las condiciones de los diseños de mezcla de los concretos fabricados a partir de residuos mineros y activadores alcalinos. Luego, los resultados se compararon con un diseño de mezcla de concreto convencional conteniendo cemento Pórtland, y usado como referencia, planteado para 21 MPa de resistencia a la compresión. Para esto, inicialmente, se llevó a cabo un proceso de molienda de los residuos mineros, con el fin de obtener un tamaño de partícula y un área superficial específica similar a la del cemento. De esta forma, se pudo comparar la resistencia a la compresión entre los morteros preparados con residuos molidos y/o con residuos con granulometría original (en estado de entrega), con el mortero de referencia elaborado con cemento Pórtland tipo I. El mortero de referencia corresponde a un mortero tipo S de 12,5 MPa de resistencia a la compresión. Además, para la preparación de morteros con residuos molidos, se hicieron sustituciones parciales del 10 y el 20% del residuo molido por cemento Pórtland tipo I como co-aglutinante. Se variaron las relaciones molares sílice/alúmina, óxido de sodio/sílice y agua/óxido de sodio para los morteros, a fin de establecer la combinación que

presentase la menor cantidad de emisiones por metro cúbico, en función del módulo de solución (Ms) y el porcentaje de óxido de sodio. De todas las combinaciones evaluadas, con los residuos como precursores, se seleccionaron los morteros con la mayor resistencia a la compresión a los 28 días para fabricar el concreto conteniendo residuo activado alcalinamente. Se incorporó la variable de relación sólido/líquido y se calcularon las emisiones y energía incorporada y la posible reducción estos indicadores. Estos resultados preliminares mostraron que la mezcla donde se logró el mayor valor de resistencia a la compresión, fue el diseño con residuo de colas de flotación molidas y un 20% de sustitución parcial por cemento. Sin embargo, esta condición, a pesar de ser la mejor, no alcanzó los valores de resistencia establecidos para el mortero y el concreto de referencia (12,5 y 21 MPa). Debido a lo anterior, se prepararon dos nuevos diseños de morteros usando las colas de flotación molidas y con sustituciones parciales de cemento de 30 y 40%, respectivamente. De este estudio final, se obtuvo que la mezcla con 30% de sustitución parcial por cemento superó el valor de resistencia a la compresión del mortero de referencia, con 17,7 MPa a los 28 días de fraguado. Por último, se prepararon los concretos con esta condición y se logró un valor de resistencia a la compresión a los 28 días de fraguado de 25,3 MPa, superando el valor establecido para el concreto de referencia.

Finalmente, se analizó la viabilidad de la sustitución de concretos convencionales por concretos generados a partir de residuos mineros activados alcalinamente a través de los resultados y las propiedades evaluadas. Los resultados del análisis demostraron que los concretos con residuos mineros activados alcalinamente son aptos para la sustitución de concretos convencionales, con una reducción en la edificación del 8,02% en las emisiones de gases de efecto invernadero y del 4,72% en la energía incorporada, respecto a los concretos convencionales.

***Palabras clave:*** Huella de carbono, energía incorporada, ciclo de vida, residuos mineros, activación alcalina.

# AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos:

A mi directora de investigación, la Dra. Esperanza López, por su apoyo, su atención y por los conocimientos transmitidos.

A mi codirector, el Dr. Guillermo Penagos. Más que mi codirector, un gran amigo y compañero de trabajo, quien me ha orientado y formado hacia el tema de la sostenibilidad. Muchas gracias por todo Memo.

A mis padres y mi tío, en especial a mi madre María Álvarez, quien toda la vida me ha inspirado a ser una mejor persona y un excelente profesional. Gracias por tu amor y apoyo incondicional.

A la Gobernación de Antioquia, por la financiación del proyecto de Fiscalización Minera, “Convenio Interadministrativo de Colaboración N0 4600007519 de 2017”, llevado a cabo en conjunto con la Universidad de Antioquia, en el cual se enmarcaron algunos de los resultados obtenidos.

Al Dr. Mauricio Correa, por permitirme participar en el proyecto de Fiscalización Minera.

A la empresa PVG Arquitectos, quienes han apoyado mis procesos de formación en investigación y desarrollo, en especial a Alexander González por los conocimientos transmitidos y a Kevin Sánchez, por toda su ayuda durante los cálculos de las cantidades de materiales a partir de los planos.

A la Magister en Ingeniería de Materiales Francy Milena Hurtado, por su apoyo, ayuda, comprensión y esfuerzos durante el desarrollo de esta investigación. Gracias por todo Milena, en especial por la paciencia y tu ser incondicional.

Al Ingeniero de Materiales Duván Agudelo, por su apoyo durante el proyecto de Fiscalización Minera.

A los estudiantes de pregrado en Ingeniería de Materiales, Gilberto, Eduard y Cristian, quienes estuvieron realizando sus trabajos del curso de materiales cerámicos, apoyando la investigación.

A los grupos de investigación Gipimme, Gimacyr y PVG+Arquitectos.

A mis compañeros de posgrado, quienes con sus comentarios y sugerencias hicieron que el trabajo mejorara considerablemente.

# TABLA DE CONTENIDO

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	5
1.1 CONTEXTO GENERAL PARA LOS GEI EN EL SECTOR CONSTRUCTOR EN COLOMBIA.....	5
1.2 SITUACIÓN MINERA EN COLOMBIA .....	10
1.3 RESIDUOS MINEROS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	12
1.4 EMISIONES ASOCIADAS A LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO.....	14
1.5 GEOCEMENTOS Y CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE .....	16
1.6 CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE A PARTIR DE RESIDUOS MINEROS.....	21
1.7 CONTEXTUALIZACIÓN EN COLOMBIA .....	22
1.7.1 Antecedentes y factores de emisión .....	22
1.7.2 Etapas de consumo de concreto en el proceso edificatorio.....	23
1.7.3 Concretos a partir de residuos mineros .....	23
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	25
2.1 CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO Y LA ENERGÍA INCORPORADA DEL PROYECTO .....	27
2.1.1 Selección del proyecto .....	27
2.1.2 Etapas analizadas.....	27
2.1.3 Factores de emisión.....	28
2.1.4 Desarrollo del modelo .....	31
2.1.5 Recolección de la información.....	33
2.1.6 Supuestos del modelo.....	34
2.1.7 Estimación de materiales a partir de los planos del proyecto .....	40
2.2 OBTENCIÓN DE LOS RESIDUOS MINEROS Y CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA .....	41
2.2.1 Materiales de estudio.....	41
2.2.2 Caracterización.....	42
2.3 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE.....	43
2.3.1 Fabricación de morteros y evaluación de la resistencia a la compresión.....	44
2.3.2 Fabricación de concretos y evaluación de la resistencia a la compresión.....	47

2.4	ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA .....	49
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS: CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO Y LA ENERGÍA INCORPORADA DE LA EDIFICACIÓN .....	50
3.1	INDICADORES AMBIENTALES ESCENARIO A.....	50
3.2	INDICADORES AMBIENTALES ESCENARIO B.....	51
3.3	INDICADORES AMBIENTALES ESCENARIO C.....	52
3.4	INDICADORES AMBIENTALES ESCENARIO D.....	53
3.5	COMPARACIÓN ENTRE LOS ESCENARIOS.....	54
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS: CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA PARA ELABORAR CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE .....	58
4.1	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LOS RESIDUOS MINEROS, EL CEMENTO Y EL AGREGADO FINO .....	58
4.1.1	Residuos mineros .....	58
4.1.2	Cemento Pórtland comercial tipo I.....	60
4.1.3	Agregado fino.....	61
4.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MORFOLÓGICA DE LOS RESIDUOS MINEROS Y LOS AGREGADOS.....	62
4.2.1	Residuos mineros .....	62
4.2.2	Agregado fino.....	66
4.2.3	Agregado grueso .....	67
4.3	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA ACTIVADORES.....	67
4.3.1	Hidróxido de sodio .....	67
4.3.2	Silicato de sodio .....	67
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS: FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS Y CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE.....	69
5.1	FABRICACIÓN DE MORTEROS Y EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	69
5.1.1	Proceso de disgregación o molienda.....	69
5.1.2	Proceso de activación alcalina.....	73
5.1.3	Evaluación de la resistencia a la compresión .....	74
5.1.4	Caracterización mineralógica, morfológica y química .....	75
5.1.5	Emisiones y energía incorporada por metro cúbico de mortero.....	86
5.2	FABRICACIÓN DE CONCRETOS Y EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	86

5.2.1	Caracterización morfológica y química .....	87
6.	ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LA SUSTITUCIÓN DE CONCRETOS CONVENCIONALES POR CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE.....	91
6.1	CONDICIÓN DETERMINADA PARA EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA	91
6.2	HUELLA DE CARBONO Y ENERGÍA INCORPORADA PARA LA MEJOR CONDICIÓN DE LOS CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE .....	94
6.3	COSTO POR METRO CÚBICO PARA AMBOS TIPOS DE CONCRETOS .....	96
7.	RESULTADOS TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS.....	98
7.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	98
8.	CONCLUSIONES .....	100
8.1	IMPACTOS AMBIENTALES DE LA EDIFICACIÓN.....	100
8.2	FABRICACIÓN DE LOS MORTEROS Y CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE.....	101
8.3	RESULTADOS TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS .....	102
8.4	ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LA SUSTITUCIÓN.....	102
9.	INVESTIGACIONES FUTURAS.....	103
10.	REFERENCIAS .....	104

# LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1-1.</b> Ciclo de vida de las edificaciones [3].....	6
<b>Figura 1-2.</b> Proyecto Informe Bienal de Actualización [2].....	7
<b>Figura 1-3.</b> El acuerdo de París. Escenario sin introducción de cambios (BAU) y escenario de mitigación para Colombia [1]. .....	8
<b>Figura 1-4.</b> Fases del proceso del sector minero [105]. .....	11
<b>Figura 1-5.</b> Distribución de minas y títulos mineros para el departamento de Antioquia [107]...11	
<b>Figura 1-6.</b> Gestión de residuos relacionados con la producción, Minería de Metales. Modificado a partir de [118]. .....	13
<b>Figura 1-7.</b> Esquema representativo de las emisiones asociadas a la fabricación de cemento Pórtland. Realizado a partir de [135]. .....	15
<b>Figura 1-8.</b> Descripción esquemática de la activación alcalina de un componente con capacidad cementante para la formación de concreto activado alcalinamente. Modificado a partir de [149]. .....	16
<b>Figura 1-9.</b> Modelo descriptivo de la activación alcalina de aluminosilicatos. Modificado a partir de [149]. .....	18
<b>Figura 1-10.</b> Diagrama conceptual que muestra las interrelaciones entre el diseño de la mezcla, la química del gel, la caracterización de la matriz, las propiedades de ingeniería y la durabilidad del concreto activado alcalinamente. Modificado a partir de [128,151]. .....	19
<b>Figura 1-11.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> de varios cementantes como una función del contenido de cemento Pórtland. Modificado a partir de [128,151]. .....	20
<b>Figura 2-1.</b> Metodología experimental.....	26
<b>Figura 2-2.</b> Esquema de la simulación mediante el software UMBERTO NXT CO <sub>2</sub> . .....	32
<b>Figura 2-3.</b> Perfil de elevación para ruta hipotética de transporte de RCD entre una obra cerca de la Iguaná y la escombrera el Trapiche. Distancia 26,2 km y pendiente máxima 12,9%. [3]. .....	34
<b>Figura 3-1.</b> Proyecto X, cálculos a partir de las cantidades de obra y RCD, suministrados por la Constructora X. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada. ....	51
<b>Figura 3-2.</b> Proyecto X, cálculos a partir de la información exacta contenida en los planos arquitectónicos, estructurales y de especificaciones técnicas. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.....	52
<b>Figura 3-3.</b> Proyecto X, cálculos a partir de la información contenida en los planos, incluyendo el porcentaje de pérdida estimado por la constructora para los RCD. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.....	53
<b>Figura 3-4.</b> Proyecto X, cálculos a partir de la información exacta contenida en los planos, incluyendo el manejo real de RCD de la constructora. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.....	54

<b>Figura 4-1.</b> Espectros de difracción para las muestras a) RC, b) RCd y c) CF.....	60
<b>Figura 4-2.</b> Espectro de difracción para el cemento Pórtland tipo I comercial.....	61
<b>Figura 4-3.</b> Espectro de difracción para el agregado fino. ....	62
<b>Figura 4-4.</b> Análisis granulométrico por tamizado de RC, RCd y CF. ....	63
<b>Figura 4-5.</b> Análisis granulométrico por difracción láser de RC, RCd y CF. ....	63
<b>Figura 4-6.</b> Micrografías MEB de los residuos. Material retenido malla 200 Tyler para a) RC y b) CF. Material pasante malla 200 Tyler para c) RC y d) AF. ....	64
<b>Figura 4-7.</b> a), b) y c) Micrografías MEB y lugares de espectros EED del residuo RC. ....	65
<b>Figura 4-8.</b> a), b) y c) Micrografías MEB y lugares de espectros EED del residuo RCd. ....	65
<b>Figura 4-9.</b> a), b) y c) Micrografías MEB y lugares de espectros EED del residuo CF.....	65
<b>Figura 4-10.</b> Análisis granulométrico por tamizado de la arena. ....	66
<b>Figura 5-1.</b> Análisis granulométrico para las muestras molidas RCm, CFm y RCdm mediante difracción láser. ....	70
<b>Figura 5-2.</b> Micrografías MEB de los residuos molidos. a), d), g) y j) para CFm. b), e), h) y k) para RCm. c), f), i) y l) para RCdm. ....	71
<b>Figura 5-3.</b> Efluorescencia en las muestras preparadas con la combinación $M_s=0,5\text{-}\%Na_2O=12$ , mostrando la vista superior y lateral de las muestras. a) MRCdm0, b) MRC, c) MCF, d) MRCm0 y e) MCFm0. ....	73
<b>Figura 5-4.</b> Efluorescencia en las muestras preparadas con la combinación $M_s=1,5\text{-}\%Na_2O=12$ mostrando la vista superior y lateral de las muestras. a) MRCdm0, b) MRC, c) MCF, d) MRCm0 y e) MCFm0. ....	73
<b>Figura 5-5.</b> Resultados de la resistencia a la compresión para las 6 mejores condiciones de los morteros con residuos activados y el mortero con cemento como referencia. ....	75
<b>Figura 5-6.</b> Espectros de difracción para las condiciones evaluadas a los 28 días de fraguado. a) MCFm20, b) MRCdm20, c) MCFm0, d) MRCm20, e) MCF y e) MRCm0. ....	77
<b>Figura 5-7.</b> Resistencia a la compresión a los 28 días en función de la relación molar $CaO/SiO_2$ para las 6 mejores condiciones de los morteros con residuos activados. ....	78
<b>Figura 5-8.</b> Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MCFm20 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f), i) y l) Zona 3.....	80
<b>Figura 5-9.</b> Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MRCdm20 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f) e i) Zona 3. ....	81
<b>Figura 5-10.</b> Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MCFm0 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f), i) y l) Zona 3.....	82

<b>Figura 5-11.</b> Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MRCm20 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f), i) y l) Zona 3.....	83
<b>Figura 5-12.</b> Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MCF para dos zonas con sus acercamientos. a), c) y e) Zona 1. b), d) y f) Zona 2.....	84
<b>Figura 5-13.</b> Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MRCm0 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f), i) y l) Zona 3.....	85
<b>Figura 5-14.</b> Resultados de la resistencia a la compresión para CCFm20 y el concreto con cemento de referencia. ....	87
<b>Figura 5-15.</b> Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del concreto CFm20 para dos zonas con sus acercamientos. a), b), c), d) y e) Zona 1. f), g), h), i) y j) Zona 2. ....	89
<b>Figura 6-1.</b> Resultados de la resistencia a la compresión para los morteros con las CFm activadas y el mortero con cemento de referencia. ....	93
<b>Figura 6-2.</b> Resultados de la resistencia a la compresión para CCFm30 y el concreto con cemento de referencia. ....	94
<b>Figura 6-3.</b> Proyecto X, cálculos a partir de la sustitución del concreto en obra convencional por la condición CCFm30. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada. ....	95
<b>Figura 7-1.</b> Resultados de la resistencia a la compresión para las 6 mejores condiciones de los morteros con residuos activados (60 °C durante 24 horas) y el mortero con cemento como referencia. ....	99

# LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1-1.</b> Medidas de mitigación de GEI para los principales sectores económicos de Colombia durante la COP21 [1].....	8
<b>Tabla 1-2.</b> Evaluación comparativa “Benchmarking” internacional de huellas de carbono para el ciclo de vida constructivo.....	10
<b>Tabla 1-3.</b> Municipios con mayor tonelaje de producción de material minero en Antioquia [107]. .....	12
<b>Tabla 1-4.</b> Comparación entre los geles presentes en los principales materiales con capacidad cementante [41]. .....	17
<b>Tabla 2-1.</b> Factores de emisión para las etapas de extracción de materia prima y fabricación de materiales nacionales [7]. .....	29
<b>Tabla 2-2.</b> Factores de emisión para las etapas de extracción de materia prima y fabricación de materiales internacionales y para el transporte transoceánico [6,195]. .....	29
<b>Tabla 2-3.</b> Factores de emisión y consumos energéticos para los combustibles [188,189]. .....	30
<b>Tabla 2-4.</b> Factores de emisión asociados a las disposiciones y aprovechamientos de los RCD [6]. .....	31
<b>Tabla 2-5.</b> Descripción de la ilustración del modelo general. ....	33
<b>Tabla 2-6.</b> Resultados del experimento. ....	35
<b>Tabla 2-7.</b> Resultados de la elicitación para la media y la desviación estándar. ....	35
<b>Tabla 2-8.</b> Resumen medias y medianas para las distribuciones de las cadenas $\mu$ y $\lambda$ . ....	37
<b>Tabla 2-9.</b> Ecuaciones de predicción de consumo de combustible. ....	37
<b>Tabla 2-10.</b> Transporte desde los lugares de explotación de agregados y fabricación de cemento hasta los lugares de fabricación de concreto premezclado en el Valle de Aburrá. ....	38
<b>Tabla 2-11.</b> Distribución y abastecimiento de agregados para Planta Argos-Caribe. ....	38
<b>Tabla 2-12.</b> Diseño de mezcla para un concreto premezclado de 21 MPa de resistencia a la compresión. ....	39
<b>Tabla 2-13.</b> Factores de emisión complementarios para el modelo. ....	40
<b>Tabla 2-14.</b> Densidades para el cálculo de las cantidades de agregados.....	40
<b>Tabla 2-15.</b> Estimación de las cantidades del diseño de mezcla calculado para los concretos preparados en obra. ....	40
<b>Tabla 2-16.</b> Consumo de materiales por tipo de sistema constructivo en ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) reportados en el informe PNUD, UPME, Ecoingeniería [7]. ....	41
<b>Tabla 2-17.</b> Porcentaje estimado de pérdida de cada material [3].....	41
<b>Tabla 2-18.</b> Proporciones en peso para el mortero de referencia MC.....	44

<b>Tabla 2-19.</b> Proporciones en peso para los residuos mineros, el cemento y la arena.....	45
<b>Tabla 2-20.</b> Combinaciones evaluadas para la activación de morteros con residuos mineros.....	45
<b>Tabla 2-21.</b> Proporciones en peso para los residuos mineros, el cemento, la arena, el agua y los activadores alcalinos en cada tipo de mortero.....	46
<b>Tabla 2-22.</b> Factores de emisión para los materiales de los diseños de mezcla. ....	47
<b>Tabla 2-23.</b> Proporciones en peso para el concreto de referencia CC.....	48
<b>Tabla 3-1.</b> Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.....	51
<b>Tabla 3-2.</b> Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.....	52
<b>Tabla 3-3.</b> Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.....	53
<b>Tabla 3-4.</b> Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.....	54
<b>Tabla 3-5.</b> Comparación entre los escenarios planteados para los indicadores ambientales planteados para los indicadores ambientales.....	55
<b>Tabla 3-6.</b> Intensidad material por m <sup>2</sup> para los escenarios planteados para los indicadores ambientales del Proyecto X.....	55
<b>Tabla 3-7.</b> Comparación entre los Escenarios A, B, C y D para las cantidades de concreto premezclado y preparado en obra.....	56
<b>Tabla 3-8.</b> Comparación entre las cantidades de los materiales, en toneladas, para los concretos reportados por la constructora y los estimados mediante los planos arquitectónicos, estructurales y técnicos (con estimado de pérdida incluido). ....	56
<b>Tabla 4-1.</b> Composición química porcentual de los residuos estudiados.....	59
<b>Tabla 4-2.</b> Relaciones molares actuales en los residuos.....	59
<b>Tabla 4-3.</b> Composición química porcentual del cemento. ....	61
<b>Tabla 4-4.</b> Composición química porcentual del agregado fino. ....	62
<b>Tabla 4-5.</b> Propiedades físicas de RC y CF.....	64
<b>Tabla 4-6.</b> Composición elemental (% en peso) para los análisis por EED.....	66
<b>Tabla 4-7.</b> Propiedades físicas del agregado fino.....	67
<b>Tabla 4-8.</b> Propiedades físicas del agregado grueso.....	67
<b>Tabla 4-9.</b> Propiedades soda cáustica comercial en escamas [226]. ....	67
<b>Tabla 4-10.</b> Composición química porcentual de la soda cáustica comercial en escamas.....	67
<b>Tabla 4-11.</b> Propiedades silicato de sodio comercial alcalino Flocsil [211]. ....	68
<b>Tabla 4-12.</b> Composición química porcentual del silicato de sodio comercial Flocsil.....	68

<b>Tabla 5-1.</b> Comparación de las distribuciones de tamaño de partícula de los residuos mineros (fracción fina y molidos) con rangos encontrados para cementos convencionales [227–229].	72
<b>Tabla 5-2.</b> Comparación de las superficies específicas de los residuos mineros (fracción fina y molidos) con rangos encontrados para cementos convencionales [227–229].	72
<b>Tabla 5-3.</b> Propiedades físicas de RCm, RCdm y CFm.	72
<b>Tabla 5-4.</b> Relaciones molares finales en cada tipo de mortero.	74
<b>Tabla 5-5.</b> Resultados de la resistencia a la compresión de los morteros con residuos activados y el mortero con cemento como referencia.	74
<b>Tabla 5-6.</b> Composición elemental (% en peso) para los análisis por EED para el mortero MCFm20 en las zonas identificadas.	80
<b>Tabla 5-7.</b> Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MRCdm20 en las zonas identificadas.	81
<b>Tabla 5-8.</b> Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MCFm0 en las zonas identificadas.	82
<b>Tabla 5-9.</b> Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MRCm20 en las zonas identificadas.	83
<b>Tabla 5-10.</b> Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MCF en las zonas identificadas.	84
<b>Tabla 5-11.</b> Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MRCm0 en las zonas identificadas.	85
<b>Tabla 5-12.</b> Emisiones y porcentaje de reducción de emisiones por metro cúbico de mortero para cada tipo de residuo.	86
<b>Tabla 5-13.</b> Relaciones molares finales y relación sólido/líquido para el concreto CCFm20.	86
<b>Tabla 5-14.</b> Proporciones en peso para los materiales que integran el concreto CCFm20.	87
<b>Tabla 5-15.</b> Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para CCFm20 y el concreto con cemento de referencia.	87
<b>Tabla 5-16.</b> Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el concreto CCFm20 en las zonas identificadas.	90
<b>Tabla 6-1.</b> Relaciones molares finales para cada tipo de mortero.	92
<b>Tabla 6-2.</b> Proporciones en peso para los materiales que integran cada tipo de mortero.	92
<b>Tabla 6-3.</b> Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para los morteros con las CFm activadas y el mortero con cemento de referencia.	92
<b>Tabla 6-4.</b> Relaciones molares finales y relación sólido/líquido para el concreto CCFm30.	93
<b>Tabla 6-5.</b> Proporciones en peso para los materiales que integran el concreto CCFm30.	93
<b>Tabla 6-6.</b> Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para CCFm30 y el concreto con cemento de referencia.	94

<b>Tabla 6-7.</b> Intensidad material para la etapa de extracción y manufactura de materiales asociado a los cementantes y activadores de ambos escenarios para el concreto preparado en obra. ....	95
<b>Tabla 6-8.</b> Huella de carbono y energía incorporada para la etapa de extracción y manufactura de materiales asociado a los cementantes y activadores de ambos escenarios para el concreto preparado en obra. ....	95
<b>Tabla 6-9.</b> Huella de carbono y energía incorporada para la etapa de transporte asociado a los cementantes y activadores de ambos escenarios para el concreto preparado en obra.....	96
<b>Tabla 6-10.</b> APU para 1 m <sup>3</sup> de concreto convencional (diseño planteado).....	97
<b>Tabla 6-11.</b> APU para 1 m <sup>3</sup> de concreto activado alcalinamente (diseño CFm30).....	97
<b>Tabla 7-1.</b> Resultados de la resistencia a la compresión de los morteros con residuos activados (60 °C durante 24 horas) y el mortero con cemento como referencia. ....	99



# ABREVIATURAS

AN	Residuos de minería aurífera aluvial
APU	Análisis de Precios Unitarios
ASTM	American Society for Testing and Materials - Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
CAA	Concretos activados alcalinamente
CAMACOL	Cámara Colombiana de la Construcción
CC	Concreto con cemento Pórtland
CCFm20	Concreto con residuos de minería aurífera de veta molidos con 20% de sustitución por cemento
CCFm30	Concreto con residuos de minería aurífera de veta molidos con 30% de sustitución por cemento
CF	Residuos de minería aurífera de veta
CFm	Residuos de minería aurífera de veta molidos
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático
COP	Conferencia de las Partes
DRX	Difracción de rayos X
EC	Economía Circular
Ecoinvent	Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida
EDBC	Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono
EDGE	Excellent in Design for Greater Efficiencies - Excelencia en el Diseño para Mayores Eficiencias
EED	Espectroscopía de energía dispersiva
EI	Energía incorporada
FA	Fly ash - Cenizas volantes
FECOC	Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos
FRX	Fluorescencia de rayos X
GAIA	Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental
GC	Geocementos
GCBFS	Ground Granulated Blast Furnace Slag - Escoria comercial granulada de alto horno
GEI	Gases de Efecto Invernadero

GHG	Greenhouse Gas Protocol - Protocolo de Gases de Efecto Invernadero
HC	Huella de carbono
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IFC	International Finance Corporation - Corporación Financiera Internacional
LEED	Leadership in Energy & Environmental Design - Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental
MC	Mortero con cemento
MCF	Mortero con residuos de minería aurífera de veta con granulometría original (en estado de entrega).
MCFm0	Mortero con residuos de minería aurífera de veta molidos
MCFm10	Mortero con residuos de minería aurífera de veta molidos con 10% de sustitución por cemento
MCFm20	Mortero con residuos de minería aurífera de veta molidos con 20% de sustitución por cemento
MCFm30	Mortero con residuos de minería aurífera de veta molidos con 30% de sustitución por cemento
MCFm40	Mortero con residuos de minería aurífera de veta molidos con 40% de sustitución por cemento
MEB	Microscopía electrónica de barrido
MINMINAS	Ministerio de Minas y Energía
MRC	Mortero con residuos de minería de carbón con granulometría original (en estado de entrega).
MRCdm0	Mortero con residuos de minería de carbón arcillosos molidos
MRCdm10	Mortero con residuos de minería de carbón arcillosos molidos con 10% de sustitución por cemento
MRCdm20	Mortero con residuos de minería de carbón arcillosos molidos con 20% de sustitución por cemento
MRCm0	Mortero con residuos de minería de carbón molidos
MRCm10	Mortero con residuos de minería de carbón molidos con 10% de sustitución por cemento
MRCm20	Mortero con residuos de minería de carbón molidos con 20% de sustitución por cemento
NDC	Nationally Determined Contributions - Contribuciones Nacionalmente Determinadas
NTC	Norma Técnica Colombiana

PAM	Pasivos ambientales mineros
PAS	Publicly Available Specification - Especificaciones Públicamente Disponibles
PNACC	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
RC	Residuos de minería de carbón
RCd	Residuos de minería de carbón arcillosos
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
RCdm	Residuos de minería de carbón arcillosos molidos
RCm	Residuos de minería de carbón molidos
REDD+	Estrategia Nacional de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques
ReLASC	Red Latinoamericana de Prevención y Gestión de Sitios Contaminados
RM	Residuos mineros
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
US EPA	United States Environmental Protection Agency - Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos
WBCSD	World Business Council For Sustainable Development - Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible
WBG	World Bank Group - Grupo del Banco Mundial



# INTRODUCCIÓN

En la actualidad se reconoce que el cambio climático se encuentra asociado a la cantidad de Gases de Efecto Invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera por diversos procesos. Colombia dentro del marco del Acuerdo de París en la Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), y reafirmado durante las cumbres posteriores COP22 y COP24, se comprometió a disminuir en un 20% sus GEI para el año 2030. A pesar de que no hay metas sectoriales, el sector de la construcción resulta estratégico para lograr esta reducción, ya que se relaciona con los sectores de transporte, energía, residuos, industrias manufactureras y procesos industriales [1–3]. Analizando el ciclo de vida del sector constructor, que incluye las etapas de extracción y manufactura de materiales de obra, el transporte de materiales hasta la obra, la fase constructiva, la fase operativa y el transporte y disposición de residuos de construcción y demolición (RCD), a nivel nacional no existe un cálculo de GEI reportado. Por otra parte, aunque en la actualidad las certificaciones nacionales para la construcción incluyen el cálculo de la energía incorporada en el proceso constructivo, no existe un análisis completo de este tipo [4–6]. El estudio más relacionado fue llevado a cabo por PNUD, UPME y Ecoingeniería en el año 2012, en el cual se consignaron los factores de emisión ( $t\ CO_2/t$ ) y el consumo energético total (MJ/t) para las etapas de extracción y fabricación de los materiales del sector constructor [7].

Dentro de la actividad edificatoria mundial, uno de los materiales más utilizados es el cemento Pórtland, principalmente en concretos. Debido a su gran producción en todo el mundo, la industria del cemento Pórtland presenta problemas económicos, energéticos y ambientales (genera entre el 5 y 7% del total de emisiones de  $CO_2$  en todo el mundo) [8–11]. Para Colombia, de manera particular, el factor de emisión del cemento se estima en 1,1271 toneladas de  $CO_2$  equivalente arrojados a la atmósfera por cada tonelada de cemento producido (como promedio entre la fabricación por vía seca y vía húmeda) [7]. La preocupación internacional sobre cómo reducir las emisiones de  $CO_2$  ha dado lugar, dentro de la comunidad científica, a un creciente interés en el desarrollo de materiales y tecnologías con la capacidad de reducir el impacto del cemento Pórtland y hacer de la construcción una industria más sostenible. Como respuesta, surgen los geocementos (GC) o aglomerantes activados alcalinamente, que de manera análoga al cemento Pórtland en los concretos convencionales, sirven para fabricar concretos activados alcalinamente (CAA). Estos CAA han sido ampliamente discutidos y promovidos como una herramienta hacia un futuro de “sistemas aglomerantes de cementación sostenible”, gracias a su capacidad de fraguado a temperatura ambiente, buena resistencia a la compresión y durabilidad [12–16]. Estos GC pueden ser procesados a partir de diferentes materias primas, las cuales, al entrar en contacto con los activadores alcalinos, forman una pasta que puede fraguar y endurecerse como un cemento Pórtland.

Una de las materias primas que no ha sido muy explorada en el ámbito de los GC son los residuos de explotación minera. Teniendo en cuenta que una de las maneras de disminuir las emisiones de GEI de las edificaciones es la sinergia con otros sectores económicos a través de la Economía Circular (EC), la vinculación con el sector minero resulta viable para ambos sectores. Esta reducción se puede dar desde la reutilización de residuos mineros (RM) para la fabricación de materiales de construcción, debido a las grandes cantidades de residuos que se originan y los problemas ambientales que se pueden evitar [17,18]. Con base a lo anteriormente expuesto, se

infiere una posible disminución en la necesidad de extraer recursos "vírgenes", lo cual significa que se consumiría menos energía para fabricar materiales y como resultado, se generarían menos emisiones de GEI [19]. Entre las principales aplicaciones que se reportan en la literatura para el sector de la construcción se encuentran la fabricación de concretos activados alcalinamente [20–47], concreto poroso [48–51], cemento [52–61], cerámicos sinterizados [18,62–64] y concretos y morteros simples [65–74]. A pesar que los RM se presentan como una fuente potencial de precursores (aluminosilicatos) para generar concretos a partir de activación alcalina, su reactividad alcalina es generalmente baja y se presenta como el aspecto más crítico en la activación alcalina de este tipo de residuos. Además, a la fecha sólo se reporta un estudio de activación alcalina de RM en Colombia, presentado por Caballero et al [21], sin embargo los autores fabricaron geopolímeros a partir de residuos de minería de oro llevando a cabo sustituciones parciales de cemento por los residuos, por lo cual la sustitución completa de cemento no ha sido abordada hasta el momento.

A partir de lo anterior, en este proyecto se calcularon las emisiones de GEI y la energía incorporada de las fases 1 y 2 del ciclo de vida de una edificación del Valle de Aburrá, Colombia (Proyecto X). Las emisiones de GEI derivadas de la operación de edificaciones, Fase 3, y final de ciclo de vida, Fase 4, no forman parte del alcance del presente estudio. La edificación elegida para el análisis corresponde a un proyecto de la Constructora X, en la cual los concretos correspondientes a las etapas de subestructura y estructura fueron diseñados para 21 MPa de resistencia a la compresión. A su vez, se generaron CAA usando RM con activación alcalina como materiales cementantes. El diseño de las mezclas se elaboró para cumplir con el valor establecido de resistencia a la compresión de los concretos convencionales del proyecto analizado (21 MPa); esto permite comenzar un proceso de sustitución de concretos convencionales, estableciendo una posible alternativa para la disminución de las emisiones de GEI. Se estudiaron cuatro tipos de RM para este fin, dos tipos de residuos de explotación de carbón (RC y RCd), colas de flotación (CF) producto de la minería aurífera de veta y arenas negras (AN), las cuales son residuos de la explotación de minería aurífera aluvial. Los tipos de residuos corresponden a los lugares en los que fue posible llevar a cabo el muestreo, a través del proyecto de Fiscalización Minera, Convenio Interadministrativo de Colaboración entre la Universidad de Antioquia y la Gobernación de Antioquia. El criterio para continuar con el residuo como material precursor de activación alcalina fue un contenido de sílice superior al 60% en peso y un contenido superior al 5% en peso de alúmina, según las referencias [22,24,26,32,42–44,46]. De los cuatro tipos de residuos, se descartó usar las arenas negras (AN), ya que su contenido de sílice y alúmina era inferior a los límites mínimos establecidos. Inicialmente, se fabricaron morteros activados alcalinamente, utilizando los RM como precursor, y una mezcla de hidróxido de sodio y silicato de sodio como solución activadora. Para esta etapa del proyecto, se llevó a cabo un proceso de molienda de los RM, con el fin de obtener un tamaño de partícula y un área superficial específica similar a la del cemento. De esta forma, fue posible comparar la resistencia a la compresión de: morteros elaborados con residuos molidos, morteros preparados con residuos con granulometría original (en estado de entrega) y el mortero de referencia. Además, para los morteros fabricados con residuos molidos se hicieron sustituciones parciales por cemento como co-aglutinante. Se variaron las relaciones molares sílice/alúmina, óxido de sodio/sílice y agua/óxido de sodio, buscando la combinación que presentara la menor cantidad de emisiones por metro cúbico, en función del módulo de solución (Ms) y el porcentaje de óxido de sodio. De todas las combinaciones con los residuos como precursores (residuo con granulometría original, residuo molido y residuo molido con 10 y 20% de sustitución parcial por cemento Pórtland), se escogió la condición con la mayor resistencia a la

compresión a los 28 días. Con este criterio de selección se fabricó el CAA, añadiendo la variable de relación sólido/líquido, y calculando las emisiones y energía incorporada y la posible reducción de estos indicadores. Debido a que en los resultados preliminares no se logró el valor establecido para la resistencia a la compresión, se plantearon dos sustituciones parciales más con 30 y 40% de cemento. De estos resultados, la mezcla con 30% de sustitución (CFm30) superó los valores resistencia a la compresión tanto del mortero como del concreto de referencia.

Como resultado final se ofrece al sector constructor colombiano una alternativa a los concretos convencionales fabricados a partir de cemento Pórtland, buscando a través de la implementación de los CAA contribuir al compromiso de Colombia de la reducción de los GEI. Esta reducción no sólo daría respuesta al compromiso de Colombia frente a las cumbres del cambio climático, sino que también ayudaría con la preocupación ambiental de la reutilización de residuos mineros, que de otra manera terminarían transformándose en pasivos ambientales mineros. Sin embargo, la sustitución de concretos convencionales por los CAA a partir de residuos mineros (desarrollados en este trabajo), se encuentra sujeto a la necesidad del desarrollo de una nueva cadena de suministro de materias primas, el desarrollo de nuevos activadores y aditivos químicos, la aprobación regulatoria, el desarrollo de nuevos protocolos de prueba de durabilidad y un historial de seguimiento en servicio antes de que sean ampliamente adoptados por la industria, por lo cual el alcance de este proyecto se limitó al desarrollo y caracterización de CAA a partir de los residuos de minería estudiados.

Este informe se ha dividido en nueve capítulos distribuidos de la siguiente manera: en el capítulo I se presenta el soporte teórico y el estado del arte de la temática desarrollada, en el capítulo II se detalla la metodología empleada para el cumplimiento de los objetivos propuestos, en el capítulo III se presentan los resultados y el análisis de la cuantificación de la huella de carbono (HC) y la energía incorporada (EI) de la edificación seleccionada, en el capítulo IV se muestran los resultados de la caracterización de las materias primas empleadas para el desarrollo de los materiales activados alcalinamente, en el capítulo V se muestran los resultados y análisis de los morteros y concretos activados alcalinamente abordando sus características estructurales, mineralógicas y mecánicas, en el capítulo VI se realiza el análisis de la viabilidad técnica de la sustitución de concretos convencionales por concretos activados alcalinamente, en el capítulo VII se presentan algunos resultados complementarios que no se tuvieron en cuenta durante el planteamiento de la investigación pero era interesante abordar, en el capítulo VIII se presentan las conclusiones del trabajo, en el capítulo IX se muestran dos focos de investigación futuros y finalmente en el capítulo X se presentan las referencias bibliográficas empleadas para el desarrollo del estudio.

## **OBJETIVOS**

El objetivo general de este trabajo fue desarrollar concretos activados alcalinamente a partir de residuos sílico-aluminosos provenientes de zonas mineras, como alternativa para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y de energía incorporada en el sector constructor.

Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

## Introducción y Objetivos

---

- Desarrollar un modelo mediante el software UMBERTO NXT CO2 que permita la determinación de las emisiones de gases de efecto invernadero y de energía incorporada en el ciclo de vida de una edificación.
- Establecer las condiciones de diseños de mezcla de concretos activados alcalinamente, generados a partir de residuos sílico-aluminosos, a través de las relaciones molares sílice/alúmina, óxido de sodio/sílice y agua/óxido de sodio y la relación sólido/líquido.
- Analizar la viabilidad técnica y ambiental de la sustitución de concreto convencional por concreto activado alcalinamente, a partir de la resistencia a la compresión, la cantidad de emisiones de GEI y la energía incorporada.

# Capítulo 1

## MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

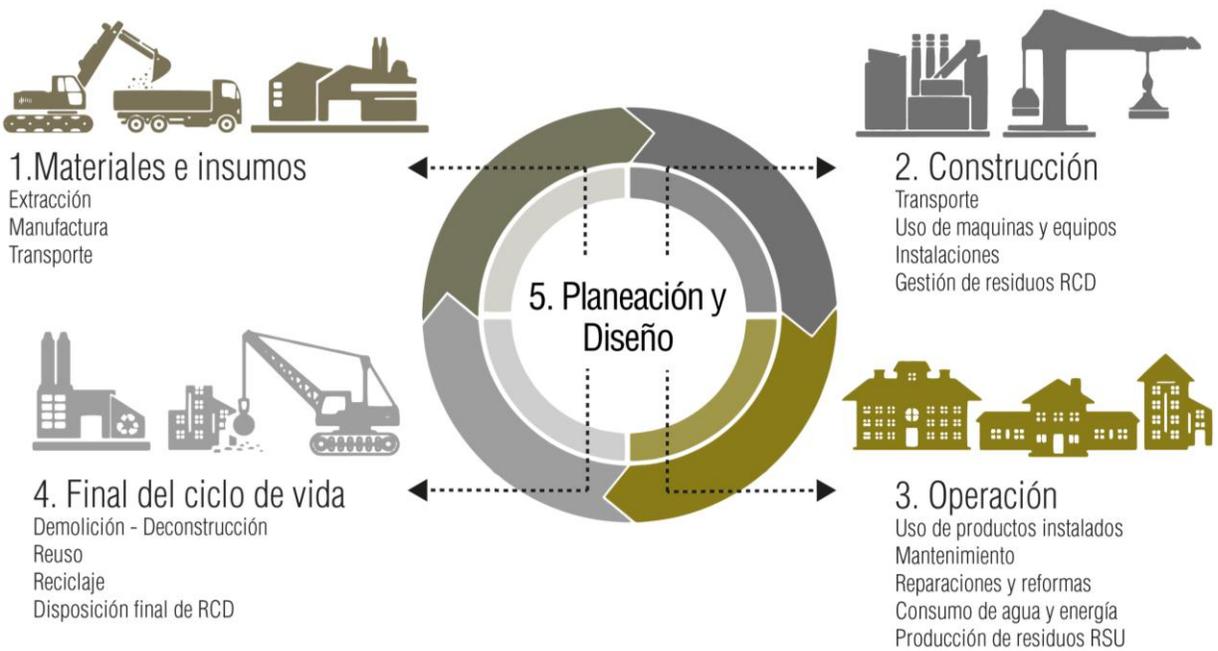
En este capítulo se hace una breve descripción de los conceptos y fundamentos teóricos básicos relacionados con los impactos ambientales asociados al sector de la construcción y su mitigación a través de la sinergia con el sector minero, en función del desarrollo de materiales fabricados a partir de residuos sílico-aluminosos procedentes de la industria minera. Se realiza una revisión en el contexto general para los gases de efecto invernadero en el sector constructor de Colombia, la situación minera en Colombia, los residuos mineros en la industria de la construcción, las emisiones asociadas a la fabricación de cemento Pórtland, los geocementos y los concretos activados alcalinamente a partir de residuos en general y a partir de residuos mineros.

### 1.1 CONTEXTO GENERAL PARA LOS GEI EN EL SECTOR CONSTRUCTOR EN COLOMBIA

En la actualidad se reconoce que el cambio climático originado por las actividades humanas constituye uno de los mayores desafíos ambientales que se pudiera interponer en el camino hacia un desarrollo sostenible. El problema radica en que cada vez son más evidentes las transformaciones climáticas determinadas por el aumento en la cantidad de GEI derivadas de la quema de combustibles fósiles, la deforestación, procesos industriales, etc. Existe una estrecha relación entre los GEI y el resultante calentamiento global y cambio climático, ya que los GEI atrapan las radiaciones entrantes del sol. Con el agotamiento de la capa de ozono día a día, un mayor volumen de radiación ultravioleta (UV) ingresa a la atmósfera. Como consecuencia del efecto invernadero, la radiación UV permanece atrapada en la atmósfera y, por lo tanto, conlleva un aumento en la temperatura del planeta tierra. Este aumento en la temperatura de la tierra se conoce como Calentamiento Global. Los GEI, como el dióxido de carbono, el metano, el óxido nítrico y algunos otros gases son los responsables de este fenómeno [75–78]. Si el calentamiento global continúa, el mundo estaría en peligro, ya que sus principales efectos e impactos son: 1) cambio climático, con el incremento de temperaturas en el planeta y el aumento de anomalías y eventos climáticos cada vez más significativos, 2) aumento en el nivel del mar, con el peligro inminente en ciudades y áreas costeras que puedan quedar sumergidas en un futuro cercano, 3)

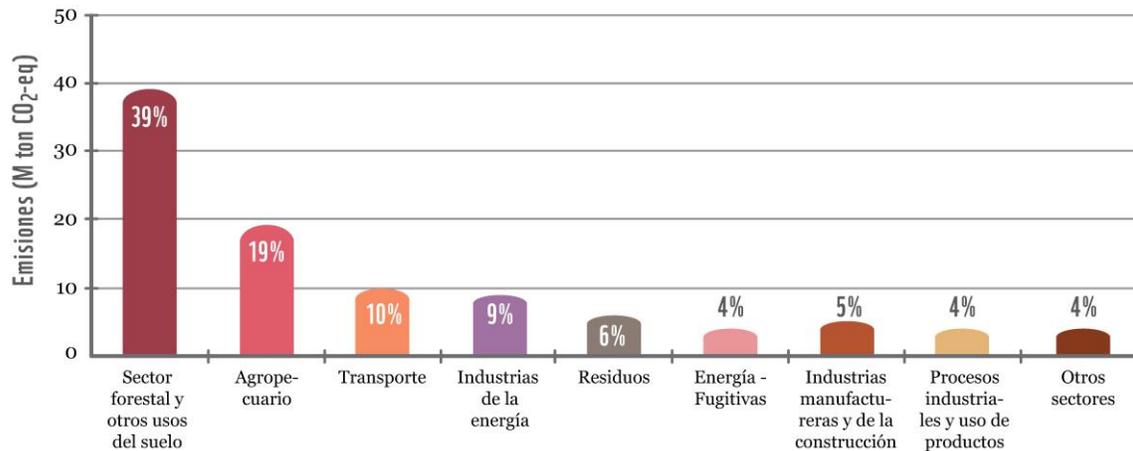
balance de agua, con el contraste de crisis por falta de agua en algunas zonas y el incremento de las precipitaciones en otras y 4) salud humana, con el incremento de la propagación de enfermedades tropicales [79].

Colombia es responsable del 0,46% de las emisiones de GEI a nivel global según datos de 2010, y se estima que para 2030 podría aumentar a 0,69% (cerca del 50%). A pesar que las emisiones en Colombia son bajas en comparación con las economías más desarrolladas, entre 1990 y 2012 la cantidad de emisiones sitúan al país entre los 40 países con la mayor responsabilidad histórica frente a la generación de GEI [1]. Aunque la industria de la construcción es crucial para el desarrollo socioeconómico global, los impactos ambientales de los procesos son cada vez más significativos. El ciclo de vida de la actividad constructiva consiste en cinco fases: 1) materiales e insumos, 2) construcción, 3) operación, 4) final del ciclo de vida, 5) planeación y diseño, donde se toman las decisiones que tendrán impacto sobre todas las demás fases (ver **Figura 1-1** [3]).



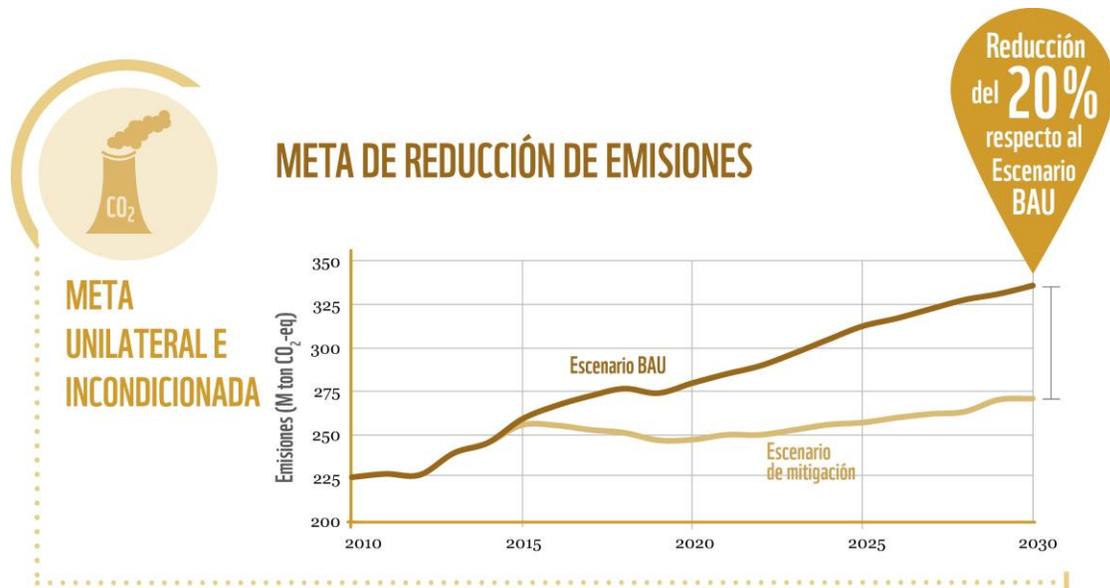
**Figura 1-1.** Ciclo de vida de las edificaciones [3].

Recientes estudios indican que el ciclo de vida de la construcción es responsable del 40-50% de GEI a nivel mundial [80], lo cual hace que este sector también resulte crucial para cumplir con las aspiraciones globales de mitigación del Cambio Climático. No obstante, este porcentaje está basado en datos de la actividad constructiva en países con climas estacionales y en economías desarrolladas, lo cual no necesariamente es válido para países tropicales con economías emergentes [81]. El inventario nacional de emisiones de GEI asigna un 5% para las industrias manufactureras y de la construcción. Sin embargo, bajo un enfoque de ciclo de vida, la actividad constructiva se relaciona con otros sectores económicos, tales como el transporte, responsable del 10% de las emisiones nacionales, la industria energética, responsable del 9% de las emisiones, la disposición de residuos, responsable del 6% de las emisiones, las energías fugitivas y los procesos industriales, cada uno de los cuales es responsable de un 4% de las emisiones nacionales (ver **Figura 1-2**) [2].



**Figura 1-2.** Proyecto Informe Bienal de Actualización [2].

El acuerdo de París sobre el Cambio Climático (COP21) [82], reafirmado durante las cumbres posteriores COP22 a COP24, supone un compromiso frente a la disminución de la cantidad de GEI en todos los sectores productivos. En este acuerdo Colombia se comprometió a la disminución de sus emisiones de GEI en un 20% con respecto a las emisiones proyectadas para el año 2030 (ver **Figura 1-3**) [1]. Para cumplir con este compromiso, es necesario crear una línea base de emisiones sectoriales con el fin de establecer metas y estrategias específicas en materia de mitigación. Antes de que Colombia se comprometiera con la reducción de emisiones, de 2013 a 2015 se establecieron más de 100 opciones de mitigación con base en los ocho Planes de Acción Sectorial y en el marco de la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (EDBC). Entre los principales sectores de la economía colombiana para implementar las medidas de mitigación de la COP21 se encuentran la agricultura, la silvicultura y otros usos de suelo, la industria en general, el sector de residuos, el sector energético, el sector de transporte y el sector constructivo [1]. Las principales medidas de mitigación presentadas en la COP21 por parte de Colombia se resumen en la **Tabla 1-1**. Sin embargo, para lograr una reducción cuantificable en el sector constructivo, es necesario conocer el total de emisiones aportado por cada una de las fases de su ciclo de vida, ya que incluye en porcentajes considerables otros sectores económicos [2].



**Figura 1-3.** El acuerdo de París. Escenario sin introducción de cambios (BAU) y escenario de mitigación para Colombia [1].

**Tabla 1-1.** Medidas de mitigación de GEI para los principales sectores económicos de Colombia durante la COP21 [1].

Sector económico	Medidas de mitigación
Agricultura, silvicultura y otros usos de suelo	Reducción de la deforestación, restauración ecológica (restauración, rehabilitación y recuperación), plantaciones forestales comerciales, sistemas agroforestales con alto potencial de captura de carbono, mejores prácticas de fertilización (cultivo de papa y arroz), ganadería sostenible (pastoreo racional, sistemas silvopastoriles intensivos), ordenamiento territorial.
Industria	Sustitución de carbón por biomasa, introducción de combustibles de menor intensidad de carbono, desarrollos tecnológicos en los procesos productivos que mejoran la eficiencia.
Residuos	Compostaje de residuos sólidos, captura y quema de metano en rellenos sanitarios.
Energía	Eficiencia energética en los sectores de demanda, medidas de mitigación en procesos de transformación y producción, portafolio de energías renovables (eólica, solar), sistemas de redes inteligentes, esquemas de generación con fuentes no convencionales y sistemas híbridos más estrategias de eficiencia energética para zonas no interconectadas, reducción de pérdidas de transporte de energía, participación de la demanda mediante esquemas de precios y de incentivos, gestión de metano en yacimientos y minas de carbón, captura y almacenamiento de carbono.
Transporte	Estándares de rendimiento y conducción verde, renovación de la flota de vehículos de carga, introducción de vehículos con nuevas tecnologías, uso de combustibles de menor intensidad de carbono, promoción del transporte público, sistemas públicos de bicicletas, desincentivos al uso del transporte privado, cobros por congestión, transporte multimodal (fluvial y férreo) y optimización del transporte de carga
Sector constructivo	Renovación de vivienda con criterios de carbono-eficiencia, nuevos materiales y mejores técnicas de diseño y construcción, ciudades sostenibles, sustitución de bombillos incandescentes, mejora en eficiencia de aires acondicionados y estufas a gas natural, reemplazo y chatarrización de neveras, uso de energía solar.

Para llevar a cabo la cuantificación de emisiones en cualquier sector económico, se introduce el concepto de la HC, el cual mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto. A nivel mundial el cálculo de la HC para el ciclo de vida de la construcción viene tomando cada vez más fuerza. En la **Tabla 1-2** se presenta una evaluación comparativa (“benchmarking”) internacional de huellas de carbono, calculadas a partir de las metodologías PAS (Publicly Available Specification) 2050 y GHG (Greenhouse Gas) Protocol, para el ciclo de vida de la construcción con los estudios más recientes. A nivel gubernamental-internacional, los principales promotores de este tipo de estudios de análisis de

ciclo de vida y huella de carbono han sido tradicionalmente el Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Grupo del Banco Mundial (WBG). Específicamente para Colombia ha sido la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el marco del reporte de emisiones. El impulso en las estrategias de mitigación ha sido promovido por la ECDBC, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) y la Estrategia Nacional de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques (REDD+). Teniendo en cuenta lo expuesto en la **Tabla 1-2**, los grupos de investigación han tenido una gran participación, caso contrario para el caso colombiano, en el cual sólo resalta el Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA) como promotor de este tipo de estudios con la publicación de factores de emisión para el transporte de personas y el consumo eléctrico. El “benchmarking” de la **Tabla 1-2** presenta algunos de los estudios revisados con publicaciones recientes; no obstante, la revisión realizada en este trabajo es más extensa [83–99].

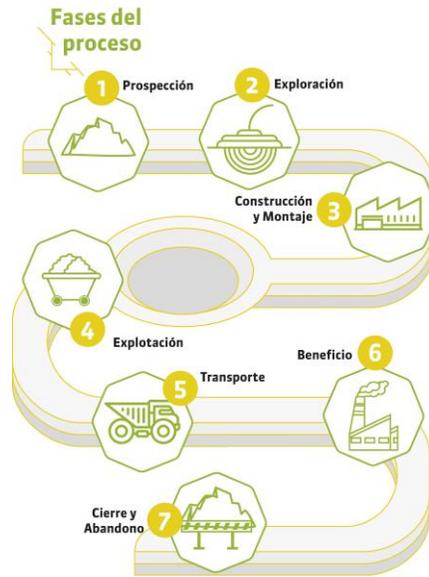
Por otra parte, de manera paralela al cálculo de los GEI, es posible determinar los consumos energéticos para el ciclo de vida del sector constructor. La energía incorporada es la energía consumida por todos los procesos asociados con la producción de un edificio, desde la extracción y el procesamiento de recursos naturales hasta la fabricación, el transporte y la instalación de los productos. La energía incorporada no incluye la operación y disposición del material de construcción. Estas fases son consideradas bajo el enfoque de ciclo de vida de la huella de carbono [7,100,101]. El cálculo de la EI es de particular importancia, debido a la necesidad que presentan las constructoras para certificarse a nivel nacional en construcción sostenible. Entre las certificaciones más importantes a nivel nacional resaltan la Certificación Leadership in Energy & Environmental Design (LEED) y la Certificación Excellence in Design for Greater Efficiency (EDGE), en donde la última viene tomando fuerza gracias al apoyo del Grupo Banco Mundial y su costo (20% del total de la LEED aproximadamente para proyectos estándar) [102,103].

**Tabla 1-2.** Evaluación comparativa “Benchmarking” internacional de huellas de carbono para el ciclo de vida constructivo.

Estudio	Locación	Año del estudio	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> por cada etapa del ciclo edificatorio						Tipología
			Extracción y manufactura de materiales	Transporte de materiales a obra	Fase constructiva	Fase de operación	Transporte de RCD	Disposición de RCD	
Salazar-Jaramillo et al. [7]	Cali, Colombia	2012	310,2		-	-	-	-	Sistema industrializado
			323,9		-	-	-	-	Mampostería estructural
			505,3		-	-	-	-	Mampostería confinada
Wu et al. [104]	Beijing, Shanghai, Guangzhou y Harbin, China	2017	921,0		3,1E-5	2.223	-	2,3E-4	Mampostería estructural “verde”
			704,0		3,0E-4	2.828	-	1,0E-3	Mampostería estructural “no verde”
			946,0		1,8E-4	4.301	-	6,8E-4	Sistema industrializado “verde”
			912,0		1,3E-4	6.756	-	4E-4	Sistema industrializado “no verde”
Su-Hyun et al. [83]	Seúl, Corea del Sur	2016	546,0	11,6	0,91	2.081,8	-	36,8	Sistema industrializado
Sinha et al. [84]	Estocolmo, Suecia	2016	76,0		-	-	-	-	Construcción en madera
			240,0		-	-	-	-	Mampostería estructural
Seo et al. [92]	Seúl, Corea del Sur	2016	743,0	19,3	33,3	-	0,47		Sistema industrializado y mampostería estructural simultáneamente
Moussavi et al. [93]	Atlanta, USA	2015	132,4 - 189,7	5,7	8,4 - 10,3	1.595,0 – 1.813,3	3,8 – 5,0		Construcción en acero
			131,8 – 204,4	9,4 – 13,2	12 – 16,1	1.465,2 – 1.278,2	5,9 - 7,9		Mampostería estructural

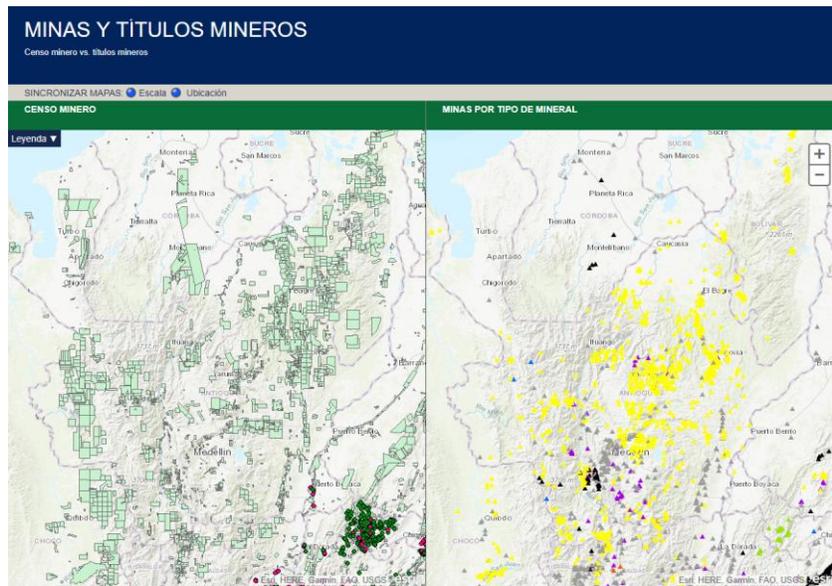
## 1.2 SITUACIÓN MINERA EN COLOMBIA

El sector minero colombiano se caracteriza por la producción especialmente de carbón, níquel, esmeraldas, oro y minerales para la industria de la de construcción. Este, ha representado en promedio el 2,2 % del PIB entre 2010 y 2015 y ha aportado el 19,6 % de las exportaciones y 16 % de inversión extranjera directa en el mismo periodo. En la **Figura 1-4** se presenta un esquema general de las fases del proceso del sector minero [105,106].



**Figura 1-4.** Fases del proceso del sector minero [105].

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) presenta desde sus sistemas de información, la distribución de minas y títulos mineros en las diferentes regiones de Colombia. El reporte presenta las características según el color del símbolo, el tipo de mina y los tipos de minerales que se pueden encontrar en las minas. El Departamento de Antioquia cuenta con una producción minera casi en su totalidad de mineral de caliza (color gris) y oro (color amarillo). Luego se encuentra la producción de carbón (color negro) y de minerales industriales (color morado), y en menor proporción de metales básicos (color azul). En la **Figura 1-5** se presenta en el lado izquierdo los diferentes títulos mineros y en el lado derecho la distribución de minas por tipo de mineral para el Departamento de Antioquia [107].



**Figura 1-5.** Distribución de minas y títulos mineros para el departamento de Antioquia [107].

Teniendo en cuenta la **Figura 1-5** y el reporte de la Agencia Nacional de Minería, en la **Tabla 1-3** se presenta una compilación del reporte de material procesado por municipio en el departamento de Antioquia durante el año 2017 para calizas, oro, plata, carbón, arenas, dolomita y arcillas en el departamento de Antioquia por municipio.

**Tabla 1-3.** Municipios con mayor tonelaje de producción de material minero en Antioquia [107].

Mineral	Municipio	Material procesado (Ton/año)	Mineral	Municipio	Material Procesado (Ton/año)	Mineral	Municipio	Material procesado (Ton/año)
Calizas	Sonsón	1.548.075	Calizas	San Luis	35.079	Plata	El Bagre	17.521
Oro	El Bagre	173.495	Arenas	Turbo	34.624	Carbón	Amagá	16.001
Oro	Remedios	104.145	Calizas	P.Triunfo	32.624	Oro	Amalfi	13.391
Oro	Segovia	90.428	Oro	Nechí	31.455	Arcillas	Fredonia	13.094
Arenas	Medellín	80.413	Oro	Cáceres	30.778	Carbón	Venecia	12.966
Plata	Segovia	67.981	Calizas	Amalfi	30.259	Arenas	Yondo	12.926
Carbón	Titiribí	66.665	Arenas	Carepa	28.874	Oro	Tarazá	12.689
Plata	Remedios	65.712	Oro	P. Berrío	27.802	Dolomita	San Luis	9.381
Oro	Zaragoza	60.651	Plata	Zaragoza	25.033	Dolomita	Amalfi	8.819
Arenas	Girardota	41.166	Calizas	Maceo	24.946	Arcillas	Venecia	5.004
Oro	Caucasia	37.804	Arenas	Titiribí	18.292	Carbón	Angelópolis	1.463

### 1.3 RESIDUOS MINEROS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

La EC se presenta como un sistema de aprovechamiento de recursos donde prima la reducción, la reutilización y el reciclaje de los elementos. Los beneficios ambientales de la EC se traducen en reducción de la extracción de materias primas, uso de fuentes de energía renovables, la reducción de residuos y emisiones, y la conservación y uso eficiente del agua. La vinculación entre gremios del sector productivo, como el constructor y el minero, resulta estratégico para lograr estos objetivos, ya que los residuos mineros pueden utilizarse como materia prima para fabricar materiales de construcción. Los RM son un problema ambiental importante que se está volviendo cada vez más serio con el incremento paulatino en la exploración de minerales y su consecuente disposición. Pueden definirse como residuos sólidos, acuosos o en pastas, que quedan tras las actividades de exploración, explotación e investigación, y se rigen por la legislación de minas. El principal efecto ecológico es generalmente la contaminación del agua, que surge de los procesos de degradación e hidrólisis de los residuos y la posterior descarga de agua contaminada con sólidos, metales pesados, reactivos de molino y compuestos de azufre que pueden alcanzar niveles freáticos. Otros de los grandes problemas asociados son [17,18,108,109]:

- El almacenamiento en escombreras que llega a formar elevadas montañas de residuos, lo cual incrementa los costos de producción, tiene una incidencia directa en la alteración del paisaje y presentan el riesgo de entrar en autocombustión con peligro de explosión, este último principalmente para residuos de minas de carbón.
- Búsqueda constante de nuevas materias primas por agotamiento y encarecimiento de las existentes, desaprovechando enormes cantidades de materiales que presentan un potencial de uso.
- Desaprovechamiento de la posible sinergia con otros sectores, perdiendo capacidad de diversificación y generación de nuevos puestos de trabajo, además olvidando que la reutilización de los residuos posee un valor agregado ambiental.

En relación a los RM, destaca la aparición de la figura de Pasivos Ambientales Mineros (PAM). A pesar que los PAM se refiere específicamente a los impactos ambientales generados por

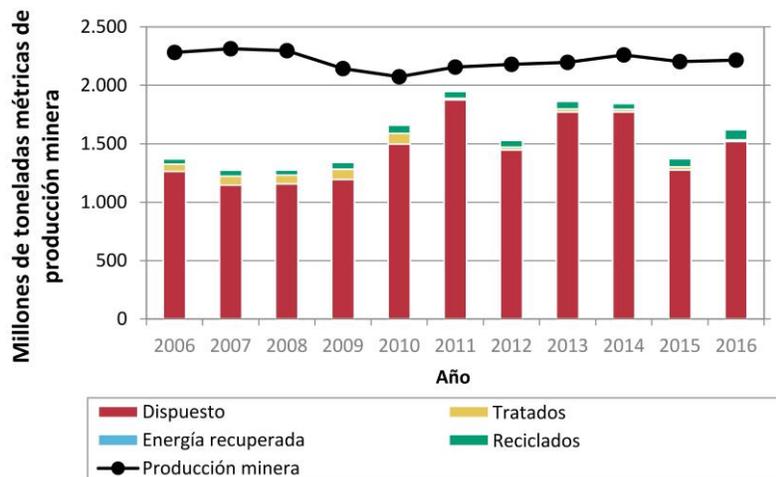
operaciones mineras abandonadas o inactivas [110], puede ser inferido que cuando los residuos mineros no se disponen correctamente, tienden a acumularse en el tiempo y pueden convertirse en PAM. En la actualidad a nivel europeo y norteamericano existen diversos programas de manejo para los RM y los PAM, que incluyen los propuestos por la Organización de las Naciones Unidas y la Unión Europea [111–113]. A nivel suramericano destacan Brasil, Bolivia, Perú y Chile con programas institucionales y algunas bases normativas orientados a la identificación, caracterización, evaluación y remediación de áreas contaminadas por medio de la ReLASC (Red Latinoamericana de prevención y gestión de Sitios Contaminados) que pueden servir como referencia para los RM y los PAM [110,114,115].

Para Colombia han existido algunos lineamientos relacionados a los RM y los PAM [115,116]:

- En el 2002, la UPME desarrolló una metodología de valoración de pasivos ambientales para el sector eléctrico.
- En el 2004, Yupará elabora un informe suramericano de PAM.
- En el 2007, Hincapié elabora un informe para la determinación de PAM, en conjunto con la Secretaría de Productividad y Competitividad del Departamento de Antioquia.
- En el 2009, González presenta su tesis de maestría, diseñando una metodología para la identificación de PAM.
- En el 2015, la UPME y el Ministerio de Minas y Energía (MINMINAS) presenta el informe para el manejo de vertimientos de minería.

Sin embargo, el Plan Nacional de Desarrollo Minero con Horizonte a 2025 [117] no contempla dentro de sus apartados un uso directo para los diferentes residuos generados por el sector minero.

La necesidad de encontrar un uso para los residuos mineros puede ser observada en la **Figura 1-6**, reportada por la US EPA (United States Environmental Protection Agency), en la cual si bien la producción minera de metales (como se informó en el Servicio Geológico de los Estados Unidos) se mantuvo relativamente constante de 2006 a 2016, la cantidad de residuos generados fue alta y la cantidad de residuos reciclados fue muy baja [118].



**Figura 1-6.** Gestión de residuos relacionados con la producción, Minería de Metales. Modificado a partir de [118].

Si bien es cierto que la **Figura 1-6** fue reportada para la producción minera de USA, en general se reconoce que la cantidad de residuos mineros generados puede ser muy variable en función de la eficiencia del proceso, el tipo de mineral explotado y la ubicación geográfica. Para carbón, por cada tonelada de mineral procesado, algunos autores como Wang et al [51] reportaron de 0,15-0,2 toneladas de residuos de carbón, Cong et al [49] mencionaron 0,10 toneladas de residuos por cada tonelada, Zhou et al [119] de 0,10-0,15 toneladas de residuos y Cui et al [120] que el valor puede ser de 0,15-0,2 toneladas de residuos. Para hierro, Ma et al [50] mencionaron que una tonelada de producción de hierro genera 2,5-3 toneladas de residuos. Para cobre, Edraki et al [121] reportaron que el volumen de residuos de mineral de cobre generados es de alrededor del 97-99 por ciento del mineral total procesado y Adiansyah et al [122] reportaron valores similares también para mineral de hierro, con porcentajes del 95-99 por ciento. Jiao et al [45] estimaron que extraer una tonelada de  $V_2O_5$  genera 120-150 toneladas de residuos.

Kinnunen et al [46] estima que a nivel mundial se producen aproximadamente 20-25 billones de toneladas de desechos sólidos mineros anualmente. Además, la acumulación de residuos de la extracción de minerales representa aproximadamente de 5 a 7 mil millones de toneladas de residuos, almacenadas en más de 3.500 presas [46]. Debido a la creciente preocupación por el cambio climático y los problemas mencionados que se encuentran asociados a la disposición de los residuos, en el sector de la construcción se pueden encontrar diferentes investigaciones relacionadas a la fabricación de concretos con RM activados alcalinamente [20–39,41–47], concreto poroso [48–51], cemento [52–61], cerámicos sinterizados [18,62–64] y concretos y morteros simples [65–74].

#### 1.4 EMISIONES ASOCIADAS A LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO

El cemento es un material pulverizado que se forma, por la adición de una cantidad apropiada de agua, una pasta conglomerante capaz de endurecer. Generalmente contiene óxido de calcio, sílice, alúmina y óxido de hierro. El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla en una cierta proporción y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión, a una temperatura de 1.300 a 1.500 °C, a la cual el material se sinteriza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como clínker. El clínker se enfría y a continuación, se adiciona un poco de yeso y en los últimos años, también se adiciona material puzolánico o cementantes suplementarios, los cuales se muelen hasta obtener un polvo fino; el producto comercial resultante es el cemento Pórtland, utilizado a gran escala en todo el mundo. La industria cementera es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de GEI, específicamente las emisiones de  $CO_2$ , siendo responsable del 5-8% de las emisiones totales globales. Las emisiones de  $CO_2$  en la industria del cemento provienen principalmente de la combustión de fósiles y de las calcinaciones de la piedra caliza para generar óxido de calcio [123–134].

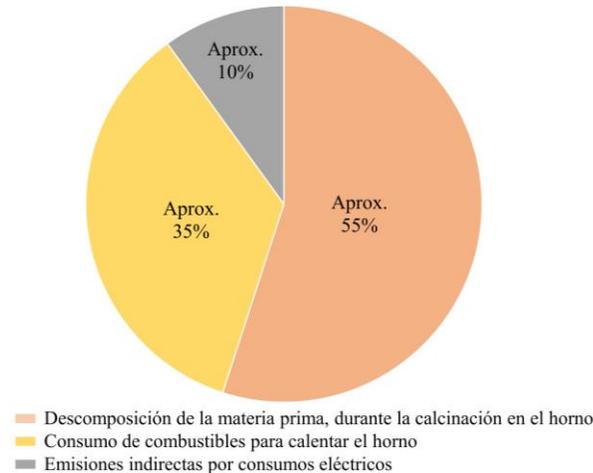
Diversos autores han asignado porcentajes a las diferentes etapas y procesos relacionados a la fabricación de cemento Pórtland [135–140]. Sin embargo, la IFC, entidad del WBG, en el año 2018 publicó las guías ambientales, sanitarias y de seguridad para la fabricación de cemento y cal [135]. En la guía, para la fabricación de cemento Pórtland, respecto al total de las emisiones se asignan, aproximadamente, los siguientes valores:

- 55% para la descomposición de las materias primas durante la calcinación en el horno, para la producción de clínker. Entre las materias primas se encuentran el carbonato de calcio y otros materiales como sílice, alúmina, óxidos de hierro, entre otros. De manera particular, la reacción química para la caliza, principal material aportante de carbonato de calcio y por ende de óxido

de calcio, consiste en  $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$  y libera aproximadamente 0,5 t de  $CO_2$  por cada tonelada de CaO producida. La descomposición de la caliza equivale aproximadamente al 50% del total de las emisiones.

- 35% para el uso de combustibles para calentar el horno. Entre estos se encuentran el uso de carbón, coque de petróleo, combustibles líquidos y desechos sólidos, gas natural, entre otros.
- El 10% restante se asigna a los consumos eléctricos. Dentro de ellos, la producción de cemento incluye el proceso de molienda y homogenización de la materia prima (3%), producción de clínker (2,5%) y producción final de cemento, incluyendo molienda final, homogenización y embalaje (4,5%), respecto al total de las emisiones.

En la **Figura 1-7** se presenta un esquema que resume las emisiones y porcentajes mencionados.



**Figura 1-7.** Esquema representativo de las emisiones asociadas a la fabricación de cemento Pórtland. Realizado a partir de [135].

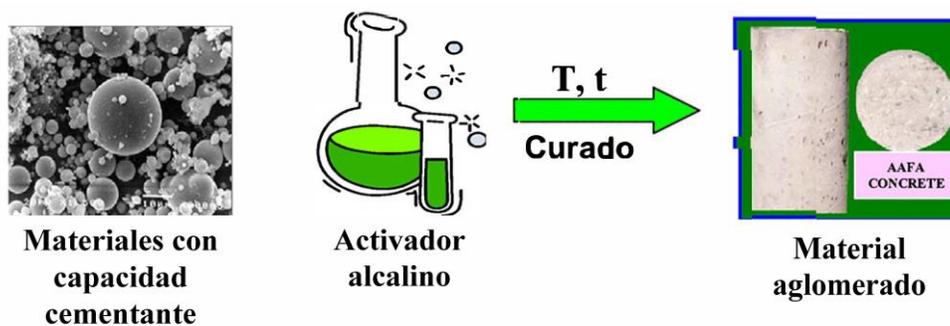
Las emisiones de  $CO_2$  dependen de la disponibilidad y composición de la materia prima, el tipo de combustibles (fósiles convencionales o alternativos utilizados), la eficiencia de los equipos y de la relación de clínker-cemento. Esta relación varía normalmente de 0,50 a 0,90 y la cantidad de  $CO_2$  generada por el proceso varía según la pérdida de las materias primas (piedra caliza) durante la calcinación. La cantidad de clínker necesaria para producir una cantidad determinada de cemento puede reducirse mediante el uso de materiales cementantes suplementarios como cenizas volantes, escorias de fundición y puzolanas naturales (por ejemplo, cenizas de cáscara de arroz y cenizas volcánicas). La adición de estos materiales al concreto no sólo reduce la cantidad de clínker requerido por tonelada de cemento producido, sino que también reduce la cantidad de material vertido (en el caso de subproductos industriales). Por lo tanto, los sustitutos del cemento pueden ofrecer una reducción en los impactos ambientales y los costos de materiales de construcción [123,124,127–129,141–143].

En la literatura se pueden encontrar valores para el factor de emisión del cemento que oscilan entre 0,82 y 0,95 t  $CO_2$ /t cemento producido [125,126,128,130,132–134]. Estos valores generalmente corresponden a estudios particulares llevados a cabo por diferentes investigadores. Bases de datos de factores de emisión europeas como las del Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida (Ecoinvent) reportan valores que oscilan entre 0,72 y 0,83 t  $CO_2$ /t cemento producido [6]. Para el caso de las principales cementeras que operan en el país, teniendo en cuenta los reportes del año 2017 con las emisiones brutas específicas (“gross”), los consumos energéticos y el factor

clínker/cemento, llevados a cabo bajo la metodología del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) [144], el factor de emisión puede ser estimado entre 0,72 y 0,97 t CO<sub>2</sub>/t cemento producido entre los años 2015 y 2017 [145–147]. Sin embargo, estos valores corresponden a los valores promedios de todas las plantas analizadas de cada cementera y fueron ajustados sólo en función de los factores de emisión eléctricos promedio para Colombia en el caso de los consumos energéticos. Por otra parte, el valor más cercano que se conoce para Colombia es el reportado por PNUD, UPME, Ecoingeniería [7], en el cual el valor oscila entre 1,089 y 1,1652 t CO<sub>2</sub>/t cemento producido. Si bien estos valores corresponden al año de estudio 2012 y se entiende que durante los últimos años se han llevado a cabo esfuerzos por disminuir las emisiones, se hace necesario realizar nuevos estudios que permitan conocer el factor de emisión para las cementeras colombianas.

### 1.5 GEOCEMENTOS Y CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

Los GC son materiales que presentan propiedades cementantes similares al cemento Pórtland. Sin embargo, a diferencia del cemento Pórtland que usa agua como sistema de activación, los GC presentan activación alcalina. El término de activación alcalina se refiere a la reacción de un aluminosilicato sólido (denominado "precursor") bajo condiciones alcalinas (inducido por el "activador alcalino"), para producir un aglomerante endurecido que se basa en una combinación de álcali-aluminosilicato hidratado y/o fases álcali-alcalinotérreo-aluminosilicato. El sólido y el líquido se pueden mezclar en proporciones variables, dependiendo de la finura del material sólido. La pasta resultante puede fraguar y endurecerse como un cemento Pórtland; en este caso, puede emplearse para la formación de concretos activados alcalinamente, como se observa en la **Figura 1-8** [8,9,12,15,16,148,149]. El origen de los GC se remonta a los trabajos de Feret en 1939 y Purdon en 1940, quienes utilizaron escorias de fundición de alto horno mezcladas con cemento y combinaciones de álcali-escoria, respectivamente. El primer autor en reportar activación alcalina fue Glukhovsky en 1965 quien acuñó el término "*cemento alcalino*". Por su parte, Davidovits en 1981, reportó la activación alcalina de caolinita calcinada con piedra caliza y dolomita, generando las marcas comerciales *Geopolímero*, *Pyrament*, *Geopolycem* y *Geopolymite*. Sin embargo fue en el año 1986 cuando se introdujo el término "Geocemento" (GC), gracias al autor Krivenco con su estudio dirigido a entender los principios y propiedades del sistema Me<sub>2</sub>O-MeO-Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [16,148,150]. De manera análoga al concreto convencional a base de cemento Pórtland, a partir del geocemento y activadores alcalinos se fabrican concretos activados alcalinamente [10–12,16,41,123,127,128,148,149,151–168].



**Figura 1-8.** Descripción esquemática de la activación alcalina de un componente con capacidad cementante para la formación de concreto activado alcalinamente. Modificado a partir de [149].

En relación a los principales elementos constituyentes de diferentes materiales precursores, se pueden encontrar varios tipos de geles cementantes, responsables de la resistencia a la compresión de los materiales fabricados (**Tabla 1-4**). Para el caso del cemento Pórtland, en el cual el principal elemento constituyente es el Ca, la activación se genera cuando el material entra en contacto con el agua, formando un silicato de calcio hidratado (C-S-H), un gel amorfo que contiene tobermorita y/o jenita. En las escorias de fundición de alto horno, en las cuales los principales elementos constituyentes son el Ca, Si y Al, la activación ocurre cuando el producto entra en contacto con un medio alcalino, formando un aluminosilicato de calcio hidratado (C-A-S-H). Para las cenizas volantes y el metacaolín, en las cuales los principales elementos constituyentes son el Si y Al, la activación, también, se da al entrar en contacto con un medio alcalino formando, en este caso, un aluminosilicato de sodio (N-A-S-H) o de potasio (K-A-S-H) hidratado, según el tipo de activador. Los geles C-A-S-H, N-A-S-H y K-A-S-H, consisten en geles amorfos que contienen unidades zeolíticas en su nanoestructura [41]. Tanto en las escorias de fundición como en las cenizas volantes y el metacaolín, las altas resistencias a la compresión reportadas se atribuyen no sólo a la composición química sino también a la cantidad de fase amorfa presente, asociada a sílice amorfa [41,128,152,159,169,170]. Al-Shathr et al [170] estudió la relación entre la fase amorfa de la sílice y la resistencia a la compresión de tres tipos de cenizas volantes, dos tipos de metacaolín y un tipo de escoria de fundición de alto horno. El mismo autor reportó lo siguiente: la cantidad de sílice amorfa presente en los materiales precursores es la responsable de la resistencia a la compresión en los geopolímeros, la sílice cristalina no contribuye al proceso de geopolimerización, la cantidad de calcio presente contribuye en el aumento de la resistencia a la compresión a edades tempranas y un incremento en el contenido de Na puede mejorar esta propiedad [170].

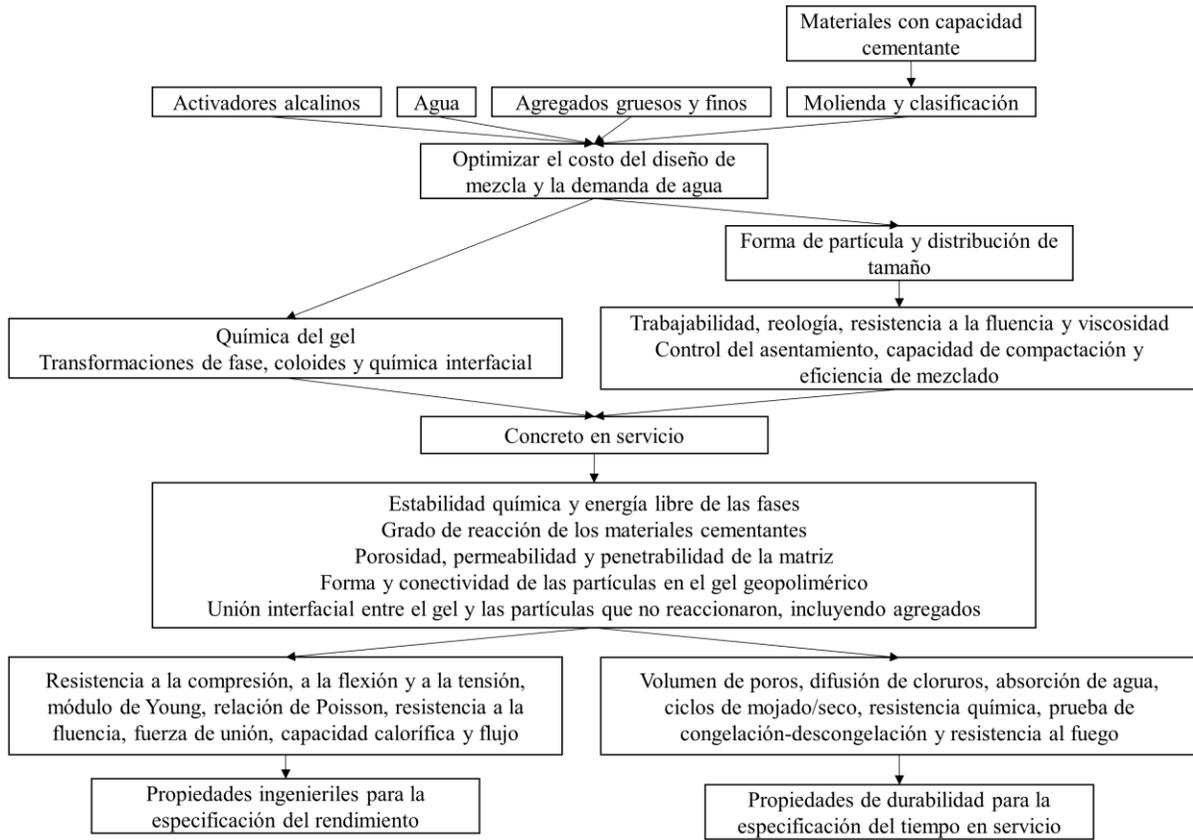
**Tabla 1-4.** Comparación entre los geles presentes en los principales materiales con capacidad cementante [41].

	C-S-H	C-A-S-H	N-A-S-H (K-A-S-H)
Nombre	Silicato de calcio hidratado	Aluminosilicato de calcio hidratado	Aluminosilicato de sodio (o de potasio) hidratado
Precursor	Cemento	Escorias de fundición	Cenizas volantes Metacaolín
Activación	Agua	Alcalina	Alcalina
Principales elementos constituyentes	Ca	Ca, Si y Al	Si y Al
Principal producto de la reacción	Gel amorfo constituido por tobermorita y jenita	Gel amorfo constituido por unidades zeolíticas nanoestructuradas	

De manera simplificada, el proceso de activación alcalina puede describirse en términos de un modelo polimérico similar a los esquemas propuestos para las reacciones que conducen a la formación de ciertas zeolitas: el proceso de activación se inicia con el contacto entre las partículas sólidas y la solución alcalina, lo cual genera la formación de un componente amorfo, liberando aluminatos y silicatos probablemente como monómeros. Estos monómeros reaccionan para formar dímeros, los cuales, a su vez, continúan reaccionando para formar trímeros, y así sucesivamente. Cuando la solución alcanza la saturación, precipita un gel aluminosilicato. Inicialmente, es un gel rico en aluminio denominado Gel 1, el cual es una fase metaestable o intermedia. A medida que avanza la reacción, se disuelven más grupos Si-O, y se incrementa el contenido de Si en el medio y aumenta, gradualmente, la proporción de este elemento en el gel precursor zeolítico o Gel 2. El



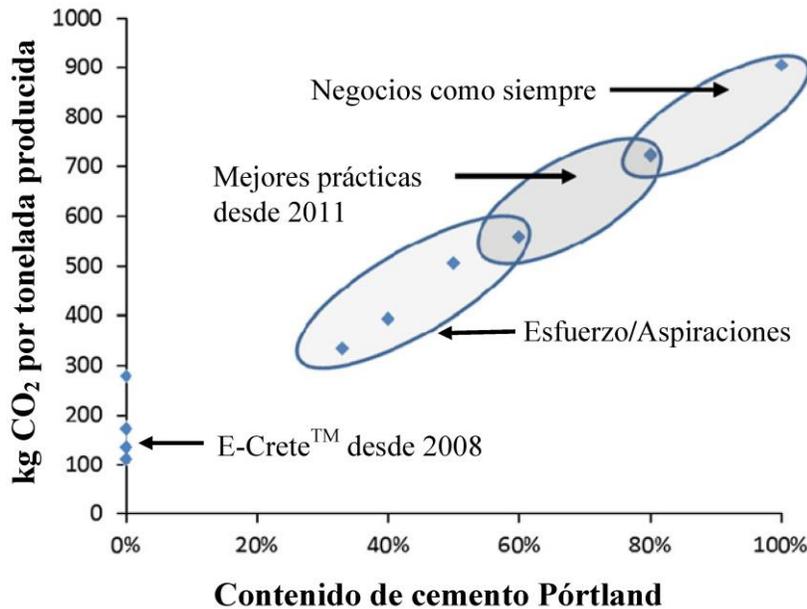
componentes y depende de la disponibilidad y localización de estos [8–11,14,16,41,128,148,149,159].



**Figura 1-10.** Diagrama conceptual que muestra las interrelaciones entre el diseño de la mezcla, la química del gel, la caracterización de la matriz, las propiedades de ingeniería y la durabilidad del concreto activado alcalinamente. Modificado a partir de [128,151].

Los GC y CAA, por su parte, muestran una amplia gama de factores de emisión, sin embargo, se reconoce que el factor de emisión total es considerablemente inferior al de los concretos a base de cementos Pórtland ordinarios. Dadidovits et al [165] fueron los primeros autores en abordar las emisiones de dióxido de carbono de GC, indicando que generan sólo 0,184 t de CO<sub>2</sub> por tonelada de aglomerante. Duxson et al [162] no confirmaron estos números, sin embargo reportan que las reducciones pueden ser hasta el 50%. Duxson and Van Deventer [41] más tarde reportaron reducciones del 80% en relación cemento-geocemento y reducciones del 60% en comparación concreto-concreto geopolimérico durante un estudio conducido por la Fundación NetBalance para el geopolímero comercial E-Crete. En la **Figura 1-11** se presenta una comparación entre diferentes materiales cementantes como una función del contenido de cemento Pórtland y claramente se observa la disminución en la cantidad de emisiones para el caso de los concretos geopoliméricos E-Crete [128,151]. McLellan et al [173] por su parte reportaron una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero del 44-64% al utilizar GC en comparación al empleo de cemento Pórtland. Algunos autores como Habert y Turner y Collins [174] consideraron que las emisiones para GC podrían ser incluso mayores que los cementos convencionales, ya que los activadores como el silicato de sodio tienen un alto impacto ambiental. No obstante Dadidovits et al [175] mencionaron en su publicación que los cálculos de la huella de carbono del silicato de sodio en los

trabajos de Habert y Turner y Collins [174] están equivocados, ya que estos autores usaron las emisiones de carbono para un contenido de sólidos del 100%, en lugar del valor real de la solución de silicato diluido (45% sólido), lo cual significa que se necesitan más estudios para confirmar la huella de carbono real de los CAA [128].



**Figura 1-11.** Emisiones de CO<sub>2</sub> de varios cementantes como una función del contenido de cemento Portland. Modificado a partir de [128,151].

Al igual que el caso del concreto convencional a base de cemento Portland, el factor de emisión total del CAA depende de la ubicación y disponibilidad de los materiales que lo componen. La discrepancia entre los diferentes autores se debe probablemente al tipo de fabricación de los materiales que componen el CAA, el cual a su vez se relaciona con el factor de emisión de cada material y por lo tanto en el factor de emisión total. Sin embargo, en general se reconoce que el factor de emisión del CAA es considerablemente inferior respecto al concreto convencional. En términos de propiedades mecánicas y durabilidad, los CAA compiten con los concretos convencionales [9,10,13,15,16,41,128,150,155,156,158,159,176–178]. No obstante, muchos de estos concretos alternativos requieren una nueva cadena de suministro de materias primas, el desarrollo de nuevos aditivos químicos, la aprobación regulatoria, el desarrollo de nuevos protocolos de prueba de durabilidad y un historial de seguimiento en servicio. Todas estas variables deben ser evaluadas antes de que los CAA sean ampliamente adoptados por la industria, por lo cual se hace necesario determinar la viabilidad de su implementación a nivel local [128].

Las investigaciones han señalado que los CAA ofrecen propiedades mecánicas superiores, desarrollo de resistencia rápida en comparación con el cemento Portland (OPC), resistencia al ataque de agentes corrosivos e inmovilización eficiente de contaminantes de RM. Además, la unión de contaminantes reduce el riesgo de lixiviación y los impactos negativos subsiguientes sobre el medio ambiente y hace que la utilización del material sea ambientalmente segura [24,46]. Los RM presentan una fuente precursora potencial para los CAA: los minerales más abundantes en la corteza terrestre son aluminosilicatos (es decir, feldespatos alcalinos), que también se refleja en las

composiciones de los residuos. Sin embargo, la reactividad alcalina de los RM es generalmente baja, y presenta el aspecto más crítico en la activación de residuos basados en activación alcalina.

## 1.6 CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE A PARTIR DE RESIDUOS MINEROS

Los RM se presentan como una fuente potencial de precursores para generar concretos a partir de activación alcalina porque están constituidos por los minerales más abundantes en la corteza terrestre como son los aluminosilicatos. Sin embargo, su reactividad alcalina es, generalmente baja, y esta variable es el aspecto más crítico en la activación alcalina de este tipo de residuos y en algunos casos genera la necesidad de algún tipo de tratamiento previo. Diferentes clases de pretratamientos pudiesen aumentar la reactividad de los RM para la activación alcalina, entre los cuales destacan los térmicos, los mecánicos, los termoquímicos y los químicos. En relación a los impactos ambientales y la disminución de la huella de carbono, el tratamiento mecánico es de especial interés. Los RM rara vez presentan un tamaño de partícula inferior a los  $100 \mu\text{m}$  y, por lo tanto, para producir una alta reactividad, es posible que se requiera un proceso específico de conminución para incrementar el área superficial (debido a la disminución del tamaño de partícula) y/o una reducción de la cantidad de fases cristalinas, asociadas a un incremento de material amorfo. Los demás procesos, como el tratamiento térmico, por ejemplo, aumentan considerablemente la huella de carbono [46].

En función de la reactividad, los RM actúan como GC y/o como agregado. Debido a lo anterior, los RM producto de la explotación de carbón, hierro, cobre, tungsteno, vanadio, etc., pueden servir como precursores o pueden necesitar materiales que funcionen como co-aglutinantes para la activación alcalina (por ejemplo, cenizas volantes o escorias de fundición de alto horno). Diversos estudios se han llevado a cabo para la fabricación de CAA a partir de RM [20–39,41–47]. Ahmari et al [42] estudiaron, inicialmente, la viabilidad de utilizar RM de cobre para la producción de ladrillos ecológicos basados en la tecnología de activación alcalina. Posteriormente los mismos autores [26] continuaron investigando la durabilidad y el comportamiento de lixiviación de bloques de CAA fabricados con residuos de cobre. Los resultados mostraron que los bloques de CAA cumplieron con los requerimientos de las normas ASTM y que hubo poca pérdida de peso y una alta inmovilización de metales pesados, atribuido a la red de polímeros inorgánicos. Kiventerä et al [32] analizaron la activación alcalina de RM sulfúricos de un sitio de extracción de oro, la activación se hizo con una solución de NaOH y se utilizó escoria comercial granulada de alto horno (GCBFS) como co-aglutinante. Los resultados mostraron que la activación alcalina de los RM permite la fabricación de CAA con suficiente resistencia a la compresión, como para ser usados en varias aplicaciones: rellenos en sitios mineros o como materia prima en la industria de la construcción. Además, en un trabajo posterior, Kiventerä et al [38] evaluaron la inmovilización de metales pesados a través de activación alcalina de los residuos anteriores, y detectaron que ocurre una inmovilización casi completa de los metales pesados presentes y que la eficiencia de inmovilización mejora cuando se aumentan los tiempos de curado. Duan et al [27] evaluaron el uso de residuos de hierro en la fabricación de bloques de CAA, activados con soluciones de NaOH y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y utilizaron cenizas volantes como co-aglutinante y, luego, los sometieron a ciclos térmicos. Los resultados indicaron que la presencia de RM mejoró las propiedades analizadas. Se incrementó, principalmente, la resistencia a la compresión hasta valores de los 50 MPa antes de los ciclos térmicos y los valores se superaron, considerablemente, después de los ciclos térmicos con respecto a los valores establecidos para los bloques de referencia. Además, en un trabajo paralelo,

Duan et al [23] utilizaron el mismo residuo con el co-aglutinante para fabricar un geopolímero poroso y evaluar la eliminación de Cu (II) de aguas residuales. En este trabajo, los investigadores lograron valores de eficiencia de remoción del 98,3%. Jiao et al [45] utilizaron RM de vanadio ricos en sílice con cenizas volantes como co-aglutinante para fabricar geopolímeros termoestables, y alcanzaron resistencias a la compresión con valores de 60 MPa a los 900 °C. Pacheco et al [35] investigaron la activación alcalina de RM de tungsteno con sustitución del 10% en peso con hidróxido calcio. En este caso, se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de casi 80 MPa en todas las relaciones molares evaluadas para los concretos fabricados.

Debido a la novedad de la inclusión de los RM, en todos los artículos se estudiaron las fases de hidratación del cemento y la toxicidad por lixiviación para garantizar la seguridad ambiental de los CAA elaborados empleando RM. Además, en la gran mayoría de los estudios revisados se reportaron resistencias a la compresión que alcanzaban o superaban los 30 MPa, esto lleva a pensar en una elevada cantidad de aplicaciones estructurales para la industria de la construcción local. En general, la literatura reconoce que los CAA presentan contenidos porcentuales en el (los) precursor (es) de sílice superiores al 50% en peso y 15% en peso en alúmina [179–186], sin embargo, algunos autores han fabricado materiales activados alcalinamente a partir de RM con contenidos de sílice en el precursor superiores al 60% en peso de sílice y con 5% en peso de alúmina [22,24,26,32,42–44,46]. Estos autores utilizaron otros materiales diferentes a los RM como precursor de la activación alcalina, como las cenizas volantes o las escorias de fundición de alto horno.

## 1.7 CONTEXTUALIZACIÓN EN COLOMBIA

### 1.7.1 Antecedentes y factores de emisión

A nivel local en el Valle de Aburrá, Colombia, se han llevado a cabo estudios para la determinación de la cantidad de GEI emitidos anualmente; sin embargo, aún se desconoce la cantidad de emisiones asociadas a la actividad constructiva bajo el enfoque de ciclo de vida [187]. Para llevar a cabo esta determinación es necesario conocer los factores de emisión tanto de los diferentes materiales como de las variables en general relacionadas al sector constructor. Ecoingeniería en conjunto con el PNUD y la UPME presentaron en el año 2012 el informe final titulado “*Determinación de propiedades físicas y, estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones colombianas*” [7]. El estudio se enmarcó principalmente en Cali y su área de influencia fue el Valle y el norte del Cauca.

El informe presenta el consumo energético total (MJ/t) y los factores de emisión totales (t CO<sub>2</sub>/t) para las etapas de extracción y fabricación de los materiales de la actividad edificatoria, que en consumo representan entre el 90-95% del total. Estos materiales son: Agregados gruesos, agregados finos, arena de río, cemento, ecocemento, agua, cerámica cocida tradicional, cerámica decorativa y sanitaria, acero, cobre, cal, yeso (estuco), pinturas, vidrio y teja de fibrocemento, entre otros. En el estudio resaltan los factores de emisión del cemento y el geocemento, este último denominado Ecocemento y fabricado a partir de caliza y un activador alcalino, llamado Adición K-Ecológica. En el caso del cemento, por cada tonelada de material producido por vía húmeda, el factor de emisión corresponde a 1,1652 t CO<sub>2</sub> y por cada tonelada de material producido por vía seca corresponde a 1,089 t CO<sub>2</sub>. Para el caso del Ecocemento, el factor de emisión corresponde a 0,2084 t CO<sub>2</sub> por cada tonelada de material producido y para la Adición K-Ecológica corresponde a 0,1178 t CO<sub>2</sub> por cada tonelada de material producido [7].

Otros factores de emisión reportados a nivel colombiano son los relacionados a los combustibles fósiles (diésel y gasolina). Para las emisiones directas, asociadas al uso de combustibles, se utilizan los factores de emisión presentados en el informe de la Federación Colombiana de Combustibles (FECOC) [188]. Para las emisiones indirectas de los combustibles, asociadas a la producción, transporte, refinación y transporte de combustible refinado, los factores de emisión pueden estimarse a partir de la información publicada por ECOPEPETROL [189]. En relación al consumo eléctrico, el factor de emisión puede encontrarse en el informe de la UPME [190].

### 1.7.2 Etapas de consumo de concreto en el proceso edificatorio

En general, en un proyecto edificatorio, para la etapa constructiva se pueden encontrar seis subetapas diferentes, que consisten en preliminares asociados al diseño, movimientos de tierra para la adecuación del terreno, y las etapas de subestructura (cimentaciones), estructura y acabados asociados al proceso constructivo. Sin embargo, asociado al consumo de concretos y morteros, se pueden encontrar tres etapas diferentes con los siguientes elementos constructivos:

- Elementos de subestructura (cimentaciones): Losas de cimentación, pilas, zapatas, pedestales, vigas de fundación, ciclópodos y solados.
- Elementos de la estructura: Bloques de concreto estructurales, columnas, vigas aéreas, losas, muros, grouting y morteros de pega.
- Elementos no estructurales: Dinteles, sillares, cuelgas, talones, cunetas, lagrimales, prefabricados, bloques de concreto no estructurales, acabados en concreto y morteros de pega.

Para el caso de los elementos de la subestructura y la estructura, los concretos pueden ser premezclados o preparados en obra [3].

### 1.7.3 Concretos a partir de residuos mineros

Por otra parte, diversos estudios se han llevado a cabo para la fabricación de concretos y morteros a partir de residuos mineros en Colombia [68–70,72,74]. Caballero et al [21] fabricaron geopolímeros a partir de residuos de minería de oro a través de sustituciones parciales de cemento por los residuos, encontrando que los geopolímeros preparados a partir de la sustitución casi completa del cemento Pórtland tipo I y curados a 70 °C durante 12 h, mostraron los valores más altos de resistencia a la compresión, cercanos a los 45 MPa. Amezcuita et al [65] fabricaron concretos convencionales a partir de residuos de carbón colombiano, cumpliendo con la resistencia de diseño propuesta. Campillo et al [66] elaboraron morteros convencionales a partir de residuos generados en el proceso de beneficio de minerales auríferos colombianos, y reportaron que se puede llegar a sustituciones del 10-20% para resistencias de diseño aceptables [3]. Si bien es cierto que se ha estudiado la influencia del uso de residuos mineros como agregados en concretos y morteros simples en función de una dada resistencia de diseño, su implementación como agregados no genera una disminución relevante en los GEI, ya que se continúa utilizando cemento Pórtland como material cementante. Además, son pocos los estudios que se han llevado a cabo para evaluar la durabilidad de este tipo de concretos y morteros [67,71]. La necesidad de llevar a cabo este tipo de estudios, radica en la poca capacidad de inmovilización de metales pesados del cemento Pórtland y las reacciones químicas de los metales pesados con el cemento que pudiesen afectar las propiedades mecánicas en el tiempo [22,26,44].

Como se puede observar, existe una pertinencia en la reutilización de los residuos generados de la explotación minera. Particularmente el sector de la construcción resulta en un gran aliado, teniendo en cuenta la necesidad mundial de incorporar la economía circular como parte integral de su política pública y mitigar los impactos ambientales asociados a ambos sectores. Sin embargo, se hace necesario profundizar el conocimiento en el área y conducir investigaciones que permitan un uso eficiente de los residuos mineros y eviten que se conviertan en pasivos ambientales mineros.

# Capítulo 2

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este capítulo tiene como objetivo describir la metodología empleada para calcular la huella de carbono de la edificación elegida y desarrollar concretos activados alcalinamente a partir de residuos sílico-aluminosos, con el fin de establecer la viabilidad técnica y ambiental de sustituir los concretos convencionales que utilizan cemento Pórtland como aglutinante y determinar si existe una disminución significativa en las emisiones. Para ello, el trabajo se dividió en cinco (5) etapas: la primera (1<sup>ra</sup>), referente a la cuantificación de la huella de carbono a partir de la información suministrada por la constructora y su comparación con la obtenida mediante los planos arquitectónicos, estructurales y de instalaciones técnicas del proyecto; la segunda (2<sup>da</sup>), la evaluación en función a la caracterización de los residuos mineros y el establecimiento del criterio para continuar con el residuo como material precursor de activación alcalina; la tercera (3<sup>ra</sup>) parte, relacionada con la fabricación y caracterización de morteros activados alcalinamente donde se compara la influencia del tamaño de partícula en la activación alcalina y su respectiva comparación con morteros convencionales de referencia; la cuarta (4<sup>ta</sup>) parte, la cual consistió en la fabricación y caracterización de concretos activados alcalinamente y su respectiva comparación con concretos convencionales de referencia; y finalmente, la quinta (5<sup>ta</sup>) parte, donde se efectuó el análisis de la viabilidad técnica y ambiental de la sustitución de concretos convencionales por los concretos activados alcalinamente.

Un resumen de la metodología se muestra en la **Figura 2-1**.

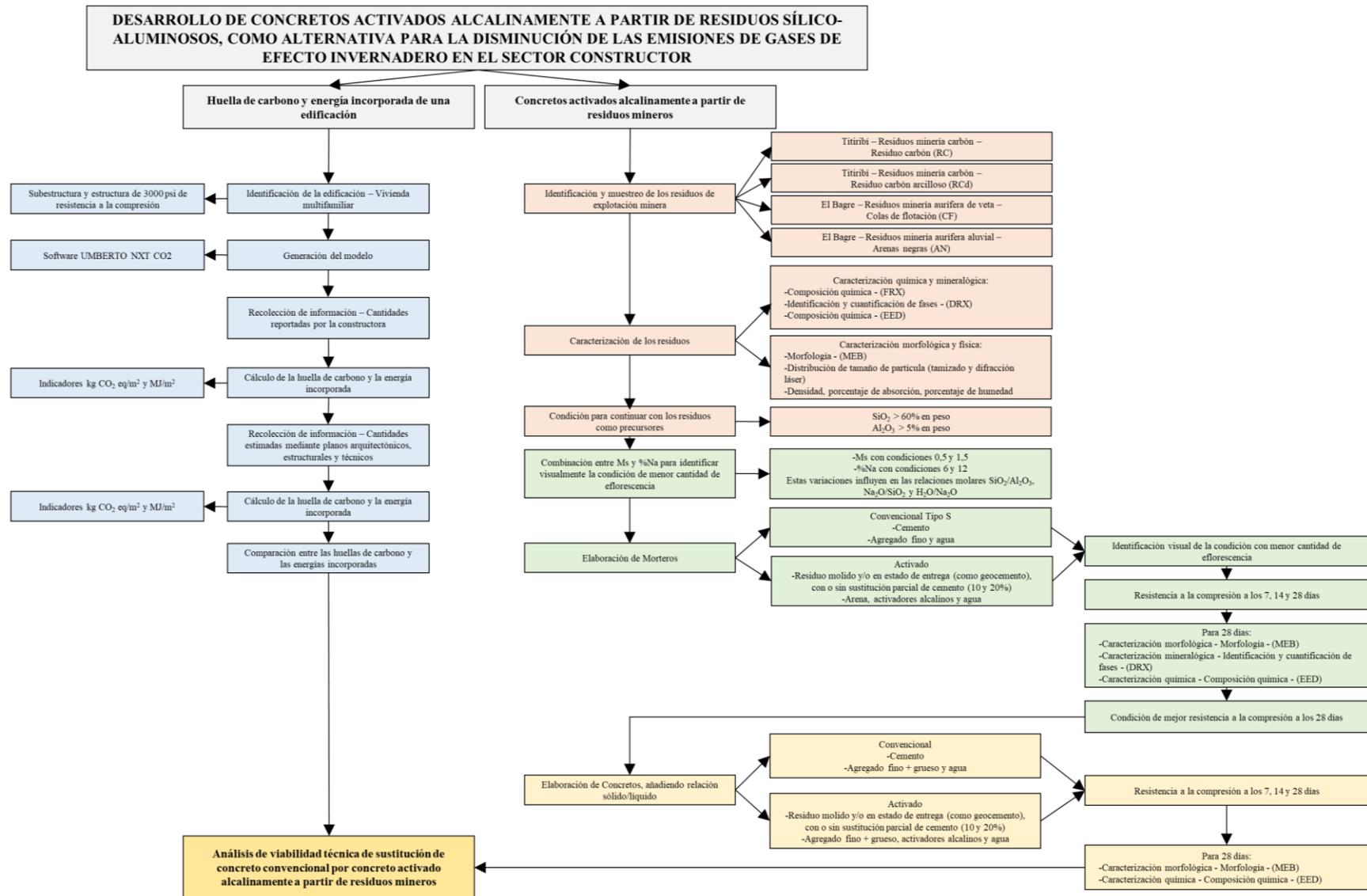


Figura 2-1. Metodología experimental.

## 2.1 CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO Y LA ENERGÍA INCORPORADA DEL PROYECTO

El cálculo de la huella de carbono se ha dividido en seis etapas: (1) selección del proyecto, (2) factores de emisión utilizados en el modelo, (3) desarrollo del modelo, (4) recolección de la información, (5) supuestos del modelo y (6) estimación de materiales a partir de los planos del proyecto. A partir de estas seis etapas, se llevaron a cabo cuatro cálculos: (A) huella de carbono mediante la información suministrada por la constructora, que incluye la cantidad y disposición de RCD (B) huella de carbono estimada en función a la información exacta contenida en los planos arquitectónicos, estructurales y de especificaciones técnicas, (C) huella de carbono estimada también en función de la información contenida en los planos, pero incluyendo los porcentajes de pérdida planteados por la empresa para cuantificar los RCD y (D) huella de carbono estimada también en función de la información contenida en los planos, pero incluyendo el manejo real de RCD de la constructora. Finalmente, se hizo una comparación de las huellas enfocada al consumo de concreto (premezclado y preparado en obra). Esta comparación se llevó a cabo con el fin de validar la gestión de la información de las cantidades de obra y determinar si el consumo de cemento reportado por la constructora presentaba diferencias significativas respecto a lo que se esperaba a partir de los planos y el manejo de RCD. Para el cálculo de la energía incorporada se llevó a cabo el mismo procedimiento que para la huella de carbono. El indicador final para la huella de carbono fue  $\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$  y para la energía incorporada  $\text{MJ/m}^2$ .

### 2.1.1 Selección del proyecto

Esta actividad fue elaborada en alianza con la empresa PVG Arquitectos, compañía dedicada a la construcción sostenible en el ambiente construido. Durante el desarrollo de uno de sus proyectos, fue posible obtener información relacionada a las cantidades de materiales consumidos en la ejecución de un proyecto constructivo, además de los planos arquitectónicos, estructurales y técnicos. Por temas de confidencialidad, la constructora se denominó Constructora X y el proyecto se nombró Proyecto X. El proyecto corresponde a una edificación de tipología vivienda multifamiliar en sistema aparcado. Esta tipología es considerada como el sistema constructivo más relevante a nivel nacional [187]. El proyecto cuenta con  $9.568,67 \text{ m}^2$  construidos, distribuidos en 22 pisos y la zona de parqueaderos, un consumo de agua de  $3.198 \text{ m}^3$  y una duración de construcción de 19 meses, con fecha de inicio noviembre de 2014. Este proyecto se eligió estratégicamente, ya que todos los concretos estructurales (preparados en obra o premezclados) presentan una resistencia a la compresión de 21 MPa. Esta es una característica para edificaciones de altura en el medio local, la cual no representa altas solicitudes, desde el punto de vista de resistencia mecánica. Además, facilitaba el cálculo de dosificación y cantidades de materiales y permitió enfocarse en la etapa de diseños de mezclas de concreto activados alcalinamente con RM. No obstante, la norma NSR-10 [191] en su Título C indica que la resistencia mínima que debe cumplir un concreto estructural es de 17 MPa. El cálculo se llevó a cabo para la Torre 2.

### 2.1.2 Etapas analizadas

Para el cálculo de la huella de carbono ( $\text{kg CO}_2 \text{ eq.}$ ), a nivel mundial se reconocen el protocolo PAS 2050 y el GHG Protocol y ambos se vinculan a las normas colombianas NTC-ISO 14040 y 14064-1 [5,192,193]. Para este estudio se utilizó un método estándar que vincula los protocolos mencionados [194]. Para la energía incorporada (MJ) se utilizaron el mismo modelo y las mismas

variables. Las emisiones de GEI derivadas de la operación y final del ciclo de vida de edificaciones no forman parte del alcance del presente estudio; el estudio se concentra únicamente en las fases 1 y 2 del ciclo de vida de la edificación, como se describe a continuación.

Procesos correspondientes a la fase 1 del ciclo de vida.

- Extracción de materia prima.
- Fabricación de materiales de obra.
- Transporte de materiales a obra.

Procesos correspondientes a la fase 2 del ciclo de vida.

- Transportes internos.
- Uso de maquinarias y equipos.
- Instalaciones
- Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva.
- Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva.

A fin de facilitar la evaluación, las fases 1 y 2 de ciclo de vida con los procesos mencionados, se re-estructuraron en las siguientes etapas:

- a) Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra.
- b) Transporte de materiales a obra.
- c) Etapa constructiva.
- d) Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva.
- e) Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva.

### 2.1.3 Factores de emisión

#### 2.1.3.1 *Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra*

Para la etapa de extracción y manufactura de materiales, se debe discriminar entre materiales nacionales e internacionales. En la **Tabla 2-1** se presentan los factores de emisión de los materiales nacionales tomados para el cálculo, discriminados entre consumos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub> [7].

**Tabla 2-1.** Factores de emisión para las etapas de extracción de materia prima y fabricación de materiales nacionales [7].

Material	Suma extracción y fabricación	
	Consumos energéticos (kJ/kg)	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /kg)
Acero	11.020	2,6994
Agregados finos	402,5	0,0139
Agregados gruesos	85,1	0,0025
Agua	5	0,0089
Arena de río	0	0
Cal	7.410,3	0,7776
Cemento (promedio entre vía seca y húmeda)	9.161,3	1,1271
Cerámica cocida tradicional	2.420	0,2165
Cerámica decorativa y sanitaria	843	0,8034
Cobre	97.622	8,5601
Estuco (Yeso)	1.031,5	0,2014
Pinturas	5.108	0,4043
Policloruro de vinilo	66.009	7,1587
Teja fibrocemento	8.741	0,0486
Vidrio	21.789	1,6705

Gracias a estudios previos desarrollados por PVG Arquitectos [3], se puede estimar que los materiales de mayor importación son el acero, el cobre y el vidrio. A partir de las bases de datos internacionales, como Ecoinvent [6] y GaBi [195], se pueden utilizar actividades asociadas a los materiales mencionados para suponer los procesos de extracción y fabricación. Además, se debe tener en cuenta los factores de emisión reportados por las bases de datos, en kg CO<sub>2</sub> eq/kg\*km, asociados al transporte oceánico hasta una frontera colombiana de los materiales importados. Estos valores se presentan en la **Tabla 2-2**.

**Tabla 2-2.** Factores de emisión para las etapas de extracción de materia prima y fabricación de materiales internacionales y para el transporte transoceánico [6,195].

Nombre del factor de emisión	Nombre del factor de emisión en Ecoinvent	Suma extracción y fabricación	
		Consumos energéticos (kJ/kg) [195]	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /kg) [6]
Acero importado	Steel product manufacturing, average... [RER] and steel, electric, un- and low-allowed...[RER]	29.500	2,23
Cobre importado	(Copper product manufacturing, average...[RER] and copper, primary...[GLO])	70.600	5
Vidrio importado	Flat glass, coated, at plant [RER]	17.900	1,09
Nombre del factor de emisión	Nombre del factor de emisión en Ecoinvent y GaBi	Transporte internacional	
		Consumos energéticos (kJ/kg*km) [196]	Emisiones CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /kg*km) [6]
Transporte transoceánico	Transoceanic freight ship [OCE]	3,0	0,01

### 2.1.3.2 Transporte de materiales a obra

Para la etapa de transporte hasta la obra, se proponen dos modos de trabajo. El primero se refiere al uso de información de las bases de datos disponibles y el segundo se refiere a la aproximación del consumo de combustible de los vehículos transportadores de materiales y de RCD. Es importante tener en cuenta durante esta etapa que no sólo se relaciona el transporte de ida, también

se debe tener en cuenta el transporte de regreso. También se debe tener en cuenta el transporte desde el lugar de fabricación hasta el centro de distribución y desde ese lugar hasta la edificación.

Primera metodología: A nivel internacional, para el transporte de carga, se utilizan factores de emisión en kg CO<sub>2</sub>/t\*km o consumos energéticos en MJ/ t\*km. De nuevo estos factores se pueden utilizar a partir de las bases de datos de Ecoinvent [6]; sin embargo, las condiciones topográficas a nivel nacional se desestiman en el uso de este tipo de factores de emisión internacionales.

Segunda metodología: El consumo de combustible debe tener en cuenta emisiones directas e indirectas. Para las emisiones directas, asociadas al uso de combustibles, se utilizaron los factores de emisión presentados en el informe de la FECOC [188]. Para las emisiones indirectas de los combustibles, relacionadas con la producción, el transporte, la refinación y el transporte de refinado, los factores de emisión fueron tomados de Martínez et al [189]. Una vez estimado el consumo de combustible, se puede multiplicar por el factor de emisión y de esa manera obtener las emisiones y la energía incorporada. En la **Tabla 2-3** se presenta los resultados de la sumatoria de las emisiones indirectas y directas para los factores de emisión y consumos energéticos de la gasolina y el diésel comercial.

**Tabla 2-3.** Factores de emisión y consumos energéticos para los combustibles [188,189].

Nombre del factor de emisión	Factor de emisión (kg CO <sub>2</sub> /gal)	Consumos energéticos (kJ/gal)
	(Emisiones directas e indirectas)	
Diésel B10 (Mezcla comercial)	11,85	22.370

### 2.1.3.3 Etapa constructiva

Durante la etapa constructiva se tienen en cuenta, de nuevo, los factores de emisión asociados al consumo de combustible. En esta fase en particular, se toma el consumo de combustible por parte de las diferentes máquinas que trabajan in situ (mezcladoras portátiles, vibradoras y bombeadoras de concreto principalmente). También se introduce un factor de emisión nuevo, en relación a las máquinas que trabajan in situ pero funcionan con electricidad, y en general para el consumo eléctrico de la obra. En este caso el factor de emisión corresponde al promedio durante el tiempo de ejecución del proyecto, con un valor de 0,2183 kg CO<sub>2</sub>/kWh y reportado por la UPME [190].

### 2.1.3.4 Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva.

Esta etapa se trabaja de manera idéntica a la etapa de transporte de materiales a obra.

### 2.1.3.5 Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva.

Finalmente, para la etapa de disposición y aprovechamiento de RCD, a partir de las bases de datos de Ecoinvent [6], se utilizaron actividades asociadas a las principales disposiciones de residuos. Al respecto, se consideraron procesos generales como el aprovechamiento en un centro especializado, el aprovechamiento por terceros, la disposición en escombrera, la disposición en relleno sanitario y la disposición de residuos peligrosos. En la **Tabla 2-4** se reportan los factores de emisión para cada uno de estos procesos.

**Tabla 2-4.** Factores de emisión asociados a las disposiciones y aprovechamientos de los RCD [6].

Proceso general	Subproceso (materiales)	Nombre del factor de emisión en Ecoinvent*	Factor de emisión (kg CO <sub>2</sub> /kg)
Centro de aprovechamiento	Concretos y morteros, cemento, ladrillos, fibrocemento y yeso	disposal, building, brick, to sorting plant [CH]	0,01
		disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to sorting plant [CH]	0,02
		disposal, building, concrete gravel, to sorting plant [CH]	0,01
		disposal, building, concrete, not reinforced, to sorting plant [CH]	0,01
		disposal, building, mineral plaster, to sorting plant [CH]	0,02
		disposal, building, reinforced concrete, to sorting plant [CH]	0,02
Escombrera	Concretos y morteros, cemento, ladrillos, fibrocemento y yeso	disposal, building, concrete, not reinforced, to final disposal [CH]	0,01
		disposal, building, reinforced concrete, to final disposal [CH]	0,02
		disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal [CH]	0,01
		disposal, building, brick, to final disposal [CH]	0,01
		disposal, building, cement-fibre slab, to final disposal [CH]	0,02
		disposal, building, mineral plaster, to final disposal [CH]	0,01
	Madera	disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal [CH]	0,02
Metálicos	disposal, building, reinforcement steel, to final disposal [CH]	0,07	
Terceros	Metálicos	disposal, building, reinforcement steel, to sorting plant [CH]	0,06
	Embalaje de cartón	disposal, packaging cardboard, 19,6% water, to inert material landfill [CH]	1,37
	Plásticos	disposal, building, polyethylene/polypropylene products, to final disposal [CH]	3
		disposal, plastics, mixture, 15,3% water, to sanitary landfill [CH]	0,09
		disposal, building, Pvc sealing sheet, to final disposal [CH]	2,09
	Pintura	disposal, paint, 0% water, to inert material landfill [CH]	7,13E-03
Vidrios	disposal, glass, 0% water, to inert material landfill [CH]	7,13E-03	
Relleno sanitario	Orgánicos	disposal, municipal solid waste, 22,9% water, to sanitary landfill [CH]	0,56
Residuos peligrosos	Residuos Peligrosos	disposal, building, paint remains, to final disposal [CH]	3,56
Residuos utilizados en la misma obra	Residuos total en la misma obra (out)/Sólo para llevar correcto el balance de masa		0

\*Se presentan los factores de emisión con el nombre en inglés, ya que aparecen de esta manera en la base de datos.

## 2.1.4 Desarrollo del modelo

Para el cálculo de las emisiones se utilizó el software UMBERTO NXT CO<sub>2</sub> suministrado por la empresa PVG Arquitectos [3]. La ejecución del software requirió del diseño de un mapa de procesos para un modelo con 302 variables. Se empleó solo un flujo de referencia y un flujo manual. En la **Figura 2-2** se muestra el modelo utilizado. Los cuadros azules corresponden a los diferentes procesos del sistema, los círculos verdes a entradas a los procesos y los círculos rojos a salidas. De izquierda a derecha los procesos analizados fueron:

- Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra, en color verde.
- Transporte de materiales a obra, en color amarillo.
- Etapla constructiva, en color azul.
- Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva, en color rojo.
- Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva, en color violeta.

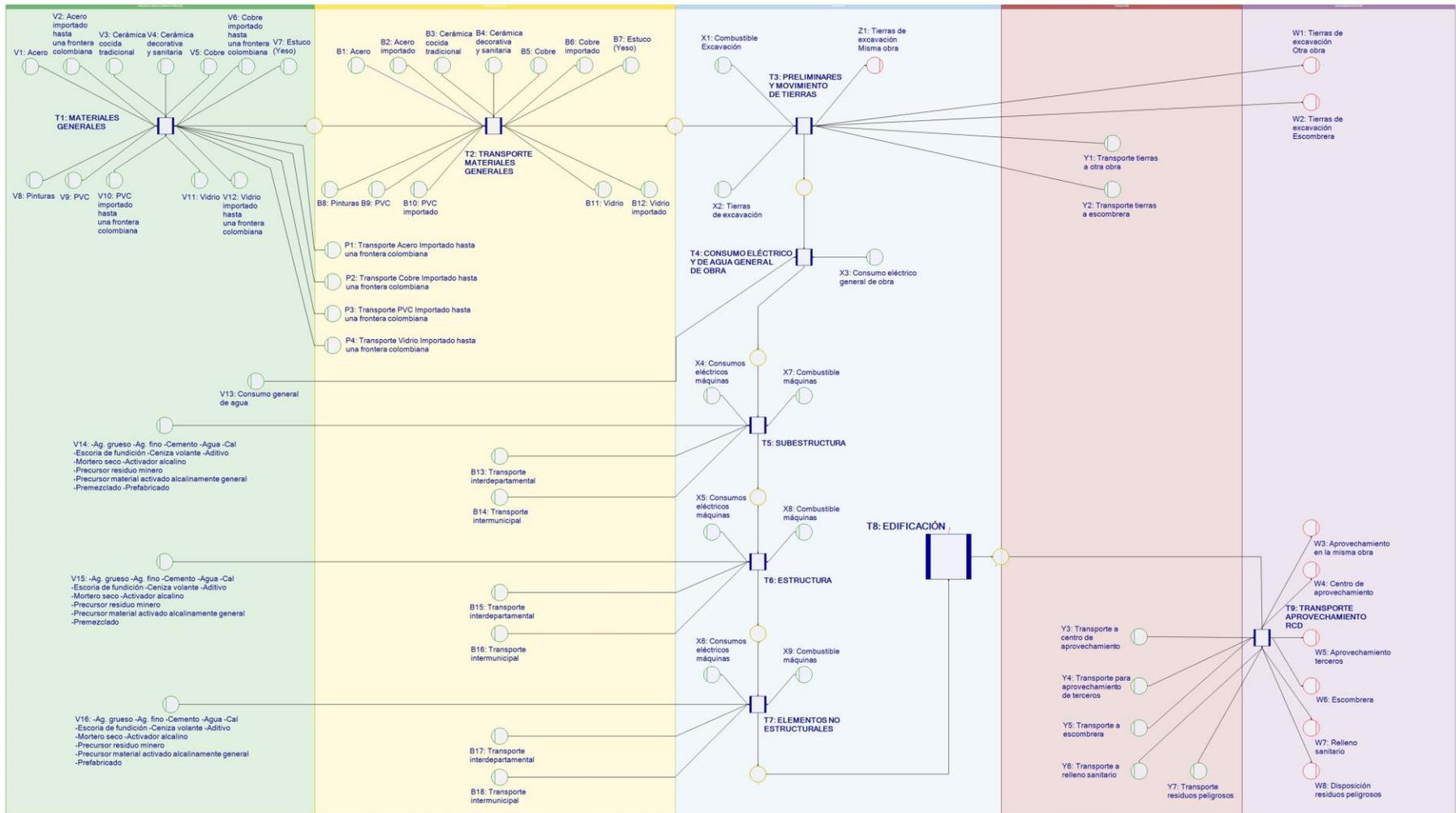


Figura 2-2. Esquema de la simulación mediante el software UMBERTO NXT CO2.

Una descripción de la ilustración del modelo es presentada en la **Tabla 2-5**.

**Tabla 2-5.** Descripción de la ilustración del modelo general.

Fase	Procesos	Entradas	Salidas	Emisiones asociadas
Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra	T1	V1 a V12		Emisiones asociadas a la extracción y manufactura de los materiales generales, tanto a nivel nacional como internacional de materiales generales: Acero, cerámica cocida tradicional, cerámica decorativa y sanitaria, cobre, yeso (estuco), pinturas y vidrio.
	T3 a T22	V13 a V16		Emisiones asociadas a la extracción y manufactura de los materiales para concreto: Agregados gruesos, agregados finos, cemento, agua, cal, escoria de fundición, ceniza volante, aditivo, mortero seco, <i>activador alcalino residuo minero, precursor residuo minero</i> , precursor material activado alcalinamente general, concreto premezclado y prefabricados.
Transporte de materiales a obra	T1	P1 a P4		Emisiones asociadas al transporte oceánico hasta una frontera colombiana para materiales importados.
	T2 a T7	B1 a B18		Emisiones asociadas a combustibles de vehículos transportadores.
	T2			<b>Flujo manual.</b>
Fase constructiva	T3 a T7	X1, X7 a X9		Emisiones asociadas a combustibles de máquinas de excavación, adecuación del suelo, mezcladoras portátiles, equipos de bombeo y máquinas vibradoras.
	T4 a T7	X3 a X6		Emisiones asociadas a energía eléctrica, tanto para las mezcladoras portátiles como para las máquinas vibradoras.
	T8			<b>Edificación: Flujo de referencia.</b>
Transporte de RCD	T9	Y1 a Y7		Emisiones asociadas a combustible de vehículos transportadores.
Disposición/Aprovechamiento de RCD	T9		W1 a W8	Emisiones generadas por la disposición de diferentes residuos.

### 2.1.5 Recolección de la información

A la Constructora X se le entregó un archivo de Excel, en el cual suministró la información requerida de la obra. A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las diferentes hojas utilizadas para recolectar la información.

Hoja 1. Corresponde al suministro de cantidades de materiales utilizados en t o m<sup>3</sup> (no incluye agregados y cemento), el lugar de procedencia y el consumo de combustible por parte de los vehículos durante el transporte hasta la obra.

Hoja 2. Corresponde al suministro de cantidades de concreto premezclado en m<sup>3</sup>, el lugar de procedencia, la resistencia de diseño y el consumo de combustible de los camiones mezcladores. El diseño de mezcla también debía suministrarse en esta tabla.

Hoja 3. Corresponde al suministro de cantidades de agregados y cemento para concretos y morteros en t o m<sup>3</sup>, el lugar de procedencia y el consumo de combustible por parte de los vehículos durante el transporte hasta la obra.

Hoja 4. Corresponde al suministro del consumo de combustible y las toneladas o m<sup>3</sup> de material removido (tierras de excavación) de las diferentes máquinas que trabajan in situ.

Hoja 5. Corresponde al suministro de los consumos (combustible o energía) de las diferentes máquinas utilizadas para mezclar, bombear y/o vibrocompactar concretos y morteros, ya sean preparados en fábrica o en obra.

Hoja 6. Corresponde al reporte de los consumos eléctrico y de agua total durante la obra.

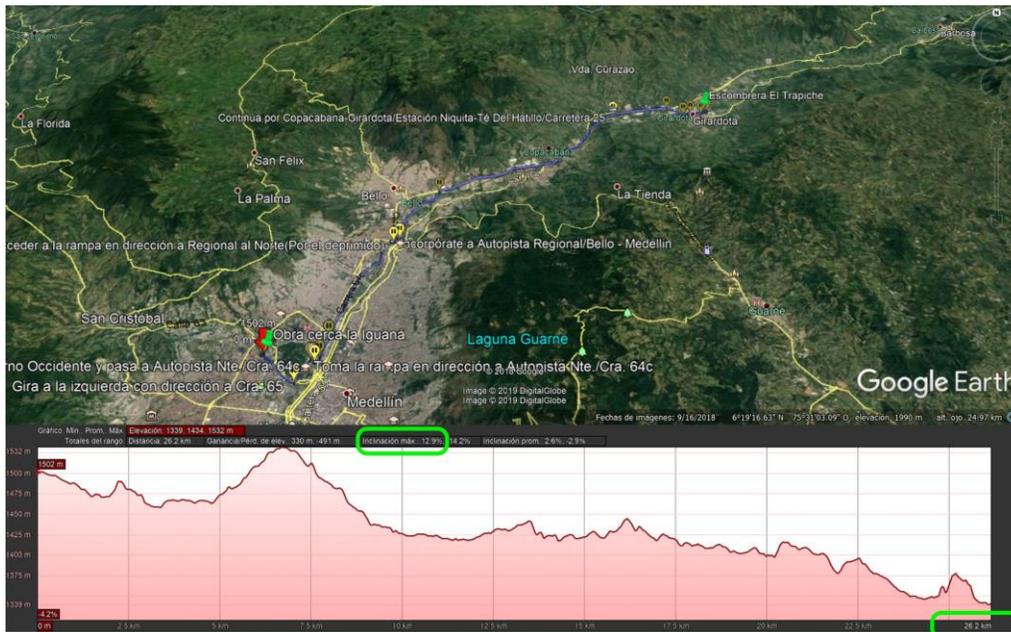
Hoja 7. Corresponde al suministro de los tipos y cantidades ( $t$  o  $m^3$ ) de RCD generados durante la construcción, el lugar de disposición final y el consumo de combustible de los vehículos transportadores.

## 2.1.6 Supuestos del modelo

### 2.1.6.1 Análisis estadístico bayesiano para la aproximación en los consumos de combustibles de volquetas

Para la constructora resultó imposible registrar el consumo de combustible en todos sus trayectos. Como solución se tuvo un acercamiento con la Asociación de Volqueteros Unidos de Antioquia (A.V.A) y se procedió a establecer un modelo bayesiano que permitiera generar una función de consumo de combustible. Se establecieron las siguientes variables para el consumo de combustible: la pendiente máxima de la topografía del terreno, las toneladas de material transportado y el modelo del vehículo.

Para establecer la pendiente máxima en función de la topografía del terreno, se utilizó el software Google Earth, usando el perfil de elevación de las rutas. La cantidad de combustible se midió desmontando el tanque del vehículo tanto antes de iniciar el recorrido como luego de llegar a su destino. A continuación se muestra un ejemplo del manejo de las rutas y los perfiles de elevación mediante Google Earth (ver **Figura 2-3**). Para una ruta de transporte de RCD entre una obra cerca de la Iguaná y la escombrera el Trapiche, la distancia aproximada es de 26,2 km y la pendiente máxima es 12,9%.



**Figura 2-3.** Perfil de elevación para ruta hipotética de transporte de RCD entre una obra cerca de la Iguaná y la escombrera el Trapiche. Distancia 26,2 km y pendiente máxima 12,9%. [3].

A través del software se generaron las rutas de transporte, las cuales fueron seguidas por diferentes volquetas. Se llevaron a cabo 13 experimentos, con diferentes rutas y diferentes modelos de vehículos. Es importante resaltar que el Protocolo PAS 2050 y el GHG Protocol establecen que, para el transporte de materiales, se debe tener en cuenta tanto el desplazamiento hasta el lugar de

destino con material de carga, como el desplazamiento hasta el lugar de partida sin material de carga. Para cada una de las rutas, en la **Tabla 2-6** se presentan los resultados.

**Tabla 2-6.** Resultados del experimento.

Ruta	Transporte de ida				Transporte de regreso			Modelo del vehículo (año)
	Pendiente Máxima (km)	Cantidad de material transportado (toneladas)	Consumo de combustible (galones)	Galones/(Ton*km)	Pendiente Máxima (km)	Consumo de combustible (galones)	Galones/km	
Ruta 1	3,4	27,0	4,0	0,0442	3,2	3,0	0,9493	2008
Ruta 2	3,4	30,0	4,5	0,0447	3,7	3,5	0,9562	2008
Ruta 3	5,4	28,0	7,0	0,0461	4,6	4,5	0,9720	2009
Ruta 4	5,4	28,0	7,0	0,0461	4,6	4,5	0,9720	2009
Ruta 5	3,3	29,0	4,0	0,0422	4,0	3,5	0,8832	2014
Ruta 6	6,9	30,0	8,5	0,0408	5,1	4,5	0,8832	2014
Ruta 7	7,2	30,0	9,0	0,0417	6,2	5,5	0,8811	2014
Ruta 8	7,5	29,0	10,0	0,0457	4,6	4,5	0,9759	2008
Ruta 9	7,5	29,0	10,0	0,0457	4,6	4,5	0,9759	2008
Ruta 10	7,8	16,0	17,0	0,1371	5,6	13,5	2,4132	1956
Ruta 11	7,8	16,0	16,5	0,1330	5,8	14,5	2,5025	1956
Ruta 12	5,9	14,0	12,5	0,1519	7,8	15,5	1,9995	1971
Ruta 13	4,5	13,0	9,5	0,1635	3,6	7,0	1,9493	1979

a) Distribución a priori

Para la distribución a priori de la media y la desviación estándar, el análisis de la elicitación se llevó a cabo por el método Roulette, a través de la herramienta online Match [197]. Se establecieron intervalos de consumo de combustible para la ruta más concurrida (Agregados del Norte – Bonavento) durante seis meses por veinte conductores. Se establecieron formatos en los cuales estimaban el consumo de combustible para la ruta, asumiendo modelos de vehículo anteriores al año 2000 y superiores al año 2000 y con carga máxima en ida y vacíos de regreso. Los resultados de la elicitación se presentan en la **Tabla 2-7**.

**Tabla 2-7.** Resultados de la elicitación para la media y la desviación estándar.

Parámetros de la elicitación		Modelo posterior al año 2000	Modelo anterior al año 2000
Ida			
Media	Tipo de distribución	Normal	Normal
	Parámetros de la distribución	$\mu = 9,029487$	$\mu = 18,36118$
		$\sigma = 0,1163786$	$\sigma = 0,335716$
Regreso			
Media	Tipo de distribución	Normal	Normal
	Parámetros de la distribución	$\mu = 4,086247$	$\mu = 8,594661$
		$\sigma = 0,1024839$	$\sigma = 0,2442346$
Ida y regreso (indistintamente)			
Desviación	Tipo de distribución	Gama	Gama
	Parámetros de la distribución	$k = 27,85001$	$k = 42,95321$
		$\theta = 52,4223$	$\theta = 23,10992$

b) Distribución a posteriori

Para la distribución a posteriori, la distribución gama supone una a priori natural conjugada para la desviación estándar. Además, se tiene una a priori normal para la media, por lo cual se puede llegar a una distribución del tipo Normal-Normal-Gama [198].

$$f(\mu, \lambda|y) \propto f(y|\lambda, \mu) * f(\mu, \lambda) * f(\lambda) \quad \text{Ecuación 2-1}$$

$$\propto \prod_{i=1}^n \left( \lambda^{1/2} * e^{\left[-\frac{\lambda}{2}(y_i - \mu)^2\right]} \right) * e^{\left[-\frac{1}{2\sigma_0^2}(\mu - \mu_0)^2\right]} * \lambda^{\alpha-1} * e^{-\beta\lambda} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

$$\propto \lambda^{\alpha + \frac{n}{2} - 1} * \exp \left[ -\lambda\beta - \frac{1}{2\sigma_0^2}(\mu - \mu_0)^2 - \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \right] \quad \text{Ecuación 2-3}$$

$$\propto \equiv (\mu, \lambda) \quad \text{Ecuación 2-4}$$

c) Estimación del consumo de combustible mediante el muestreador de Gibbs

Examinando el kernel de la distribución propuesta en la **Ecuación 2-2** y partiendo de los modelos normal-normal y normal-gama [198], se puede llegar a dos distribuciones condicionales, las cuales definen el muestreador de Gibbs. Estos se definen así para la media:

$$\mu \sim f(\mu|y, \lambda) \sim N(\mu_*, \sigma_*^2) \quad \text{Ecuación 2-5}$$

$$\mu_* = (1 - k)\mu_0 + k\bar{y} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

$$\sigma_*^2 = k \frac{\sigma^2}{n} = \frac{k}{n\lambda} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

$$k = \frac{n}{n + \sigma^2/\sigma_0^2} = \frac{n}{n + \left(\frac{1}{\lambda\sigma_0^2}\right)} \quad \text{Ecuación 2-8}$$

$$\sigma^2 \equiv 1/\lambda \quad \text{Ecuación 2-9}$$

Y para la desviación estándar:

$$\lambda \sim f(\lambda|y, \mu) \sim G \left( \alpha + \frac{n}{2}, \beta + \frac{1}{2} \left( (n-1)s^2 + n(\mu - \bar{y})^2 \right) \right) \quad \text{Ecuación 2-10}$$

El muestreador de Gibbs se comenzó en  $\mu = 0$  y  $\lambda = 1$  y se corrieron 30.000 iteraciones. Se quemaron las primeras 10.000 iteraciones y se calcularon la media y la mediana de la simulación. En la **Tabla 2-8** se presenta el resumen de las medias y medianas de cada una de las distribuciones a posteriori para los vehículos con modelo posterior al año 2000 en ida, modelo posterior al año 2000 en regreso, modelo anterior al año 2000 en ida y modelo anterior al año 2000 en regreso. Se puede observar que la media y la mediana son bastante cercanas, por lo cual los cálculos posteriores se llevaron a cabo con base a la media. La media ( $\mu$ ) corresponde al coeficiente de predicción, que posteriormente será multiplicado por la distancia en pendiente máxima y las toneladas, según el tipo de recorrido. La desviación estándar ( $\lambda$ ) corresponde no a la desviación del coeficiente, sino a la desviación de la predicción de consumo de combustible una vez multiplicada por la pendiente máxima y las toneladas, según el tipo de recorrido.

**Tabla 2-8.** Resumen medias y medianas para las distribuciones de las cadenas  $\mu$  y  $\lambda$ .

Modelo de vehículo y tipo de viaje	Distribución $\mu$		Distribución $\lambda$	
	Media	Mediana	Media	Mediana
Modelo posterior al año 2000 en ida	0,04180009	0,04180214	0,6173791	0,6106171
Modelo posterior al año 2000 en regreso	0,9727508	0,9725788	0,6168487	0,6108077
Modelo anterior al año 2000 en ida	0,1593965	0,1594039	1,943898	1,927761
Modelo anterior al año 2000 en regreso	2,050313	2,050437	1,931101	1,917809

d) Generación de los factores de consumo de combustible y emisiones

Tomando en cuenta las medias presentadas en la **Tabla 2-8**, en la **Tabla 2-9** se presentan las ecuaciones para la predicción del consumo de combustible.

**Tabla 2-9.** Ecuaciones de predicción de consumo de combustible.

Modelo de vehículo y tipo de viaje	Predicción de consumo de combustible Diésel (gal)	Predicción de las emisiones (Emisiones directas + indirectas) Diésel (kg CO <sub>2</sub> eq.)
Modelo posterior al año 2000 en ida	$0,0418 * Kmpendmáx * Ton$	$0,4952 * Kmpendmáx * Ton$
Modelo posterior al año 2000 en regreso	$0,9728 * Kmpendmáx$	$11,5242 * Kmpendmáx$
Modelo anterior al año 2000 en ida	$0,1594 * Kmpendmáx * Ton$	$1,8884 * Kmpendmáx * Ton$
Modelo anterior al año 2000 en regreso	$2,0503 * Kmpendmáx$	$24,2901 * Kmpendmáx$

### 2.1.6.2 Uso de materiales internacionales

Durante la fase constructiva se utilizan algunos materiales importados, específicamente acero, cobre, pvc y vidrio. Para llevar a cabo una aproximación en la cantidad de material importado, se realizaron reuniones con la Empresa 1 para el acero, la Empresa 2 para el pvc, la Empresa 3 para el cobre y la Empresa 4 para el vidrio.

Con cada una de las empresas se hizo un seguimiento al principal proveedor a nivel internacional. La empresa proveedora se ubicó mediante el software Google Earth, y se identificó la distancia en transporte terrestre hasta el puerto marítimo utilizado. Luego, se estimó la distancia en transporte transoceánico hasta Buenaventura, Colombia. Finalmente, mediante el mismo software, se calculó la ruta hasta cada una de las empresas y de ahí hasta el proyecto analizado.

Empresa 1: El acero de la Empresa 1 presenta un 40% de materiales importado. Los proveedores 1 y 2 se encuentran en Brasil y Ucrania. El 60% restante corresponde al proveedor 3, con planta productiva ubicada en Manizales.

Empresa 2: El pvc de la Empresa 2 es de fabricación nacional en un 98% a 99%. Para efectos del análisis no se consideró este material como importado.

Empresa 3: El cobre de la Empresa 3 presenta un 60% de materiales importados. Los 2 proveedores se encuentran en México. El 40% restante corresponde al proveedor 3, con plantas productivas ubicada en Cali.

Empresa 4: El vidrio de la Empresa 4 presenta un 10% de materiales importado. El proveedor 1 se encuentra en Detroit, USA. El 90% restante corresponde a los proveedores 2 y 3, con plantas productivas ubicadas en Cundinamarca y Antioquia.

**2.1.6.3 Transporte de cemento y agregados en los concretos premezclados de Argos**

A través de la información suministrada por la constructora, se conoció que la compañía Argos fue la única proveedora de concreto premezclado, mediante su planta Argos-Caribe. Sin embargo, esta planta sólo se encarga de premezclar el concreto. Para la fabricación de cemento, a nivel de Antioquia Argos posee las plantas Nare, el Cairo y Río Claro, las cuales se encargan de suministrar el material hasta las plantas de procesamiento local [199]. Para el presente trabajo sólo se considerará la Planta El Cairo como el suministrador de cemento, ya que Planta Nare sólo fabrica cemento blanco y Río Claro no estuvo suministrando cemento a esta planta durante la ejecución del proyecto. Para el uso de agregados, Argos-Caribe recibe los materiales principalmente de Mincivil y en menores proporciones de Canteras de Colombia y Santafé. En la **Tabla 2-10** y **Tabla 2-11** se presenta la información relevante relacionada a los proveedores de materiales mencionados.

**Tabla 2-10.** Transporte desde los lugares de explotación de agregados y fabricación de cemento hasta los lugares de fabricación de concreto premezclado en el Valle de Aburrá.

Planta de explotación de agregados y fabricación de cemento	Planta premezcladora de concreto	Distancia (km)	Porcentaje asumido por cada m <sup>3</sup> de agregados y t de cemento (%)
Planta Nare ubicada en Puerto Nare, Antioquia	Planta Caribe	207	0
Planta Río Claro ubicada en Río Claro, Antioquia	Planta Caribe	157	0
Planta El Cairo ubicada en Montebello, Antioquia	Planta Caribe	66,9	100

**Tabla 2-11.** Distribución y abastecimiento de agregados para Planta Argos-Caribe.

Material	Lugar	Porcentaje (%)
Arena	Santafé	10
	Canteras de Colombia	10
	Mincivil	80
Grava	Mincivil	100

Es importante resaltar que, para el transporte de agregados hasta las plantas de procesamiento de los concretos premezclados, se asumió que la carga por viaje de agregados gruesos y finos fue de 30 toneladas (volqueta estándar de capacidad de cubo 16 m<sup>3</sup> y densidades específicas secas para agregados gruesos de 2.730 kg/m<sup>3</sup> y agregados finos 2.640 kg/m<sup>3</sup>).

Por otra parte, para el transporte de cemento, se asumió 28 toneladas por viaje, debido a que la tendencia actual de Argos es distribuirlo a granel, transportándolo en camiones cisterna o graneleras y almacenándolo en silos. Estos vehículos cuentan con capacidad entre 18 y 38 toneladas, por lo cual se asume un valor intermedio.

**2.1.6.4 Consumo de combustible de máquinas que trabajan in situ.**

Para el consumo de combustible de las máquinas que bombean el concreto, se realizaron medidas in situ con diferentes tipos de concreto premezclado (diferentes obras de la constructora) en una bomba Putzmeister TK 70. El consumo de combustible fue medido después de una hora. La salida máxima de volumen presentó un valor de 57 m<sup>3</sup>/h. El consumo de combustible fue de 27,0±2,0 gal/h. Se encontró que la bomba presenta un rendimiento de 0,5±0,1 gal/m<sup>3</sup>.

Para el consumo de combustible de las máquinas que realizan remoción de tierras, se realizaron medidas in situ con diferentes excavadoras, de capacidad de cucharón 2,5 m<sup>3</sup>, las cuales se encuentran, actualmente, en diferentes obras en ejecución. El consumo de combustible fue medido después de una hora de funcionamiento. A diferencia de las bombas de concreto, el rendimiento

para este tipo de máquinas depende de otro tipo de factores como lo expresa Lozano et al [200]. Estos factores son: la capacidad o volumen del cucharón, el factor de rendimiento de la máquina, el factor de llenado del cucharón, el cual a su vez depende de las dimensiones y capacidad del cucharón, el factor de abundamiento y el tiempo del ciclo en segundos. En este caso, el alcance del estudio no permitió tener en cuenta todas las variables mencionadas. Por lo tanto, sólo se midió la cantidad de  $m^3$  removidos y el consumo de combustible durante una hora, entendiendo que el desmontaje del tanque de combustible es demasiado laborioso. Se encontró que el consumo de combustible fue de  $130,8 \pm 5,4$  gal/h y la cantidad de  $m^3$  removidos fue de  $237,2 \pm 61,0$   $m^3$ /h. Al dividir el consumo de combustible promedio entre los  $m^3$  removidos, se encontró que las excavadoras presentan un rendimiento de  $0,6 \pm 0,3$  gal/ $m^3$ .

#### 2.1.6.5 Consumo eléctrico de máquinas que trabajan in situ.

Para el consumo eléctrico de las mezcladoras portátiles de concreto, se realizaron medidas in situ con diferentes tipos de concreto preparado en obra (diferentes obras de la constructora) en una mezcladora portátil Domat DM Standard, con un valor de capacidad entre 20-24  $m^3$ /h. Se llenó la mezcladora con 22  $m^3$  en las diferentes medidas realizadas, se instaló un medidor de corriente y se hicieron las conversiones a kWh por cada  $m^3$  mezclado. Se encontró que la mezcladora presenta un rendimiento de  $0,79 \pm 0,13$  kWh/ $m^3$ .

#### 2.1.6.6 Densidad para las tierras de excavación

A partir del estudio de suelos y la cantidad de  $m^3$  de tierra de excavación removida, se calculó una densidad de tierras de excavación de 1.927 kg/ $m^3$ .

#### 2.1.6.7 Diseño de mezcla de concreto premezclado

En la **Tabla 2-12** se presenta el diseño de mezcla utilizado por la constructora durante la ejecución del proyecto [3]. Se puede observar que, además de los materiales convencionales, Argos utilizó aditivos superplastificantes y como material cementante suplementario cenizas volantes.

**Tabla 2-12.** Diseño de mezcla para un concreto premezclado de 21 MPa de resistencia a la compresión.

Material	kg/ $m^3$
Cemento	268,5
Ceniza volante	20,0
Agregados finos	976,0
Agregado grueso	941,5
Agua	188,5
Aditivo 1	1,9
Aditivo 2	1,0
Densidad	2.397,4

En la **Tabla 2-13** se presenta la revisión bibliográfica de los factores de emisión más recientes para aditivos y cenizas volantes, ya que en Colombia no se reportan factores de emisión para estos materiales. Además, se incluye en la revisión las escorias de fundición, ya que, al igual que las cenizas volantes, es uno de los materiales cementantes suplementarios más utilizados y sirve para complementar el modelo, en caso de que las cementeras lo reporten en su diseño de mezcla. Para cada tipo de material se utilizó el promedio entre los valores reportados.

**Tabla 2-13.** Factores de emisión complementarios para el modelo.

Material	Nazari, 2017 [128]		Tam, 2016 [201]		Edge (GaBi), 2016 [195]	Promedio		
	kg CO <sub>2</sub> eq/kg	kJ/kg	kg CO <sub>2</sub> eq/kg	kJ/kg	kJ/kg	kg CO <sub>2</sub> eq/kg	kJ/kg	
Aditivo	0,7721	16.915	0,2500	-	-	0,5111±0,3692	16.915	
Ceniza volante	0,0110	0,0196	154	0,0150	-	0,13	0,0152±0,0043	142±169
Escoria de fundición	0,0265	100	0,034	-	0,1	0,0303±0,0053	100±0	

### 2.1.6.8 Cálculo de toneladas de agregados en concretos y morteros preparados en obra

Para los agregados gruesos y finos de los concretos y/o morteros de obra, la constructora reportó las cantidades en m<sup>3</sup>. Sin embargo, debido a que el software sólo reconoce unidades de masa, se utilizaron dos densidades estándar para el cálculo. En la **Tabla 2-14** se muestran los tipos de agregados y sus respectivas densidades para el cálculo.

**Tabla 2-14.** Densidades para el cálculo de las cantidades de agregados.

Tipo de agregado	Densidad específica seca (kg/m <sup>3</sup> )
Agregado grueso	2.690
Agregado fino	2.720

### 2.1.6.9 Diseño de mezcla concreto preparado en obra

En la **Tabla 2-15** se presenta la resistencia a la compresión, el diseño de mezcla y la densidad para 1 m<sup>3</sup> de concreto convencional preparado en obra bajo la metodología ACI 318-14 [202]. El desarrollo metodológico para el cálculo de la dosificación se plantea en la sección 2.3.2.

**Tabla 2-15.** Estimación de las cantidades del diseño de mezcla calculado para los concretos preparados en obra.

	Unidad	Valor
Resistencia a la compresión estimada	MPa	21
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	2.414,3
Agua	kg	190,0
Cemento		463,4
Agregado grueso		1.195,6
Agregado fino		565,3

### 2.1.7 Estimación de materiales a partir de los planos del proyecto

Para el proyecto analizado, la constructora tercerizó la compra de cobre y no presentaba registros de la cantidad de este material. Debido a esto, se tomó como base el consumo de este material para el sistema constructivo mampostería confinada, reportado en el informe PNUD, UPME, Ecoingeniería [7]. Para la suposición de la empresa distribuidora, se tomó la Empresa 3. En la **Tabla 2-16** se presentan los consumos de materiales por tipo de sistema constructivo.

**Tabla 2-16.** Consumo de materiales por tipo de sistema constructivo en ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) reportados en el informe PNUD, UPME, Ecoingeniería [7].

Consolidado de materiales	Distribución por tipo de sistema ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )		
	Sistema industrializado	Mampostería estructural	Mampostería confinada
Agregado grueso	536,5	399,2	625,0
Agregado fino	440,9	356,5	733,6
Cemento gris	160,9	138,8	306,1
Cerámica cocida	43,9	320,8	358,1
Acero	29,5	21,0	9,4
Otros (Pvc, Cobre, Pinturas, Vidrio, etc.)	3,4	3,3	2,4

A partir de los planos arquitectónicos, estructurales y de especificaciones técnicas fue posible estimar la cantidad de concreto, acero y demás materiales utilizados en el modelo. Dado que el consumo de estos materiales no es exacto, se utilizaron estimados de pérdida por cada tipo de material y se presentan en la **Tabla 2-17** [3]. Estos estimados de pérdida fueron utilizados por la constructora durante la adquisición de los materiales del proyecto.

**Tabla 2-17.** Porcentaje estimado de pérdida de cada material [3].

Material	Estimado de pérdida (%)	Material	Estimado de pérdida (%)	Material	Estimado de pérdida (%)
Cemento	3	Acero	3	Cobre	1
Agregado grueso	5	Cerámica decorativa	4	Pvc	1
Agregado fino	5	Cerámica cocida tradicional	6	Pintura	3
Agua	-	Vidrio	1	Estuco	3

## 2.2 OBTENCIÓN DE LOS RESIDUOS MINEROS Y CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La obtención y caracterización de la materia prima consta de dos momentos principalmente. El primero corresponde al muestreo y preparación del material de estudio y el segundo a la caracterización química, mineralógica, física y morfológica de los materiales utilizados (según corresponda).

### 2.2.1 Materiales de estudio

A partir de la **Tabla 1-3** fue posible establecer los lugares con un procesamiento minero igual o superior a las 30 mil toneladas. La cantidad de material procesado por municipio permitió hacer inferencias respecto a la preselección de los lugares propuestos para el muestreo de residuos. Los criterios de selección para los lugares fueron la cantidad de material extraído para el beneficio del material de interés (tonelaje) y la facilidad y la disposición para muestrear por parte de los títulos mineros. Por su producción y disponibilidad de muestreo, se seleccionaron los municipios de Titiribí y El Bagre. La distribución de minas y títulos mineros en estos municipios permite inferir que las minerías predominantes son la del oro y la del carbón [107]. Para el caso de Titiribí, se tomaron dos tipos de residuos de la explotación de carbón y se denominaron “RC” y “RCd”. Para el caso de El Bagre, se tomaron residuos de la explotación de minería aurífera aluvial, correspondiente a las muestras arenas negras, denominadas “AN” y residuos de minería aurífera de veta, correspondiente a las muestras colas de flotación, nombradas “CF”. De cada tipo de residuo se tomaron aproximadamente 130 kg de muestra.

Para cada tipo de residuo se llevó a cabo la preparación de la muestra según lo indicado en la norma ASTM D421-81 [203]. Inicialmente, se llevó a cabo un proceso de secado al ambiente y luego mediante cuarteador metálico se separó el material. A partir de los diferentes ensayos a realizar a los residuos, se determinó cuartear hasta una cantidad de 10 kg por muestra.

Los agregados finos y gruesos corresponden a materiales comerciales, adquiridos con la empresa Easy Cencosud ubicado en Medellín.

El cemento utilizado corresponde a un cemento Argos Pórtland Tipo I.

Como solución activante se utilizó una mezcla de solución 10 molar de hidróxido de sodio y silicato de sodio alcalino. El hidróxido de sodio corresponde a soda cáustica comercial, adquirido con la empresa Químicos JM S.A. El silicato de sodio corresponde a un silicato de sodio alcalino comercial Flocsil, adquirido con la empresa Spin S.A.

### 2.2.2 Caracterización

#### 2.2.2.1 *Caracterización química y mineralógica de los residuos mineros, el cemento y el agregado fino*

El análisis cuantitativo de óxidos generales en los residuos mineros se llevó a cabo mediante la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X, por longitud de onda dispersiva, en un espectrómetro de rayos X Thermo Scientific modelo ARL 9900 X-Ray WorkStation. La preparación de cada tipo de residuo minero se hizo por perla fundida y las concentraciones de óxidos fueron calculadas mediante OX GEN 2017 y UniQuant. En adición, se utilizó la técnica de espectroscopía de energía dispersiva (EED) para complementar el análisis elemental de las muestras, con la ayuda de un equipo JEOL JSM, 6490 LV.

El análisis cuantitativo de óxidos generales en el cemento y el agregado fino se llevó a cabo mediante la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X, por longitud de onda dispersiva en un espectrómetro de rayos X Thermo Scientific modelo ARL OPTIM'X. Las concentraciones de óxidos fueron calculadas mediante el software UniQuant.

Por otra parte, se utilizó la técnica de difracción de rayos X (DRX) con el objetivo de identificar las fases cristalinas asociadas a las muestras. Para esto, se empleó un equipo PANalytical, de referencia EMPYREAN, con barrido angular ( $2\theta$ ) desde  $6^\circ$  hasta  $60^\circ$  a una velocidad de barrido de  $0,050^\circ/\text{min}$ . Para la identificación de fases se utilizó el software High Score Plus versión 3.0c, el cual está complementado con dos tipos de banco de patrones, uno adscrito a la base de datos "Crystal Open Database (COD)", cuya última actualización fue en 2016 y el otro adscrito a la base de datos "Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)". De manera complementaria, se llevó a cabo un análisis semicuantitativo de las fases identificadas, mediante el software MAUD (Materials Analysis Using Diffraction), en el cual se emplea el método de refinamiento tipo Rietveld y verificando que el  $R_{wp} < 10\%$ . Se usó un polinomio de séptimo grado para modelar el ruido de fondo de los difractogramas, mientras que el factor de escala, la estructura del cristal y los parámetros de textura, entre otros parámetros, se refinaron utilizando 7 iteraciones para cada uno. El contenido de la fase amorfa también se calculó mediante la aproximación de Le Bail para la sílice vítrea, en donde el método de Rietveld aproxima la fase amorfa a un sólido nanocristalino.

El análisis elemental puntual de los residuos mineros espectroscopía de energía dispersiva (EED) con un equipo JEOL JSM, 6490 LV.

### 2.2.2.2 *Caracterización física y morfológica de residuos mineros y agregados*

El análisis granulométrico de las partículas en los residuos mineros se llevó a cabo mediante tamizado con la serie Tyler y difracción láser. Inicialmente, se realizó un tamizado en húmedo de 300 g de material en malla Tyler 200, con el fin de separar los finos de los gruesos. El material pasante se dejó sedimentar y se secó en una estufa a 200 °C, para su posterior análisis granulométrico mediante difracción láser en un equipo Mastersizer 2000. Por otro lado, el material retenido se clasificó mediante análisis granulométrico por tamizado bajo la norma ASTM D422-63 [204]. Para este tamizado se emplearon los tamices de mallas Tyler: 10, 14, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 80, 100, 140 y 200. Las mallas en las cuales no hubo una cantidad significativa de material retenido fueron eliminadas, teniendo en cuenta no retirar dos tamices sucesivos, para garantizar la correcta distribución del material. Las gráficas fueron realizadas por el método de análisis de Gaudin-Schumann.

El análisis granulométrico de la arena se llevó a cabo también mediante tamizado con la serie Tyler bajo la norma ASTM D422-63 [204]. Se hicieron dos tamizados, uno para el cálculo del módulo de finura con los tamices de mallas Tyler: 3/8", 4, 8, 16, 30, 50 y 100 (ASTM C33-18 [205]) y el otro para el análisis granulométrico detallado, empleando los tamices de mallas Tyler: 3, 4, 6, 8, 10, 14, 16, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 120, 140 y 200.

El tamaño máximo de agregado grueso se verificó mediante la norma ASTM C33-18 [205].

Para los tres tipos de residuos mineros, la arena y el agregado grueso se llevó a cabo el análisis de las propiedades de densidad específica y porcentaje de absorción y humedad. El análisis de densidad específica se llevó a cabo mediante la norma ASTM D854 [206] en un picnómetro estándar para los residuos mineros, mediante la norma ASTM C127-15 [207] para agregado grueso y ASTM C128-15 [208] para agregado fino. La determinación del porcentaje de absorción se llevó a cabo mediante la norma ASTM C127-15 [207] para agregado grueso y ASTM C128-15 [208] para agregado fino y residuos mineros. Finalmente, el cálculo del porcentaje de humedad para residuos mineros, agregado grueso y agregado fino se hizo bajo la norma ASTM D2216-10 [209], por el método A.

El análisis morfológico de las partículas de los residuos mineros se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) con un equipo JEOL JSM, 6490 LV.

### 2.2.2.3 *Caracterización química de los activadores*

El análisis cuantitativo de óxidos generales en el silicato de sodio y las escamas de hidróxido de sodio se llevó a cabo mediante la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X, por longitud de onda dispersiva, en un espectrómetro de rayos X Thermo Scientific modelo ARL OPTIM'X. Las concentraciones de óxidos fueron calculadas mediante el software UniQuant.

## 2.3 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

La fabricación y caracterización de los concretos activados alcalinamente consta de tres partes, principalmente. La primera corresponde al diseño de mezcla y caracterización de morteros activados alcalinamente. En esta etapa se llevó a cabo un proceso de molienda para los residuos mineros, con el fin de obtener un tamaño de partícula y un área superficial específica similar a la del cemento. Luego, se compararon los valores de resistencia a la compresión obtenidos para las

muestras preparadas con los residuos molido, las probetas elaboradas con residuos con granulometría original (en estado de entrega) y las muestras del mortero de referencia (cemento Pórtland, arena y agregado fino). La segunda parte corresponde al diseño de mezcla y caracterización de concretos activados alcalinamente, fabricados a partir del diseño de mezcla con residuo que presentó la mejor resistencia a la compresión a los 28 días.

### 2.3.1 Fabricación de morteros y evaluación de la resistencia a la compresión

Para verificar la influencia del tamaño de partícula, se llevó a cabo una comparación de la resistencia a la compresión entre los morteros fabricados con los residuos con un proceso de molienda y los residuos con granulometría original (en estado de entrega). De los tres tipos de residuos, CF y RC podían ser utilizados con granulometría original, mientras que RCd, por sus características arcillosas, sólo pudo ser utilizada molida. El proceso de molienda de los residuos CF y RC se realizó en un molino centrífugo de bolas S-1000 RETCH con recipiente de óxido de circonio, entre 3.600 y 4.500 rpm en intervalos de tiempo de 15 minutos con una cantidad de material de 50 g. El proceso de molienda del residuo RCd se llevó a cabo en un molino de bolas sobre banco de rodillos, con recipientes de alúmina, a 2.400 rpm, en intervalos de tiempo de 20 min y con una cantidad de material de 800 g. El análisis granulométrico de los residuos mineros molidos se llevó a cabo mediante difracción láser en un equipo Mastersizer 2000.

Para la fabricación de los morteros, se utilizó el procedimiento descrito por Rivera [210] a fin de establecer las condiciones del mortero dosificado con cemento. Para la preparación de las muestras se utilizó un recipiente polimérico e impermeable. Inicialmente se llevó a cabo la mezcla manual entre el material cementante y el agregado fino. Una vez se obtuvo una mezcla homogénea, se añadió el agua gradualmente, se mezcló durante 15 s y se dejó reposar el mortero durante 90 s sin cubrirlo. Una vez completado el tiempo de reposo, se mezcló de nuevo durante 15 s y se inició el proceso de llenado de los moldes en tres etapas proporcionales a la altura de llenado. Cuando se alcanzaba una altura de llenado aproximada de 25 mm, luego hasta la altura de 37,5 mm y finalmente hasta 50 mm, apisonando el mortero con 32 golpes en cada etapa. El mortero remanente en la superficie se retiraba con el palustre.

Para evaluar la resistencia a la compresión se elaboraron cubos de 50 mm de lado en moldes normalizados. La resistencia a la compresión se evaluó en un equipo Shimadzu Autograph con una celda de 300 kN, clase 1 y resolución 1/500, con una velocidad empleada para el ensayo de aplicación de la carga de 900 N/s, según la norma ASTM C109/C109 – 16a [209]. El mortero de referencia se elaboró con cemento Pórtland, arena y agua, y se corresponde con un mortero dosificado tipo S ( $R'm=12,5$  MPa [191]). El mortero con cemento se denominó MC. En la **Tabla 2-18** se presentan las proporciones finales en peso del mortero de referencia.

**Tabla 2-18.** Proporciones en peso para el mortero de referencia MC.

Material	Proporciones
Cemento	1
Agregado fino	2,84
Agua	0,7

Para la dosificación de los morteros con los residuos mineros con granulometría original (en estado de entrega), se utilizó la fracción pasante malla No. 200 como parte del material cementante y el retenido como parte del agregado fino. En la **Tabla 2-19** se presentan las proporciones finales en

peso del mortero de referencia y las condiciones evaluadas. MRC y MCF corresponden a los morteros con los residuos con granulometría original (en estado de entrega). MRCm0, MCFm0 y MRCdm0 corresponden a los morteros con los residuos molidos. Finalmente, MRCm10, MCFm10 y MRCdm10 corresponden a los morteros con materiales molidos con 10% de sustitución por cemento y MRCm20, MCFm10 y MRCdm10 los residuos molidos con 20% de sustitución por cemento.

**Tabla 2-19.** Proporciones en peso para los residuos mineros, el cemento y la arena.

Material	MRC	MRCm0	MRCm10	MRCm20	MCF	MCFm0
Residuo con granulometría original (en estado de entrega)	1	0	0	0	1,0	0
Residuo molido o disgregado	0,082	1,0	1,0	1,0	0	1,0
Cemento	0	0	0,1	0,3	0	0
Arena	0	2,84	3,2	3,6	0,345	2,84
Material	MCFm10	MCFm20	MRCdm0	MRCdm10	MRCdm20	-
Residuo con granulometría original (en estado de entrega)	0	0	0	0	0	-
Residuo molido o disgregado	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Cemento	0,1	0,3	0	0,1	0,3	-
Arena	3,2	3,6	2,84	3,2	3,6	-

Para la activación alcalina se utilizó una mezcla de solución de hidróxido de sodio 10 M y silicato de sodio alcalino. El módulo de solución ( $M_s$ ) del silicato corresponde a 1,65 [211]. Diversos autores han utilizado una mezcla de silicato de sodio con hidróxido de sodio para lograr  $M_s$  que varían entre 1,0 y 3,5. Además, el hidróxido de sodio funciona como material que aporta óxido de sodio, por lo cual, algunos de los autores también han variado el porcentaje de óxido de sodio entre 3 y 8%, prestando especial atención a la posible aparición de eflorescencia en las muestras con altos contenidos de óxido de sodio [8,9,11,15,16,27,41,42,148,150,176,177,182,186,212,213].

Para la activación alcalina, se utilizaron las proporciones en peso presentadas en la **Tabla 2-19** y se utilizaron las combinaciones entre  $M_s$  y %Na, con  $M_s=0,5$ ,  $M_s=1,5$ , %Na<sub>2</sub>O=6 y %Na<sub>2</sub>O=12. Estas condiciones se eligieron en función de las emisiones de los morteros, ya que  $M_s$  o %Na<sub>2</sub>O aumentaban considerablemente el impacto ambiental de cada condición evaluada. Inicialmente, se preparó una muestra de cada material y se observó el endurecimiento y la eflorescencia presentada por las muestras. Los morteros con RM se prepararon bajo el mismo procedimiento que el mortero con cemento. En la **Tabla 2-20** se presentan las combinaciones evaluadas para la activación de los morteros con residuos mineros.

**Tabla 2-20.** Combinaciones evaluadas para la activación de morteros con residuos mineros.

Combinación	$M_s$	%NaO
1	0,5	6
2	0,5	12
3	1,5	6
4	1,5	12

Una vez determinada la condición, se fabricaron 3 muestras para cada diseño de mezcla. Asimismo, se calcularon las relaciones molares correspondientes a cada diseño de mortero. La relación SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> depende principalmente de la cantidad de silicato de sodio. La relación Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> se ajustó con la cantidad de hidróxido de sodio. La relación H<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O se ajustó mediante la adición de agua. Esta condición fue la más crítica, ya que ligeras variaciones hacían que la pasta fuera inmanejable o quedara tan líquida que no lograba el fraguado a las 36 horas de desmolde. Para los

cálculos, también se tuvo en cuenta la composición química de la arena, ya que esta presentaba un alto contenido de Na<sub>2</sub>O y CaO.

A partir de las relaciones entre material cementante y arena de la **Tabla 2-19** y la combinación de mejor consistencia y menor eflorescencia, Ms=1,5-%Na<sub>2</sub>O=6 de la **Tabla 2-20**, en la **Tabla 2-21** se presentan las proporciones en peso para todos los materiales que integran los diseños de mezcla planteados.

**Tabla 2-21.** Proporciones en peso para los residuos mineros, el cemento, la arena, el agua y los activadores alcalinos en cada tipo de mortero.

Material	MRC	MRCm0	MRCm10	MRCm20	MCF	MCFm0
Residuo en estado de entrega	1,0	0	0	0	1,0	0
Residuo molido o disgregado	0,082	1,0	1,0	1,0	0	1,0
Cemento	0	0	0,1	0,3	0	0
Arena	0	2,84	3,20	3,60	0,34	2,84
Silicato de sodio	0,507	0,277	0,302	0,332	0,364	0,196
Hidróxido de sodio	0,021	0,011	0,012	0,014	0,015	0,008
Agua	0	0,434	0,723	0,812	0	0,441
Material	MCFm10	MCFm20	MRCdm0	MRCdm10	MRCdm20	-
Residuo en estado de entrega	0	0	0	0	0	-
Residuo molido o disgregado	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Cemento	0,1	0,3	0	0,1	0,3	-
Arena	3,20	3,60	2,84	3,20	3,60	-
Silicato de sodio	0,223	0,252	0,257	0,284	0,317	-
Hidróxido de sodio	0,009	0,010	0,010	0,011	0,012	-
Agua	0,539	0,600	0,594	0,698	0,790	-

Las sustituciones parciales de cemento del 10% y 20% en la preparación de las muestras con los residuos molidos no se contemplaron durante la etapa inicial del proyecto; sin embargo, se hicieron con el fin de mejorar la resistencia a la compresión sin aumentar de manera sustancial las emisiones. La resistencia a la compresión se evaluó a los 7, 14 y 28 días, ya que a los 3 días algunos de los morteros elaborados con los residuos mineros no habían completado el proceso de fraguado.

### 2.3.1.1 Caracterización morfológica, química y mineralógica

Posterior al ensayo de resistencia a la compresión, evaluada a los 28 días de fraguado de los morteros, se analizaron las superficies de fractura. El análisis morfológico y elemental puntual de los concretos, fabricados con los residuos mineros alcalinamente activados y con el cemento, se llevó a cabo con MEB y EED en un equipo JEOL JSM, 6490 LV.

Además, se utilizó la técnica de difracción de rayos X (DRX) con el objetivo de identificar las fases cristalinas asociadas a los morteros, con la ayuda del equipo PANalytical de referencia EMPYREAN. Se utilizaron las mismas condiciones y técnicas que las empleadas para la materia prima.

### 2.3.1.2 Emisiones y energía incorporada por metro cúbico de mortero

En la **Tabla 2-22** se presentan los factores de emisión para los materiales presentes en los diseños de mezcla con su respectiva fuente y año. Si bien se reconoce que el sector cementero ha realizado esfuerzos por disminuir el factor de emisión del cemento, con valores que oscilan entre 0,72 y 0,97 t CO<sub>2</sub>/t cemento producido entre los años 2015 y 2017 [145–147], estos valores corresponden a valores promedio de las plantas analizadas de cada cementera (Argos, Cemex y LafargeHolcim) y las variaciones pueden ser muy significativas en función de los tipos de materias primas y

combustibles utilizados. Por lo tanto, en el presente estudio se utilizó el valor promedio entre los procesos de fabricación por vía seca y húmeda reportados en el año 2012 para Colombia presentados en el informe del PNUD, UPME y Ecoingeniería [7], haciendo un énfasis particular en la necesidad de actualizar estos valores para las cementeras colombianas. Para el residuo molido fueron asignadas las emisiones proporcionales a la molienda final, homogenización y embalaje (4,5% [135] del factor de emisión del cemento), ya que los residuos sólo necesitaron un proceso de molienda y homogenización para su uso en el caso de los residuos molidos o un factor de emisión cero para las mezclas que utilizaron el residuo con granulometría original (en estado de entrega). El cálculo corresponde al *Factor de emisión del cemento* \* 0,045 para 1 kg de residuo molido [135]. Para la soda caústica en escamas, ya que es un material importado, se utilizó el valor presentado por Thanmmalay [214] en el año 2013. El autor llevó a cabo el análisis de ciclo de vida para la fabricación de hidróxido de sodio sólido, encontrando que a partir de la materia prima, los químicos y/o aditivos y el proceso de manufactura, la reacción presenta una eficiencia del 31% para el hidróxido de sodio (formando otros subproductos). El cálculo corresponde al *Factor de emisión*/0,31 para 1 kg de hidróxido de sodio sólido. Para el silicato de sodio, ante la falta de un factor de emisión por parte de la empresa Spin S.A., se utilizó el valor reportado por Fawer en el año 1999 [215]. El autor llevó a cabo el análisis de ciclo de vida para la fabricación de silicato de sodio sólido y diferentes soluciones con porcentajes de sólidos variables, encontrando que, en función del porcentaje de sólidos, el factor de emisión de las soluciones se comporta casi de manera proporcional. Ya que la empresa Spin S.A. utiliza silicato de sodio sólido de la empresa Manufacturas Silíceas S.A.S. para fabricar el Flocsil, se utilizó el factor de emisión reportado por Fewer para el silicato sólido y el contenido de sólidos por el factor de emisión para el Flocsil. El cálculo corresponde al *Factor de emisión* + *Factor de emisión* \* 0,452 para 1 kg de silicato de sodio en solución Flocsil. Finalmente, para el agua y los agregados, se utilizaron los valores del PNUD, UPME, Ecoingeniería [7], haciendo de nuevo énfasis en la necesidad de actualizar todos los valores.

**Tabla 2-22.** Factores de emisión para los materiales de los diseños de mezcla.

Material	Factor de emisión		Fuente, año
	kg CO <sub>2</sub> /kg	KJ/kg	
Cemento	1,1271	9.161,3	Ecoingeniería, 2012 [7]
Residuo molido	1,1271*0,045	9.161,3*0,045	Ecoingeniería, 2012 [7] multiplicado por el porcentaje de emisiones del IFC para molienda final, homogenización y embalaje del cemento Pórtland, 2018 [135]
NaOH sólido	0,6329/0,31	3.500/0,31	Thannimalay, 2013 [214] divido la eficiencia de la reacción
Solución de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	1,07+1,07 *0,452	10.953+10.953*0,452	Fawer, 1999 [215] multiplicado por el contenido de sólidos desde la fuente primaria
Agua	0,0089	5	Ecoingeniería, 2012 [7]
Agregado grueso	0,0025	85,1	Ecoingeniería, 2012 [7]
Agregado fino	0,0139	402,5	Ecoingeniería, 2012 [7]

### 2.3.2 Fabricación de concretos y evaluación de la resistencia a la compresión

Para el diseño de mezcla del concreto de referencia se utilizó el método ACI 211.1 descrito en [216] y se partió de los ejemplos planteados por Bolívar [217] y Rivera [124]. Las propiedades físicas necesarias para la dosificación fueron determinadas en la sección 4.2. Se seleccionó una consistencia fluida, con un asentamiento entre 50 y 100 mm y sin vibración. El tamaño máximo de agregado se encuentra en el rango recomendado para muros reforzados, vigas y columnas. Para la

estimación del agua en la mezcla, se escogió un concreto con aire incluido, con forma angular de agregado y una exposición de aire media. El diseño de mezcla corresponde a una resistencia a la compresión de 21 MPa. Se determinaron las condiciones iniciales y se llevó a cabo el ajuste por humedad de los agregados.

Para la preparación de las muestras se utilizó un recipiente polimérico e impermeable. Inicialmente se llevó a cabo la mezcla manual entre el material cementante, el agregado fino y el agregado grueso. Una vez se obtuvo una mezcla homogénea, se añadió el agua gradualmente y se mezcló el tiempo suficiente hasta obtener una pasta homogénea. El llenado de los moldes se hizo en tres capas, la primera aproximadamente hasta una altura de 15 cm y las dos siguientes hasta 22,5 y 30 cm de altura. El concreto remanente en la superficie se retiraba con el palustre

Una vez llevado a cabo el ajuste por humedad de los agregados, se prepararon tres cilindros y se midió el asentamiento. Cuando se preparó esta primera mezcla de prueba, fue necesario adicionar agua. Ya que la relación agua/cemento se alteró, se ajustó el contenido de cemento y se procedió al ajuste por resistencia. Con la segunda mezcla de prueba con las proporciones ajustadas, se verificó el asentamiento y se ensayaron tres cilindros de prueba a los cuales se les determinó una resistencia promedio a los 28 días de  $23,0 \pm 0,4$  MPa. Esta resistencia fue superior a la de diseño, por lo tanto, en la **Tabla 2-23** se presentan las proporciones finales en peso del concreto de referencia, denominado CC.

**Tabla 2-23.** Proporciones en peso para el concreto de referencia CC.

Material	Proporciones
Cemento	1
Agua	0,41
Agregado fino	1,22
Agregado grueso	2,58

La mejor condición de los morteros activados alcalinamente fue tomada en cuenta para la fabricación de los concretos activados alcalinamente. Para los concretos activados alcalinamente, la cantidad de material activamente se dosificó en función de las relaciones molares sílice/alúmina y óxido de sodio/sílice encontrados con la mejor condición de los morteros activados alcalinamente. La relación molar agua/óxido de sodio se ajustó en función de encontrar una buena manejabilidad para la pasta y un asentamiento similar al encontrado para el concreto de referencia. La relación sólido/líquido se estableció en función de lograr las mismas proporciones que el concreto de referencia, tomando como sólido, en unidades de masa, el residuo minero, el cemento y los agregados y tomando como líquido, en unidades de masa, el agua, el silicato de sodio y el hidróxido de sodio.

Para evaluar la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado, se elaboraron especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto en moldes normalizados, la resistencia a la compresión se evaluó con una velocidad de 0,25 MPa/s, siguiendo la norma ASTM C39/C39M-18 [218].

### 2.3.2.1 Caracterización morfológica y química

Los análisis morfológico y elemental puntual de las superficies de fractura de los concretos fabricados con los residuos mineros y el cemento se llevó a cabo mediante MEB y EED con un equipo JEOL JSM, 6490 LV.

## 2.4 ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA

El análisis de viabilidad técnica se ejecutó después de evaluar la resistencia a la compresión de los concretos activados alcalinamente. Dado que se encontró una resistencia inferior a la del concreto de referencia, se prepararon dos condiciones más con sustitución parcial de cemento Pórtland por el residuo minero, (30 y 40% P/P). Se evaluó la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días, verificando que las emisiones y la energía incorporada por metro cúbico fueran inferiores a las del concreto de referencia. Luego se simuló la huella de carbono y la energía incorporada de la edificación reemplazando el concreto convencional preparado en obra por el diseño encontrado para los concretos activados alcalinamente y se realizó una comparación entre los principales componentes de ambos diseños de mezcla. Finalmente, se llevó a cabo una comparación entre los costos por metro cúbico de los concretos estudiados en el presente trabajo, estableciendo, básicamente, una comparación sólo en función del costo de los materiales.

# Capítulo 3

## RESULTADOS Y ANÁLISIS: CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO Y LA ENERGÍA INCORPORADA DE LA EDIFICACIÓN

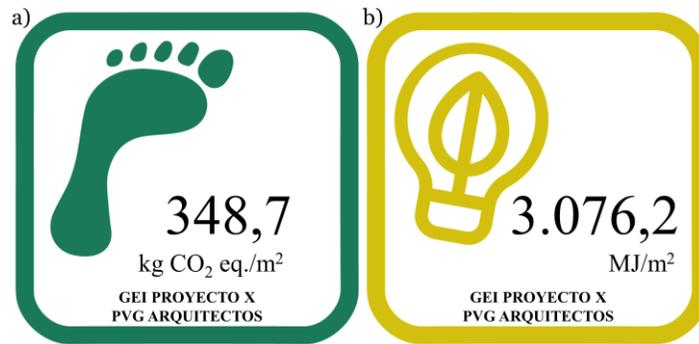
En este capítulo se presentan los resultados del análisis de la huella de carbono y la energía incorporada de la edificación, denominada Proyecto X. Se presentan cuatro cálculos: (Escenario A) indicadores ambientales mediante la información suministrada por la constructora, que incluye la cantidad y disposición de RCD, (Escenario B) indicadores ambientales estimados en función de la información exacta contenida en los planos arquitectónicos, estructurales y de especificaciones técnicas, (Escenario C) indicadores ambientales estimados también en función de la información contenida en los planos, pero incluyendo los porcentajes de pérdida planteados por la empresa para cuantificar los RCD y (Escenario D) indicadores ambientales estimados también en función de la información exacta contenida en los planos, pero incluyendo el manejo real de RCD reportado por la constructora. Finalmente, se hizo una comparación entre los indicadores ambientales, enfocada al consumo de concreto (premezclado y preparado en obra).

### 3.1 INDICADORES AMBIENTALES ESCENARIO A

A partir de las cantidades de obra y de RCD suministrados por la constructora, en la **Figura 3-1a** se muestra el cálculo de la huella de carbono y en la **Figura 3-1b** el cálculo de la energía incorporada para el Proyecto X, a partir de la información suministrada por la Constructora X a través de PVG Arquitectos. Para un consumo de materiales de 22.851.252,9 kilogramos, se produjeron 3.336.148,4 kg CO<sub>2</sub> eq y se consumieron 29.435.585,8 MJ. Teniendo en cuenta que es una tipología de vivienda multifamiliar, con 9.568,67 m<sup>2</sup> construidos, se puede inferir que la huella

Resultados y análisis: Cuantificación de la huella de carbono y la energía incorporada de la edificación

de carbono equivale a 348,7 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> construido y la energía incorporada equivale a 3.076,2 MJ/m<sup>2</sup>.



**Figura 3-1.** Proyecto X, cálculos a partir de las cantidades de obra y RCD, suministrados por la Constructora X. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.

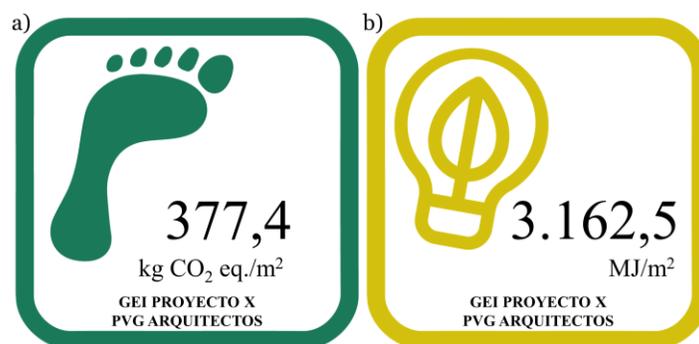
En la **Tabla 3-1** se muestra la cantidad, en kg CO<sub>2</sub> equivalente y MJ, para cada una de las etapas de la edificación. Se observa que la etapa de extracción de materia prima y fabricación de materiales genera más del 93% para la huella de carbono y más del 87% para la energía incorporada. Las demás fases no presentan porcentajes significativos respecto al total de las emisiones y los consumos energéticos.

**Tabla 3-1.** Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.

Fase	Huella de carbono		Energía incorporada	
	kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	Porcentaje	MJ/m <sup>2</sup>	Porcentaje
Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra	324,3	93,01%	2.694,1	87,58%
Transporte de materiales a obra	19,2	5,52%	359,3	11,68%
Etapla constructiva	2,5	0,71%	22,9	0,74%
Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva	1,1	0,31%	-	-
Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva	1,6	0,45%	-	-
Total	348,7	-	3.076,2	-

### 3.2 INDICADORES AMBIENTALES ESCENARIO B

A partir de los planos arquitectónicos, estructurales y de instalaciones técnicas fue posible estimar las cantidades de los materiales. Con las nuevas cantidades, se utilizaron los mismos proveedores y se llevó a cabo el cálculo de ambos indicadores. En la **Figura 3-2a** se muestra el cálculo de la huella de carbono y en la **Figura 3-2b** el cálculo de la energía incorporada para el Proyecto X. Para un consumo de materiales de 15.737.739,7 kilogramos, se estimó la generación de 3.611.398,8 kg CO<sub>2</sub> eq y el consumo de 30.260.896,2 MJ, equivalentes a la huella de carbono de 377,4 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> construido y la energía incorporada de 3.162,5 MJ/m<sup>2</sup>.



**Figura 3-2.** Proyecto X, cálculos a partir de la información exacta contenida en los planos arquitectónicos, estructurales y de especificaciones técnicas. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.

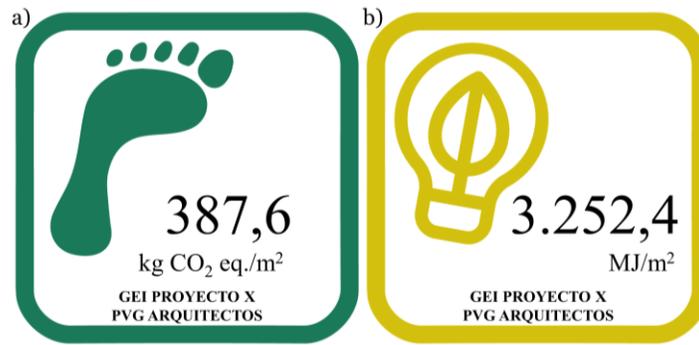
En la **Tabla 3-2** se muestra la cantidad, en kg CO<sub>2</sub> equivalente y MJ, para cada una de las etapas de la edificación. Se observa que, de nuevo, la etapa de extracción de materia prima y fabricación de materiales genera más del 93% para la huella de carbono y más del 89% para la energía incorporada.

**Tabla 3-2.** Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.

Fase	Huella de carbono		Energía incorporada	
	kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	Porcentaje	MJ/m <sup>2</sup>	Porcentaje
Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra	352,0	93,27%	2.816,3	89,05%
Transporte de materiales a obra	19,4	5,15%	321,7	10,17%
Etapa constructiva	3,3	0,88%	24,5	0,77%
Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva	1,1	0,29%	-	-
Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva	1,6	0,41%	-	-
Total	377,4	-	3.162,5	-

### 3.3 INDICADORES AMBIENTALES ESCENARIO C

A partir de los porcentajes de pérdida suministrados por la constructora del proyecto para la estimación de la cantidad de RCD, se llevó a cabo, de nuevo, el cálculo de ambos indicadores. En la **Figura 3-3a** se muestra el cálculo de la huella de carbono y en la **Figura 3-3b** el cálculo de la energía incorporada para el Proyecto X. Para un consumo de materiales de 15.953.704,6 kilogramos, se estimó la generación de 3.708.606,8 kg CO<sub>2</sub> eq y el consumo de 31.121.516,3 MJ, equivalentes a la huella de carbono de 387,6 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> construido y la energía incorporada de 3.252,4 MJ/m<sup>2</sup>.



**Figura 3-3.** Proyecto X, cálculos a partir de la información contenida en los planos, incluyendo el porcentaje de pérdida estimado por la constructora para los RCD. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.

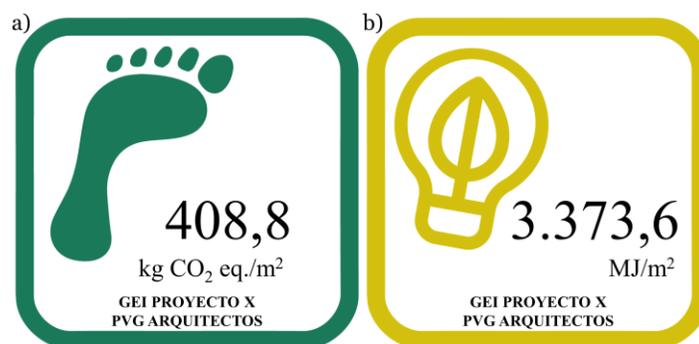
En la **Tabla 3-3** se muestra la cantidad, en kg CO<sub>2</sub> equivalente y MJ, para cada una de las etapas de la edificación. Se observa que, de nuevo, la etapa de extracción de materia prima y fabricación de materiales genera más del 93% para la huella de carbono y más del 89% para la energía incorporada.

**Tabla 3-3.** Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.

Fase	Huella de carbono		Energía incorporada	
	kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	Porcentaje	MJ/m <sup>2</sup>	Porcentaje
Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra	362,0	93,40%	2.896,4	89,05%
Transporte de materiales a obra	20,3	5,24%	331,6	10,19%
Etapa constructiva	3,3	0,86%	24,5	0,75%
Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva	0,9	0,23%	-	-
Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva	1,1	0,27%	-	-
Total	387,6	-	3.252,4	-

### 3.4 INDICADORES AMBIENTALES ESCENARIO D

A partir de la información contenida en los planos y la cantidad real de RCD, se llevó a cabo el último cálculo de ambos indicadores. En la **Figura 3-4a** se muestra el cálculo de la huella de carbono y en la **Figura 3-4b** el cálculo de la energía incorporada para el Proyecto X. Para un consumo de materiales de 16.290.859,7 kilogramos, se estimó la generación de 3.911.920,7 kg CO<sub>2</sub> eq y el consumo de 32.281.014,9 MJ, equivalentes a la huella de carbono de 408,8 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> construido y la energía incorporada de 3.373,6 MJ/m<sup>2</sup>.



**Figura 3-4.** Proyecto X, cálculos a partir de la información exacta contenida en los planos, incluyendo el manejo real de RCD de la constructora. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.

En la **Tabla 3-4** se muestra la cantidad, en kg CO<sub>2</sub> equivalente y MJ, para cada una de las etapas de la edificación. En este caso, se observa que la etapa de extracción de materia prima y fabricación de materiales genera más del 92% para la huella de carbono y más del 89% para la energía incorporada.

**Tabla 3-4.** Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.

Fase	Huella de carbono		Energía incorporada	
	kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	Porcentaje	MJ/m <sup>2</sup>	Porcentaje
Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra	379,8	92,91%	3.013,3	89,32%
Transporte de materiales a obra	23,0	5,63%	335,8	9,95%
Etapla constructiva	3,3	0,81%	24,5	0,73%
Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva	1,1	0,26%	-	-
Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva	1,6	0,38%	-	-
Total	408,8	-	3.373,6	-

### 3.5 COMPARACIÓN ENTRE LOS ESCENARIOS

En la **Tabla 3-5** se presenta la comparación entre los escenarios planteados para los indicadores ambientales. Como se puede observar, los indicadores ambientales de los escenarios que parten de la información contenida en los planos (B, C y D) son muy superiores al escenario planteado para la información suministrada por la constructora (A). Esto es completamente diferente a lo esperado a partir de un proyecto edificatorio, ya que, incluyendo porcentajes de pérdida o RCD reales a la información contenida en los planos, las intensidades materiales son muy inferiores para los escenarios B, C y D respecto al escenario A. A pesar de que hay diferencias significativas en la huella de carbono para los cuatro escenarios, los valores límites (escenarios A y D) se encuentran en los rangos esperados para este tipo de edificaciones de vivienda multifamiliar en altura y sistema aporricado [219].

**Tabla 3-5.** Comparación entre los escenarios planteados para los indicadores ambientales planteados para los indicadores ambientales.

Escenario	Huella de carbono (kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup> )	Energía incorporada (MJ/m <sup>2</sup> )	Intensidad material (kg/m <sup>2</sup> )	RCD - escombros (kg/m <sup>2</sup> )
A	348,7	3.076,2	2.388,1	65,68
B	377,4	3.162,5	1.644,7	0
C	386,7	3.242,6	1.667,3	28,95
D	408,8	3.373,6	1.702,5	65,68

En la **Tabla 3-6** se presenta la intensidad material por m<sup>2</sup> para los escenarios planteados. Como se puede observar, la intensidad material para cemento es muy superior para los escenarios que parten de la información contenida en los planos (B, C y D), con diferencias de más de 40 kg/m<sup>2</sup> respecto al escenario planteado para la información suministrada por la constructora (A). Sin embargo, ocurre lo contrario para la intensidad material para los agregados gruesos y finos en el Escenario A, los cuales en total superan por más de 770 kg/m<sup>2</sup> a los Escenarios B, C y D.

**Tabla 3-6.** Intensidad material por m<sup>2</sup> para los escenarios planteados para los indicadores ambientales del Proyecto X.

Material	Escenarios (kg/m <sup>2</sup> )			
	A	B	C	D
Acero	28,6	25,0	25,7	25,2
Cerámica cocida tradicional	48,3	40,1	42,5	41,7
Cerámica decorativa y sanitaria	9,2	8,8	9,1	20,5
Polivinil cloruro	2,1	2,6	2,6	2,6
Estuco	2,2	3,5	3,6	6,4
Pinturas	0,4	2,6	2,7	2,6
Cobre	2,5	2,2	2,2	2,2
Vidrio	1,3	2,5	2,5	5,4
Agregados gruesos en obra	816,4	316,2	332,0	330,8
Agregados gruesos (concreto premezclado)	22,6	158,4	166,4	158,4
Agregados finos en obra	732,6	149,5	157,0	164,1
Agregados finos (concreto premezclado)	23,5	164,2	172,5	164,2
Cemento en obra	121,2	122,6	126,2	131,9
Cemento (concreto premezclado)	6,4	45,2	46,5	45,2
Ceniza volante	0,5	3,4	3,4	3,4
Aditivo	0,1	0,5	0,5	0,5
Agua (concreto premezclado)	4,5	31,7	31,7	31,7
Agua concreto en obra	49,7	50,2	50,2	54,6
Agua general	221,7	221,1	221,1	216,7

Estas diferencias sustanciales entre los escenarios, sugiere errores por parte de la constructora al momento de gestionar y reportar las cantidades de obra, en especial para los concretos preparados en obra. En la **Tabla 3-7** se presenta la comparación entre los metros cúbicos de concreto reportados por la constructora y los estimados mediante los planos. La cantidad equivalente al concreto premezclado para los escenarios a partir de la información contenida en los planos se estimó a partir de la premisa que la subestructura es el elemento más importante de la edificación y debe cumplir con todas las propiedades mecánicas y de durabilidad presentadas en la NSR-10 [191], que son certificadas por las cementeras en sus concretos premezclados. Como se puede observar, a pesar de que las cantidades de concreto son muy similares entre los cuatro escenarios, la cantidad de cemento reportado por la constructora sugiere una cantidad aproximada de 2.502,2 m<sup>3</sup> de concreto preparado en obra, muy diferente a los 4.258,1 m<sup>3</sup> reportados. Continuando con el análisis y la premisa de la cantidad de cemento proporcional a la cantidad de concreto, hay un

Resultados y análisis: Cuantificación de la huella de carbono y la energía incorporada de la edificación

sobranante aproximado de 503,8 kg/m<sup>2</sup> de agregados gruesos y 584,8 kg/m<sup>2</sup> de agregados finos. Además, es imposible utilizar esta cantidad de agregados en la edificación, ya que por más RCD que se generen, sigue siendo una cantidad exorbitante de agregados a incluir en la edificación.

**Tabla 3-7.** Comparación entre los Escenarios A, B, C y D para las cantidades de concreto premezclado y preparado en obra.

Etapa	Elementos	Escenario A (m <sup>3</sup> )		Escenario B (m <sup>3</sup> )	
		Premezclado	Preparado en obra	Premezclado	Preparado en obra
Subestructura	Pilas de cimentación	230	1.300,50	1.510,1	-
	Fundaciones (vigas y dados)	-	105,3	100,2	-
Estructura	Cubierta	-	49,2	-	48,2
	Losas	-	1.505,10	-	1.440,1
	Escaleras	-	60,1	-	58,8
	Columnas	-	59,8	-	55,5
	Muros estructurales	-	948,10	-	928,2
Total		4.258,10		4.141,1	
Etapa	Elementos	Escenario C (m <sup>3</sup> )		Escenario D (m <sup>3</sup> )	
		Premezclado	Preparado en obra	Premezclado	Preparado en obra
Subestructura	Pilas de cimentación	1.510,1	-	1.510,1	-
	Fundaciones (vigas y dados)	100,2	-	100,2	-
Estructura	Cubierta	-	50,24	-	51,44
	Losas	-	1.500,91	-	1.536,89
	Escaleras	-	61,28	-	62,75
	Columnas	-	57,84	-	59,23
	Muros estructurales	-	967,39	-	990,59
Total		4.247,97		4.311,20	

En la **Tabla 3-8** se presenta la comparación entre las cantidades de los materiales para los concretos y sus correspondientes RCD de los escenarios planteados. Teniendo en cuenta que se generaron 628,4 t de RCD (que incluyen residuos de concretos, morteros, cerámica, vidrio y estuco), en esta cantidad de RCD puede existir una cantidad aproximada de 83,8 t de cemento (Escenario D) y su cantidad proporcional de agregados y agua. Este es un valor muy diferente al esperado para el Escenario C, el cual sólo espera la pérdida de 35,2 t de cemento.

**Tabla 3-8.** Comparación entre las cantidades de los materiales, en toneladas, para los concretos reportados por la constructora y los estimados mediante los planos arquitectónicos, estructurales y técnicos (con estimado de pérdida incluido).

Material	Escenario A (kg/m <sup>2</sup> )			Escenarios B, C y D (kg/m <sup>2</sup> )				
	Preparado en obra	Premezclado	Presente en RCD	Preparado en obra	Premezclado	Presente en RCD		
						Escenario B	Escenario C	Escenario D
Cemento	121,18	6,45	-	122,56	45,19	-	3,68	8,76
Agregado grueso	312,64	22,63	-	316,21	158,44	-	15,81	18,75
Agregado fino	147,84	23,46	-	149,53	164,25	-	7,48	10,42
Ceniza volante	-	0,48	-	-	3,37	-	-	-
Aditivo	-	0,07	-	-	0,49	-	-	-
Agua	49,68	4,53	-	50,25	31,72	-	2,57	6,13

Este tipo de análisis permiten detectar que durante el ciclo de vida de una edificación, excluyendo las fases de “operación, deconstrucción (o demolición) y disposición final de RCD”, la fase de “extracción de materia prima y fabricación de materiales” es la que presenta un mayor impacto

ambiental. De manera particular, el cemento es el material que presenta mayor impacto, relacionado directamente a su intensidad material y elevado factor de emisión. En algunas ocasiones, sumado a malas prácticas constructivas, se eleva de manera significativa la huella de carbono y la energía incorporada en la edificación. Por lo tanto, la necesidad de encontrar sustitutos al cemento Pórtland es imperativa.

En la práctica se han utilizado diferentes materiales como sustitutos parciales del cemento Pórtland, entre los cuales resaltan las cenizas volantes o las escorias granuladas [220]. Las cenizas volantes son un subproducto de las estaciones termoeléctricas, sin embargo, la matriz energética colombiana ha sido principalmente hidráulica. Con una producción de energía eléctrica en 2017 de 66,5 GWh, la producción en centrales hidroeléctricas fue de 57,3 GWh y en centrales térmicas fue de 8,6 GWh [221]. Por esta razón, el uso de cenizas volantes en el sector constructor se encuentra bastante restringido. Por otra parte, las escorias granuladas de alto horno son un subproducto de la industria siderúrgica. Sin embargo, si se tiene en cuenta que por cada tonelada de acero se generan aproximadamente 0,23 toneladas de escorias granuladas [222], sumado a que durante el año 2018 se produjeron 1.248 toneladas de aceros largos respecto a un consumo aparente de 2.187 toneladas en Colombia [223], el uso de escorias en el sector constructor, también, se restringe bastante.

Teniendo en cuenta que los residuos de minería podrían servir como sustituto parcial del cemento Pórtland, sumado a la alta generación de pasivos ambientales mineros (como se expuso en el capítulo introductorio del presente informe), el estudio y la valoración técnica de estos residuos se hacen pertinentes para buscar una reducción en los impactos ambientales, tanto del sector constructor en la huella de carbono de las edificaciones, como en el sector minero con el uso de los pasivos ambientales mineros.

# Capítulo 4

## RESULTADOS Y ANÁLISIS: CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA PARA ELABORAR CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización llevada a cabo a los residuos mineros, cemento, agregados gruesos y finos y activadores. Inicialmente, se muestra la caracterización química y mineralógica para cada tipo de residuo minero y el cemento Pórtland. En esta etapa, se exponen las condiciones para emplear alguno de los residuos, las cuales consisten en que los contenidos de sílice y alúmina sean por encima del 60% en peso y 5% en peso, respectivamente. También, se requiere que la sílice presente se encuentre en fase amorfa, preferencialmente. Luego se exhibe la caracterización física de cada tipo de residuo y los agregados gruesos y finos. Finalmente, se detalla la caracterización química de los activadores, silicato de sodio e hidróxido de sodio, comparando los resultados con las fichas técnicas proporcionadas por los proveedores.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LOS RESIDUOS MINEROS, EL CEMENTO Y EL AGREGADO FINO

#### 4.1.1 Residuos mineros

En la **Tabla 4-1** se muestran los resultados del análisis mediante FRX de los tres tipos de residuos. De acuerdo a lo planteado anteriormente en relación a los contenidos de sílice y alúmina, se puede observar que RC, RCd y CF presentan un contenido elevado de sílice (por encima del 60% en peso) y un contenido aceptable de alúmina (por encima del 5% en peso), lo cual los hace buenos

candidatos para las reacciones de activación alcalina. El residuo AN por su parte presenta un contenido muy bajo de sílice y alúmina, por lo cual fue descartado en el presente estudio.

**Tabla 4-1.** Composición química porcentual de los residuos estudiados.

Óxido	RC (%)	RCd (%)	CF (%)	AN (%)	Óxido	RC (%)	RCd (%)	CF (%)	AN% (%)
SiO <sub>2</sub>	78,31	60,72	69,45	13,68	ZnO	0,04	0,06	0,03	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,25	17,94	10,43	1,43	ZrO <sub>2</sub>	0,15	0,02	0,13	7,40
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,45	1,23	0,43	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0,31
CaO	0,44	0,81	5,50	1,04	CeO <sub>2</sub>	-	-	-	0,31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,89	6,54	4,96	51,66	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,20
MnO	0,08	0,10	0,12	1,10	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,14
K <sub>2</sub> O	1,18	1,52	0,60	0,16	HfO <sub>2</sub>	-	-	-	0,13
MgO	0,80	1,88	3,19	0,47	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,10	0,05	0,70	ThO <sub>2</sub>	-	-	-	0,08
SO <sub>3</sub>	0,37	0,02	0,10	0,30	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0,02
SrO	0,03	0,03	0,04	-	BaO	-	0,09	-	-
TiO <sub>2</sub>	0,49	0,92	0,47	19,93	L.O.I	5,57	8,92	3,68	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,04	0,02	0,42					-

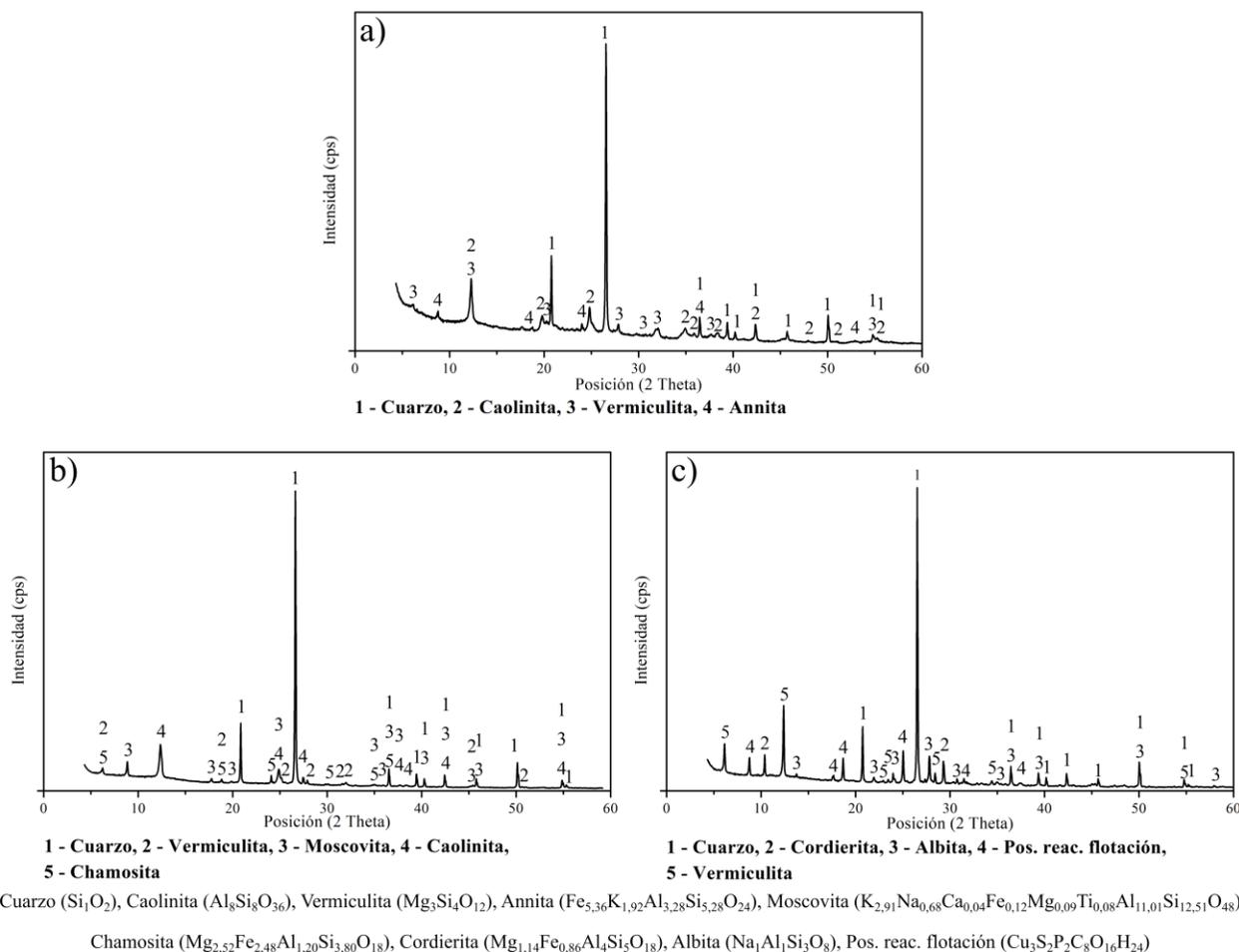
Llevando a cabo los cálculos respectivos, en la **Tabla 4-2** se presentan las relaciones molares actuales en los residuos RC, RCd y CF que cumplieron con los rangos de composición establecidos. Acorde a la literatura, los tres tipos de residuos presentan valores muy superiores para la relación SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de los reportados para materiales susceptibles de activación alcalina, como las cenizas volantes y el metacaolín. Estos valores usualmente se encuentran en el rango de 2 a 4 para favorecer la formación del gel N-A-S-H [41,128,152,159]. De manera especial para CF, otra relación importante debido al contenido superior al 5% en peso de CaO es la relación CaO/SiO<sub>2</sub>. Esta relación varía en el rango de 0,9 a 0,12 y las escorias de fundición son los materiales más susceptibles de este tipo de activación, ya que favorecen la formación del gel C-A-S-H [41,128,152,159]. A pesar que la relación se encuentra muy por debajo del rango reportado, puede tener una incidencia importante en las propiedades mecánicas de los materiales finales.

**Tabla 4-2.** Relaciones molares actuales en los residuos.

Residuo	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	Relación molar SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Relación molar Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	Relación molar CaO/SiO <sub>2</sub>
RC	78,31	8,25	0,21	16,11	0,0026	0,0060
RCd	60,72	17,94	0,45	5,74	0,0072	0,0143
CF	69,45	10,43	1,23	11,3	0,0172	0,0848

En la **Figura 4-1** se presentan los resultados de la identificación de las fases cristalinas en el espectro de difracción de rayos X para **a)** RC, **b)** RCd y **c)** CF. Las fases encontradas en los patrones disponibles en las bases de datos COD e ICSD, son coherentes con los resultados encontrados en el análisis por FRX para cada muestra. En los tres tipos de residuos se puede observar la presencia del tectosilicato cuarzo y el filosilicato vermiculita. Además, para RC se pueden encontrar los filosilicatos caolinita y moscovita y para RCd los filosilicatos caolinita y annita. Para CF, se observa la presencia del tectosilicato albita, el ciclosilicato cordierita y una fase asociada a un posible reactivo de flotación, el cual se puede relacionar con el proceso de beneficio del material de partida de los residuos. En relación al análisis semicuantitativo de las fases, mediante MAUD no fue posible establecer la presencia o cantidad de fase amorfa, ya que las cantidades arrojadas por el software se encontraban entre 0,2 y 0,3% en peso, con desviaciones entre 20 y 30% en peso. A pesar de que existen diversos métodos para la cuantificación de fases [224,225], y podría

realizarse a nivel local mediante el método del estándar interno, no fue posible llevar a cabo este tipo de análisis debido al alto costo del ensayo y la disponibilidad de recursos. El estudio de la presencia de fase amorfa sólo se hizo bajo la observación del halo situado entre los ángulos 20-35°, los cuales durante la activación de diferentes precursores presentan un aumento respecto a la línea base y sugieren la presencia del gel (N,C)-A-S-H en la fase vítrea [41,128,152,159,169,170]. En las figuras no es posible identificar visualmente la presencia de fase amorfa.



**Figura 4-1.** Espectros de difracción para las muestras a) RC, b) RCd y c) CF.

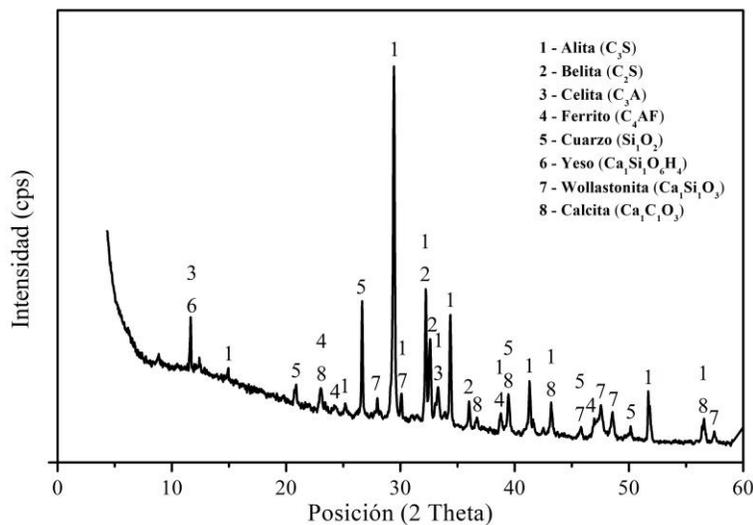
#### 4.1.2 Cemento Pórtland comercial tipo I

En la **Tabla 4-3** se presentan los resultados del análisis mediante FRX del cemento Pórtland tipo I comercial. Se puede observar que la composición química corresponde a la de un cemento convencional, con un alto contenido de óxido de calcio y en menores proporciones sílice y alúmina [124,127].

**Tabla 4-3.** Composición química porcentual del cemento.

Óxido	(%)	Óxido	(%)	Óxido	(%)
CaO	64,34	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
SiO <sub>2</sub>	18,12	TiO <sub>2</sub>	0,37	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,14	MnO	0,1	NiO	0,01
SO <sub>3</sub>	3,95	SrO	0,08	ZrO <sub>2</sub>	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,72	BaO	0,04	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01
MgO	1,74	CuO	0,03	PuO <sub>2</sub>	0,01
K <sub>2</sub> O	1,13	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	ZnO	0,01
Na <sub>2</sub> O	0,86	WO <sub>3</sub>	0,02	Rb <sub>2</sub> O	0,00

En la **Figura 4-2** se presentan los resultados de la identificación de las fases cristalinas en el espectro de difracción de rayos X para el cemento. Las fases encontradas en los patrones disponibles en las bases de datos COD e ICSD, son coherentes con los resultados encontrados en el análisis por FRX. Se observa la presencia de las fases principales (alita, belita, celita y ferrito) para cementos comerciales y algunas fases minoritarias que corresponden al cuarzo, yeso, wollastonita y calcita.



**Figura 4-2.** Espectro de difracción para el cemento Pórtland tipo I comercial.

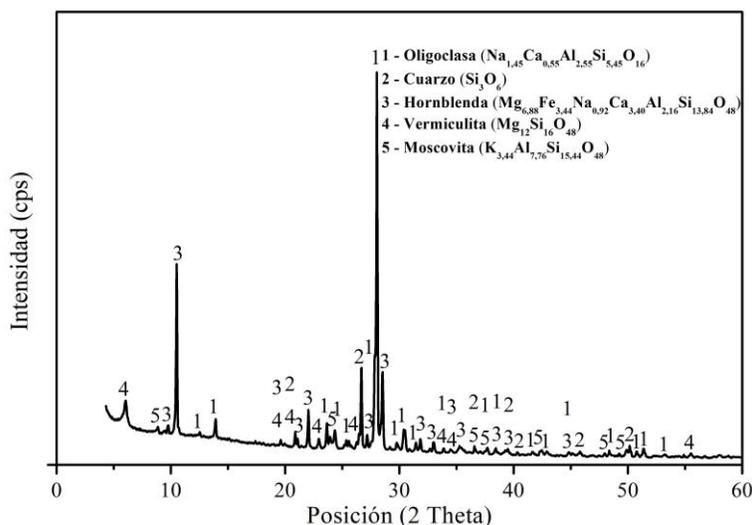
### 4.1.3 Agregado fino

En la **Tabla 4-4** se presentan los resultados del análisis mediante FRX al agregado fino. Se puede observar que la composición química corresponde a la de un aluminosilicato, con un alto contenido de sílice y alúmina. De manera particular, la cantidad de óxido de calcio y óxido de sodio es importante para tener en cuenta en el proceso de activación.

**Tabla 4-4.** Composición química porcentual del agregado fino.

Óxido	(%)	Óxido	(%)	Óxido	(%)
SiO <sub>2</sub>	53,18	MnO	0,109	NiO	0,0073
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,99	ZrO <sub>2</sub>	0,0669	PuO <sub>2</sub>	0,0057
CaO	7,16	SrO	0,0371	ZnO	0,0055
Na <sub>2</sub> O	6,83	BaO	0,0241	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0031
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,44	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0224	Rb <sub>2</sub> O	0,0028
MgO	4,14	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0171	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0023
TiO <sub>2</sub>	0,811	WO <sub>3</sub>	0,0113	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0018
K <sub>2</sub> O	0,712	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0109		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,396	CuO	0,0106		

En la **Figura 4-3** se presentan los resultados de la identificación de las fases cristalinas en el espectro de difracción de rayos X del agregado fino. La composición de cada una de las fases encontradas en los patrones disponibles en la base de datos COD e ICSD, son coherentes con los resultados encontrados en el análisis por FRX. Se puede observar la presencia de los tectosilicatos oligoclasa y cuarzo. La presencia del inosilicato hornblenda puede deberse a que este mineral suele presentarse en compañía del cuarzo y agregados muy finos usados en construcción. También, aparecen algunos picos de baja intensidad asociados a los filosilicatos vermiculita y moscovita.



**Figura 4-3.** Espectro de difracción para el agregado fino.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MORFOLÓGICA DE LOS RESIDUOS MINEROS Y LOS AGREGADOS

### 4.2.1 Residuos mineros

En la **Figura 4-4** se presentan las distribuciones de tamaño de partícula realizadas por tamizado para las muestras RC, RCd y CF retenidas en malla N<sup>o</sup> 200 Tyler. El d<sub>50</sub> para RC y CF es inferior a 131,5 μm y 141,3 μm, respectivamente. La muestra RCd, por su parte, presenta un tamaño de partícula muy fino y no fue posible determinar su d<sub>50</sub> mediante este tamizado. Se puede observar que el 35,4% de la masa acumulada de RC, el 21,4% de CF y el 93,0% de RCd presentan un tamaño de partícula pasante malla N<sup>o</sup> 200 (inferior a 75 μm). Por esta razón, este ensayo fue

complementado con los resultados de análisis granulométricos por difracción láser, realizado a las partículas más finas.

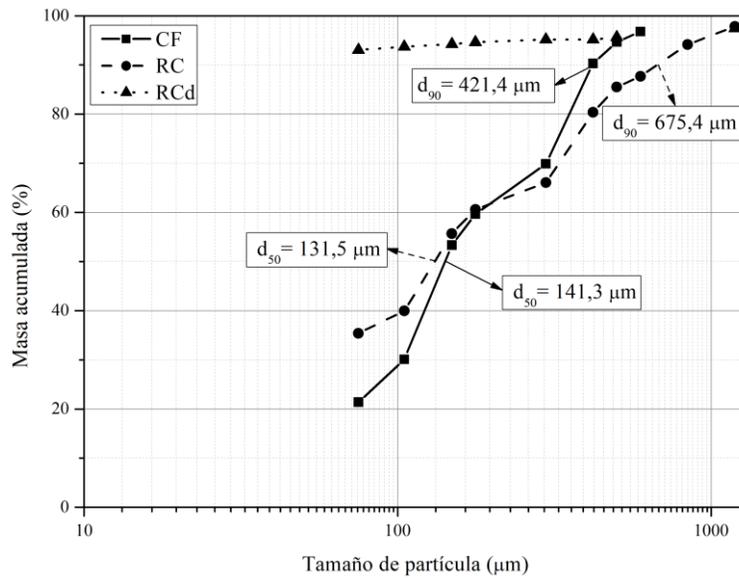


Figura 4-4. Análisis granulométrico por tamizado de RC, RCd y CF.

En la **Figura 4-5** se presentan las distribuciones de tamaño de partícula realizadas por difracción láser para las muestras RC, CF y RCd pasantes en malla N<sub>0</sub> 200. Se observa que el d<sub>50</sub> para RC, CF y RCd es 5,4 μm, 12,5 μm y 5,1 μm respectivamente.

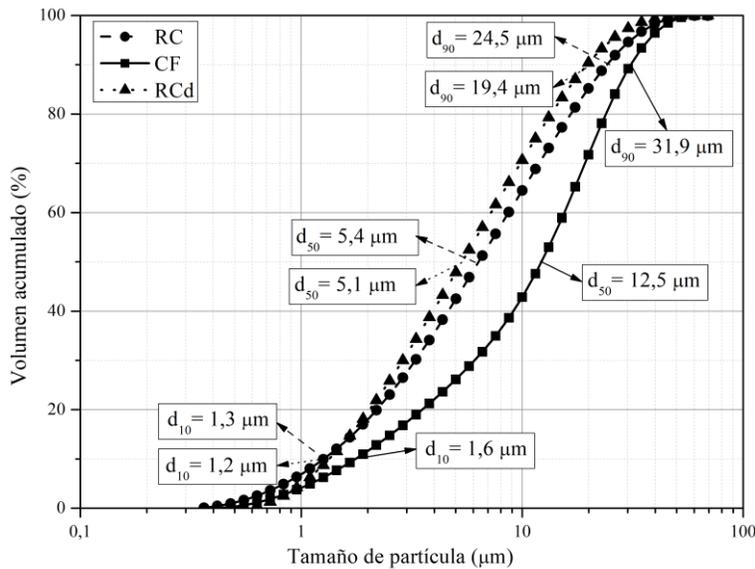


Figura 4-5. Análisis granulométrico por difracción láser de RC, RCd y CF.

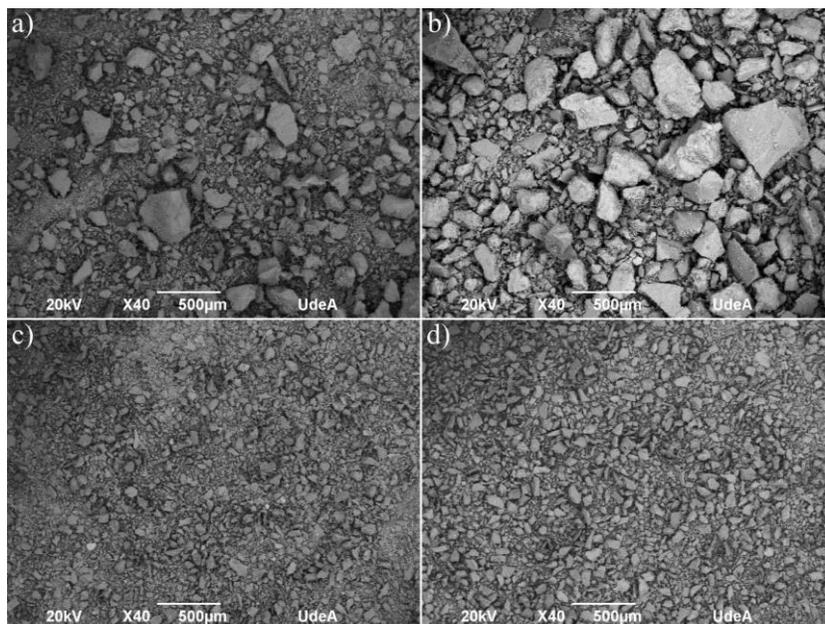
En la **Tabla 4-5** se muestran las propiedades físicas medidas a los residuos. Es importante resaltar que en los concretos activados alcalinamente a partir de residuos mineros, dichos materiales juegan el papel de precursores y/o agregados. Teniendo en cuenta lo anterior, los valores de densidad para los residuos se encuentran entre los límites usuales para agregados (2.300 y 2.900 kg/m<sup>3</sup> [123,127]).

Además, los porcentajes de humedad y absorción sirvieron para ajustar la cantidad de activadores alcalinos en el diseño de mezcla. Las propiedades físicas de RCd no fueron determinadas en estado de entrega, ya que el material no podía ser utilizado sin un proceso de disgregación previo.

**Tabla 4-5.** Propiedades físicas de RC y CF.

Tipo de muestra	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Humedad %	Absorción %
RC	2.670	0,63	0,81
CF	2.590	0,05	0,34

En la **Figura 4-6** se presentan las micrografías MEB de RC y CF. La muestra RCd no fue observada bajo estos aumentos, ya que el material era muy fino. En la **Figura 4-6a** y **4-6b** se muestran para RC y CF retenido malla 200 Tyler, respectivamente y en la **Figura 4-6c** y **4-6d** se presentan para RC y CF pasante malla 200 Tyler, respectivamente. Se puede observar, para ambos tipos de residuos, una amplia distribución de tamaños de partícula y la forma, generalmente, irregular y angular. De manera particular, se visualiza que la muestra CF presenta una forma angular más pronunciada, evidencia de un proceso de conminución previo. Los puntos poco característicos de la **Figura 4-4** para la masa acumulada pasante en 66.1% para RC y en 69.9% para CF pueden estar asociados a esta morfología irregular. Se puede detectar, en la **Figura 4-6c** y **4-6d**, que la muestra de RC tiene un tamaño de partícula inferior a la muestra CF, acorde a los  $d_{50}$  de la **Figura 4-4**. No obstante, se puede observar en la **Figura 4-4** que el  $d_{90}$  de la muestra RC es mayor al de la muestra CF.



**Figura 4-6.** Micrografías MEB de los residuos. Material retenido malla 200 Tyler para a) RC y b) CF. Material pasante malla 200 Tyler para c) RC y d) AF.

En la **Figura 4-7**, **Figura 4-8** y **Figura 4-9** se exhiben las micrografías MEB y se indican los lugares donde se realizaron los análisis EED para los residuos RC, RCd y CF, respectivamente. La composición elemental (porcentajes en peso) de cada uno de los análisis de los EED se presenta en la **Tabla 4-6**. En general, se observa que los elementos predominantes, además del oxígeno, son el

silicio y el aluminio. El silicio puede asociarse a las partículas de tectosilicatos (cuarzo) presentes, que en las micrografías se presentan con formas irregulares. El aluminio y los demás elementos pueden asociarse a las diferentes morfologías presentes, como es el caso de las formas laminares y planares atribuidas a la vermiculita presente en los tres tipos de residuos y la caolinita presente en RC y RCd, acorde a lo encontrado en el análisis por FRX y DRX.

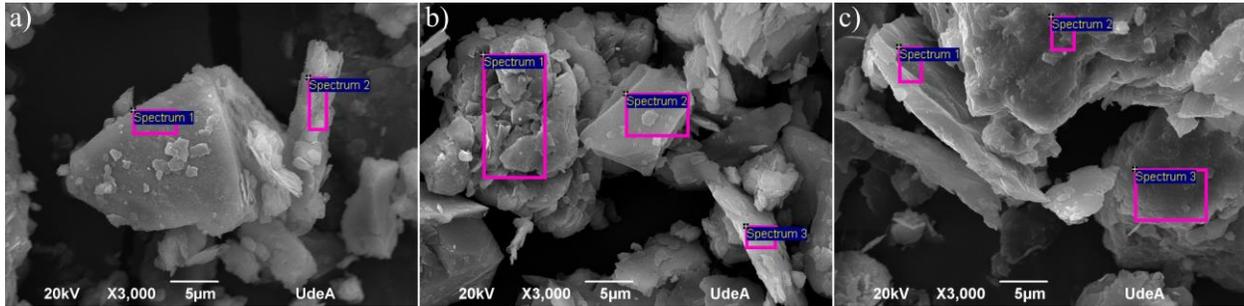


Figura 4-7. a), b) y c) Micrografías MEB y lugares de espectros EED del residuo RC.

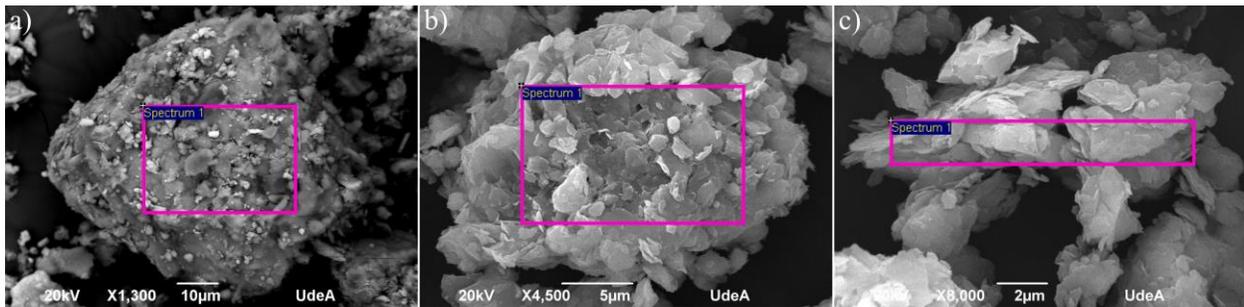


Figura 4-8. a), b) y c) Micrografías MEB y lugares de espectros EED del residuo RCd.

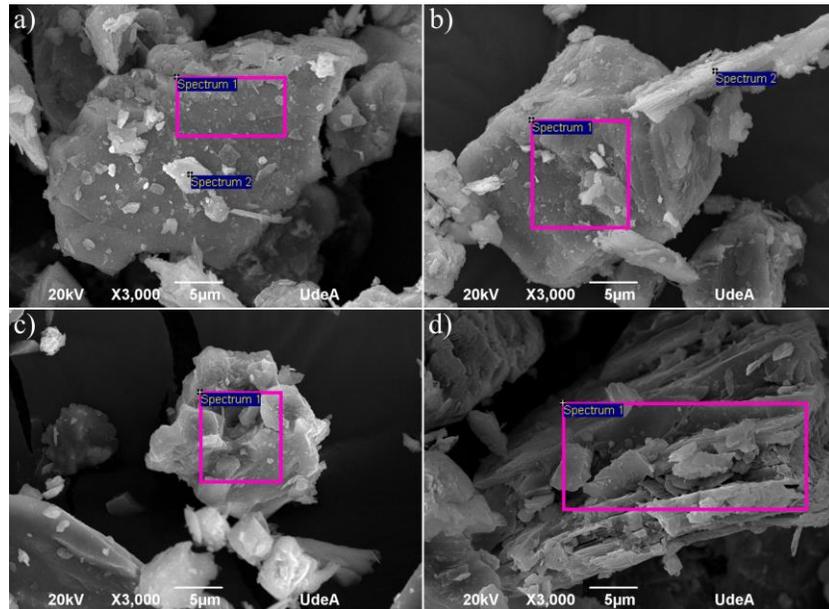


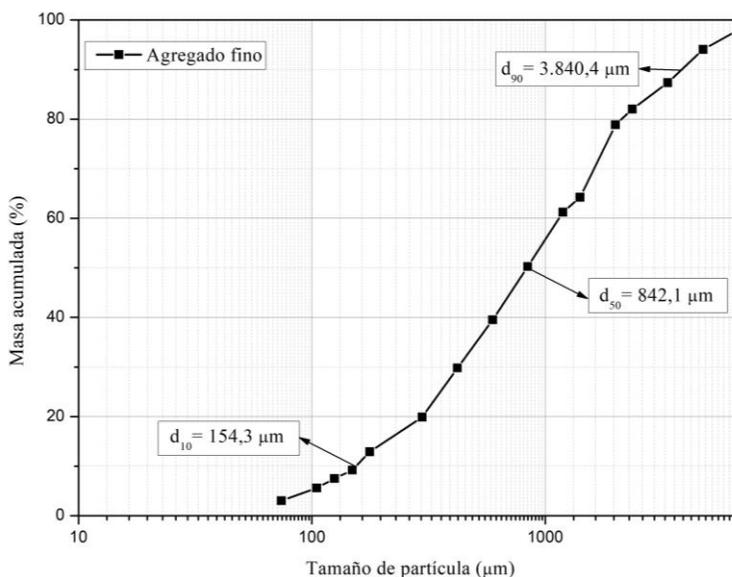
Figura 4-9. a), b) y c) Micrografías MEB y lugares de espectros EED del residuo CF.

**Tabla 4-6.** Composición elemental (% en peso) para los análisis por EED.

Residuo	Figura	Espectro	O	Si	Al	Fe	Mg	K	Ca	Ti	Cl
RC	a	1	39,37	60,63	-	-	-	-	-	-	-
		2	43,23	27,99	18,62	1,25	-	8,92	-	-	-
	b	1	36,25	61,03	2,71	-	-	-	-	-	-
		2	44,94	23,25	14,65	10,12	6,32	-	-	0,73	-
		3	44,11	26,50	19,28	4,07	0,84	5,20	-	-	-
	c	1	37,67	35,67	9,35	1,72	1,46	14,14	-	-	-
		2	35,73	60,89	2,54	-	0,84	-	-	-	-
		3	30,59	60,99	8,42	-	-	-	-	-	-
	RCd	a	1	44,89	32,02	19,08	2,48	0,64	0,88	-	-
b		1	39,31	35,65	13,59	4,72	1,45	2,66	-	1,60	1,02
c		1	49,85	31,20	14,59	1,98	0,75	1,63	-	-	-
CF	a	1	8,25	16,04	9,71	59,44	5,42	-	1,14	-	-
		2	39,11	22,44	13,23	17,80	4,33	3,08	-	-	-
	b	1	49,14	2,00	0,94	-	-	-	47,92	-	-
		2	48,96	41,12	3,09	2,90	1,61	-	2,32	-	-
	c	1	46,62	3,66	0,82	1,89	0,64	-	46,38	-	-
	d	1	40,58	28,44	12,31	7,27	1,45	8,78	1,17	-	-

#### 4.2.2 Agregado fino

De acuerdo a la norma ASTM C33-18 [205], el módulo de finura de la arena corresponde al valor de 2,9. Esto permite inferir que es una arena ligeramente gruesa y su valor se encuentra en los límites permisibles para este tipo de material, los cuales oscilan entre 2,0 y 3,5 [210]. En la **Figura 4-10** se presenta el análisis granulométrico detallado por tamizado de la arena. En efecto, se puede observar que es una arena ligeramente gruesa, con un  $d_{50}$  de 842,1  $\mu\text{m}$ . En la **Tabla 4-7** se resumen las propiedades físicas.



**Figura 4-10.** Análisis granulométrico por tamizado de la arena.

**Tabla 4-7.** Propiedades físicas del agregado fino.

Tipo de muestra	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Humedad %	Absorción %
Arena	2.720	2,56	3,95

### 4.2.3 Agregado grueso

De acuerdo a la norma ASTM C33-18 [205], mediante tamizado se determinó que el tamaño máximo nominal de los agregados gruesos corresponde al número de tamaño 56, con rangos de material pasante (porcentaje en peso) de 90-100% para 25 mm, 40-85% para 19 mm, 10-40% para 12,5 mm y 0-5% para 4,75 mm. En la **Tabla 4-8** se resumen las propiedades físicas.

**Tabla 4-8.** Propiedades físicas del agregado grueso.

Tipo de muestra	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Humedad %	Absorción %
Agregado grueso	2.690	0,48	1,37

## 4.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA ACTIVADORES

### 4.3.1 Hidróxido de sodio

En la **Tabla 4-9** presentan las especificaciones y el certificado de calidad para la soda cáustica comercial, en la cual se puede observar que presenta una pureza superior al 98%.

**Tabla 4-9.** Propiedades soda cáustica comercial en escamas [226].

Parámetros	Unidad	Especificaciones	Resultado
Apariencia	-	Botones blancos o casi blancos higroscópicos	Conforme
NaOH	% (m/m)	Mín. 98	98,1
NaCO <sub>3</sub>	-	Máx. 2.000	Garantizado
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Máx. 15	Garantizado
Metales pesados	-	Máx. 10	Garantizado
NaCl	mg/kg	Máx. 200	143
Hg	-	Máx. 0,3	Garantizado

Verificando la composición del activador, se encontró que presenta una pureza superior al 99%. Además, tiene una densidad de 1.310,1 kg/m<sup>3</sup>. En la **Tabla 4-10** se presentan los contenidos porcentuales de óxidos presentes en la muestra.

**Tabla 4-10.** Composición química porcentual de la soda cáustica comercial en escamas.

Óxido	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	CuO	Cl	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO
(%)	99,65	0,196	0,104	0,0157	0,0148	0,0141	0,0052	0,0045

### 4.3.2 Silicato de sodio

En la **Tabla 4-11** se presentan las especificaciones y el certificado de calidad para el silicato de sodio comercial, correspondiente a la referencia Flocsil.

**Tabla 4-11.** Propiedades silicato de sodio comercial alcalino Flocsil [211].

Parámetros	Método	Especificaciones	Resultado
Densidad (° Be)	IAM 321-035	52 a 54	52,78
G.E. (kg/m <sup>3</sup> )	-	1.550 a 1.600	1.572,1
Relación	IAM 321-035	1,6 ±0,1	1,65
Na <sub>2</sub> O (% en peso)	-	17,5±0,5	17,09
SiO <sub>2</sub> (% en peso)	-	27,5±1,0	28,12
Sólidos (% en peso)	IAM 321-035	45±0,5	45,21
Color	-	Grisáceo	Normal
Turbidez y sedimentos	-	Ninguno	Normal

Verificando la composición del activador, se encontró que para un contenido de sólidos del 45,2%, las cantidades óxido de silicio y óxido de sodio corresponden a porcentajes en peso en el silicato de sodio de 27,57 y 17,19. Estos valores son cercanos a los presentados en las especificaciones. Además, la densidad calculada corresponde a la presentada en la ficha técnica, con un valor de 1.572,4 kg/m<sup>3</sup>. En la **Tabla 4-12** se presentan los contenidos porcentuales de óxidos presentes en la muestra.

**Tabla 4-12.** Composición química porcentual del silicato de sodio comercial Flocsil.

Óxido	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	BaO
(%)	61,00	38,04	0,489	0,196	0,0714	0,0630	0,0312
Óxido	CaO	P	K <sub>2</sub> O	ZrO <sub>2</sub>	Cl	NiO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
(%)	0,0247	0,0234	0,0208	0,0125	0,0107	0,0064	0,0047

# Capítulo 5

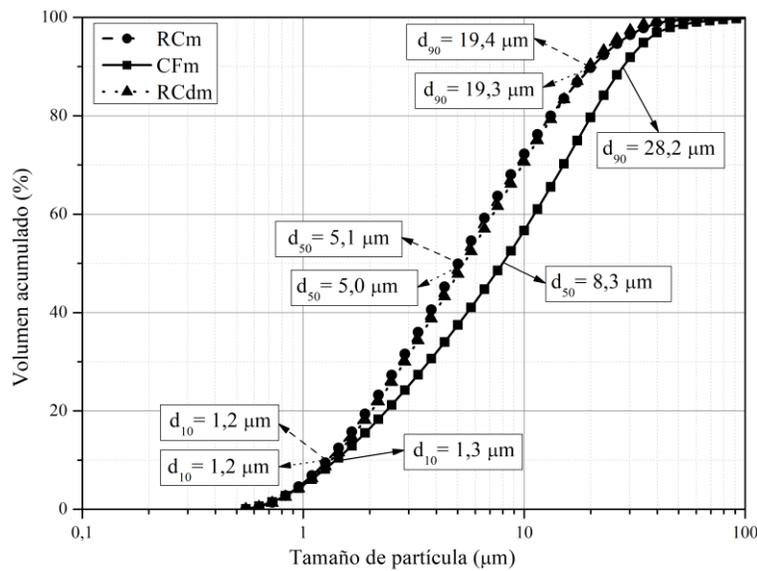
## RESULTADOS Y ANÁLISIS: FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS Y CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

En este capítulo se presentan los resultados de la fabricación de los morteros y concretos activados alcalinamente. Inicialmente se llevó a cabo un proceso de disgregación o molienda, según el tipo de residuo, hasta alcanzar un tamaño de partícula similar al del cemento. Luego se fabricaron y caracterizaron morteros activados alcalinamente, en los cuales se comparó la influencia del tamaño de partícula en la activación alcalina y su respectiva comparación con morteros convencionales de referencia. Una vez determinada la mejor condición de activación en función de la resistencia a la compresión a los 28 días, se llevó a cabo la fabricación y caracterización de concretos activados alcalinamente y su respectiva comparación con concretos convencionales de referencia.

### 5.1 FABRICACIÓN DE MORTEROS Y EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

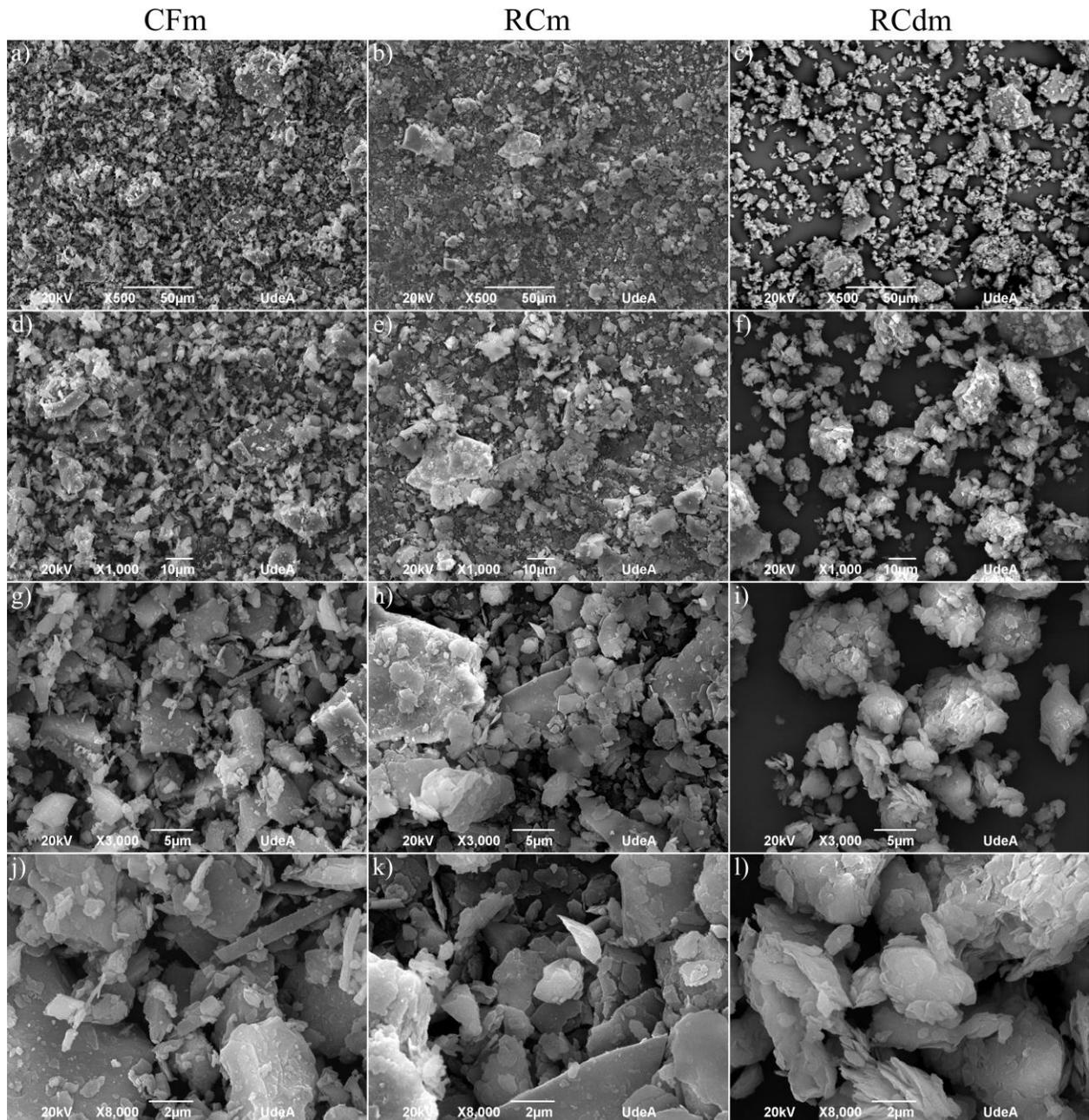
#### 5.1.1 Proceso de disgregación o molienda

En la **Figura 5-1** se presentan las distribuciones de tamaño de partícula realizadas por difracción láser para las muestras RCm, CFm y RCdm. Se observa que el  $d_{50}$  para RCm, CFm y RCdm es 5,0  $\mu\text{m}$ , 8,3  $\mu\text{m}$  y 5,1  $\mu\text{m}$  respectivamente. De manera particular, el  $d_{50}$  para RCdm es similar al encontrado para RCd, lo cual permite inferir que el proceso de molienda solo generó un proceso de separación de las partículas. En RCm y CFm sí se observa que el proceso de molienda redujo el tamaño de partícula.



**Figura 5-1.** Análisis granulométrico para las muestras molidas RCm, CFm y RCdm mediante difracción láser.

En la **Figura 5-2** se muestran las micrografías MEB de CFm, RCm y RCdm. Se observa que para CFm (**Figura 5-2a** y **d**) y RCm (**Figura 5-2b** y **e**), la distribución de tamaño de partícula a bajos aumentos es muy similar. Sin embargo, a altos aumentos se observa que la porción de finos para RCm (**Figura 5-2h** y **k**) es superior a CFm (**Figura 5-2g** y **j**), conforme a los resultados obtenidos mediante difracción láser presentados en la **Figura 5-1**, donde el  $d_{50}$  de RCm es inferior al de CFm. Para RCm y CFm, la forma es generalmente irregular y angular, evidencia del proceso de molienda. Por otra parte, se observa que RCdm luego del proceso de disgregación, presenta una morfología ligeramente homogénea, característica de su capacidad higroscópica. Sin embargo, a altos aumentos en la **Figura 5-2i** y **l**, se puede visualizar que las partículas grandes corresponden a aglomerados de partículas más pequeñas con morfologías laminares.



**Figura 5-2.** Micrografías MEB de los residuos molidos. a), d), g) y j) para CFm. b), e), h) y k) para RCm. c), f), i) y l) para RCdm.

En la **Tabla 5-1** se presenta la comparación de las distribuciones de tamaño de partícula y en la **Tabla 5-2** la comparación de las superficies específicas de los residuos mineros (fracción fina sin moler y molidos), con rangos encontrados para cementos convencionales [227–229]. Se puede observar que la fracción fina (pasante malla 200 Tyler) de los residuos y los residuos molidos presentan tamaños de partícula similares y superficies específicas, incluso superiores, a las de los cementos convencionales. Ya que el proceso de activación de los residuos ocurre desde la

superficie hacia el interior, probablemente los residuos molidos, al tener mayor área superficial expuesta, se activarán más rápido que la fracción fina presente [230].

**Tabla 5-1.** Comparación de las distribuciones de tamaño de partícula de los residuos mineros (fracción fina y molidos) con rangos encontrados para cementos convencionales [227–229].

Tamaño	RC		RCm
	Retenido malla 200 (µm)	Pasante malla 200 (µm)	Molido
d <sub>10</sub>	-	1,3	1,2
d <sub>50</sub>	131,5	5,4	5,0
d <sub>90</sub>	421,4	24,9	19,3
Tamaño	CF		CFm
	Retenido malla 200 (µm)	Pasante malla 200 (µm)	Molido
d <sub>10</sub>	-	1,6	1,3
d <sub>50</sub>	141,3	12,5	8,3
d <sub>90</sub>	675,4	31,9	28,2
Tamaño	RCd		RCdm
	Retenido malla 200 (µm)	Pasante malla 200 (µm)	Molido
d <sub>10</sub>	-	1,2	1,2
d <sub>50</sub>	-	5,1	5,1
d <sub>90</sub>	-	19,4	19,4
Tamaño	Cemento convencional (µm)		
d <sub>10</sub>	1,5 a 3		
d <sub>50</sub>	12 a 22		
d <sub>90</sub>	40 a 60		

**Tabla 5-2.** Comparación de las superficies específicas de los residuos mineros (fracción fina y molidos) con rangos encontrados para cementos convencionales [227–229].

Material	Unidad (cm <sup>2</sup> /g)
RC	8.100
RCm	9.300
CF	5.200
CFm	7.900
RCd	9.000
RCdm	9.000
Cemento comercial Pórtland	3.400 a 4.500 (Mínimo 2.800)

Finalmente, en la **Tabla 5-3** se presenta la densidad de los residuos molidos. A diferencia de los residuos en estado de entrega, en los cuales los residuos juegan el papel de precursores y agregados, los residuos molidos o disgregados sólo se comportan como precursores en los concretos activados alcalinamente. Teniendo en cuenta lo anterior, los valores de densidad para los residuos se encuentran por debajo de los límites usuales para cementos (2.900 y 3.100 kg/m<sup>3</sup> [227–229]), lo que podría permitir que los diseños de mezcla tengan pesos inferiores a los de concretos convencionales.

**Tabla 5-3.** Propiedades físicas de RCm, RCdm y CFm.

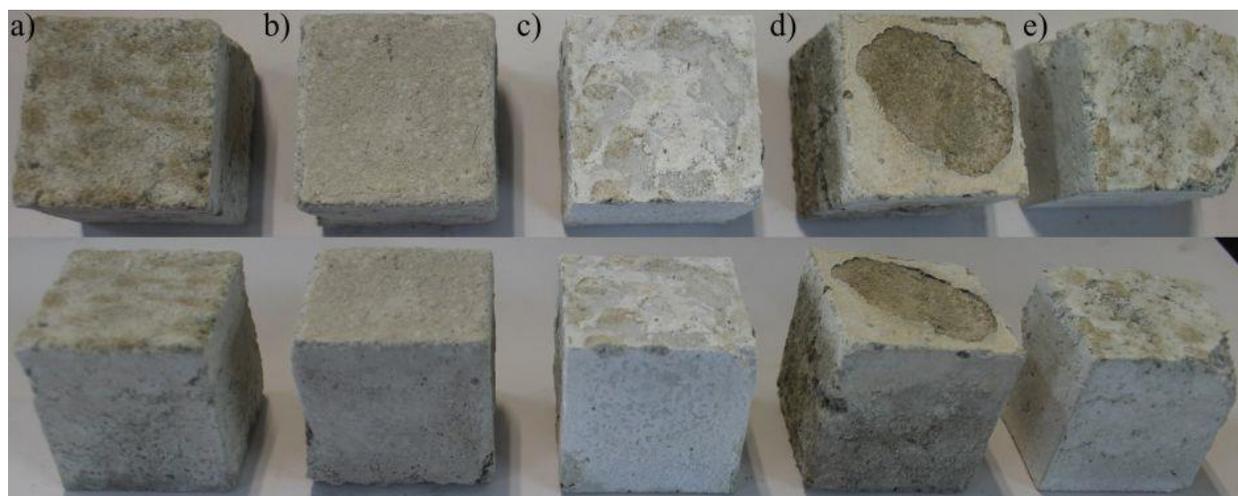
Tipo de muestra	Densidad kg/m <sup>3</sup>
RCm	2.720
CFm	2.760
RCdm	2.490

### 5.1.2 Proceso de activación alcalina

Las combinaciones  $M_s=0,5\text{-}\%Na_2O=12$  (**Figura 5-3**) y  $M_s=1,5\text{-}\%Na_2O=12$  (**Figura 5-4**) presentaron una gran cantidad de eflorescencia y a los 28 días de observación no se encontraban en condiciones aptas para su estudio de resistencia a la compresión. La combinación  $M_s=0,5\text{-}\%Na_2O=6$  no logró endurecer a las 24, 30 y 36 horas de desmolde. Finalmente, la combinación  $M_s=1,5\text{-}\%Na_2O=6$  fue la que presentó mejor consistencia a las 24 y 30 horas de desmolde (según el tipo de residuo) y la menor cantidad de eflorescencia.



**Figura 5-3.** Eflorescencia en las muestras preparadas con la combinación  $M_s=0,5\text{-}\%Na_2O=12$ , mostrando la vista superior y lateral de las muestras. a) MRCdm0, b) MRC, c) MCF, d) MRCm0 y e) MCFm0.



**Figura 5-4.** Eflorescencia en las muestras preparadas con la combinación  $M_s=1,5\text{-}\%Na_2O=12$  mostrando la vista superior y lateral de las muestras. a) MRCdm0, b) MRC, c) MCF, d) MRCm0 y e) MCFm0.

En la **Tabla 5-4** se presentan las relaciones molares planteadas para cada tipo de mortero, incluyendo la relación  $CaO/SiO_2$ , para la combinación  $M_s=1,5\text{-}\%Na_2O=6$ .

**Tabla 5-4.** Relaciones molares finales en cada tipo de mortero.

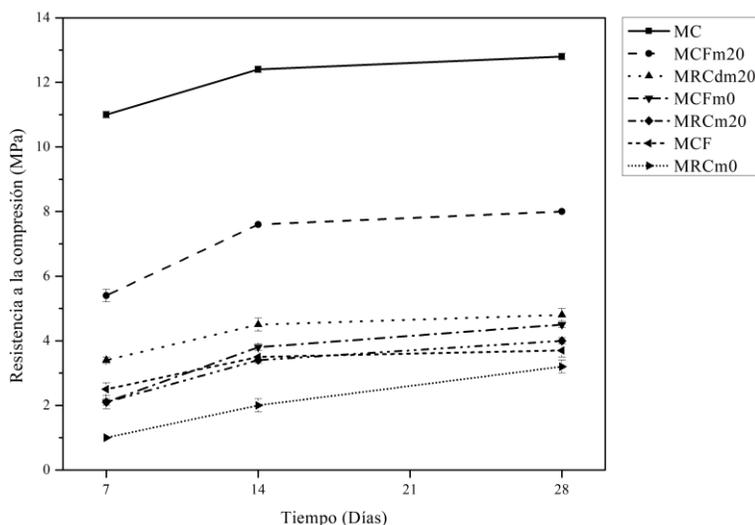
Relación	MRC	MRCm0	MRCm10	MRCm20	MCF	MCFm0
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,532	5,921	5,785	5,648	9,352	5,470
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,094	0,101	0,104	0,106	0,102	0,104
H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0	7,467	10,470	10,437	0	7,284
CaO/SiO <sub>2</sub>	0,005	0,094	0,126	0,160	0,088	0,123
Relación	MCFm10	MCFm20	MRCdm0	MRCdm10	MRCdm20	-
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,381	5,289	4,785	4,764	4,741	-
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,107	0,109	0,109	0,111	0,113	-
H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	7,924	6,810	9,632	10,107	10,142	-
CaO/SiO <sub>2</sub>	0,154	0,187	0,104	0,137	0,173	-

### 5.1.3 Evaluación de la resistencia a la compresión

En la **Tabla 5-5** se presentan los resultados de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado para todas las muestras y en la **Figura 5-5** se presentan los resultados a los 7, 14 y 28 días de fraguado para los seis mejores resultados de resistencia a la compresión de las condiciones evaluadas para los morteros activados alcalinamente y el mortero de referencia. Se observa que, pese a que MCFm20 presenta el resultado más alto a los 28 días de fraguado, no se logró alcanzar el valor establecido en las especificaciones. En la siguiente sección se realiza un análisis detallado de la influencia del tamaño de partícula de la materia prima y la morfología, fases y geles presentes en la resistencia a la compresión de los morteros desarrollados.

**Tabla 5-5.** Resultados de la resistencia a la compresión de los morteros con residuos activados y el mortero con cemento como referencia.

Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)		
	7 días	14 días	28 días
MC	11,0±0,1	12,4±0,1	12,8±0,2
MRC	0,6±0,0	1,2±0,0	1,4±0,1
MRCm0	1,0±0,0	2,0±0,2	3,2±0,2
MRCm10	0,5±0,1	0,9±0,1	1,1±0,1
MRCm20	2,1±0,2	3,4±0,1	4,0±0,1
MCF	2,5±0,2	3,5±0,2	3,7±0,2
MCFm0	2,1±0,1	3,8±0,1	4,5±0,1
MCFm10	0,8±0,2	0,9±0,0	1,4±0,1
MCFm20	5,4±0,2	7,6±0,0	8,0±0,0
MRCdm0	0,7±0,1	1,9±0,1	2,7±0,2
MRCdm10	0,4±0,1	0,8±0,1	1,5±0,2
MRCdm20	3,4±0,1	4,5±0,2	4,8±0,1



**Figura 5-5.** Resultados de la resistencia a la compresión para las 6 mejores condiciones de los morteros con residuos activados y el mortero con cemento como referencia.

#### 5.1.4 Caracterización mineralógica, morfológica y química

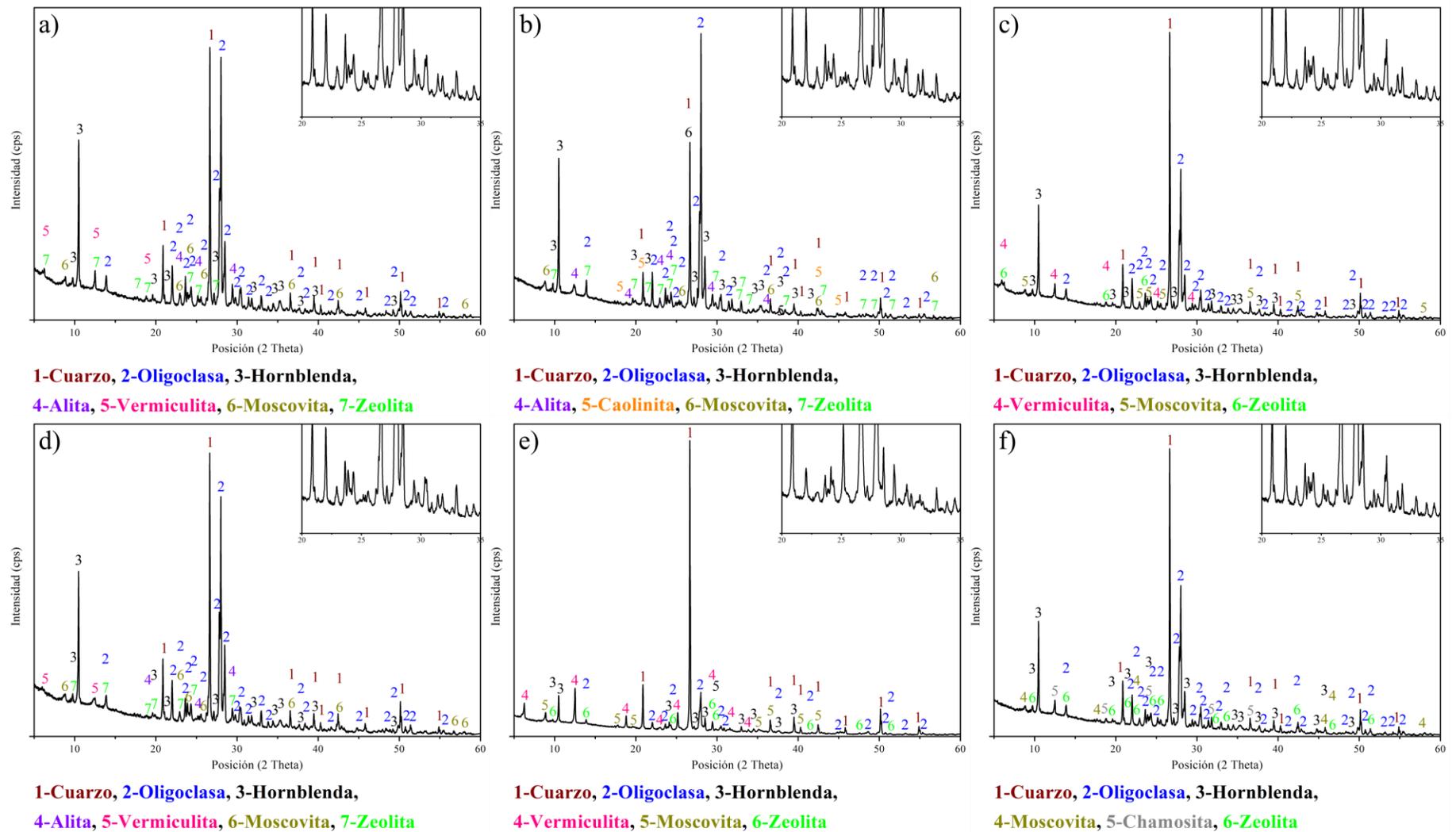
Los resultados de resistencia a la compresión muestran que el tamaño de partícula juega un papel importante. Si se comparan los resultados entre las muestras molidas y las muestras sin moler:  $MRC=1,4$  MPa frente a  $MRCm0=3,2$  MPa y  $MCF=3,7$  MPa frente a  $MCFm0=4,5$  MPa, es evidente que la resistencia a la compresión aumenta cuando disminuye el tamaño de partícula. A pesar que se mantuvieron las mismas proporciones entre finos y gruesos durante la elaboración de los morteros, el  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  y  $d_{90}$  eran inferiores en las muestras molidas (**Tabla 5-1**). Debido a que la activación de los residuos se da desde la superficie hasta el interior, tener material más fino acelera la activación alcalina, ya que el área superficial expuesta se incrementa. Como pudo observarse en la **Tabla 5-2**, el área superficial expuesta de los residuos molidos es incluso superior a los límites para cementos convencionales, lo cual probablemente incrementó la resistencia a la compresión.

Desde la influencia de las fases presentes en los morteros, estos resultados pueden atribuirse a tres aspectos principalmente. El primero se relaciona a la poca o nula fase amorfa que se presenta en los espectros de difracción de la **Figura 5-6**. En ninguno de los diseños evaluados se observa una modificación en el halo situado entre los ángulos  $20-35^\circ$ , los cuales durante la activación de diferentes precursores, como las cenizas volantes o las escorias de fundición presentan un aumento respecto a la línea base y sugieren la presencia del gel (N,C)-A-S-H en la fase vítrea [41,128,152,159,169,170]. En las figuras no es posible identificar visualmente la presencia de fase amorfa, la cual es la responsable de las elevadas resistencias a la compresión en los materiales activados alcalinamente [41,128,152,159,169,170]. La mayoría de picos se asocian principalmente a la oligoclasa y hornblenda de la arena y al cuarzo presente en todos los tipos de residuos. Además, en la **Figura 5-6a, b y d** se puede observar la presencia de alita, asociado a la sustitución parcial de cemento.

El segundo aspecto se relaciona a la aparición de zeolitas en los diferentes espectros. Pacheco et al [159] mencionan que el principal producto generado en la activación alcalina de materiales sílico-

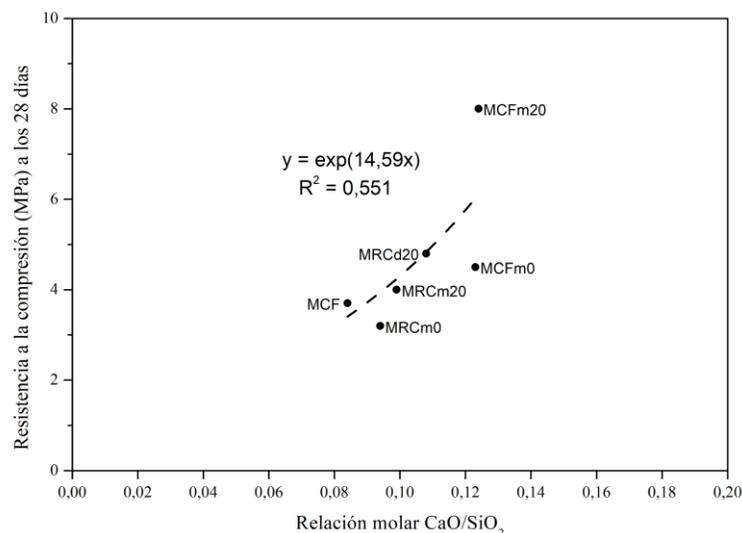
aluminosos es el gel amorfo (N,C)-A-S-H. Sin embargo, también se da la aparición de productos zeolíticos secundarios, tales como la hidroxisodalita, la zeolita P, la Na-chabazita, la zeolita Y y la faujasita. Estos productos no disminuyen las propiedades mecánicas si se forman después de la formación del gel amorfo, luego de mucho tiempo de reacción (más de 180 días), en la etapa final de activación. Pero, cuando se da la cristalización de zeolitas a edades tempranas y compite con la formación del gel (se forma menor cantidad de gel), genera una disminución en las propiedades mecánicas [41].

El tercer aspecto se relaciona al tipo de gel que probablemente se haya formado. A pesar de que las relaciones molares iniciales  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  de cada residuo sugieren la posible formación del gel N-A-S-H, la adición de cemento Pórtland como sustituto parcial incrementa la relación molar  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  (**Tabla 2-20**), lo cual favorece la formación del gel C-A-S-H, o la coexistencia de ambos en el gel (N,C)-A-S-H. Para observar si existe alguna influencia directa de las relaciones molares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , se llevó a cabo un análisis estadístico mediante diferentes ajustes en el software OriginPro 8.5 para los seis mejores resultados. El análisis permitió establecer que la resistencia a la compresión no se relaciona de manera directa a las relaciones molares por si solas o combinaciones entre ellas. La relación molar  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  es la que presentó un mejor ajuste entre ellas (no muy bueno con 0,551), sin embargo, en general las muestras que presentaron sustitución parcial del 20% de cemento presentaron las mejores resistencias a la compresión (MCFm20, MRCdm20 y MRCm20), lo cual sugiere la aparición del gel (N,C)-A-S-H. También puede observarse que las muestras con 10% de sustitución parcial de cemento presentaron resistencias muy bajas, incluso inferiores a las de los morteros con los residuos molidos sin sustitución parcial de cemento. Esto puede deberse a que el contenido de cemento no era suficiente para generar la aparición del gel (N,C)-A-S-H.



Cuarzo ( $\text{Si}_1\text{O}_2$ ), Oligoclasa ( $\text{Na}_{1,45}\text{Ca}_{0,55}\text{Al}_{2,55}\text{Si}_{5,45}\text{O}_{16}$ ), Hornblenda ( $\text{Mg}_{6,88}\text{Fe}_{3,44}\text{Ca}_{3,40}\text{Na}_{0,92}\text{Al}_{2,16}\text{Si}_{3,84}\text{O}_{48}$ ), Alita ( $\text{Ca}_3\text{Si}_1\text{O}_3$ ), Caolinita ( $\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{36}$ ), Vermiculita ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{12}$ ), Moscovita ( $\text{K}_{3,44}\text{Al}_{7,76}\text{Si}_{15,44}\text{O}_{48}$ ), Chamosita ( $\text{K}_{3,44}\text{Al}_{7,76}\text{Si}_{15,44}\text{O}_{48}$ ), Zeolita ( $\text{Na}_{9,4}\text{Al}_{9,4}\text{Si}_{26,6}\text{O}_{108,8}\text{H}_{73,6}$ ) - ( $\text{Al}_{2,84}\text{Si}_{8,88}\text{O}_{22,02}$ )

**Figura 5-6.** Espectros de difracción para las condiciones evaluadas a los 28 días de fraguado. a) MCFm20, b) MRCdm20, c) MCFm0, d) MRCm20, e) MCF y e) MRCm0.



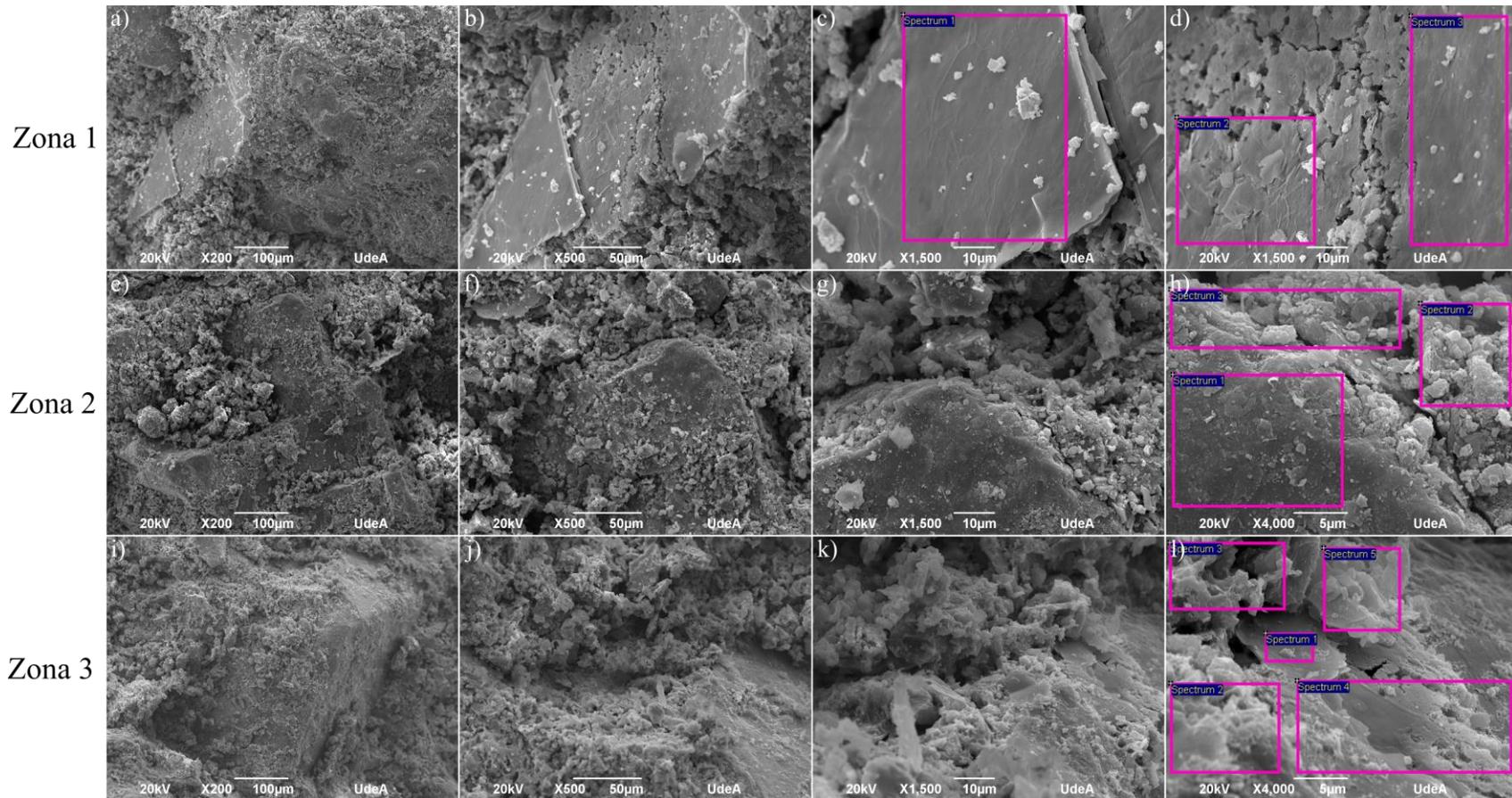
**Figura 5-7.** Resistencia a la compresión a los 28 días en función de la relación molar CaO/SiO<sub>2</sub> para las 6 mejores condiciones de los morteros con residuos activados.

En la **Figura 5-8**, **Figura 5-9**, **Figura 5-10**, **Figura 5-11**, **Figura 5-12** y **Figura 5-13** se observan las morfologías de las superficies de fractura después del ensayo de compresión, realizados a los 28 días de fraguado y se indican los lugares donde se realizaron los análisis EED para los morteros MCFm20, MRCdm20, MCFm0, MRCm20, MCF y MRCm0 respectivamente. La composición elemental (porcentajes en peso) de cada uno de los análisis de los EED se presenta en la **Tabla 5-6**, **Tabla 5-7**, **Tabla 5-8**, **Tabla 5-9**, **Tabla 5-10** y **Tabla 5-11** respectivamente. En general se observa que los morteros presentan estructuras similares al gel (C,N)-A-S-H, sin embargo sus densidades y compacidades varían considerablemente entre zonas del mismo mortero y con otros tipos. A altos aumentos es posible observar que se presentan zonas de segregación y los materiales cementantes no recubren de manera uniforme todos los agregados finos.

Es probable que la estructura más evidente de la formación del gel se observa en la **Figura 5-8c** (Zona 1 mortero MCFm20), el cual se encuentra recubriendo una porción del agregado fino. El análisis mediante EED presente en el espectro 1 sugiere que el gel es más del tipo N-A-S-H debido al bajo contenido de Ca. Otras estructuras que muestran geles densos se pueden observar en la **Figura 5-8d** (Zona 1 mortero MCFm20), **Figura 5-9h** (Zona 2 mortero MRCdm20), **Figura 5-9k** (Zona 3 mortero RCdm20), **Figura 5-10d** y **h** (Zonas 1 y 2 de mortero MCFm0) y **Figura 5-13h** (Zona 3 mortero MRCm0). Los espectros 2 y 3 de la **Figura 5-8d**, 1 y 2 de la **Figura 5-9k**, 2 de la **Figura 5-10d**, 1 y 3 de la **Figura 5-10h** sugieren la presencia del gel (C,N)-A-S-H, debido al alto contenido de Ca. El espectro 1 de la **Figura 5-13h** sugiere la presencia del tipo N-A-S-H ya que se evidencia la presencia de una gran cantidad de Al y no fue detectado Ca. Los geles densos se relacionan directamente con la propiedad mecánica evaluada, ya que fueron los responsables de la resistencia a la compresión.

No obstante, si sólo se presentaran geles densos, la resistencia a la compresión hubiese sido más alta. La presencia de geles poco densos y poco compactos, como los observados en la **Figura 5-8l** (Zona 3 mortero MCFm20), **Figura 5-9h** (Zona 2 mortero MRCdm20), **Figura 5-10d** (Zona 1 mortero MCFm0), **Figura 5-10l** (Zona 3 mortero MCFm0), **Figura 5-11d**, **h** y **l** (Zonas 1, 2 y 3 del mortero MRCm20 respectivamente) probablemente sean los responsables de las bajas

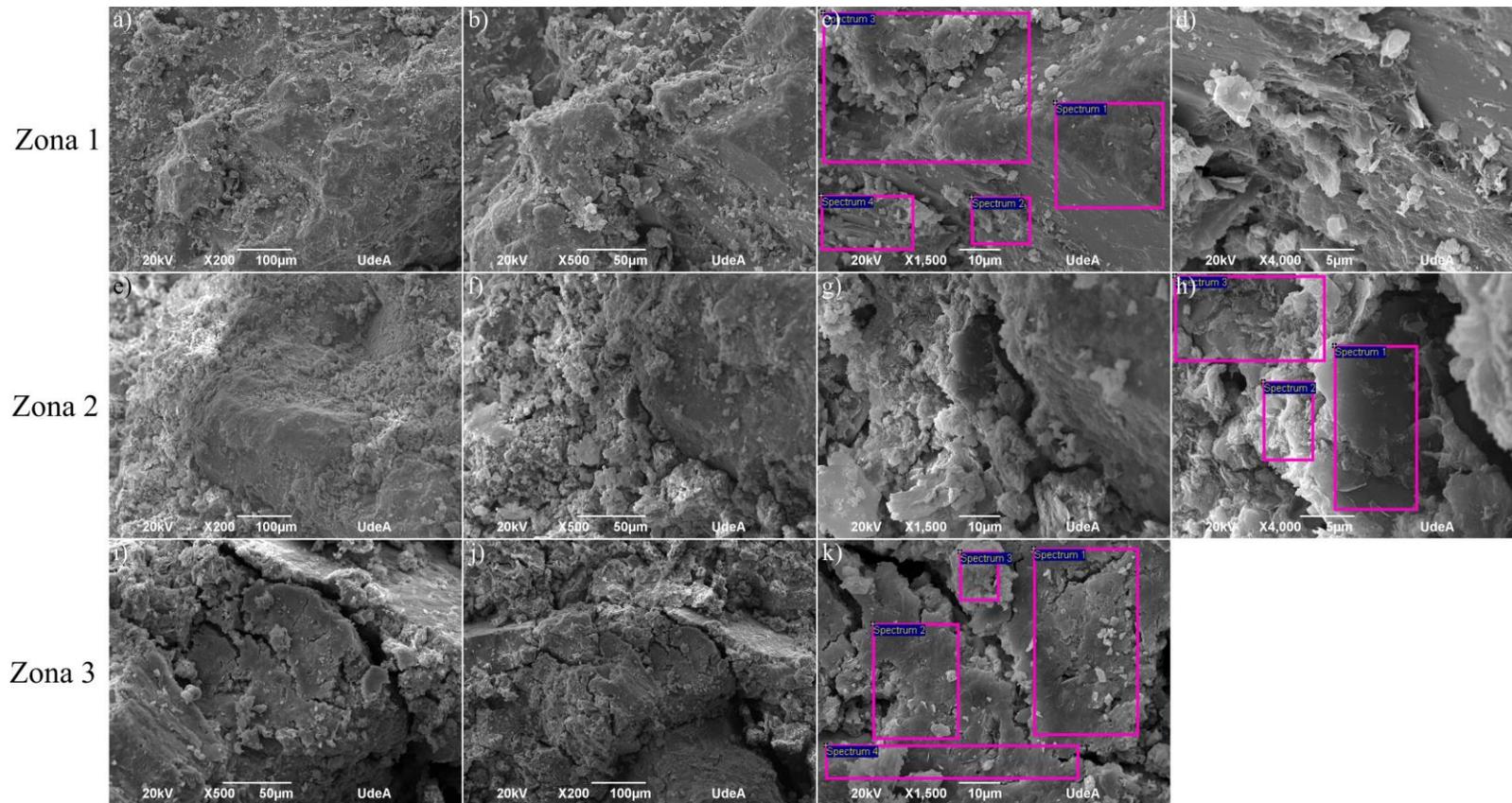
resistencias a la compresión. Las zonas delimitadas por los espectros 2, 3 y 5 de la **Figura 5-8l**, 2 y 3 de la **Figura 5-9h**, 1 y 3 de la **Figura 5-10d**, 2, 3 y 4 de la **Figura 5-10l**, 2, 3, 4 y 5 de la **Figura 5-11d**, 2, 3 y 4 **Figura 5-11h** y 1 de la **Figura 5-11l** evidencian la presencia del gel (C,N)-A-S-H, debido a los altos contenidos de Ca. A pesar que a estos aumentos no es posible asegurar la existencia de unidades zeolíticas bien definidas, las zonas delimitadas por los espectros mencionados muestran ligeras similitudes con las zeolitas sintetizadas a partir de la activación de cenizas volantes [231–237]. Esto también puede influir en la resistencia a la compresión, ya que esta cristalización no es la deseada, por el contrario, se espera un gel en su mayoría amorfo, denso, compacto y continuo.



**Figura 5-8.** Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MCFm20 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f), i) y l) Zona 3.

**Tabla 5-6.** Composición elemental (% en peso) para los análisis por EED para el mortero MCFm20 en las zonas identificadas.

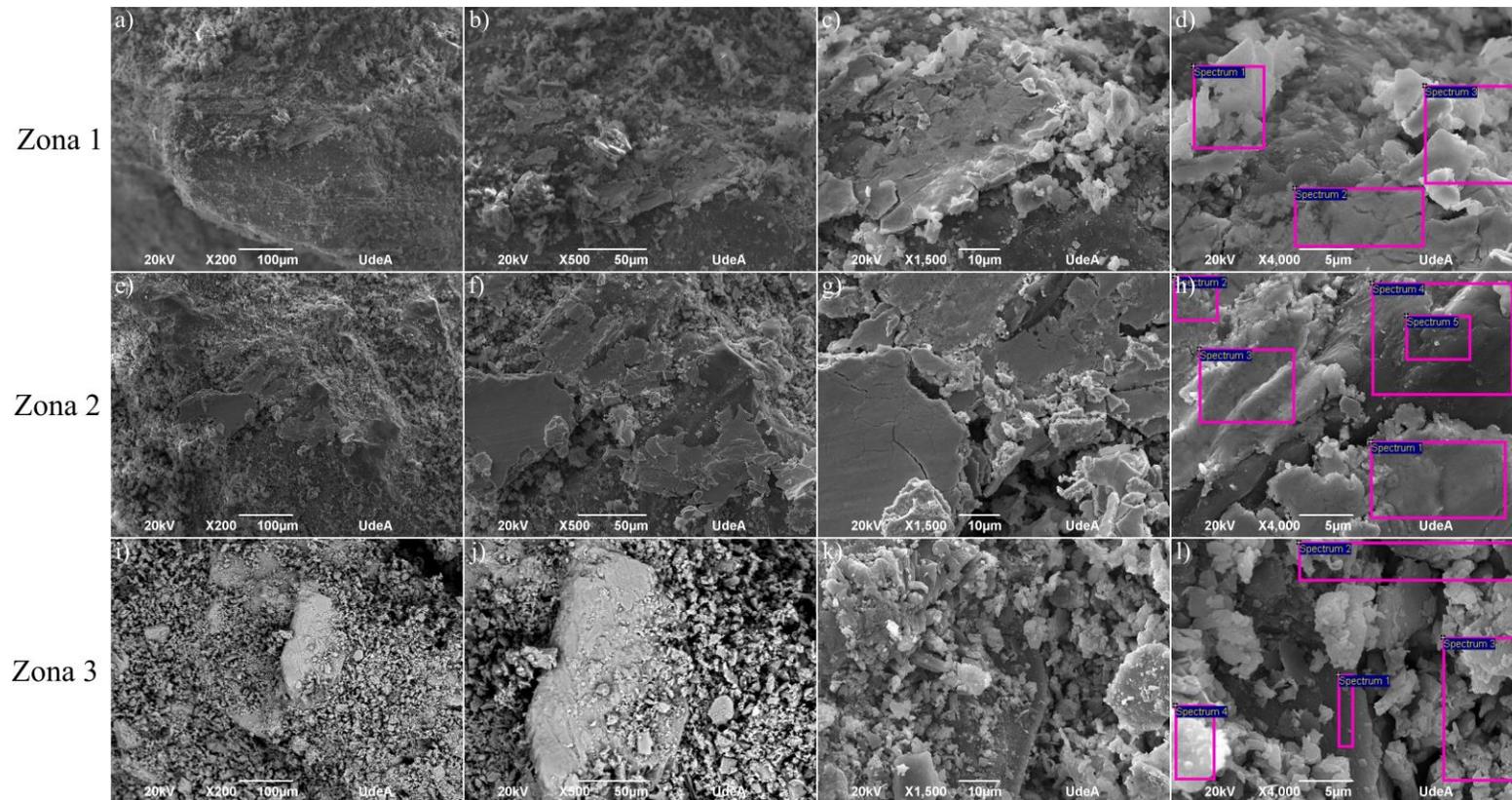
Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti	Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti
1	1	43,01	21,95	7,38	1,16	1,42	6,50	5,58	10,92	2,08	3	1	24,52	24,46	6,91	2,29	13,12	3,16	3,47	20,35	1,72
	2	47,82	21,09	4,42	6,52	10,63	2,75	1,59	4,51	0,67		2	42,13	28,50	12,56	2,38	5,98	1,30	4,80	2,35	-
	3	41,65	22,82	6,91	2,74	4,70	5,91	4,31	9,28	1,68		3	25,04	37,78	9,14	4,95	9,76	1,20	1,43	10,70	-
2	1	28,16	42,32	14,76	5,19	8,17	-	-	1,40	-	-	4	33,00	18,13	3,35	1,93	30,23	-	-	13,36	-
	2	43,81	20,72	4,51	3,55	19,73	2,03	-	5,65	-		5	30,08	29,51	5,44	3,71	22,61	1,54	-	7,11	-
	3	39,24	30,36	8,48	4,50	12,36	1,04	1,16	2,86	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



**Figura 5-9.** Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MRCdm20 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f) e i) Zona 3.

**Tabla 5-7.** Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MRCdm20 en las zonas identificadas.

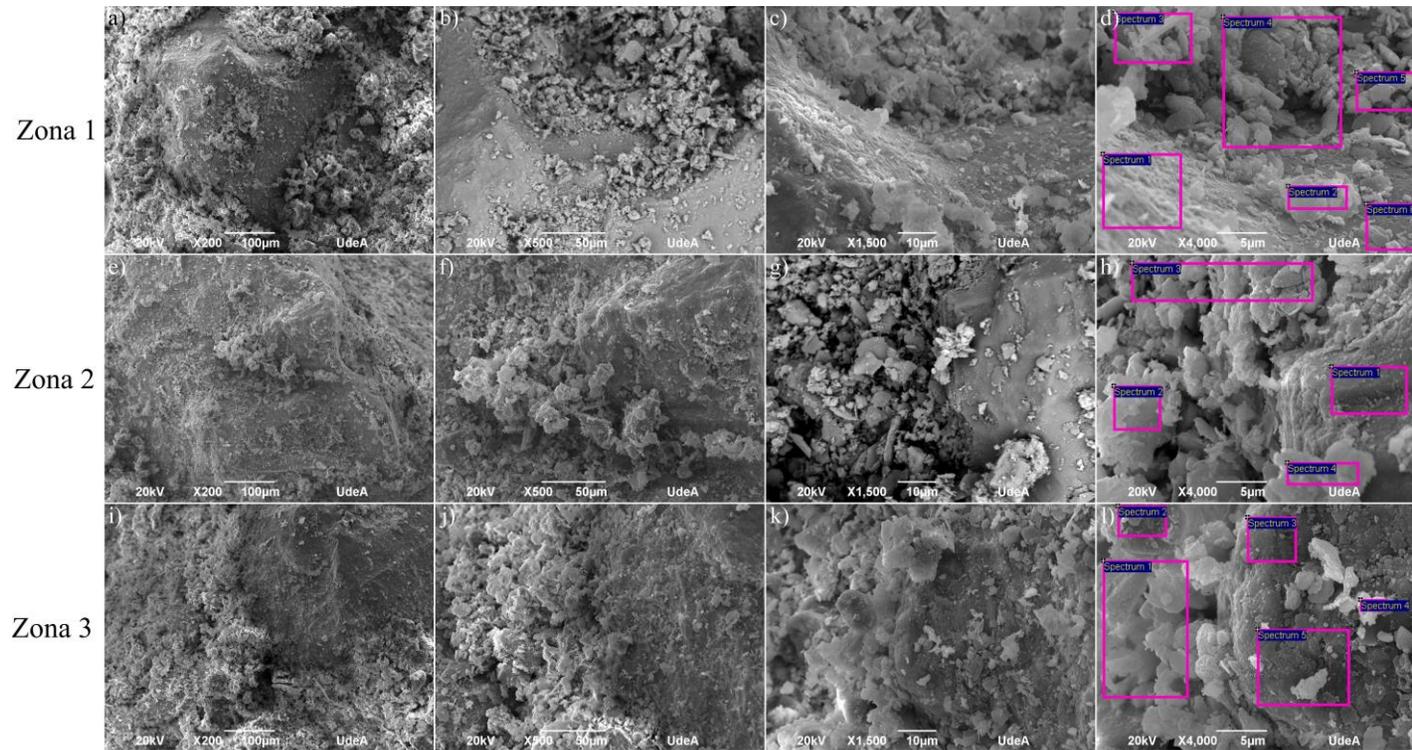
Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti	Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti		
1	1	22,36	33,72	4,93	2,76	11,59	6,36	-	17,27	1,01	3	1	40,02	29,91	8,16	4,01	11,66	1,26	1,08	3,9	-		
	2	30,25	30,10	5,32	4,11	9,21	3,73	-	16,48	0,80		2	39,49	30,24	8,51	4,24	12,35	1,00	1,42	2,75	-		
	3	33,58	28,36	5,24	2,98	9,47	5,19	0,56	13,76	0,86		3	43,43	25,10	6,91	3,42	15,15	1,04	1,09	3,86	-		
	4	32,24	27,27	4,97	3,66	12,56	4,02	0,57	14,71	-		4	36,50	31,40	10,28	3,06	11,98	0,91	1,49	4,38	-		
2	1	38,13	29,44	12,03	3,37	6,50	1,74	2,33	6,46	-													
	2	47,87	24,46	8,81	4,86	7,35	1,89	0,48	4,28	-													
	3	43,55	25,87	8,25	4,15	9,16	1,85	1,12	5,41	0,64													



**Figura 5-10.** Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MCFm0 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f), i) y l) Zona 3.

**Tabla 5-8.** Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MCFm0 en las zonas identificadas.

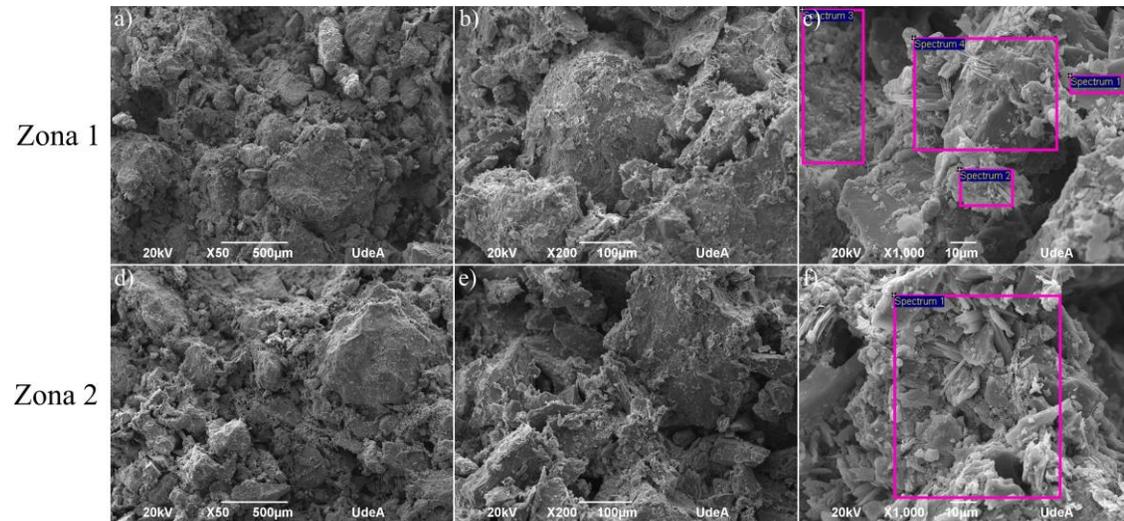
Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti	Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti	
1	1	50,21	18,70	3,25	3,78	9,88	1,34	0,44	3,77	8,63	3	1	41,39	26,55	3,73	2,88	2,58	1,77	12,25	8,85	-	
	2	32,68	31,69	-	7,96	3,87	-	-	18,15	5,65		2	32,16	33,96	6,45	2,37	5,37	2,29	1,28	16,12	-	
	3	45,43	24,30	3,63	5,40	8,40	1,26	0,77	5,83	4,98		3	30,60	32,65	5,33	2,56	5,17	1,69	1,40	19,37	1,23	
4	38,44	37,66	13,65	5,35	4,20	-	-	0,70	-	4		36,55	24,22	9,86	2,58	1,56	9,91	-	15,32	-		
2	1	42,20	23,04	9,12	5,27	9,80	0,64	0,76	7,61	1,56												
	2	40,22	18,10	13,25	4,64	4,75	1,25	0,39	8,77	8,63												
	3	44,30	20,63	9,17	5,52	9,30	0,54	0,85	8,65	1,04												
	4	38,44	37,66	13,65	5,35	4,20	-	-	0,70	-												
	5	38,36	38,95	12,77	5,57	4,35	-	-	-	-												



**Figura 5-11.** Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MRCm20 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f), i) y l) Zona 3.

**Tabla 5-9.** Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MRCm20 en las zonas identificadas.

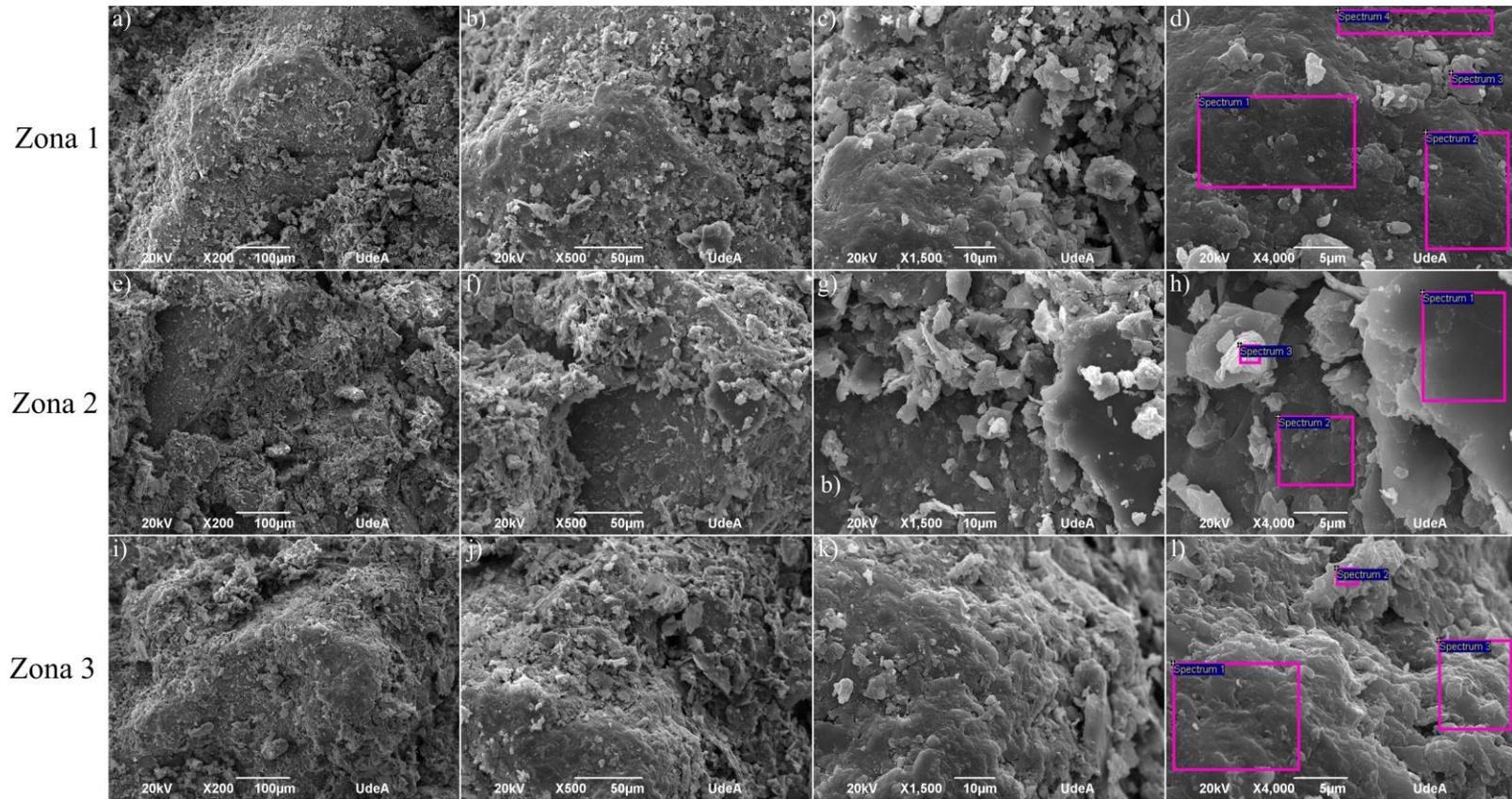
Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti	Zn	Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti	Zn	
1	1	42,29	30,92	6,90	2,55	9,02	-	0,99	7,33	-	-	3	1	51,21	29,65	4,45	2,72	4,81	1,72	1,09	3,71	0,64	-	
	2	36,48	36,73	11,79	3,35	5,45	0,86	1,33	4,01	-	-		2	40,86	45,66	3,50	2,70	2,68	-	1,97	2,63	-	-	
	3	46,13	29,71	5,93	2,59	11,28	0,66	0,49	3,21	-	-		3	41,24	31,97	11,99	6,46	5,82	-	-	2,52	-	-	
	4	31,96	34,42	7,32	3,20	7,99	0,94	0,98	12,34	0,85	-		4	44,91	29,42	9,99	6,27	4,73	1,94	2,74	-	-	-	-
	5	33,71	37,00	9,05	3,33	5,19	0,64	0,92	4,60	0,10	5,46		5	37,12	37,17	12,05	5,63	5,10	-	-	1,42	1,51	-	
	6	33,84	42,41	11,91	4,49	5,47	-	-	1,88	-	-													
2	1	40,78	34,28	13,17	5,45	4,85	-	-	1,47	-	-													
	2	45,75	30,59	9,75	3,95	4,59	0,37	0,50	3,93	0,57	-													
	3	47,14	29,72	7,79	3,96	5,63	0,45	0,50	4,58	0,23	-													
	4	44,30	20,53	11,21	5,12	8,53	0,44	0,85	7,98	1,04	-													



**Figura 5-12.** Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MCF para dos zonas con sus acercamientos. a), c) y e) Zona 1. b), d) y f) Zona 2.

**Tabla 5-10.** Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MCF en las zonas identificadas.

Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe
1	1	29,92	35,84	19,50	1,44	-	0,81	10,01	3,48
	2	35,96	33,19	5,94	9,16	5,58	2,06	1,00	7,11
	3	30,61	34,10	9,79	2,95	2,85	1,95	6,41	11,34
	4	34,98	37,44	9,67	7,85	2,96	1,49	-	5,61
2	1	33,86	36,07	5,11	6,61	5,87	2,98	1,20	8,30



**Figura 5-13.** Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del mortero MRCm0 para tres zonas con sus acercamientos. a), d), g) y j) Zona 1. b), e), h) y k) Zona 2. c), f), i) y l) Zona 3.

**Tabla 5-11.** Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el mortero MRCm0 en las zonas identificadas.

Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti	Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe	Ti
1	1	30,98	45,66	13,33	5,45	2,79	-	0,39	1,40	-	3	1	34,79	30,49	13,03	5,56	7,67	1,2	1,07	6,19	-
	2	28,94	47,74	13,09	5,15	2,71	-	0,43	1,94	-		2	43,37	40,06	3,49	3,3	1,97	1,83	1,9	4,08	-
	3	38,34	36,97	16,97	3,08	1,65	0,42	0,46	2,11	-		3	32,94	36,47	12,97	5,55	2,29	1,39	1,05	7,34	-
	4	29,18	41,75	13,52	4,97	4,15	1,40	-	5,03	-											
2	1	32,43	39,62	15,66	2,66	-	1,93	0,45	6,69	0,56											
	2	39,59	36,82	12,7	5,82	3,75	-	0,3	1,02	-											
	3	47,38	43,54	3	2,58	0,71	0,53	0,29	1,97	-											

### 5.1.5 Emisiones y energía incorporada por metro cúbico de mortero

En la **Tabla 5-12** se presentan las emisiones, en kg de CO<sub>2</sub> eq., y la energía incorporada, en MJ, por metro cúbico de mortero, de cada tipo de condición evaluada. Como se puede observar, el porcentaje de reducción de emisiones oscila entre el 67,45 y el 40,96% y el porcentaje de energía incorporada oscila entre el 62,13 y el 31,92%, tomando el mortero de cemento como referencia. Las variaciones observadas se dan principalmente por las cantidades de silicato de sodio e hidróxido de sodio que se deben agregar para mantener las relaciones planteadas de Ms y %Na, en especial al adicionar cemento.

**Tabla 5-12.** Emisiones y porcentaje de reducción de emisiones por metro cúbico de mortero para cada tipo de residuo.

Indicador ambiental	MC	MRC	MRCm0	MRCm10	MRCm20	MCF
Emisiones (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	589,6	192,1	277,8	302,6	347,9	786,1
Reducción de emisiones (%)	-	67,45	52,86	48,67	40,96	-
Energía incorporada (MJ/m <sup>3</sup> )	4.945,6	1.874,2	2.945,3	3.002,2	3.364,7	7.940,3
Reducción de emisiones (%)	-	62,13	40,42	39,29	31,92	-
Indicador ambiental	MCFm0	MCFm10	MCFm20	MRCdm0	MRCdm10	MRCdm20
Emisiones (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	221,8	275,3	330,4	246,1	291,4	338,8
Reducción de emisiones (%)	62,37	53,28	43,99	58,25	50,54	42,51
Energía incorporada (MJ/m <sup>3</sup> )	2.375,9	2.789,6	3.242,9	2.548,0	2.897,6	3.280,4
Reducción de emisiones (%)	51,94	43,55	34,45	48,48	41,37	33,64

## 5.2 FABRICACIÓN DE CONCRETOS Y EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Dado que el mortero MCFm20 fue la que obtuvo mayor resistencia a la compresión evaluada a los 28 días de fraguado, se utilizó su diseño de mezcla en la preparación de los concretos. Además de las relaciones molares planteadas para este diseño, se utilizó una relación sólido/líquido que permitiera el uso de la misma proporción entre agregados gruesos y finos. Para esta relación, se utilizaron todas las proporciones en sólido en el cálculo. En la **Tabla 5-13** se muestran las relaciones molares planteadas para el concreto CCFm20, incluyendo la relación sólido/líquido y en la **Tabla 5-14** se presentan las proporciones en peso para todos los materiales que integran el diseño de mezcla planteado.

**Tabla 5-13.** Relaciones molares finales y relación sólido/líquido para el concreto CCFm20.

Relación	CCFm20
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,385
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,111
H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	11,807
CaO/SiO <sub>2</sub>	0,210
S/L	6,571

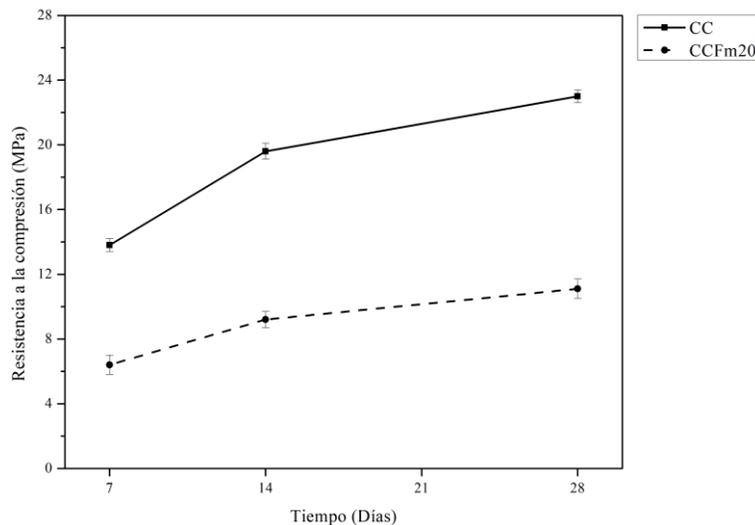
**Tabla 5-14.** Proporciones en peso para los materiales que integran el concreto CCFm20.

Material	CCFm20
Residuo en estado de entrega	0
Residuo molido o disgregado	1,0
Cemento	0,25
Agregado fino	1,53
Agregado grueso	3,23
Silicato de sodio	0,388
Hidróxido de sodio	0,016
Agua	0,51

En la **Tabla 5-15** y en la **Figura 5-14** se presentan los resultados de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado para el concreto desarrollado y el concreto de referencia. Se observó que CCFm20 a los 28 días de fraguado no cumplió con el valor especificado. Este resultado es acorde con el encontrado para los 28 días de resistencia del mortero MCFm20, el cual tampoco alcanzó la resistencia especificada.

**Tabla 5-15.** Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para CCFm20 y el concreto con cemento de referencia.

Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)			Emisiones		Energía incorporada	
	7 días	14 días	28 días	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Reducción (%)	MJ/m <sup>3</sup>	Reducción (%)
CC	13,8±0,4	19,6±0,5	23,0±0,4	550,1	-	4.576,0	-
CCFm20	6,4±0,6	9,2±0,5	11,1±0,6	342,6	37,71	3.299,0	27,91

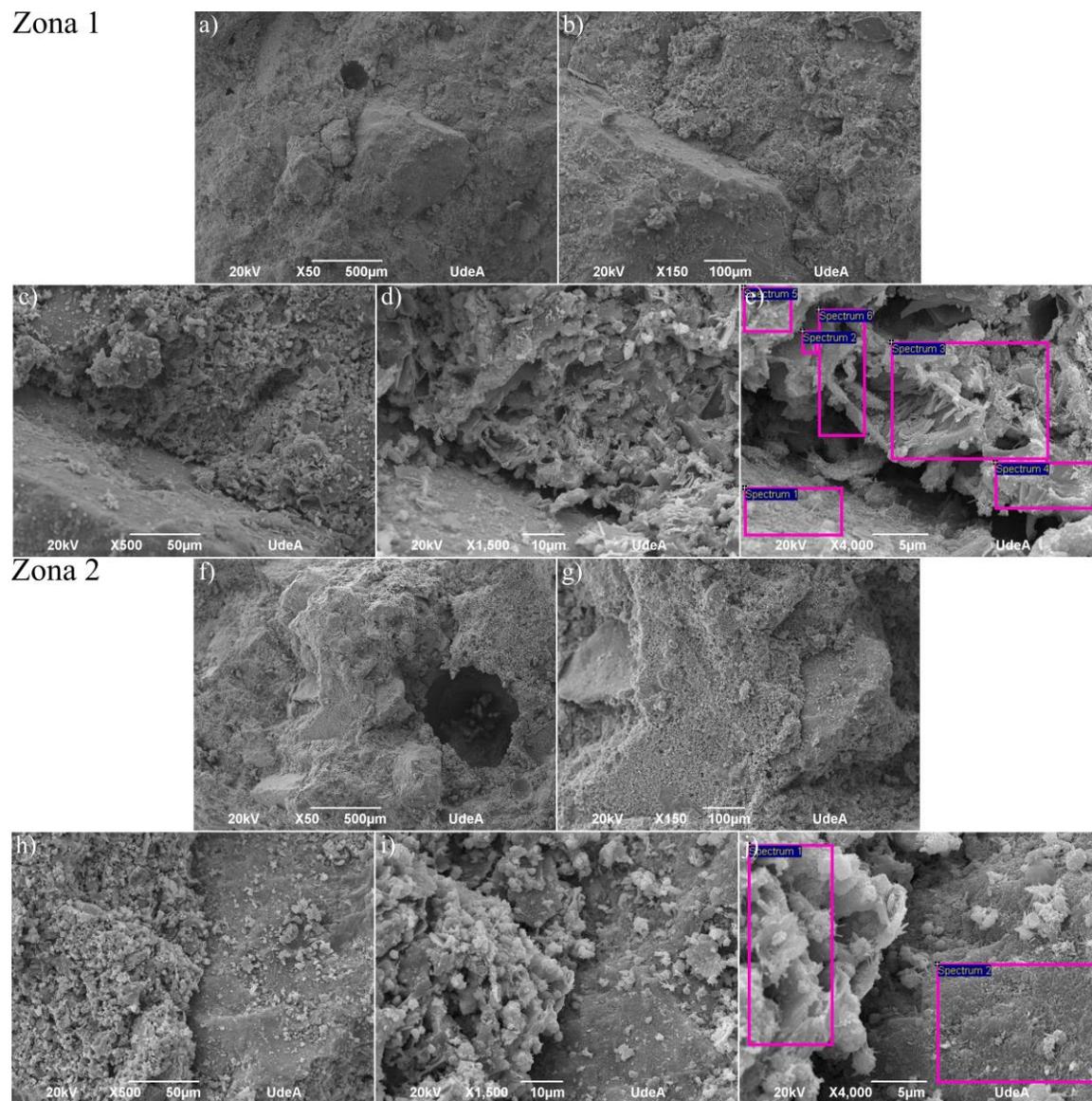


**Figura 5-14.** Resultados de la resistencia a la compresión para CCFm20 y el concreto con cemento de referencia.

### 5.2.1 Caracterización morfológica y química

A continuación, se realiza un análisis detallado de la influencia de la morfología y geles presentes en la resistencia a la compresión de los concretos desarrollados. En la **Figura 5-15** se presenta la morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y se indican los lugares donde se realizaron los análisis EED del concreto CCFm20 para dos zonas con sus acercamientos.

A bajos aumentos la mezcla entre material cementante (CFm con cemento) y agregados finos se encuentra recubriendo los agregados gruesos de manera uniforme, tal como se observa para la Zona 1 en la **Figura 5-15a, b y c** y para la Zona 2 en la **Figura 5-15c, d y e**. A mayores aumentos, en la Zona 1 (**Figura 5-15d y e**) y en la Zona 2 (**Figura 5-15i y j**) se pueden observar algunas estructuras similares al gel (N,C)-A-S-H, sin embargo son poco densas y poco compactas, con una falta de continuidad evidente. Esto se relaciona con la propiedad mecánica evaluada, causando probablemente la disminución de la resistencia a la compresión. A pesar que a estos aumentos no es posible asegurar la existencia de unidades zeolíticas bien definidas, la zona delimitada por el espectro 1 en la Zona 2 muestra ligeras similitudes con las zeolitas sintetizadas a partir de la activación de cenizas volantes [231–237]. Esto también puede influir en la resistencia a la compresión, ya que esta cristalización no es la deseada, por el contrario, se espera un gel en su mayoría amorfo, denso, compacto y continuo.



**Figura 5-15.** Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del concreto CFm20 para dos zonas con sus acercamientos. a), b), c), d) y e) Zona 1. f), g), h), i) y j) Zona 2.

Gracias a que las micrografías fueron tomadas en dos zonas que muestran simultáneamente el gel poco denso y el agregado grueso, los porcentajes elementales de los espectros 2 al 6 para la Zona 1 (**Figura 5-15e**) y el espectro 1 para la Zona 2 (**Figura 5-15j**) presentados en la **Tabla 5-16**, sugieren la presencia de este tipo de gel C-A-S-H poco denso, debido a los altos contenidos de Ca. Los porcentajes elementales del espectro 1 para la Zona 1 (**Figura 5-15e**) y el espectro 2 para la Zona 2 (**Figura 5-15j**) presentados en la **Tabla 5-16**, muestran que el agregado (alto contenido de Si y Al) se encuentra recubierto por un poco de gel (poco contenido de Ca).

**Tabla 5-16.** Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el concreto CCFm20 en las zonas identificadas.

Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe
1	1	32,99	28,73	6,73	-	31,55	-	-	-
	2	15,95	10,39	2,04	-	62,94	0,98	-	7,7
	3	36,7	15,57	4,1	-	36,42	1,54	1,16	4,51
	4	46,53	9,85	2,98	-	38,91	-	-	1,73
	5	27,77	13,15	2,35	-	52,37	-	-	4,36
	6	16,73	10,77	2,09	-	60,52	-	-	9,89
2	1	27,81	12,98	4,63	-	49,54	-	-	5,04
	2	31,41	39,62	12,93	4,36	11,68	-	-	-

# Capítulo 6

## ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LA SUSTITUCIÓN DE CONCRETOS CONVENCIONALES POR CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

En este capítulo se presenta el análisis de la viabilidad técnica al simular la sustitución del concreto con cemento convencional preparado en obra, con la mejor condición encontrada para los concretos activados alcalinamente. Inicialmente, ya que la mejor condición preparada para los morteros y concretos activados alcalinamente (MCFm20 y CCFm20, respectivamente) no alcanzó la resistencia a la compresión esperada, se exploraron dos condiciones más de sustitución, es decir con 30 y 40% de cemento. Posteriormente, se evaluó la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días para los morteros con estas sustituciones y con la mejor condición se procedió a evaluar a los 7, 14 y 28 días la resistencia a la compresión en los concretos activados, haciendo un pequeño análisis relacionado con las pruebas mecánicas y los indicadores ambientales. Para el Escenario C del capítulo 3, se llevó a cabo la simulación con CCFm30 y se presenta la variación entre los resultados encontrados de ambos indicadores ambientales. Finalmente se presenta una pequeña comparación entre los costos por metro cúbico de los concretos comparados, relacionado solo al costo de los materiales.

### 6.1 CONDICIÓN DETERMINADA PARA EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA

En el capítulo anterior se elaboraron los concretos activados alcalinamente con la condición CCFm20, es decir, colas de flotación molidas con veinte por ciento de cemento. Sin embargo, la resistencia a la compresión a los 28 días no alcanzó los 21 MPa del concreto convencional de

referencia preparado y planteado durante el análisis de huella de carbono y energía incorporada de la edificación.

A partir de este resultado se prepararon dos condiciones más para morteros, MCFm30 y MCFm40 (30 y 40% de sustitución de cemento respectivamente), y se evaluó de nuevo la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. En la **Tabla 6-1** se presentan las relaciones molares planteadas para los morteros que utilizaron colas de flotación molidas y en la **Tabla 6-2** se presentan las proporciones en peso para todos los materiales que integran los diseños de mezcla planteados.

**Tabla 6-1.** Relaciones molares finales para cada tipo de mortero.

Relación	MCFm0	MCFm10	MCFm20	MCFm30	MCFm40
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,470	5,381	5,289	5,198	5,104
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,104	0,107	0,109	0,112	0,114
H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	7,284	7,924	6,810	6,998	6,148
CaO/SiO <sub>2</sub>	0,123	0,154	0,187	0,221	0,257

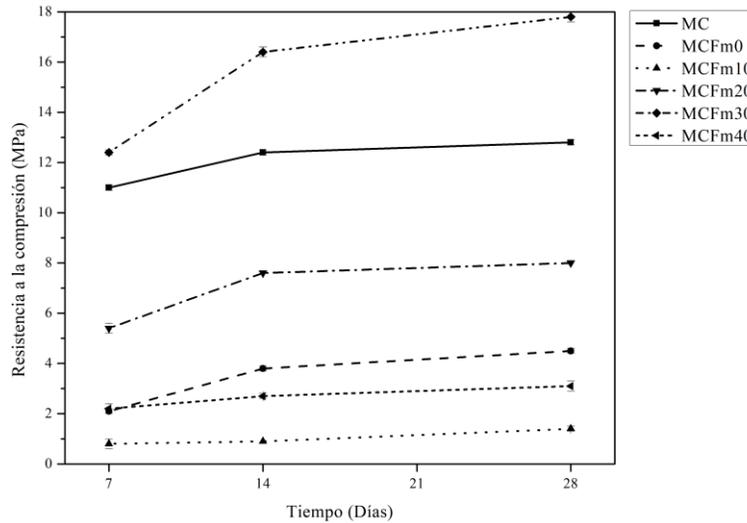
**Tabla 6-2.** Proporciones en peso para los materiales que integran cada tipo de mortero.

Material	MCFm0	MCFm10	MCFm20	MCFm30	MCFm40
Residuo en estado de entrega	0	0	0	0	0
Residuo molido o disgregado	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Cemento	0	0,1	0,3	0,4	0,7
Arena	2,84	3,20	3,60	4,1	4,7
Silicato de sodio	0,196	0,223	0,252	0,294	0,344
Hidróxido de sodio	0,008	0,009	0,010	0,012	0,014
Agua	0,441	0,539	0,600	0,598	0,597

Como se observa en la **Tabla 6-3** y en la **Figura 6-1**, la condición MCFm30 superó la resistencia a la compresión del mortero convencional de referencia. Sin embargo, la condición MCFm40 presentó una disminución considerable en la resistencia. Ambos resultados se pueden asociar a la cantidad de silicato de sodio e hidróxido de sodio adicionados a las muestras, ya que a medida que aumenta la cantidad de cemento sustituido, aumenta la cantidad de silicato de sodio e hidróxido de sodio, necesarios para mantener la condición Ms=1,5 y %Na=6. Debido a que el silicato de sodio puede funcionar como retardante de la hidratación del cemento Pórtland [238], el aumento en la cantidad de cemento y silicato probablemente haya ocasionado un efecto negativo en la formación del gel C-A-S-H, generando una disminución en la resistencia a la compresión. No obstante, hay una cantidad de hidróxido de sodio, silicato de sodio y cemento, en la cual la resistencia a la compresión es máxima para el diseño de mezcla evaluado. Esta condición se encontró con un 30% de sustitución de residuo CFm por cemento Pórtland tipo I.

**Tabla 6-3.** Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para los morteros con las CFm activadas y el mortero con cemento de referencia.

Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)			Emisiones		Energía incorporada	
	7 días	14 días	28 días	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Reducción (%)	MJ/m <sup>3</sup>	Reducción (%)
MC	11,0±0,1	12,4±0,1	12,8±0,2	589,6	-	4.945,6	-
MCFm0	2,1±0,1	3,8±0,1	4,5±0,1	22,8	62,37	2.375,9	51,94
MCFm10	0,8±0,2	0,9±0,0	1,4±0,1	275,3	53,28	2.789,6	43,55
MCFm20	5,4±0,2	7,6±0,0	8,0±0,0	330,4	43,99	3.242,9	34,45
MCFm30	12,4±0,1	16,4±0,1	17,7±0,1	396,1	32,85	3.823,1	22,73
MCFm40	2,2±0,1	2,7±0,1	3,1±0,1	464,1	21,34	4.421,5	10,67



**Figura 6-1.** Resultados de la resistencia a la compresión para los morteros con las CFm activadas y el mortero con cemento de referencia.

A partir de los resultados encontrados en los morteros, se fabricó el concreto activado alcalinamente con la condición CCFm30. En la **Tabla 6-4** se muestran las relaciones molares planteadas para el concreto CCFm30, incluyendo la relación sólido/líquido y en la **Tabla 6-5** se presentan las proporciones en peso para todos los materiales que integran el diseño de mezcla planteado.

**Tabla 6-4.** Relaciones molares finales y relación sólido/líquido para el concreto CCFm30.

Relación	CCFm30
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,198
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,112
H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	6,998
CaO/SiO <sub>2</sub>	0,221
S/L	6,6

**Tabla 6-5.** Proporciones en peso para los materiales que integran el concreto CCFm30.

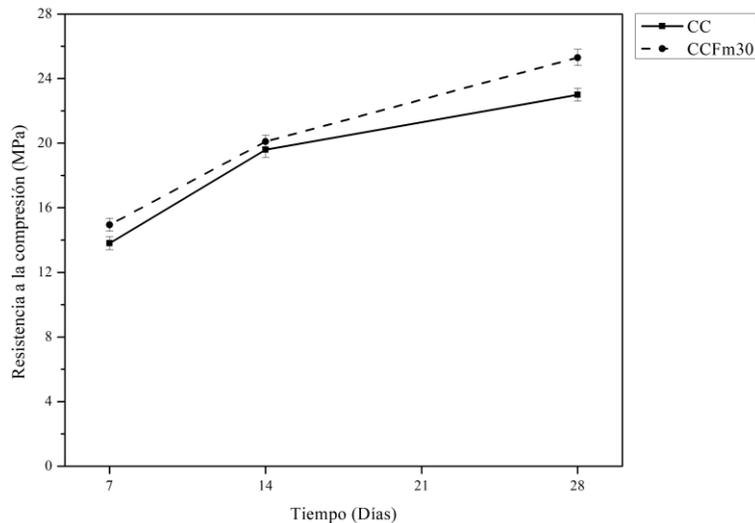
Material	CCFm30
Residuo en estado de entrega	0
Residuo molido o disgregado	1,0
Cemento	0,43
Agregado fino	1,74
Agregado grueso	3,69
Silicato de sodio	0,448
Hidróxido de sodio	0,018
Agua	0,58

Como se observa en la **Tabla 6-6** y en la **Figura 6-2**, la condición CCFm30 superó la resistencia a la compresión del concreto convencional de referencia a los 28 días de fraguado. Este resultado es acorde con el encontrado para los 28 días de resistencia del mortero MCFm30, el cual también superó la resistencia especificada. Este es un resultado sumamente interesante, ya que podría permitir su uso en elementos estructurales, con el gran beneficio de la disminución en los impactos ambientales (29,04% en la huella de carbono y 19,31% en la energía incorporada) respecto al

concreto de referencia CC. Nuevamente este resultado se atribuye la óptima cantidad entre el hidróxido de sodio, el silicato de sodio y el cemento adicionados a la mezcla.

**Tabla 6-6.** Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para CCFm30 y el concreto con cemento de referencia.

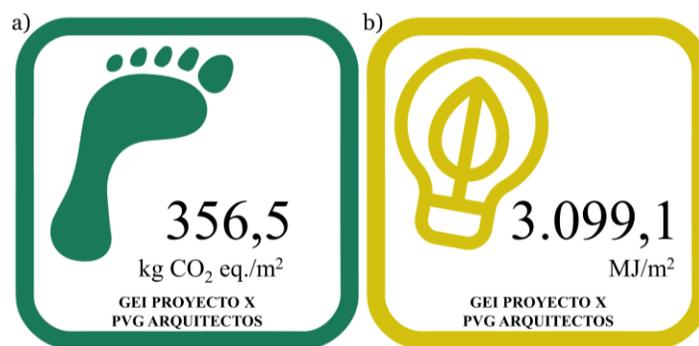
Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)			Emisiones		Energía incorporada	
	7 días	14 días	28 días	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Reducción (%)	MJ/m <sup>3</sup>	Reducción (%)
CC	13,8±0,4	19,6±0,5	23,0±0,4	550,1	-	4.576,0	-
CCFm30	14,9±0,4	20,1±0,4	25,3±0,5	390,4	29,04	3.692,4	19,31



**Figura 6-2.** Resultados de la resistencia a la compresión para CCFm30 y el concreto con cemento de referencia.

## 6.2 HUELLA DE CARBONO Y ENERGÍA INCORPORADA PARA LA MEJOR CONDICIÓN DE LOS CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

A partir de los resultados indicados en la sección anterior, se decidió llevar a cabo un quinto cálculo de la huella de carbono y la energía incorporada de la edificación. Utilizando el Escenario C, el residuo CFm y la combinación de los activadores silicato de sodio e hidróxido de sodio, para un consumo de materiales de 13.777.868,0 kilogramos, se estimó la generación de 3.411.280,9 kg CO<sub>2</sub> eq y el consumo de 29.653.930,5 MJ, equivalentes a la huella de carbono de 356,5 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> construido y la energía incorporada de 3.099,1 MJ/m<sup>2</sup> (ver **Figura 6-3**). Se puede inferir que la huella de carbono podría disminuir aproximadamente en 8,02% y la energía incorporada en 4,72%, respecto a los cálculos presentados en el Escenario C del capítulo en la **Figura 3-3**.



**Figura 6-3.** Proyecto X, cálculos a partir de la sustitución del concreto en obra convencional por la condición CCFm30. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.

A partir de la comparación directa de ambos escenarios para la edificación, en la **Tabla 6-7** se puede observar la intensidad material y la considerable reducción en el consumo de cemento por metro cuadrado construido (asociado a la condición 70% Colas de flotación molidas – 30% Cemento). En la **Tabla 6-8** se puede observar que los kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> y los MJ/m<sup>2</sup> disminuyen en relación al uso de material cementante y activadores. Sin embargo, en la **Tabla 6-9** se puede observar que las emisiones y energía incorporada asociadas al transporte de las colas de flotación (El Bagre – Planta Caribe de Argos –Proyecto X), silicato de sodio (Cundinamarca – Sabaneta – Proyecto X) e hidróxido de sodio (China – Puerto Barranquilla – Centro Medellín – Proyecto X) aumentan. A pesar que no tengan un gran peso dentro de los cálculos totales, se debe tener especial cuidado con estos indicadores, ya que el material particulado (PM10 y PM2.5 por sus siglas en inglés) asociado a la quema de combustibles ha tenido serias afectaciones al medio ambiente del Valle de Aburrá y requiere un constante monitoreo [239,240].

**Tabla 6-7.** Intensidad material para la etapa de extracción y manufactura de materiales asociado a los cementantes y activadores de ambos escenarios para el concreto preparado en obra.

Material	Escenario con concreto convencional (ajuste de cemento)	Escenario con concreto CCFm30
	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>
Cemento	126,24	34,48
Precursor (CFm)	-	80,19
Silicato de sodio	-	1,44
Hidróxido de sodio	-	35,92

**Tabla 6-8.** Huella de carbono y energía incorporada para la etapa de extracción y manufactura de materiales asociado a los cementantes y activadores de ambos escenarios para el concreto preparado en obra.

Material	Escenario con concreto convencional (ajuste de cemento)		Escenario con concreto CCFm30	
	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup>
Cemento	142,29	1.156,53	38,86	315,88
Precursor (CFm)	-	-	4,07	33,06
Activadores (NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	-	-	58,76	587,61
Total	142,29	1.156,53	101,69	936,55

**Tabla 6-9.** Huella de carbono y energía incorporada para la etapa de transporte asociado a los cementantes y activadores de ambos escenarios para el concreto preparado en obra.

Transporte	Escenario C con CC		Escenario con CCFm30	
	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup>
Interdepartamental cemento	3,97	7,49	1,08	2,04
Municipal cemento	0,51	0,95	0,14	0,26
Interdepartamental precursor (CFm)	-	-	11,15	21,04
Municipal precursor (CFm)	-	-	0,22	0,42
Internacional NaOH	-	-	0,25	104,22
Interdepartamental activadores (NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	-	-	3,16	5,96
Municipal activadores (NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	-	-	0,15	0,28
Total	4,47	8,44	16,15	134,22

Teniendo en cuenta que el residuo de minería colas de flotación molidas presenta capacidad técnica para reemplazar parcialmente el cemento Pórtland, sumado a la alta generación de pasivos ambientales mineros, es posible reducir los impactos ambientales tanto del sector constructor como del sector minero. No obstante, es necesario resaltar que por ahora sólo se ha abordado la resistencia a la compresión. Es necesario abordar toda la normativa colombiana vigente para morteros y concretos comerciales convencionales, entre las cuales resaltan para el caso del concreto: asentamiento, siguiendo la metodología NTC 396 (ASTM C143/C143M) [241], fraguado inicial y final, siguiendo la metodología NTC 890 (ASTM C403/C403M-16) [242], permeabilidad al agua, siguiendo la metodología NTC 4483, resistencia a la penetración del ión cloruro, siguiendo la metodología ASTM C1202-17a [243] y expansión máxima a sulfatos, siguiendo la metodología NTC 3330 (ASTM C1012/C1012M-18a) [244]. Además, aunque los materiales activados alcalinamente presentan una alta capacidad de inmovilización de metales pesados [15,22,26,38,245–249], deben llevarse a cabo pruebas de lixiviación para los elementos en trazas (EPA 3051A-SM 3120 B [250,251]), ya que los concretos o morteros al estar expuestos al agua (lluvia, agua superficial, agua subterránea, etc.), pueden experimentar procesos de disolución y liberar al medio ambiente los metales pesados, generando un riesgo al medio ambiente en el que se encuentran [252].

### 6.3 COSTO POR METRO CÚBICO PARA AMBOS TIPOS DE CONCRETOS

En la **Tabla 6-10** y **Tabla 6-11** se presenta el APU (Análisis de Precio Unitario) por metro cúbico de los concretos planteados en el estudio y no se contemplan los ítems asociados al equipo, mano de obra y transporte. Los costos por unidad para el cemento y los agregados fueron tomados de las bases de datos de Camacol-Antioquia [253]. El costo por metro cúbico de agua corresponde a la suma de acueducto y alcantarillado para estrato 4 (estrato de la zona de ubicación del Proyecto X) tomado de EPM [254]. Finalmente, el costo por kg del silicato de sodio e hidróxido de sodio corresponde al valor suministrado por Spin S.A., ajustado a un precio preferencial para el suministro de aproximadamente 344 toneladas de Flocsil [255]. Se puede observar que el costo por metro cúbico del concreto activado alcalinamente con el concreto CCFm30 es 14,41% superior al planteado para el concreto convencional de referencia. A pesar que el valor es superior, la disminución en los indicadores ambientales de huella de carbono y energía incorporada de la edificación, sumado al uso de residuos mineros (que terminarían como pasivos ambientales mineros), podría servir para la inclusión de la sostenibilidad como componente financiero y estratégico que trascienda más allá de su función estrictamente organizacional y normativa para

asumir un papel activo ante las problemáticas mundiales, en los cuales Colombia como país firmante de tratados internacionales, se comprometió a su disminución.

**Tabla 6-10.** APU para 1 m<sup>3</sup> de concreto convencional (diseño planteado).

Recurso	Unidad	Cantidad	% desperdicio	Valor unitario	Subtotal
Cemento	Bulto	9,27	0,1	\$ 22.674	\$ 231.177
Agregado fino	m <sup>3</sup>	0,35	0,1	\$ 53.674	\$ 20.864
Agregado grueso	m <sup>3</sup>	0,79	0,1	\$ 66.607	\$ 57.634
Agua	m <sup>3</sup>	0,19	0,1	\$ 4.878	\$ 1.020
Equipo					
Mezcladora	Hora				
Mano de obra					
Ayudante	Hora				
Total					\$ 310.695

**Tabla 6-11.** APU para 1 m<sup>3</sup> de concreto activado alcalinamente (diseño CFm30).

Recurso	Unidad	Cantidad	% desperdicio	Valor unitario	Subtotal
Cemento	Bulto	2,52	0,1	\$ 22.674	\$ 62.926
Agregado fino	m <sup>3</sup>	0,32	0,1	\$ 53.674	\$ 18.930
Agregado grueso	m <sup>3</sup>	0,71	0,1	\$ 66.607	\$ 52.293
Agua	m <sup>3</sup>	0,17	0,1	\$ 4.878	\$ 915
CFm	Bulto	5,89	0,1	\$ 1.020	\$ 6.607
Silicato de sodio	kg	131,86	0,1	\$ 1.459	\$ 211.614
Hidróxido de sodio	kg	1,66	0,1	\$ 1.200	\$ 2.187
Equipo					
Mezcladora	Hora	-	-	-	-
Mano de obra					
Ayudante	Hora	-	-	-	-
Total					\$ 355.345

# Capítulo 7

## RESULTADOS TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS

En este capítulo se presentan los resultados de la fabricación de los morteros activados alcalinamente, preparados bajo las mismas condiciones que en el capítulo 5. Sin embargo, esta vez las muestras se fraguaron 24 horas a 60 °C. Estos resultados no hacen parte de los alcances de la presente investigación. No obstante, se incluyeron para observar si la temperatura aceleraba el proceso de activación y permitía la utilización de los residuos mineros en posibles aplicaciones de materiales prefabricados.

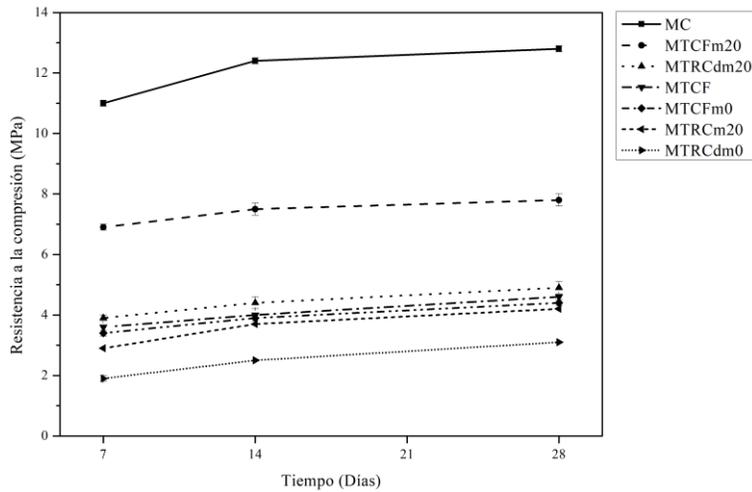
### 7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Para los diseños de mezcla planteados durante el trabajo, se llevó a cabo de nuevo la preparación de las muestras, esta vez fraguadas a 60 °C durante 24 horas [9,13,257–260,41,128,149,152,160,164,186,256], con el fin de observar si la temperatura actuaba como catalizador de la activación. En la **Tabla 7-1** y en la **Figura 7-1** se presentan los resultados de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado. Se observa que un aumento en la temperatura durante las primeras 24 horas de fraguado no genera cambios significativos en la resistencia a la compresión de las muestras evaluadas a los 28 días. A pesar que mejoró la resistencia a la compresión de otras muestras respecto a los morteros fraguados a temperatura ambiente (TCF aumenta respecto a CF y TRCd0 aumenta respecto a RCd0), en general las resistencias siguen siendo bajas con respecto al mortero preparado con cemento como referencia. Un efecto interesante pudo observarse durante los primeros 7 días, ya que la temperatura aceleró el proceso de activación (con respecto a los resultados obtenidos mediante fraguado a temperatura ambiente), sin embargo, a los 28 días la activación parece haberse completado o disminuido considerablemente. Este fenómeno puede explicarse debido a que, a altas temperaturas de fraguado, la solubilidad de los aluminosilicatos en solución alcalina aumenta, generando un fraguado y endurecimiento acelerados. Esto mejora la resistencia a edades tempranas en los materiales de

activación alcalina, hasta que se agotan los aluminatos y silicatos disponibles (se alcanza un estado de saturación) para continuar reaccionando [13,41,128,149,152,160,186,258–260].

**Tabla 7-1.** Resultados de la resistencia a la compresión de los morteros con residuos activados (60 °C durante 24 horas) y el mortero con cemento como referencia.

Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)		
	7 días	14 días	28 días
MC	11,0±0,1	12,4±0,1	12,8±0,2
MTRC	0,5±0,0	0,5±0,0	0,6±0,0
MTRCm0	1,0±0,0	1,8±0,1	1,9±0,0
MTRCm10	0,7±0,1	0,9±0,0	1,0±0,0
MTRCm20	2,9±0,0	3,7±0,0	4,2±0,0
MTCF	3,6±0,2	4,0±0,2	4,6±0,0
MTCFm0	3,4±0,1	3,9±0,1	4,4±0,1
MTCFm10	0,9±0,0	1,1±0,2	1,3±0,1
MTCFm20	6,9±0,1	7,5±0,2	7,8±0,2
MTRCd0	1,9±0,1	2,5±0,0	3,1±0,0
MTRCd10	0,8±0,1	1,0±0,1	1,2±0,1
MTRCd20	3,9±0,1	4,4±0,2	4,9±0,2



**Figura 7-1.** Resultados de la resistencia a la compresión para las 6 mejores condiciones de los morteros con residuos activados (60 °C durante 24 horas) y el mortero con cemento como referencia.

# Capítulo 8

## CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron concretos activados alcalinamente a partir de residuos sílico-aluminosos del sector minero y activación alcalina, con el propósito de plantear alternativas a los concretos convencionales con cemento Pórtland, estableciendo la disminución de los impactos ambientales como una variable de interés a través del cálculo de la huella de carbono y la energía incorporada de una edificación. Basado en los resultados se pueden formular las siguientes conclusiones, discriminadas por los impactos ambientales de la edificación, la fabricación de los morteros y concretos activados alcalinamente, los resultados complementarios y el análisis de la viabilidad técnica de la sustitución.

### 8.1 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA EDIFICACIÓN

- Durante el ciclo de vida de una edificación, excluyendo las fases de operación, deconstrucción (o demolición) y disposición final de RCD, la fase de extracción de materia prima y fabricación de materiales es la que presenta un mayor impacto ambiental. De manera particular, el cemento es el material que presenta mayor impacto, relacionado directamente a su intensidad material y elevado factor de emisión, el cual eleva de manera significativa la huella de carbono y la energía incorporada en la edificación.
- Los inventarios de emisiones de GEI, tanto globales como nacionales, disgregan el ciclo de vida del sector constructor en otros sectores económicos (minería, industria, energía, transporte, etc.), por lo tanto, ni su impacto, ni sus oportunidades de mitigación son evidentes a partir de dichos inventarios. En este sentido, el presente estudio aporta a la elaboración de una línea base de emisiones de GEI para el sector constructor en Colombia, lo cual permitirá establecer prioridades sectoriales, ajustadas a la realidad nacional. Esto constituye justamente la base para el cumplimiento de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés), que son el sustrato del Acuerdo de París.
- Si bien el estudio se hace para una edificación en la ciudad de Medellín, los valores de emisión relacionados con la extracción y manufactura de materiales, fase constructiva y disposición de residuos, pueden considerarse válidos en el territorio nacional, considerando que el sistema

constructivo analizado es el más implementado en Colombia. De esta forma, los únicos valores de emisión que son realmente específicos a escala local son los relacionados con el transporte. Como valor agregado del estudio se resalta el modelo propuesto para el cálculo de emisiones asociadas al transporte, el cual resulta útil, no sólo para el sector constructor, sino para el transporte de carga en general y constituye justamente el primer reporte de un factor de emisión para el transporte de carga asociado a la geografía nacional.

- La comparación entre los impactos ambientales reportados por la constructora y los estimados mediante los planos arquitectónicos, estructurales y técnicos, dieron como resultado una elevada cantidad de cemento faltante en el reporte de la constructora. Esto genera la necesidad de mejorar la contabilización de los consumos de materiales internos en las constructoras y elaborar protocolos de interventoría, orientados a los impactos ambientales a partir de la buena gestión de la información.

### 8.2 FABRICACIÓN DE LOS MORTEROS Y CONCRETOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

- Las condiciones de activación se deben tener en cuenta no sólo en función de la cantidad de impactos ambientales, sino también en función de la eflorescencia que puedan presentar las muestras, ya que altos contenidos de óxido de sodio (superiores al 6% en peso) aumentan la eflorescencia de los materiales activados alcalinamente.
- En general, las resistencias a la compresión fueron bajas para los morteros activados alcalinamente. A pesar que los residuos mineros cumplieron con los rangos composicionales establecidos para la sílice y la alúmina, los análisis sugirieron la presencia de poca cantidad o la ausencia de fase amorfa. Esto se convierte en el problema más importante que deben superar estos residuos para su activación mediante medios alcalinos y ser utilizados como material cementante principal.
- La resistencia a la compresión de los morteros activados alcalinamente fue inferior para las mezclas preparadas con residuos en estado de entrega, en comparación con las mezclas preparadas con residuos molidos. El tamaño de partícula juega un papel importante en la activación, ya que a menor tamaño de partícula incrementa el área superficial expuesta y por ende la reactividad entre la sílice, la alúmina y el óxido de calcio, para formar las redes características de este tipo de materiales.
- Los análisis de los morteros activados alcalinamente sugirieron la presencia de poca cantidad de fase amorfa, la cual es la responsable de las elevadas resistencias a la compresión en los materiales activados alcalinamente. Esta fase se vio reflejada en algunas zonas con estructuras similares al gel (C,N)-A-S-H; sin embargo, sus densidades y compacidades variaron considerablemente entre zonas del mismo mortero y con otros tipos. Algunos geles densos y compactos se encontraron recubriendo los agregados y se presentaron en los morteros con mayor resistencia a la compresión. No obstante, los geles poco densos se asociaron a la presencia de zeolitas, de estructuras similares a las zeolitas sintetizadas a partir de cenizas volantes, las cuales debido a su cristalización generaron una disminución en la resistencia a la compresión.
- La resistencia a la compresión mejoró con la adición de cemento, de manera específica para las colas de flotación, donde la sustitución de residuo con 30% de cemento superó la resistencia a

la compresión del mortero y el concreto de referencia. Es decir, los residuos mineros presentan cierta capacidad cementante mediante medios alcalinos. Pero, sin una amorfización previa, se necesita otro tipo de material cementante (cemento, cenizas volantes, escorias de fundición, etc.) como sustituto parcial para mejorar la resistencia a la compresión. Sin embargo, se debe adicionar la cantidad apropiada para evitar disminuciones en esta propiedad, ya que sustituciones en las bandas límites entre el 10 y 40% de cemento para las colas de flotación molidas, generó un detrimento de la resistencia a la compresión.

### 8.3 RESULTADOS TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS

- Los resultados complementarios mostraron que la temperatura puede tener un efecto catalítico a edades tempranas. Sin embargo, a los 28 días presentaron resistencias a la compresión similares a las encontradas en los morteros fraguados a temperatura ambiente. Esto descarta por el momento su activación a la temperatura propuesta y genera la necesidad de investigar si a tiempos y temperaturas superiores de fraguado se mejoran las propiedades evaluadas.

### 8.4 ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LA SUSTITUCIÓN

- El costo económico directo de los concretos activados alcalinamente, propuestos en el presente trabajo, es superior al de los concretos convencionales. Sin embargo, bajo las consideraciones del desarrollo sostenible, un análisis económico completo deberá incorporar indicadores de huella de carbono y energía incorporada de la edificación, así como el uso de residuos mineros (que terminarían como pasivos ambientales mineros). De esta forma, la sostenibilidad pasaría a convertirse en un componente estratégico de análisis técnico y económico del ciclo de vida completo, que repercute en una responsabilidad social y ambiental que trasciende en un ámbito mayor al asumir un papel activo ante las problemáticas mundiales.

# Capítulo 9

## INVESTIGACIONES FUTURAS

Las investigaciones futuras respecto al uso de residuos sílico-aluminosos de la industria minera como material cementante para la fabricación de morteros o concretos activados alcalinamente pueden apuntar a dos focos principalmente.

El primero se relaciona a continuar investigando la cantidad adecuada de cemento (que en este caso funcionaría como cementante suplementario), activadores y agua que se debe adicionar para lograr buenas resistencias a la compresión, según el tipo de residuo. Además, se deben evaluar todas las propiedades mecánicas y de durabilidad necesarias para validar los morteros y concretos activados alcalinamente, en especial la lixiviación.

El segundo aspecto se relaciona a la modificación de la fases cristalinas presentes en los residuos mediante alguna vía, ya sea térmica, mecánica, química, etc., antes de la activación alcalina. Como pudo observarse, no sólo altos contenidos de sílice y alúmina son necesarios; la alta cristalinidad de los residuos impide una buena activación. La formación de una buena cantidad de fase amorfa puede mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de este tipo de materiales de activación alcalina, como sucede con las cenizas volantes o las escorias de fundición de alto horno.

# Capítulo 9

## REFERENCIAS

- [1] García Arbeláez, C., Vallejo López, G., Higgins, M. Lou, *et al.*, “EL acuerdo de París. así actuará Colombia frente al cambio climático,” WWF-Colombia, Cali, Colombia 2016.
- [2] IDEAM, *Proyecto Informe Bienal De Actualización*, Bogotá, Colombia, 2015.
- [3] PVG Arquitectos, *Elaboración Propia*, Medellín, Colombia, 2018.
- [4] Eusko Jaurlaritz, G. V., *Análisis De Ciclo De Vida Y Huella De Carbono*, IHOBE, 1st ed., Bilbao, España, 2009.
- [5] WBCSD, WRI, “Quantifying the greenhouse gas emissions of products: pas 2050 and the ghg protocol product standard: a short guide to their purpose, similarities and differences,” pp. 1–4, 2011.
- [6] Ecoinvent, *Bases De Datos Versión 3.01*, Zurich, Switzerland, 2013.
- [7] Salazar Jaramillo, A., *Determinación De Propiedades Físicas Y Estimación Del Consumo Energético En La Producción, De Acero, Concreto, Vidrio, Ladrillo Y Otros Materiales, Entre Ellos Los Alternativos Y Otros De Uso No Tradicional, Utilizados En La Construcción De Edificaciones*, Santiago de Cali, Colombia, 2012.
- [8] Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., *et al.*, “Advances in alternative cementitious binders”, *Cement And Concrete Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1232–1243, 2011.
- [9] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Labrincha, J. A., *et al.*, *Eco-Efficient Concrete*, Woodhead Publishing Limited, Philadelphia, USA, 2013.
- [10] Part, W. K., Ramli, M., Cheah, C. B., “An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial byproducts,” In: *Handbook Of Low Carbon Concrete*, vol. 77, Elsevier Ltd, 2016.
- [11] Xie, T., Ozbakkaloglu, T., “Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature”, *Ceramics International*, vol. 41, no. 4, pp. 5945–5958, 2015.
- [12] Provis, J. L., “Alkali-activated materials”, *Cement And Concrete Research*, 2017.
- [13] Neupane, K., Sriravindrarajah, R., Baweja, D., *et al.*, “Effect of curing on the compressive strength development in structural grades of geocement concrete”, *Construction And Building*

*Materials*, vol. 94, pp. 241–248, 2015.

[14] Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A. F., *et al.*, “Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over portland cement or an unproven issue?”, *Construction And Building Materials*, vol. 30, pp. 400–405, 2012.

[15] Vincenzini, P., Leonelli, C., “Geopolymers and geocements: low environmental impact ceramic materials,” In: *Proceedings Of The 12 Th International Ceramics Congress, Part Of CIMTEC 2010- 12 Th International Ceramics Congress And 5th Forum On New Materials Montecatini Terme*, p. 210 2010.

[16] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., “Alkali-activated binders: a review. part 1. historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products”, *Construction And Building Materials*, vol. 22, no. 7, pp. 1305–1314, 2008.

[17] Wills, B. A., Finch, J. A., “Tailings disposal,” In: *Wills’ Mineral Processing Technology*, , 2016.

[18] Ministerio de Industria y Energía, “Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica.” In: *RESIDUOS PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA MINERA DEL CARBÓN*, 1st ed., ch. 1, Instituto Tecnológico GeoMinero de España, España, 1995.

[19] Heshmati, A., “A review of the circular economy and its implementation”, *IZA Discussion Papers*, vol. No. 9611, no. 9611, p. 63, 2015.

[20] Yu, L., Zhang, Z., Huang, X., *et al.*, “Enhancement experiment on cementitious activity of copper-mine tailings in a geopolymer system”, *Fibers*, vol. 5, no. 4, p. 47, 2017.

[21] Caballero, E., Sánchez, W., Ríos, Y C. A., “Synthesis of geopolymers from alkaline activation of gold minnig wastes”, *Ingeniería Y Competitividad*, vol. 16, no. 1, pp. 317–330, 2014.

[22] Barrie, E., Cappuyns, V., Vassilieva, E., *et al.*, “Potential of inorganic polymers (geopolymers) made of halloysite and volcanic glass for the immobilisation of tailings from gold extraction in ecuador”, *Applied Clay Science*, vol. 109–110, pp. 95–106, 2015.

[23] Duan, P., Yan, C., Zhou, W., *et al.*, “Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolymer for removal of cu(ii) from wastewater”, *Ceramics International*, vol. 42, no. 12, pp. 13507–13518, 2016.

[24] Gitari, M. W., Akinyemi, S. A., Thobakgale, R., *et al.*, “Physicochemical and mineralogical characterization of musina mine copper and new union gold mine tailings: implications for fabrication of beneficial geopolymeric construction materials”, *Journal Of African Earth Sciences*, vol. 137, pp. 218–228, 2018.

[25] Ye, J., Zhang, W., Shi, D., “Properties of an aged geopolymer synthesized from calcined ore-dressing tailing of bauxite and slag”, *Cement And Concrete Research*, vol. 100, no. May, pp. 23–31, 2017.

[26] Ahmari, S., Zhang, L., “Durability and leaching behavior of mine tailings-based geopolymer bricks”, *Construction And Building Materials*, vol. 44, pp. 743–750, 2013.

[27] Duan, P., Yan, C., Zhou, W., *et al.*, “Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle”, *Construction And Building Materials*, vol. 118, pp. 76–88, 2016.

[28] Matheu, P. S., Waldron, A., Varela, B., “Optimization of alkali activation of ground granulated slag with mining tails”, *NTCC 2014: International Conference On Non-Traditional Cement And Concrete*, pp. 1–8, 2014.

[29] Consoli, N. C., Da Silva, A. P., Nierwinski, H. P., *et al.*, “Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 55, no. 4, pp. 486–

- 494, 2018.
- [30] Kastiukas, G., Zhou, X., “Effects of waste glass on alkali-activated tungsten mining waste: composition and mechanical properties”, *Materials And Structures/Materiaux Et Constructions*, vol. 50, no. 4, pp. 1–11, 2017.
- [31] Ahmari, S., Zhang, L., Zhang, J., “Effects of activator type/concentration and curing temperature on alkali-activated binder based on copper mine tailings”, *Journal Of Materials Science*, vol. 47, no. 16, pp. 5933–5945, 2012.
- [32] Kiventerä, J., Golek, L., Yliniemi, J., *et al.*, “Utilization of sulphidic tailings from gold mine as a raw material in geopolymerization”, *International Journal Of Mineral Processing*, vol. 149, pp. 104–110, 2016.
- [33] Ahmari, S., Parameswaran, K., Zhang, L., “Alkali activation of copper mine tailings and low-calcium flash-furnace copper smelter slag”, *Journal Of Materials In Civil Engineering*, vol. 27, no. 6, p. 04014193, 2015.
- [34] Solismaa, S., Ismailov, A., Karhu, M., *et al.*, “Valorization of finnish mining tailings for use in the ceramics industry”, *Bulletin Of The Geological Society Of Finland*, vol. 90, no. 1, pp. 33–54, 2018.
- [35] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. P., Jalali, S., “Investigations of tungsten mine waste geopolymeric binder: strength and microstructure”, *Construction And Building Materials*, vol. 22, no. 11, pp. 2212–2219, 2008.
- [36] Pacheco-Torgal, F., Castro-Games, J. P., Jalali, S., “Alkali activated geopolymeric binder using tungsten mine waste: preliminary investigation”, *Geopolymer, Green Chemistry And Sustainable Development Solutions*, pp. 93–98, 2005.
- [37] Sedira, N., Castro-gomes, J., “Study of an alkali-activated binder based on tungsten mining mud and brick powder waste”, *8th Scientific-Technical Conference On Material Problems In Civil Engineering*, vol. 06002, pp. 1–8, 2018.
- [38] Kiventerä, J., Lancellotti, I., Catauro, M., *et al.*, “Alkali activation as new option for gold mine tailings inertization”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 187, pp. 76–84, 2018.
- [39] Sangiorgi, C., Lantieri, C., Tataranni, P., *et al.*, “Reuse of mining waste into innovative alkali-activated-based materials for road pavement applications”, *Functional Pavement Design - Proceedings Of The 4th Chinese-European Workshop On Functional Pavement Design, CEW 2016*, pp. 1735–1744, 2016.
- [40] Ojuri, O. O., Adavi, A. A., Oluwatuyi, O. E., “Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction”, *Transportation Geotechnics*, vol. 10, pp. 1–12, 2017.
- [41] Provis, J. L., Van Deventer, J. S. J., *Geopolymers: Structures, Processing, Properties And Industrial Applications*, 2009.
- [42] Ahmari, S., Zhang, L., “Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization”, *Construction And Building Materials*, vol. 29, pp. 323–331, 2012.
- [43] Zhang, L., Ahmari, S., Zhang, J., “Synthesis and characterization of fly ash modified mine tailings-based geopolymers”, *Construction And Building Materials*, vol. 25, no. 9, pp. 3773–3781, 2011.
- [44] Ahmari, S., Zhang, L., “Utilization of cement kiln dust (ckd) to enhance mine tailings-based geopolymer bricks”, *Construction And Building Materials*, vol. 40, pp. 1002–1011, 2013.
- [45] Jiao, X., Zhang, Y., Chen, T., “Thermal stability of a silica-rich vanadium tailing based geopolymer”, *Construction And Building Materials*, vol. 38, pp. 43–47, 2013.

- [46] Kinnunen, P., Ismailov, A., Solismaa, S., *et al.*, “Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – a review”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 634–649, 2018.
- [47] Wei, B., Zhang, Y., Bao, S., “Preparation of geopolymers from vanadium tailings by mechanical activation”, *Construction And Building Materials*, vol. 145, pp. 236–242, 2017.
- [48] Cai, L., Ma, B., Li, X., *et al.*, “Mechanical and hydration characteristics of autoclaved aerated concrete (aac) containing iron-tailings: effect of content and fineness”, *Construction And Building Materials*, vol. 128, pp. 361–372, 2016.
- [49] Cong, X. Y., Lu, S., Yao, Y., *et al.*, “Fabrication and characterization of self-ignition coal gangue autoclaved aerated concrete”, *Materials And Design*, vol. 97, pp. 155–162, 2016.
- [50] Ma, B. guo, Cai, L. xiong, Li, X. guo, *et al.*, “Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 127, pp. 162–171, 2016.
- [51] Wang, C. L., Ni, W., Zhang, S. Q., *et al.*, “Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings”, *Construction And Building Materials*, vol. 104, pp. 109–115, 2016.
- [52] Belkheiri, D., Diouri, A., Taibi, M., *et al.*, “Recycling of moroccan coal gangue in the elaboration of a portland clinker”, *Journal Of Materials And Environmental Science*, vol. 6, no. 6, pp. 1570–1577, 2015.
- [53] Chen, G., Fu, X., Tao, W., “Preparation of low-heat portland cement clinker with coal gangue,” vol. 307, pp. 861–864, 2011.
- [54] Li, D., Song, X., Gong, C., *et al.*, “Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanic cement with coal gangue”, *Cement And Concrete Research*, vol. 36, no. 9, pp. 1752–1759, 2006.
- [55] Li, X., Wang, H., “Gangue utilization methods inquiry,” no. Cmes, pp. 343–345, 2015.
- [56] Lin, Z. S., Wan, H. W., Zhao, Q., *et al.*, “Applications of copper gangue with high content of fe<sub>2</sub>sio<sub>4</sub> as cement admixture and for cement production”, *Advances In Building Technology, Vols I And II, Proceedings*, vol. 1, pp. 853–858, 2002.
- [57] Qiu, G., Luo, Z., Shi, Z., *et al.*, “Utilization of coal gangue and copper tailings as clay for cement clinker calcinations”, *Journal Wuhan University Of Technology, Materials Science Edition*, vol. 26, no. 6, pp. 1205–1210, 2011.
- [58] Qiu, G., Zeng, W., Shi, Z., *et al.*, “Recycling coal gangue as raw material for portland cement production in dry rotary kiln”, *Proceedings - 2010 International Conference On Digital Manufacturing And Automation, ICDMA 2010*, vol. 2, pp. 141–144, 2010.
- [59] Xu, G., Sun, C., Sun, Y., *et al.*, “A new comprehensive utilization method for coal gangue : preparing alite-sulphoaluminate cement,” vol. 654, no. 1, pp. 1527–1532, 2013.
- [60] Yan, Z., “Engineering properties of cement with coal gangue,” In: *International Conference On Electric Technology And Civil Engineering (ICETCE)*, pp. 6565–6567, TBD Lushan, China, 22–24 Apr. 2011.
- [61] Yang, Z., Zhang, Y., Liu, L., *et al.*, “Integrated utilization of sewage sludge and coal gangue for cement clinker products: promoting tricalcium silicate formation and trace elements immobilization”, *Materials*, vol. 9, no. 4, 2016.
- [62] Liu, T., Li, X., Guan, L., *et al.*, “Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties”, *Ceramics International*, vol. 42, no. 1, pp. 1733–1739, 2016.
- [63] Liu, T., Tang, Y., Li, Z., *et al.*, “Red mud and fly ash incorporation for lightweight foamed

- ceramics using lead-zinc mine tailings as foaming agent”, *Materials Letters*, vol. 183, pp. 362–364, 2016.
- [64] Liu, T., Tang, Y., Han, L., *et al.*, “Recycling of harmful waste lead-zinc mine tailings and fly ash for preparation of inorganic porous ceramics”, *Ceramics International*, vol. 43, no. 6, pp. 4910–4918, 2017.
- [65] Ávila Amezcuita, Edna Shirley Soto Rubio, A. D., Sánchez Abri2, H. M., “Estériles del carbón y su uso en concreto hidráulico para pavimentos.”, *Revista Colombiana De Materiales*, vol. I, no. V, pp. 375–381, 2014.
- [66] Campillo Montoya, Luis Felipe Marín Osorio, Nolbayro Andrés Arias Gómez, J. A., López, M. E., *ANEXO 39. Informe Elaboración De Morteros A Partir De Residuos De Minerales Auríferos Del Occidente Antioqueño*, Colombia, 2016.
- [67] Guo, J. M., Zhu, L. L., “Experimental research on durabilities of coal gangue concrete”, *Advanced Materials Research*, vol. 306–307, pp. 1569–1575, 2011.
- [68] Han, F., Li, L., Song, S., *et al.*, “Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder”, *Powder Technology*, vol. 315, pp. 322–331, 2017.
- [69] Huang, X., Ranade, R., Ni, W., *et al.*, “Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates”, *Construction And Building Materials*, vol. 44, pp. 757–764, 2013.
- [70] Li, W., Wang, D., Niu, J., *et al.*, “Preparation of coal gangue cement mortar,” vol. 684, pp. 159–162, 2013.
- [71] Shettima, A. U., Hussin, M. W., Ahmad, Y., *et al.*, “Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete”, *Construction And Building Materials*, vol. 120, pp. 72–79, 2016.
- [72] Tariq, A., Yanful, E. K., “A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices”, *Journal Of Environmental Management*, vol. 131, pp. 138–149, 2013.
- [73] Wang, Z., Zhao, N., “Influence of coal gangue aggregate grading on strength properties of concrete”, *Wuhan University Journal Of Natural Sciences*, vol. 20, no. 1, pp. 66–72, 2015.
- [74] Zhang, N., Sun, H., Liu, X., *et al.*, “Early-age characteristics of red mud-coal gangue cementitious material”, *Journal Of Hazardous Materials*, vol. 167, no. 1–3, pp. 927–932, 2009.
- [75] Ranganathan, J., Moorcroft, D., Koch, J., *et al.*, *Protocolo De Gases Efecto Invernadero. Estándar Corporativo De Contabilidad Y Reporte*, World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute, México, 2006.
- [76] UNEP, SBCI, *Assessment Of Policy Instruments For Reducing Greenhouse Gas Emissions From Buildings*, United Nation Environment Programme and Central European University, Paris, France, 2007.
- [77] UNEP, SBCI, *Buildings And Climate Change: Summary For Decision Makers*, United Nation Environment Programme and Central European University, Paris, France, 2009.
- [78] Huovila, P., Alla-Juusela, M., Melchert, L., *et al.*, *Buildings And Climate Change: Status, Challenges And Opportunities*, Sustainable Consumption and Production Branch, Paris, France, 2007.
- [79] ImportantIndia, *ESSAY ON GLOBAL WARMING: CAUSES, EFFECTS, IMPACT AND PREVENTION OF GLOBAL WARMING*, 2017, [Online], Available: <https://www.importantindia.com/11701/essay-on-global-warming/>, [Accessed: 07-Nov-2017].
- [80] Abd Rashid, A. F., Yusoff, S., “A review of life cycle assessment method for building

industry”, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 244–248, 2015.

[81] Penagos, G., “Políticas de construcción sostenible como herramienta de mitigación y adaptación frente al cambio climático,” In: *CAMBIO CLIMÁTICO: LECCIONES DE Y PARA CIUDADES DE AMÉRICA LATINA*, E. ALISTE, 1st ed., ch. 2, U. Externado de Colombia, Bogotá, Colombia.

[82] Naciones Unidas, “Convención marco sobre el cambio climático. acuerdo de paris. conferencia de las partes, 21er período de sesiones.,” vol. 21930, 2015.

[83] Cho, S. H., Chae, C. U., “A study on life cycle co2 emissions of low-carbon building in south korea”, *Sustainability (Switzerland)*, vol. 8, no. 6, pp. 1–19, 2016.

[84] Sinha, R., Lennartsson, M., Frostell, B., “Environmental footprint assessment of building structures: a comparative study”, *Building And Environment*, vol. 104, pp. 162–171, Aug. 2016.

[85] Monahan, J., Powell, J. C., “An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: a case study using a lifecycle assessment framework”, *Energy And Buildings*, vol. 43, no. 1, pp. 179–188, 2011.

[86] Junnila, S., Horvath, A., Asce, A. M., “Life-cycle environmental effects of an office building,” no. December, pp. 157–166, 2003.

[87] Nielsen, C. V., “Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective”, *Concrete Technology Forum*, no. June, pp. 1–14, 2008.

[88] Xing, S., Xu, Z., Jun, G., “Inventory analysis of lca on steel- and concrete-construction office buildings,” vol. 40, pp. 1188–1193, 2008.

[89] Hammond, G. P., Jones, C. I., “Embodied energy and carbon in construction materials”, *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers: Energy*, vol. 161, no. 2, pp. 87–98, 2008.

[90] Hacker, J., DeSaulles, T., Minson, A., *et al.*, “Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: a case study on the effects of thermal mass and climate change”, *Energy And Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 375–384, 2008.

[91] Darby, H. J., Elmualim, A. A., Kelly, F., “Case study on the whole life carbon cycle in buildings,” pp. 1781–1788, 1990.

[92] Seo, M. S., Kim, T., Hong, G., *et al.*, “On-site measurements of co2 emissions during the construction phase of a building complex”, *Energies*, vol. 9, no. 8, pp. 1–13, 2016.

[93] Moussavi Nadoushani, Z. S., Akbarnezhad, A., “Effects of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings”, *Energy And Buildings*, vol. 102, pp. 337–346, 2015.

[94] Bonamente, E., Merico, M. C., Rinaldi, S., *et al.*, “Environmental impact of industrial prefabricated buildings: carbon and energy footprint analysis based on an lca approach”, *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 2841–2844, 2014.

[95] Klufallah, M. M. a., Nuruddin, M. F., Khamidi, M. F., *et al.*, “Assessment of carbon emission reduction for buildings projects in malaysia-a comparative analysis”, *E3S Web Of Conferences*, vol. 3, no. 01016, pp. 1–8, 2014.

[96] Bendewald, M., Zhai, Z. J., “Using carrying capacity as a baseline for building sustainability assessment”, *Habitat International*, vol. 37, pp. 22–32, 2013.

[97] Asdrubali, F., Baldassarri, C., Fthenakis, V., “Life cycle analysis in the construction sector : guiding the optimization of conventional italian buildings”, *Energy And Buildings*, vol. 64, pp. 73–89, 2013.

[98] Aye, L., Ngo, T., Crawford, R. H., *et al.*, “Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules”, *Energy And Buildings*, vol. 47, pp. 159–168,

2012.

[99] British Council for Offices, *Whole-Life Carbon Footprint Measurement And Offices*, Environmental Sustainability Group, 1st ed., London, UK, 2012.

[100] Geoff Milne; Chris Reardon, “Embodied energy”, *Alternatives Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 205–209, 2006.

[101] Gamboa, C. N. Q., *Análisis De La Energía Incorporada Y Emisiones De Co2 Aplicado A Viviendas Unifamiliares De Eficiencia Energética*, M. Sc., Universidad Politécnica de Cataluña Escuela, Cataluña, España, 2016.

[102] Green Group Sustainability Consulting, CERTIFICACIONES LEED Y EDGE, 2017, [Online], Available: <http://www.greengroup.com.ar/listar.php?s=certificaciones&c=25040>, [Accessed: 09-Oct-2017].

[103] IFC, EDGE EXCELLENCE IN DESIGN FOR GREATER EFFICIENCIES, 2017, [Online], Available: <https://www.edgebuildings.com/>, [Accessed: 09-Oct-2017].

[104] Wu, X., Peng, B., Lin, B., “A dynamic life cycle carbon emission assessment on green and non-green buildings in china”, *Energy And Buildings*, vol. 149, pp. 272–281, 2017.

[105] MINEDUCACIÓN, MINMINAS, PNUD, *et al.*, *Sector MINERO Minerales Oro Y Carbón*, Marco Nacional de Cualificaciones Colombia, Colombia, 2016.

[106] UPME, *Directorio De Posibles Proveedores De Minería Por Departamento*, Colombia, 2016.

[107] UPME, MINAS Y TÍTULOS MINEROS, 2018, [Online], Available: [http://sig.simec.gov.co/UPME\\_MI\\_minas/](http://sig.simec.gov.co/UPME_MI_minas/), [Accessed: 19-Feb-2018].

[108] Betzab, A., *Residuos Mineros , Qué Son Y Posibilidades De Valorización Residuos Mineros*, 2016.

[109] Junta de Andalucía, *Los Residuos Mineros*, Andalucía, España, 2006.

[110] Oblasser, A., *Estudio Sobre Lineamientos, Incentivos Y Regulación Para El Manejo De Los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), Incluyendo Cierre De Faenas Mineras*, Desarrollo Sostenible de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Bolivia, Chile, Colombia y Perú, 2016.

[111] ONU, *Mining Overview*, USFS International Program, 2002.

[112] European Commission, *Mining Waste Directive (MWD) GUIDANCE DOCUMENT DOE PLANNING*, The European Parliament and the Council of the EU, Europe, 2006.

[113] Feder, M., *Residuos Mineros*, Andalucía, España, 2006.

[114] Ministerio de Minería, *Gestión De Residuos Industriales Líquidos Mineros Y Buenas Prácticas*, ACUERDO MARCO PRODUCCIÓN LIMPIA SECTOR GRAN MINERÍA BUENAS PRÁCTICAS Y GESTIÓN AMBIENTAL, Chile, 2002.

[115] Arango Aramburo, M., Olaya, Y., “Problemática de los pasivos ambientales mineros en colombia”, *Gestión Y Ambiente*, vol. 15, no. 3, pp. 125–133, 2012.

[116] UPME, MINMINAS, *Guía De Orientación Para El Minero Sobre El Correcto Manejo De Vertimientos Para La Minería De Metales Preciosos Y De Carbón*, Colombia, 2015.

[117] UPME, MINMINAS, *PLAN NACIONAL DE DESARROLLO MINERO CON HORIZONTE A 2025*, BUREAU VERITAS, Colombia.

[118] US EPA, *Production-Related Waste Managed By Industry*, TRI National Analysis 2016, USA, 2018.

- [119] Zhou, C., Liu, G., Yan, Z., *et al.*, “Transformation behavior of mineral composition and trace elements during coal gangue combustion”, *Fuel*, vol. 97, pp. 644–650, 2012.
- [120] Cui, J. P., Liu, Y., Wang, Z. H., *et al.*, “Life cycle assessment of cement clinker production using coal gangue as alternative raw material and fuel”, *Materials Science Forum*, vol. 814, pp. 435–440, 2015.
- [121] Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., *et al.*, “Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 84, no. 1, pp. 411–420, 2014.
- [122] Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., *et al.*, “A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 108, pp. 1–13, 2015.
- [123] Benavides, R. J., “Concreto de alto desempeño,” p. 153, 2014.
- [124] Rivera, G., *Concreto Simple*, Universidad del Cauca, 1st ed., Cauca, Colombia, 2013.
- [125] Ishak, S. A., Hashim, H., *Low Carbon Measures For Cement Plant - A Review* vol. 103, Elsevier Ltd, 2015.
- [126] Kajaste, R., Hurme, M., “Cement industry greenhouse gas emissions - management options and abatement cost”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 4041–4052, 2016.
- [127] Gutiérrez de López, L., *El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción*, Universidad Nacional de Colombia, , Manizales, Colombia, 2003.
- [128] Nazari, A., Sanjayan, J. G., *Handbook Of Low Carbon Concrete*, Joe Hayton, 1st ed., Elsevier, United Kingdom, 2017.
- [129] Stajanca, M., Estokova, A., “Environmental impacts of cement production”, *Technical University Of Kosice, Civil Engineering Faculty, Institute Of Architectural Engineering*, pp. 296–302, 2012.
- [130] Ali, M. B., Saidur, R., Hossain, M. S., “A review on emission analysis in cement industries”, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2252–2261, 2011.
- [131] Akçiçek, N. A. N., “Optimization of clinker grinding using the taguchi method,” vol. 3, no. 2, pp. 101–108, 2011.
- [132] Kalbakk, T. E., “LCA on case study – concrete,” 2011.
- [133] Kim, T., Lee, S., Chae, C. U., *et al.*, “Development of the co<sub>2</sub> emission evaluation tool for the life cycle assessment of concrete”, *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 11, pp. 1–14, 2017.
- [134] Ludwig, H. M., Zhang, W., “Research review of cement clinker chemistry”, *Cement And Concrete Research*, vol. 78, pp. 24–37, 2015.
- [135] International Finance Corporation, *Environmental, Health, And Safety Guidelines CEMENT AND LIME MANUFACTURING* In: DRAFT REVISED EHS GUIDELINES FOR CEMENT AND LIME MANUFACTURING-ENVIRONMENTAL, HEALTH, and SAFETY GUIDELINES TECHNICAL REVISION, SECOND PUBLIC CONSULTATION, World Bank Group, 2018.
- [136] Shen, L., Gao, T., Zhao, J., *et al.*, “Factory-level measurements on co<sub>2</sub> emission factors of cement production in china”, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 337–349, 2014.
- [137] Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., *et al.*, “Global strategies and potentials to curb co<sub>2</sub> emissions in cement industry”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 142–161, 2013.
- [138] Gao, T., Shen, L., Shen, M., *et al.*, “Analysis of material flow and consumption in cement production process”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 112, no. August, pp. 553–565, 2016.

- [139] Alghadafi, E. M., Latif, M., “Simulation of a libyan cement factory”, *WCE 2010 - World Congress On Engineering 2010*, vol. 3, no. September, pp. 2292–2296, 2010.
- [140] Huntzinger, D. N., Eatmon, T. D., “A life-cycle assessment of portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 17, no. 7, pp. 668–675, 2009.
- [141] Noguera Sebastián, J., *Estudio Técnico-Económico Para La Fabricación De 1000000 De Toneladas De Cemento Portland*, M.Sc., Universitat Politècnica de Catalunya, Cataluña, España, 2008.
- [142] Rodríguez Luque, A. M., *Estudio Técnico Económico Para La Fabricación De 1000000 De Toneladas De Cemento Portland Anuales*, M.Sc., Universitat Politècnica de Catalunya, Cataluña, España, 2005.
- [143] Carneado Moreno, A., *Estudio Técnico-Económico De Una Fábrica De Cemento Portland Para La Obtención De 1.000.000 TM Al Año*, Universidad Politècnica de Cataluña, Cataluña, España, 2008.
- [144] World Business Council for Sustainable Development, *The Cement CO2 And Energy Protocol CO2 And Energy Accounting And Reporting Standard For The Cement Industry Cement Sustainability Initiative (CSI)*, 2011.
- [145] CEMEX, *Integrated Report CEMEX*, 2017.
- [146] ARGOS, *Integrated Report ARGOS*, 2017.
- [147] LAFARGEHOLCIM, *Sustainability Report LAFARGEHOLCIM*, 2017.
- [148] Roy D M, “Alkali activated cements, opportunities and challenges”, *Cement And Concrete Research*, vol. 29, pp. 249–254, 1999.
- [149] Shi, C., Jiménez, A. F., Palomo, A., “New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to portland cement”, *Cement And Concrete Research*, vol. 41, no. 7, pp. 750–763, 2011.
- [150] Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., *et al.*, “A review on alkaline activation: new analytical perspectives”, *Materiales De Construcción*, vol. 64, no. 315, pp. 1–23, 2018.
- [151] Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., “Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement”, *Minerals Engineering*, vol. 29, pp. 89–104, 2012.
- [152] Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D. M., *Alkali-Activated Cements And Concretes*, 2006.
- [153] Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., *et al.*, “Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials”, *Waste And Biomass Valorization*, vol. 1, no. 1, pp. 145–155, 2010.
- [154] Hua Xu Jannie S. J. van Deventer, and Pavel V. Krivenko, J. L. P., “Characterization of aged slag concretes”, *Materials Journal*, vol. 105, no. 2.
- [155] Provis, J. L., Palomo, A., Shi, C., “Advances in understanding alkali-activated materials”, *Cement And Concrete Research*, vol. 78, pp. 110–125, 2015.
- [156] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., “Alkali-activated binders: a review. part 2. about materials and binders manufacture”, *Construction And Building Materials*, vol. 22, no. 7, pp. 1315–1322, 2008.
- [157] Alonso, M. M., Gismera, S., Blanco, M. T., *et al.*, “Alkali-activated mortars: workability and rheological behaviour”, *Construction And Building Materials*, vol. 145, pp. 576–587, 2017.
- [158] Albitar, M., Ali, M. S. M., Visintin, P., *et al.*, “Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes”, *Construction And Building Materials*, vol. 136, pp. 374–385, 2017.
- [159] Pacheco-Torgal, F., *Introduction To Handbook Of Alkali-Activated Cements, Mortars And*

*Concretes*, 2014.

- [160] Ramujee, K., Potharaju, M., “Mechanical properties of geopolymers concrete composites”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 2937–2945, 2017.
- [161] Mo, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., “Structural performance of reinforced geopolymer concrete members: a review”, *Construction And Building Materials*, vol. 120, pp. 251–264, 2016.
- [162] Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., *et al.*, “The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’”, *Cement And Concrete Research*, vol. 37, no. 12, pp. 1590–1597, 2007.
- [163] Joseph Davidovits John H. Paterson, Douglas J. Ritcey, D. C. C., “Geopolymeric concretes for environmental protection”, *Concrete International*, vol. 12, no. 7.
- [164] Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., *et al.*, “Geopolymer concrete: a review of some recent developments”, *Construction And Building Materials*, vol. 85, pp. 78–90, 2015.
- [165] Hardjito, D., Rangan, B. V., “Geopolymer concrete for environmental protection”, *Research Report GC*, no. April, pp. 41–59, 2014.
- [166] Petrillo, A., Cioffi, R., Ferone, C., *et al.*, “Eco-sustainable geopolymer concrete blocks production process”, *Agriculture And Agricultural Science Procedia*, vol. 8, pp. 408–418, 2016.
- [167] Michaux, M., Nelson, E., Vidick, B., “Cement and chemistry additives”, *Oilfield Review*, vol. 1, no. 1, pp. 18–25, 1989.
- [168] Bye, G., *Portland Cement*, A. Paul Livesey, BSc(Tech), EurChem, CChem, MRSC, 3rd ed., ICE Publishing, London, United Kingdom, 2011.
- [169] Molina, D. A. V., Arcila, J. M. M., Gutiérrez, R. M. De, “Mechanical and thermal performance of a geopolymeric and hybrid material based on fly ash”, *Dyna*, vol. 83, no. 195, pp. 216–223, 2016.
- [170] Al-Shathr, B., Shamsa, M., Al-Attar, T., “Relationship between amorphous silica in source materials and compressive strength of geopolymer concrete”, *MATEC Web Of Conferences*, vol. 162, p. 02019, 2018.
- [171] Komnitsas, K. A., “Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities”, *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 1023–1032, 2011.
- [172] Habert, G., D’Espinose De Lacaillerie, J. B., Roussel, N., “An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 19, no. 11, pp. 1229–1238, 2011.
- [173] McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., *et al.*, “Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 19, no. 9–10, pp. 1080–1090, 2011.
- [174] Turner, L. K., Collins, F. G., “Carbon dioxide equivalent (co<sub>2</sub>-e) emissions: a comparison between geopolymer and opc cement concrete”, *Construction And Building Materials*, vol. 43, pp. 125–130, 2013.
- [175] Davidovits, J., ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS OF GEOPOLYMERS, 2003, [Online], Available: <https://www.materialstoday.com/polymers-soft-materials/features/environmental-implications-of-geopolymers/>, [Accessed: 26-Mar-2018].
- [176] Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., *et al.*, “Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: a review on recent studies”, *Construction And Building Materials*, vol. 152, pp. 598–613, 2017.

- [177] Provis, J. L., “Milestones in the analysis of alkali-activated binders”, *Journal Of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 4, no. 2, pp. 74–84, 2015.
- [178] Provis, J. L., “Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?”, *Materials And Structures/Materiaux Et Constructions*, vol. 47, no. 1–2, pp. 11–25, 2014.
- [179] Joseph, B., Mathew, G., “Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete”, *Scientia Iranica*, vol. 19, no. 5, pp. 1188–1194, 2012.
- [180] Lahoti, M., Wong, K. K., Yang, E. H., *et al.*, “Effects of si/al molar ratio on strength endurance and volume stability of metakaolin geopolymers subject to elevated temperature”, *Ceramics International*, vol. 44, no. 5, pp. 5726–5734, 2018.
- [181] Livi, C. N., Repette, W. L., “Effect of naoh concentration and curing regime on geopolymer efeito da concentração de naoh e de regimes de cura em geopolímeros,” vol. 10, no. 6, pp. 1174–1181, 2017.
- [182] Mermerdaş, K., Manguri, S., Nassani, D. E., *et al.*, “Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar”, *Engineering Science And Technology, An International Journal*, vol. 20, no. 6, pp. 1642–1652, 2017.
- [183] Ozer, I., Soyer-uzun, S., “Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar si / al ratios”, *Ceramics International*, vol. 41, no. 8, pp. 10192–10198, 2015.
- [184] Pandurangan, K., Thennavan, M., Muthadhi, A., “Studies on effect of source of flyash on the bond strength of geopolymer concrete,” In: *Materials Today: Proceedings*, pp. 12725–12733 2018.
- [185] Çetintaş, R., Soyer-Uzun, S., “Relations between structural characteristics and compressive strength in volcanic ash based one–part geopolymer systems”, *Journal Of Building Engineering*, vol. 20, pp. 130–136, 2018.
- [186] Cho, Y. K., Yoo, S. W., Jung, S. H., *et al.*, “Effect of na<sub>2</sub>o content, sio<sub>2</sub>/na<sub>2</sub>o molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of fa-based geopolymer”, *Construction And Building Materials*, vol. 145, pp. 253–260, 2017.
- [187] AMVA, UPB, *Política Pública De Construcción Sostenible. Línea Base Y Guía 4.*, Área Metropolitana Valle de Aburrá and Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2015.
- [188] Arrieta, A. A., Janna, F. C., López, D., *et al.*, *Consultoría Técnica Para El Fortalecimiento Y Mejora De La Base De Datos De Factores De Emisión De Los Combustibles Colombianos-FECOC*, Medellín, Colombia, 2016.
- [189] Martínez-González, A., Casas-Leuro, O. M., Acero-Reyes, J. R., *et al.*, “Comparison of potential environmental impacts on the production and use of high and low sulfur regular diesel by life cycle assessment”, *CTyF - Ciencia, Tecnologia Y Futuro*, vol. 4, no. 4, pp. 123–136, 2011.
- [190] UPME, *Informe Mensual De Variables De Generación Y Del Mercado Eléctrico Colombiano-Diciembre De 2015*, Subdirección de Energía Eléctrica - Grupo Generación, Medellín, Colombia, 2015.
- [191] Comisión Asesora Permanente Para El Regimen De Construcciones Sismo Resistentes, *NSR-10*, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia, 2010.
- [192] ISO 14067, “Greenhouse gases — carbon footprint of products — requirements and guidelines for quantification,” 2018.
- [193] The British Standards Institution, “PUBLICLY available specification pas 2050: 2011 specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services,” pp. 1–45, 2011.
- [194] Hamburg, I., *UMBERTO NXT CO2*, 2019.

- [195] Energy, E., “EDGE materials,” 2016.
- [196] Erickson, P., Tempest, K., *The Contribution Of Urban-Scale Actions To Ambitious Climate Targets*, 2014.
- [197] Morris, D. E., Oakley, J. E., Crowe, J. A., “A web-based tool for eliciting probability distributions from experts”, *Environmental Modelling And Software*, vol. 52, pp. 1–4, Feb. 2014.
- [198] Puza, B., *Bayesian Methods For Statistical Analysis*, ANU eView, Australia, 2015.
- [199] Argos, PRODUCTOS ARGOS: AGREGADOS, CEMENTO Y CONCRETO PREMEZCLADO, [Online], Available: <https://www.argos.co/Productos>, [Accessed: 10-Mar-2017].
- [200] Bello Lozano, A. S., *Informe Final-Rendimiento De Maquinaria Pesada*, Grupo de Investigación Ciencia y Sociedad and Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia, 2015.
- [201] Tam, V. W. Y., Le, K. N., Shen, L., *Life Cycle Assessment On Green Building Implementation*, V. W. Y. Tam, , K. N. Le, , and L. Shen, 1st ed., vol. 1, Shu-Kun Lin, Basel, Switzerland, 2016.
- [202] ACI 318-14, “Requisitos de reglamento para concreto estructural,” 2014.
- [203] ASTM D421–85, “Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants,” 2007.
- [204] ASTM D422-63, “Standard test method for particle-size analysis of soils,” 2007.
- [205] ASTM C33/C33M-18, “Standard specification for concrete aggregates,” 2018.
- [206] ASTM D854 –14, “Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer,” 2018.
- [207] ASTM C127 – 15, “Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate,” 2015.
- [208] ASTM C128 – 15, “Standard test method for relative density ( specific gravity ) and absorption of fine aggregate,” 2018.
- [209] ASTM D2216 – 10, “Standard test methods for laboratory determination of water ( moisture ) content of soil and rock by mass,” 2018.
- [210] Rivera, G., “Dosificación de mezclas de concreto,” In: *Concreto Simple*, Universidad del Cauca, 1st ed., ch. 8, Cauca, Colombia, 2013.
- [211] Spin S.A., *Especificaciones Y Certificado De Calidad Flocsil*, Colombia, 2018.
- [212] Hossain, M. M., Karim, M. R., Hossain, M. K., *et al.*, “Durability of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: a review”, *Construction And Building Materials*, vol. 93, pp. 95–109, 2015.
- [213] Krivenko, P., Kovalchuk, O., Pasko, A., *et al.*, “Development of alkali activated cements and concrete mixture design with high volumes of red mud”, *Construction And Building Materials*, vol. 151, pp. 819–826, 2017.
- [214] Thannimalay, L., Yusoff, S., Zawawi, N. Z., “Life cycle assessment of sodium hydroxide”, *Australian Journal Of Basic And Applied Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 421–431, 2013.
- [215] Fawer, M., Concannon, M., Rieber, W., “Life cycle inventories for the production of sodium silicates”, *International Journal Of Life Cycle Assessment*, vol. 4, no. 4, pp. 207–212, 1999.
- [216] ACI Committee, “Standard practice for selecting proportions for normal heavyweight, and mass concrete, aci 211.1-91”, *Manual Of Concrete Practice*, no. Reapproved, pp. 1–38, 1997.

- [217] Giraldo Bolivar, O., *Dosificación De Mezclas De Hormigón*, Medellín, Colombia, 2006.
- [218] ASTM C39/C39M – 18, “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens,” 2018.
- [219] Área metropolitana del Valle de Aburrá, Camacol Antioquia, One Planet build with care - UNEP, *Implementación De La Política Pública De Construcción Sostenible*, 2018.
- [220] Gutiérrez-Junco, O. J., Pineda-Triana, Y., Vera-López, E., “Efecto de la incorporación de ceniza volante y escoria de horno alto en el comportamiento electroquímico de concretos de cemento comercial”, *Revista De Metalurgia*, vol. 51, no. 4, p. e058, 2015.
- [221] UPME, DISTRIBUCIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA SIN, 2019, [Online], Available: <http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/PETROLEO.aspx>, [Accessed: 15-Apr-2019].
- [222] Medina Romero, L., *Análisis De La Viabilidad Económica Y Ambiental Del Uso De Armaduras Corrugadas De Acero Inoxidable En Elementos De Hormigón Armado Sometidos A Clases De Exposición Agresivas. Aplicación A Elementos En Contacto Con Aguas Residuales Agresivas*, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2006.
- [223] ANDI, ACERO EN CIFRAS, 2019, [Online], Available: <http://www.andi.com.co/Home/Camara/6-comite-colombiano-de-productores-de-acero>, [Accessed: 15-Apr-2019].
- [224] Chateigner, D., “Some basic notions about powder diffraction,” In: *Combined Analysis*, 1st ed., ch. 1, Wiley, United States, 2010.
- [225] Shatokha, V., “The quantification of crystalline phases in materials: applications of rietveld method,” In: *Sintering – Methods And Products*, 1st ed., ch. 14, InTech, Croatia, 2012.
- [226] 林伸行, *Especificaciones Y Certificado De Calidad Soda Caústica*, 中國, 2018.
- [227] Frías, M., Sánchez, I., Luxan, M., *et al.*, “Granulometría láser : estudio comparativo con las técnicas de tamizado y elutriación aplicado a materiales puzolánicos láser granulometry : a comparative study the techniques of sieving and elutriation applied to pozzolanic materials”, *Materiales De Construcción*, vol. 40, no. 217, pp. 39–52, 1990.
- [228] Rend, M., Fern, B. A., Mart, M., *et al.*, “Desarrollo de nuevos cementos : ‘ cementos alcalinos y cementos híbridos ,’” 2015.
- [229] Sanchez de Guzman, D., *Tecnología Del Concreto Y Del Mortero* 5th ed., vol. 1, Santafé de Bogotá, Colombia, 2001.
- [230] Castellano, C., Bonavetti, V., Irassar, E. F., “Cementos mezclas : influencia del tamaño de las partículas de escoria”, *Concreto Y Cemento*, vol. 4, no. 2, pp. 2–14, 2013.
- [231] De Rossi, A., Simão, L., Ribeiro, M. J., *et al.*, “In-situ synthesis of zeolites by geopolymerization of biomass fly ash and metakaolin”, *Materials Letters*, vol. 236, pp. 644–648, 2019.
- [232] LaRosa, J. L., Kwan, S., Grutzeck, M. W., “Zeolite formation in class f fly ash blended cement pastes”, *Journal Of The American Ceramic Society*, vol. 75, no. 6, pp. 1574–1580, 1992.
- [233] Ojha, K., Pradhan, N. C., Samanta, A. N., “Zeolite from fly ash: synthesis and characterization”, *Bulletin Of Materials Science*, vol. 27, no. 6, pp. 555–564, 2004.
- [234] Alehyen, S., Achouri, M. E. L., Taibi, M., “Characterization, microstructure and properties of fly ash-based geopolymer”, *Journal Of Materials And Environmental Sciences*, vol. 8, no. 5, pp. 1783–1796, 2017.
- [235] Tang, Q., He, Y., Wang, Y. pin, *et al.*, “Study on synthesis and characterization of zsm-20 zeolites from metakaolin-based geopolymers”, *Applied Clay Science*, vol. 129, pp. 102–107, 2016.

- [236] Grutzeck, M., Kwan, S., DiCola, M., “Zeolite formation in alkali-activated cementitious systems”, *Cement And Concrete Research*, vol. 34, no. 6, pp. 949–955, 2004.
- [237] Król, M., Mozgawa, W., “Zeolite layer on metakaolin-based support”, *Microporous And Mesoporous Materials*, vol. 282, no. February, pp. 109–113, 2019.
- [238] Guo, S., Zhang, Y., Wang, K., *et al.*, “Delaying the hydration of portland cement by sodium silicate: setting time and retarding mechanism”, *Construction And Building Materials*, vol. 205, pp. 543–548, 2019.
- [239] Gómez Comba, C. A., *Contaminación Del Aire De Medellín Por PM10 Y PM2.5 Y Sus Efectos En La Salud*, Especialización Planeación Ambiental y Manejo Integral de Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, 2017.
- [240] SIATA, ICA - PM2.5 ESTACIONES POECA, 2019, [Online], Available: [https://siata.gov.co/siata\\_nuevo/](https://siata.gov.co/siata_nuevo/), [Accessed: 06-May-2019].
- [241] ASTM C143/C143M – 15a, “Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete,” 2015.
- [242] ASTM C403, “Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance,” 2016.
- [243] ASTM C1202 – 17a, “Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration,” 2017.
- [244] ASTM C1012/C1012M – 18a, “Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution,” 2018.
- [245] Gonçalves Rapazote, J., Laginhas, C., Teixeira-Pinto, A., “Development of building materials through alkaline activation of construction and demolition waste (cdw) – resistance to high temperatures”, *12th International Conference On Durability Of Building Materials And Components*, pp. 1–8, 2011.
- [246] Li, C., Wen, Q., Hong, M., *et al.*, “Heavy metals leaching in bricks made from lead and zinc mine tailings with varied chemical components”, *Construction And Building Materials*, vol. 134, pp. 443–451, 2017.
- [247] Giergiczny, Z., Król, A., “Immobilization of heavy metals (pb, cu, cr, zn, cd, mn) in the mineral additions containing concrete composites”, *Journal Of Hazardous Materials*, vol. 160, no. 2–3, pp. 247–255, 2008.
- [248] Minaščíková, M., Škvára, F., “Fixation of heavy metals in geopolymeric materials based on brown coal fly ash”, *Ceramics*, vol. 50, no. 4, pp. 200–207, 2006.
- [249] Ahmari, S., Zhang, L., *Eco-Efficient Masonry Bricks And Blocks*, 2015.
- [250] Environmental Protection Agency (EPA), *3051A - METHOD 3051A MICROWAVE ASSISTED ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, SOILS, AND OILS*, USA, 2017.
- [251] Environmental Protection Agency, *3120 Metals By Plasma Emission Spectroscopy (Editorial Revisions, 2011)*, USA, 2011.
- [252] Domínguez López, M. G., Salazar, A. P., *PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COMO EVALUACIÓN AMBIENTAL DE MATERIALES*, Mexico, 2018.
- [253] Camacol-Antioquia, *Base De Datos De Costos*, Colombia, 2019.
- [254] EPM, *TARIFAS PARA SERVICIOS DE ACUEDUCTO Y AGUAS RESIDUALES - Mes De Facturación Mayo 2019*, Medellín - Colombia, 2019.
- [255] Spin S.A., *Información Interna*, Colombia, 2019.

- 
- [256] Ahmari, S., *Recycling And Reuse Of Wastes As Construction Material Through Geopolymerization*, USA, 2015.
- [257] F. Pacheco-Torgal, V.W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. D. and J. de B., *Handbook Of Recycled Concrete And Demolition Waste.*, 2013.
- [258] Robayo-Salazar, R. A., Rivera, J. F., Mejía de Gutiérrez, R., “Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes”, *Construction And Building Materials*, vol. 149, pp. 130–138, 2017.
- [259] Rao, F., Liu, Q., “Geopolymerization and its potential application in mine tailings consolidation: a review”, *Mineral Processing And Extractive Metallurgy Review*, vol. 36, no. 6, pp. 399–409, 2015.
- [260] Krishnan, T., Purushothaman, R., “Optimization and influence of parameter affecting the compressive strength of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregate: using full factorial design approach”, *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science*, vol. 80, no. 1, 2017.