



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO ASOCIADA A LA ELABORACIÓN
DE HORMIGONES GEOPOLIMÉRICOS EN CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JUAN FERNANDO ALBORNOZ MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:

FEDERICO EDUARDO RAMÓN DELFÍN ARIZTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

BÁRBARA XIMENA RODRÍGUEZ DROGUETT

DAVID CAMPUSANO BROWN

SANTIAGO DE CHILE

2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil.
POR: Juan Fernando Albornoz Muñoz.
FECHA: 08/05/2015.
PROFESOR GUÍA: Federico Delfín Ariztía.

CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO ASOCIADA A LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES GEOPOLIMÉRICOS EN CHILE.

Los Cementos Geopoliméricos representan una nueva clase de polímeros inorgánicos, que constituye una potencial alternativa al uso de cementos hidráulicos en la construcción. En particular, el Hormigón Geopolimérico, permite la incorporación de subproductos industriales y el reemplazo total de cemento portland, componente principal de los hormigones convencionales. De acuerdo a lo anterior, el principal atractivo de estos hormigones radica en la potencial reducción de gases de efecto invernadero generados (Huella de Carbono) al ser utilizados como alternativa a los hormigones convencionales en la construcción.

En el presente trabajo de título, se efectúa un análisis comparativo del desempeño ambiental, medido a través de la huella de carbono del hormigón geopolimérico, con relación al correspondiente del hormigón convencional, ambos evaluados para las condiciones imperantes en Chile. El objetivo del presente estudio es estimar la reducción de gases de efecto invernadero resultante del reemplazo de hormigón convencional por hormigón geopolimérico, en el medio nacional. Dentro de los objetivos específicos está la evaluación, a nivel nacional, de las fuentes de aluminosilicatos disponibles, materia prima base para la producción de geopolímeros, y la elaboración de herramienta para el cálculo de huella de carbono, aplicable al caso de los hormigones en estudio. Se realiza además, una comparación de la implicancia económica de esta nueva tecnología.

Los resultados obtenidos dan cuenta de una significativa reducción de las emisiones de CO₂e, medida universal utilizada para indicar el potencial de calentamiento global asociado a los gases con efecto invernadero, al usar hormigón geopolimérico como alternativa al uso de hormigón convencional. Esta disminución sería no menor al 30% a favor del hormigón geopolimérico.

Finalmente, se pudo establecer que existiría disponibilidad suficiente de ceniza volante en el país para hacer factible el desarrollo de esta tecnología. En efecto, si se utilizara ceniza volante como fuente de aluminosilicato base para la producción de hormigón geopolimérico, los volúmenes disponibles permitirían satisfacer alrededor del 30% de la demanda anual de hormigón en el país.

**...A mis viejos, por darme la fuerza necesaria para poder
llevar acabo ésta etapa de mi vida...**

*“El imposible no podría haber ocurrido, por lo tanto lo imposible debe ser posible a
pesar de las apariencias.*

- Agatha Christie -

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres por su ayuda y apoyo incondicional tanto en mi etapa universitaria como en el diario vivir. Les doy gracias por acompañarme y darme las fuerzas necesarias para no flaquear a lo largo de estos años de Universidad. “Gracias totales!...”

A mi familia en general, en especial al tío Rodney por haberme ayudado con su súper beca, estaré siempre en deuda con usted. Gracias por estar conmigo en este largo proceso, mucho más de lo que debiese quizás, pero que ya está ad portas de terminar. Lo importante era salir no?...

A la “Bobi”, por hacerme la vida más fácil y darme tantas alegrías en esta etapa, por su interés en tratar de entender lo que estaba haciendo, por todos esos regalos que aparecían de la nada, por su gran preocupación y por dar todo por mí.

A Héctor, por el tiempo invertido en ayudarme (ya se devolverá la mano waxo), por sus buenas recomendaciones de películas y series para poder sobrellevar de mejor manera los tiempos de ocio. A Juank, por su paciencia con mis súper traducciones, yo sé que el inglés te cuesta, pero sabes que conmigo aprenderás mucho hijo. A mis amigos, que fueron un apoyo todos estos años, Héctor (nuevamente), Xoro, Copitz, Cardenas, Droguett y “Topo”. Por todas esas maratones de estudio y porque no mencionar también esos terraceos o su “algo piola por ahí” que ayudaban a despejarse de vez en cuando.

A mis amigos del colegio, que a pesar de que a lo largo de esta etapa no nos vemos tan seguido como antes, nunca perdimos el contacto y hemos sabido mantener la amistad, que sigue tal cual como quedó cuando tomamos caminos diferentes. Siempre que podemos nos ponemos al día y recordamos los buenos años.

A los profesores de la comisión Don FD, por su gran disposición, interés y ayuda para lograr este trabajo de título. Espero después de esto, los miércoles se libere antes y no esté almorzando tan tarde. Bárbara Rodríguez por darme todas las facilidades para poder trabajar en su oficina, además de facilitarme datos de su trabajo que permitieron el desarrollo de este trabajo de título. A David Campusano, por darme esa motivación necesaria para una gran producción, como se dice por ahí, por chicotearme los caracoles para poder terminar.

En fin, a cada persona que estuvo conmigo estos últimos X años de carrera.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1:	1
Introducción.	1
1.1 Introducción general.	1
1.2 Objetivos.	2
1.2.1 Objetivo General.	2
1.2.2 Objetivos Específicos.	3
CAPÍTULO 2:	4
Antecedentes sobre Hormigón Geopolimérico.	4
2.1 Introducción.	4
2.2 Geopolímeros.	4
2.2.1 Geopolimerización.	6
2.3 Aluminosilicatos.	11
2.3.1 Escoria de alto horno.	11
2.3.2 Puzolana natural.	12
2.3.3 Ceniza Volante.	13
2.4 Soluciones Alcalinas.	15
2.4.1 Activación alcalina.	16
2.5 Aplicaciones del Hormigón Geopolimérico.	17
CAPÍTULO 3:	19
Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos.	19
3.1 Introducción.	19

3.2	Disponibilidad de aluminosilicatos en Chile.....	20
3.2.1	Cenizas volantes.	20
3.2.2	Puzolana Natural y Caolín.....	21
3.3	Procedimiento general válido para las distintas metodologías de cálculo de huella de carbono para producto.	22
3.3.1	Diagnóstico inicial y establecimiento de objetivos de cálculo.	22
3.3.2	Cálculo de Huella de Carbono de Producto (procedimiento general). ..	22
3.4	Síntesis de las principales metodológicas existentes.....	28
3.5	Cálculo de la huella de carbono.	36
3.5.1	Alcances del estudio y unidad funcional.....	36
3.5.2	Diagramas de proceso, límites del sistema y descripción de los procesos unitarios.	37
3.5.3	Composición de hormigones seleccionados para el estudio.	43
3.5.4	Dosificaciones.	43
3.5.5	Recolección de datos.	44
3.5.6	Cálculo de las emisiones de GEI.....	45
CAPÍTULO 4:		46
Presentación de resultados.		46
4.1	Cantidad de cenizas volantes en el país.	46
4.1.1	Información sobre disponibilidad de cenizas volantes en Chile.....	46
4.1.2	Estimación de las cantidades de cenizas generadas por la combustión de carbón. 48	
4.2	Cantidades de Pumicita (puzolana natural) y Caolín en el país.	52
4.3	Huella de carbono del Hormigón Geopolimérico.	53
4.3.1	Huella de Carbono de mezcla HGHD.....	54

4.3.2	Huella de Carbono de mezcla HG5.....	59
4.4	Comparación de la huella de carbono del hormigón Geopolimérico con la del hormigón en base a cemento portland elaborados en Chile.....	63
4.5	Costos preliminares de las mezclas.....	64
CAPÍTULO 5:	.....	67
Análisis y discusión de resultados.	.....	67
5.1	Fuentes de aluminosilicatos en el país.....	67
5.2	Huella de carbono del hormigón geopolimérico.....	70
5.3	Costos.....	73
CAPÍTULO 6:	.....	74
Comentarios y conclusiones.	.....	74
Bibliografía.	.....	77
ANEXOS.....	.....	84
7.1	Factores de emisión usados para la herramienta de cálculo de emisiones de CO ₂ e para hormigón geopolimérico.....	84
7.2	Gráficos de columna apilada para cada materia prima usada en la elaboración del hormigón geopolimérico.....	87
7.2.1	Columnas apiladas para las materias primas de mezcla HGHD.....	87
7.2.2	Columnas apiladas para las materias primas de mezcla HG5.....	91

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 – Clasificación de cenizas volantes, según ASTM C618.	14
Tabla 2 – Análisis y revisión de las principales metodologías para el cálculo de huella de carbono de Producto. .	29
Tabla 3 – Dosificaciones a comparar.....	44
Tabla 4 – Composición ceniza volante presente en carbón ocupado en Central Angamos.....	47
Tabla 5 – Cantidades de ceniza totales, centrales 5 región.	47
Tabla 6 – Propiedades del carbón estudiado y eficiencias consideradas.	48
Tabla 7 – Composición de las cenizas producidas producto de la combustión de carbón en el estudio entregado.	49
Tabla 8 – Cantidad de cenizas por la combustión de cada carbón.	50
Tabla 9 – Cantidad de cenizas volantes por centrales termoeléctricas.	51
Tabla 10 – Toneladas de Caolín extraído en Chile.....	52
Tabla 11 – Toneladas de Pumicita extraída en Chile.	52
Tabla 12 – Detalle de la mezcla HGHD.....	54
Tabla 13 – Combustibles y energía ocupados para la modelación.	55
Tabla 14 – Emisiones de CO _{2e} para ceniza volante, mezcla HGHD.....	55
Tabla 15 – Emisiones de CO _{2e} para grava, mezcla HGHD.	56
Tabla 16 – Emisiones de CO _{2e} para gravilla, mezcla HGHD.	56
Tabla 17 – Emisiones de CO _{2e} para Arena, mezcla HGHD.....	56
Tabla 18 – Emisiones de CO _{2e} para solución de Hidróxido de Sodio, mezcla HGHD.....	56
Tabla 19 – Emisiones de CO _{2e} para solución de Silicato de Sodio, mezcla HGHD.....	56
Tabla 20 – Emisiones de CO _{2e} para aditivo plastificante reductor de agua, mezcla HGHD.	57
Tabla 21 – Emisiones de CO _{2e} para agua extra, mezcla HGHD.....	57
Tabla 22 – Huella de carbono para mezcla HGHD.	57
Tabla 23 – Detalle mezcla HG5.	59
Tabla 24 – Emisiones CO _{2e} para ceniza volante (HG5).....	59
Tabla 25 – Emisiones de CO _{2e} para grava, mezcla HG5.....	60
Tabla 26 – Emisiones de CO _{2e} para gravilla, mezcla HG5.	60
Tabla 27 – Emisiones de CO _{2e} para arena, HG5.	60
Tabla 28 – Emisiones de CO _{2e} para solución de Hidróxido de Sodio, mezcla HG5.....	60
Tabla 29 – Emisiones de CO _{2e} para solución de Silicato de Sodio, mezcla HG5.....	60
Tabla 30 – Emisiones de CO _{2e} para agua extra, mezcla HG5.....	61
Tabla 31 – Huella de carbono para mezcla HG5.....	61
Tabla 32 – Comparación de huella de carbono.	63
Tabla 33 – Precios considerados para los insumos del hormigón.	64
Tabla 34 – Costos estimados para las distintas mezclas de hormigón.	66

<i>Tabla 35 – Composición del carbón usado en CT. Angamos y carbón Bituminoso 3 del estudio de emisiones.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 36 – Extracción de Caolín en Chile.</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 37 – Extracción de puzolana natural en Chile.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 38 – Incidencia de Procesos/Materiales con respecto a la huella de carbono de las mezclas.</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 39 – Variación porcentual de la huella de carbono respecto de los Kg de CO₂e emitidos por los hormigones convencionales en base a cemento.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 40 – Variación porcentual para costo de las mezclas respecto de los hormigones convencionales en base a cemento.</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 41 – Factores de emisión, Agua.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 42 – Factores de emisión, Hidróxido de sodio.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 43 – Factores de emisión, Silicato de sodio.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 44 – Factores de emisión, Transporte.</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 45 – Factores de emisión, Policarboxilato.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 46 – Factores de emisión, Diesel.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 47 – Factores de emisión, Gas natural (Calor).</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 48 – Factores de emisión, Electricidad.</i>	<i>86</i>

ÍNDICE DE FIGURAS.

<i>Figura 1 – Estructura básica de los geopolímeros.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2 – Disposiciones atómicas necesarias para ilustrar la geopolimerización.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3 – Proceso de Geopolimerización, paso 1.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4 – Proceso de Geopolimerización, paso 2.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5 – Proceso de Geopolimerización, paso 3.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 6 – Proceso de Geopolimerización, paso 4.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 7 – Proceso de Geopolimerización, paso 5.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 8 – Proceso de Geopolimerización, paso 6a.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 9 – Proceso de Geopolimerización, paso 6b.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 10 – Proceso de Geopolimerización, paso 7.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 11 – Límites de composición de escoria de alto horno para uso en la fabricación de cementos siderúrgicos.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 12 – Estructura zeolítica.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 13 – Diagrama general de los pasos a seguir para el cálculo de huella de carbono de producto.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 14 – Materiales/Actividades comunes a incluir dentro de los límites del ciclo de vida de un producto.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15 – Datos a considerar en las actividades de un análisis de ciclo de vida.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 16 – Ecuación cálculo de huella de carbono.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17 – Diagramas de proceso para la fabricación de soluciones alcalinas.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18 – Diagramas de proceso para la fabricación de aluminosilicatos.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 19 – Diagrama de proceso de la producción del Hormigón Geopolimérico.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 20 – Límite del sistema para la elaboración de hormigón geopolimérico.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 21 – Límite del sistema para la producción de soluciones alcalinas.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 22 – Límite del sistema para la elaboración de hormigón convencional.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 23 – Gráfico de columna apilada para 1m³ de hormigón geopolimérico, mezcla HGHD.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 24 – Gráfico de columna apilada para 1m³ de hormigón geopolimérico, mezcla HG5.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 25 – Gráfico de comparación de kg CO₂e/m³ entre los distintos tipos de Hormigón.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 26 – Gráfica de costos para las mezclas de hormigón.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 27 – Detalle kg CO₂e para ceniza volante, Mezcla HGHD.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 28 – Detalle kg CO₂e para grava, Mezcla HGHD.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 29 – Detalle kg CO₂e para gravilla, Mezcla HGHD.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 30 – Detalle kg CO₂e para arena, Mezcla HGHD.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 31 – Detalle kg CO₂e para solución de NaOH, Mezcla HGHD.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 32 – Detalle kg CO₂e para solución de silicato de sodio, Mezcla HGHD.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 33 – Detalle kg CO₂e para plastificante, Mezcla HGHD.....</i>	<i>90</i>

<i>Figura 34 – Detalle kg CO₂e para agua extra, Mezcla HGHD.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 35 – Detalle kg CO₂e para ceniza volante, Mezcla HG5.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 36 – Detalle kg CO₂e para grava, Mezcla HG5.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 37 – Detalle kg CO₂e para gravilla, Mezcla HG5.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 38 – Detalle kg CO₂e para arena, Mezcla HG5.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 39 – Detalle kg CO₂e para solución de hidróxido de sodio, Mezcla HG5.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 40 – Detalle kg CO₂e para solución de silicato de sodio, Mezcla HG5.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 41 – Detalle kg CO₂e para agua extra, Mezcla HG5.....</i>	<i>94</i>

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN.

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.

El Hormigón es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, alcanzando niveles de consumo de 1 m^3 por persona al año [1]. El hormigón tiene como materia prima básica al cemento portland, material que se obtiene por la pulverización del Clinker portland con la adición de una o más formas de yeso (sulfato de calcio), y que a lo largo de su ciclo de vida incorporan un alto nivel de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), medida universal utilizada para indicar el potencial de calentamiento global asociado a los gases de efecto invernadero. La producción mundial de cemento Portland contribuye al menos al 5 - 7% de las emisiones antropogénicas globales de CO_2e [2,3]. La razón de la alta contribución de CO_2e , se debe a la calcinación de la piedra caliza en el horno rotatorio donde se fabrica el Clinker y el alto consumo energético durante la fabricación del cemento, incluidos los combustibles y energía eléctrica ocupadas para el proceso térmico a más de 1400°C [1]. Se han propuesto alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sustituyendo parte del Clinker de cemento Portland por adiciones cementicias suplementarias que se incorporan en el proceso de molienda para la obtención de cementos mezclados. Los más comunes incluyen las cenizas volantes, un residuo fino que se obtiene de las emisiones liberadas por las centrales generadoras termoeléctricas que queman carbón, y la escoria granulada de alto horno, conglomerante cementicio, subproducto de desecho de la fabricación del hierro. Por otra parte, se ha desarrollado un nuevo material cementicio alternativo denominado "Geopolímero", el cual está siendo considerado como un sustituto válido para el cemento, para la obtención de Hormigón Geopolimérico. El termino, Geopolímero, fue

acuñado por Joseph Davidovits [4] en la década de los años 1980 para designar a polímeros sintéticos inorgánicos obtenidos a partir de aluminosilicatos activados mediante una solución alcalina que da origen a la reacción química conocida como geopolimerización. Si bien, en Chile se ha estudiado la posibilidad de obtener Hormigones Geopoliméricos [5,6], estos estudios han abocado especialmente a los aspectos técnicos, y no se han abordado aún estudios que evalúan el beneficio medio ambiental efectivo asociado a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero por el uso de aglomerantes alternativos geopoliméricos en la fabricación del hormigón. En la comparación entre hormigón convencional y hormigón geopolimérico, los rangos de valores de CO₂e estimados a nivel internacional varían considerablemente a favor del hormigón geopolimérico. La mayoría de las estimaciones indica que el hormigón geopolimérico presenta valores de CO₂e entre 26 - 45% más bajos que los presentados por el hormigón en base a cemento portland [7,8,9,10,11], inclusive existen estudios en donde la variación es cercana al 80% a favor del hormigón geopolimérico [12,13]. Estas variaciones son atribuibles a diferencias metodológicas en cuanto a la consideración de los procesos de extracción, procesamiento, y el transporte de materias primas, y/o a la consideración del gasto significativo de energía para la fabricación de los activadores alcalinos. Por otra parte, un requisito necesario para el desarrollo de la resistencia del geopolímero, es el curado a temperaturas del orden de 60 °C por 6 h [14,15,16], factor que en muchos casos no ha sido considerado.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivo General.

- Analizar la potencial reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), al usar hormigón geopolimérico como alternativa al hormigón convencional, en base a cementos hidráulicos portland o portland con adiciones en Chile.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Recopilar antecedentes sobre fuentes de aluminosilicatos y disponibilidad de las mismas en el país, seleccionando las fuentes con mayor potencial de utilización para servir como materia prima para la fabricación de geopolímeros en Chile.
- Elaborar una metodología de cálculo de huella de carbono, para cuantificar y comparar la Huella de Carbono entre hormigón geopolimérico y hormigón en base a cementos hidráulicos en el país.
- Realizar una estimación del costo total de las mezclas de hormigón consideradas en el presente estudio, tomando en cuenta los precios de mercado de los insumos necesarios para la elaboración de cada una de las mezclas, y a partir de esto, evaluar la factibilidad económica de esta nueva tecnología.

CAPÍTULO 2:

ANTECEDENTES SOBRE HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO.

2.1 INTRODUCCIÓN.

Actualmente, la búsqueda de materiales sustentables en consonancia con un mayor cuidado del medio ambiente, se han vuelto temas cada vez más relevantes. Además, la fabricación de cemento portland en países industrializados y en desarrollo se ha incrementado en forma exponencial [17], volviéndolo uno de los productos más usados en la industria de la construcción [18], con el mayor aporte en materia de emisiones de CO₂e a lo largo de su ciclo de vida. Por lo anterior, el estudio de hormigones geopoliméricos ha pasado a ser un tema de gran importancia por tratarse de una alternativa real al hormigón en base a cemento usado típicamente en la industria de la construcción.

Desde un punto de vista general, en este capítulo se presenta la información básica sobre el hormigón geopolimérico conforme el objetivo y alcance del presente estudio.

2.2 GEOPOLÍMEROS.

Los geopolímeros corresponden a una clase de polímeros inorgánicos formados por reacciones químicas entre una fuente de aluminosilicatos y una solución alcalina. Estos materiales, tienen características que en muchos aspectos son superiores a las del hormigón convencional de cemento, no obstante, predomina su uso como sustituto del cemento. Existe un amplio conocimiento sobre las propiedades de estos materiales en relación a su composición y procedimientos de fabricación y curado. En general, se

acepta como características relevantes que los geopolímeros presentan una gran resistencia química y térmica, buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas, además, se destacan por presentar la ventaja de los bajos niveles de emisiones de CO₂e en su producción [19].

La reacción química que produce un Geopolímero se denomina “Geopolimerización”. Esta reacción es llevada a cabo al poner material puzolánico en contacto con una solución alcalina, lo cual tras reorientarse los iones en solución da como resultado la formación de cadenas poliméricas. A través del curado, en horno o a temperatura ambiente, los materiales resultantes de estas reacciones presentan una estructura amorfa tridimensional. El detalle de esta reacción química se expone más adelante.

Los geopolímeros basados en aluminosilicatos son llamados Polisialatos, los cuales consisten en tetraedros de SiO₄ y AlO₄ unidos por átomos compartidos de oxígeno. Dentro de esta estructura tridimensional se introducen iones positivos (Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺⁺, Ba⁺⁺, NH₄⁺, H₃O⁺) para preservar la neutralidad eléctrica global del geopolímero.

La estructura básica de los polysialatos, se presenta en la Figura 1.

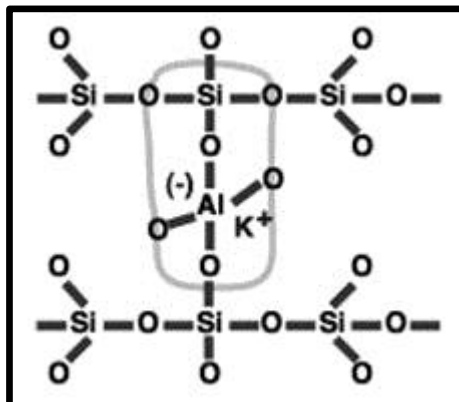


Figura 1 – Estructura básica de los geopolímeros.

2.2.1 Geopolimerización.

La geopolimerización es la reacción química que da origen a los geopolímeros. El modelo más aceptado para describir la naturaleza de estas reacciones químicas fue propuesto por J. Davidovits el año 2011 [20]. La reacción se genera a partir de una fuente de aluminosilicatos activada mediante una solución alcalina. Los monómeros inorgánicos en solución dan origen a estructuras simples llamadas polisialatos, las cuales al reorganizarse forman cadenas con la misma estructura como elemento repetitivo (polímero).

Las disposiciones atómicas necesarias para poder ilustrar el proceso de geopolimerización, presentadas por J. Davidovits el año 2011 en su libro Geopolymer Chemistry and Applications [20], se detallan en la Figura 2.

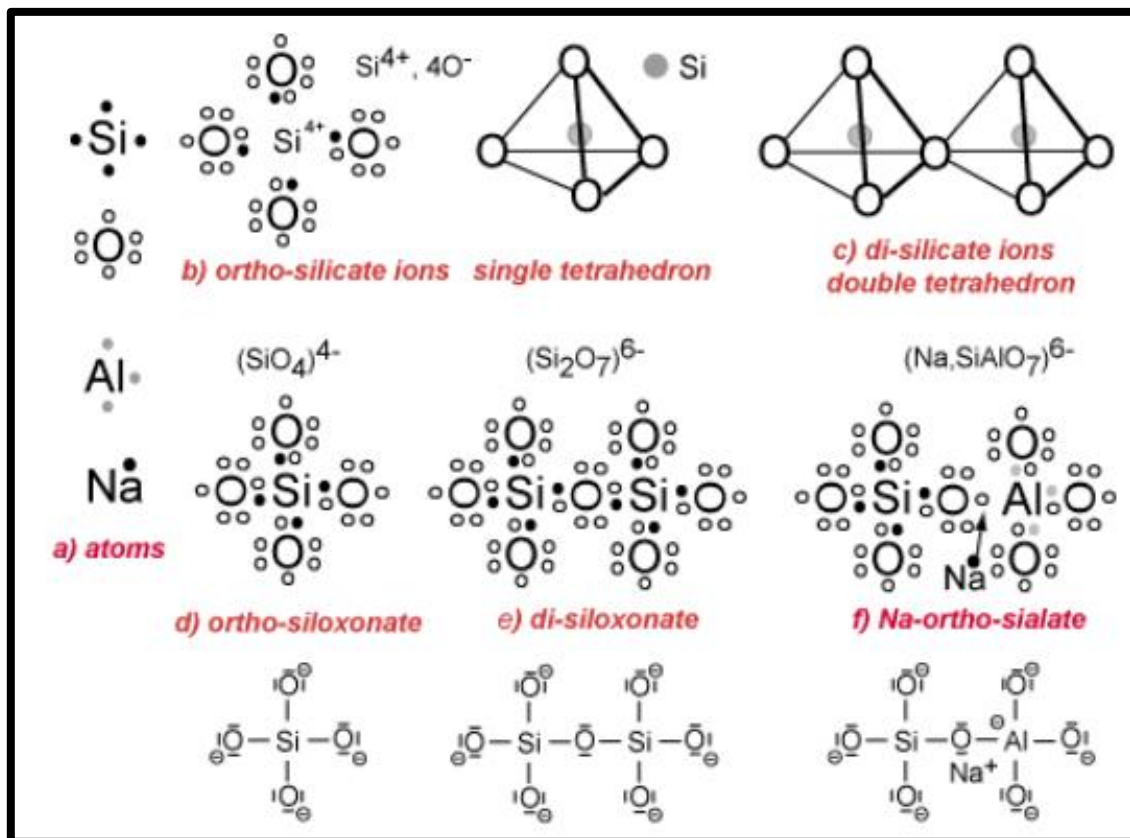


Figura 2 – Disposiciones atómicas necesarias para ilustrar la geopolimerización.

El proceso de geopolimerización consta de etapas que se encuentran relacionadas entre sí, por ejemplo el mecanismo de geopolimerización con un aluminosilicato particular, Metacaolín MK-750, se puede describir en los siguientes 7 pasos [20]:

Paso 1: Alcalinización y formación de Aluminio tetravalente en el grupo lateral silato-Si-O-Al-(OH)₃-Na.

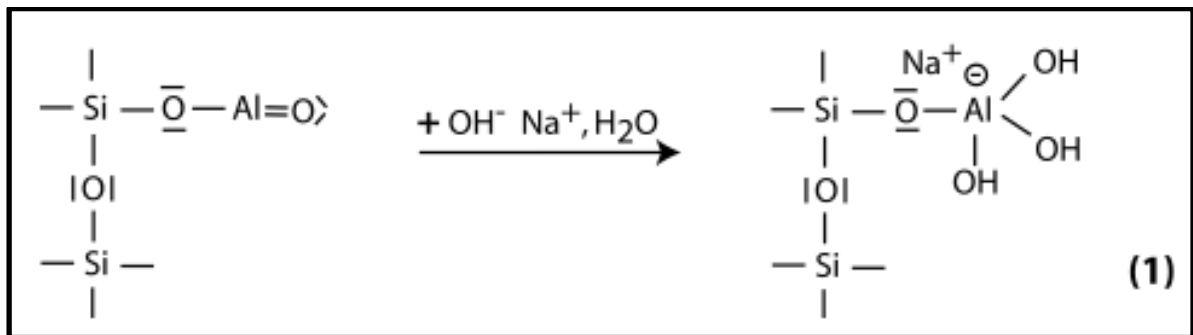


Figura 3 – Proceso de Geopolimerización, paso 1.

Paso 2: Con la unión del ión hidroxilo OH⁻ al átomo de silicio, se inicia disolución alcalina y se extiende la esfera de valencia al estado - pentavalente.

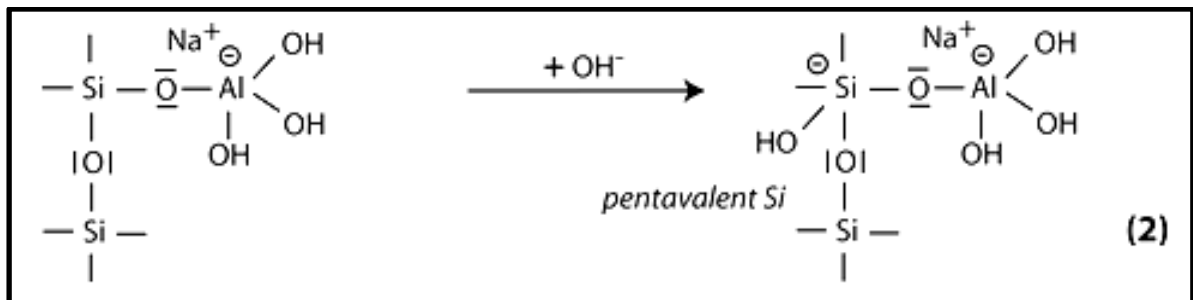


Figura 4 – Proceso de Geopolimerización, paso 2.

Paso 3: La evolución posterior de la reacción, puede ser explicada por la escisión del oxígeno en el grupo siloxano Si-O-Si a través de la transferencia del electrón de Si a O, la formación de silanol Si-OH intermedio, por una parte, y siloxo básica Si-O en el otro lado.

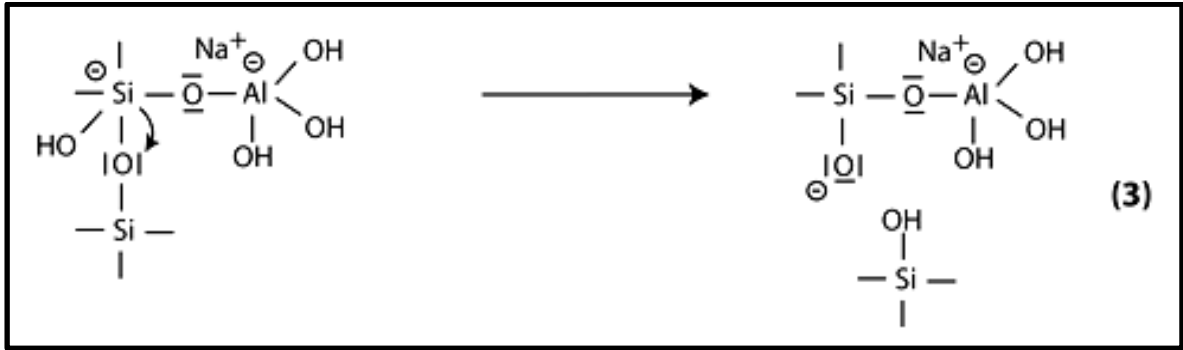


Figura 5 – Proceso de Geopolimerización, paso 3.

Paso 4: Formación de más grupos silanol Si-OH y el aislamiento de la molécula orto sialato, la unidad primaria en la geopolimerización.

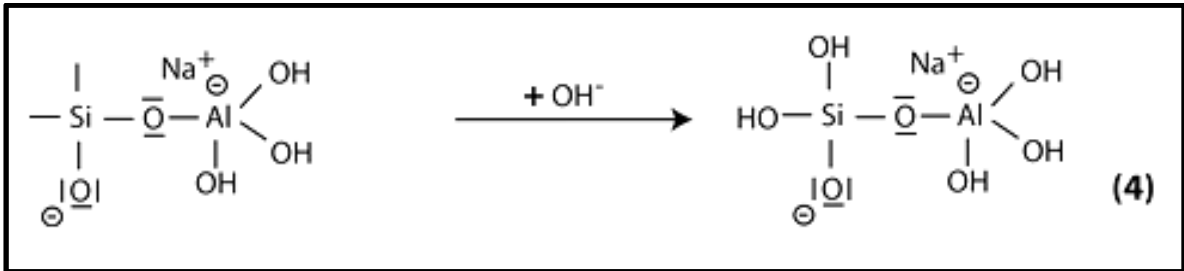


Figura 6 – Proceso de Geopolimerización, paso 4.

Paso 5: Reacción de la siloxo básica Si-O con el catión de sodio Na⁺ y la formación de enlace terminal Si-O-Na.

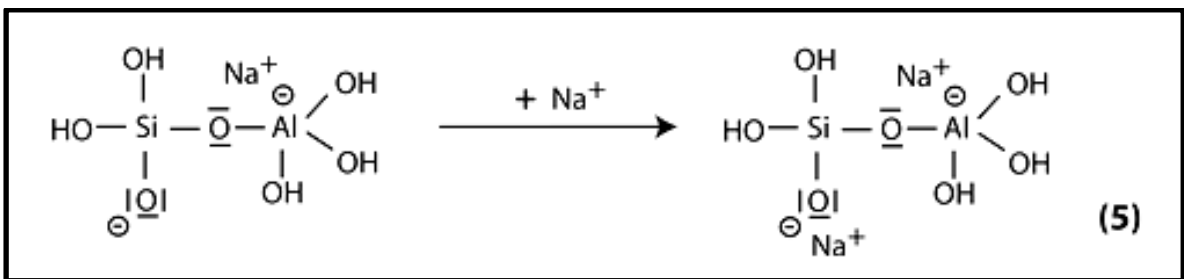


Figura 7 – Proceso de Geopolimerización, paso 5.

Paso 6a: Condensación entre moléculas orto sialato, grupos reactivos Si-O-Na y aluminio hidroxilo OH-Al, con producción de NaOH. Formando finalmente, una red de Na-poli(sialato), Nefelina.

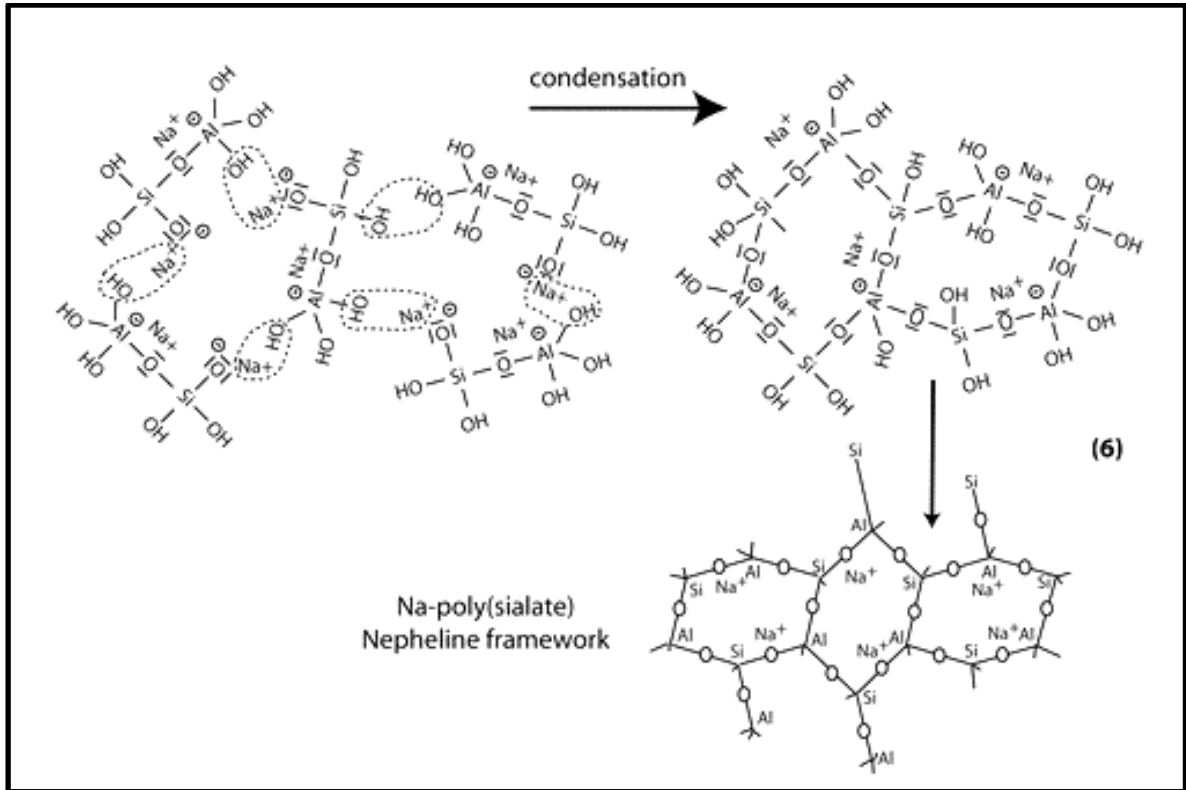


Figura 8 – Proceso de Geopolimerización, paso 6a.

Paso 6b: En presencia de vidrio soluble (Na-polisiloxonato) se produce una condensación entre di-siloxonato Q₁ y las moléculas orto sialato, grupos reactivos Si-O-Na, Si-OH e hidroxilo de aluminio OH-Al-, creación de estructura cíclica orto-sialato-disiloxo, mediante el cual el NaOH alcalino es liberado y vuelve a reaccionar.

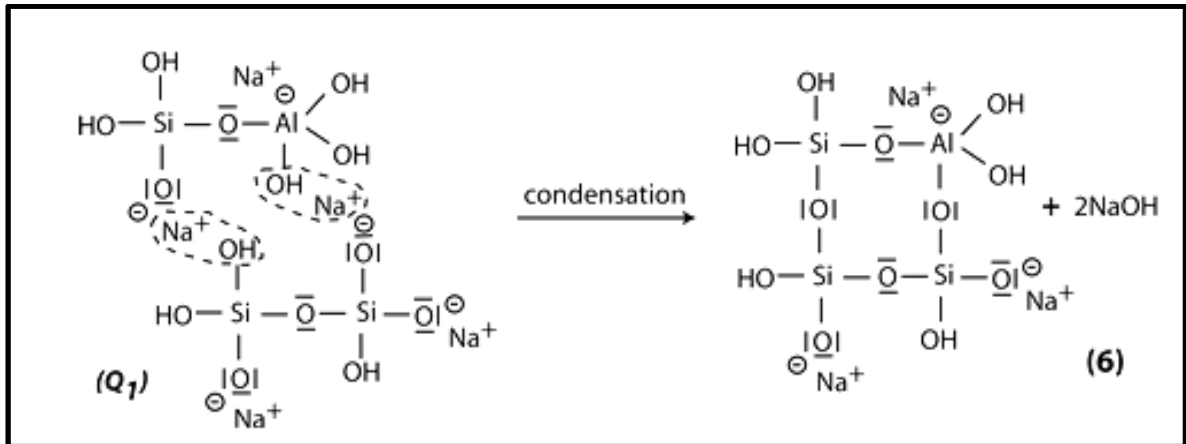


Figura 9 – Proceso de Geopolimerización, paso 6b.

Paso 7: Más policondensación en estructura albita Na-poli(sialato-disiloxo) con su típica estructura de cadena de feldespato.

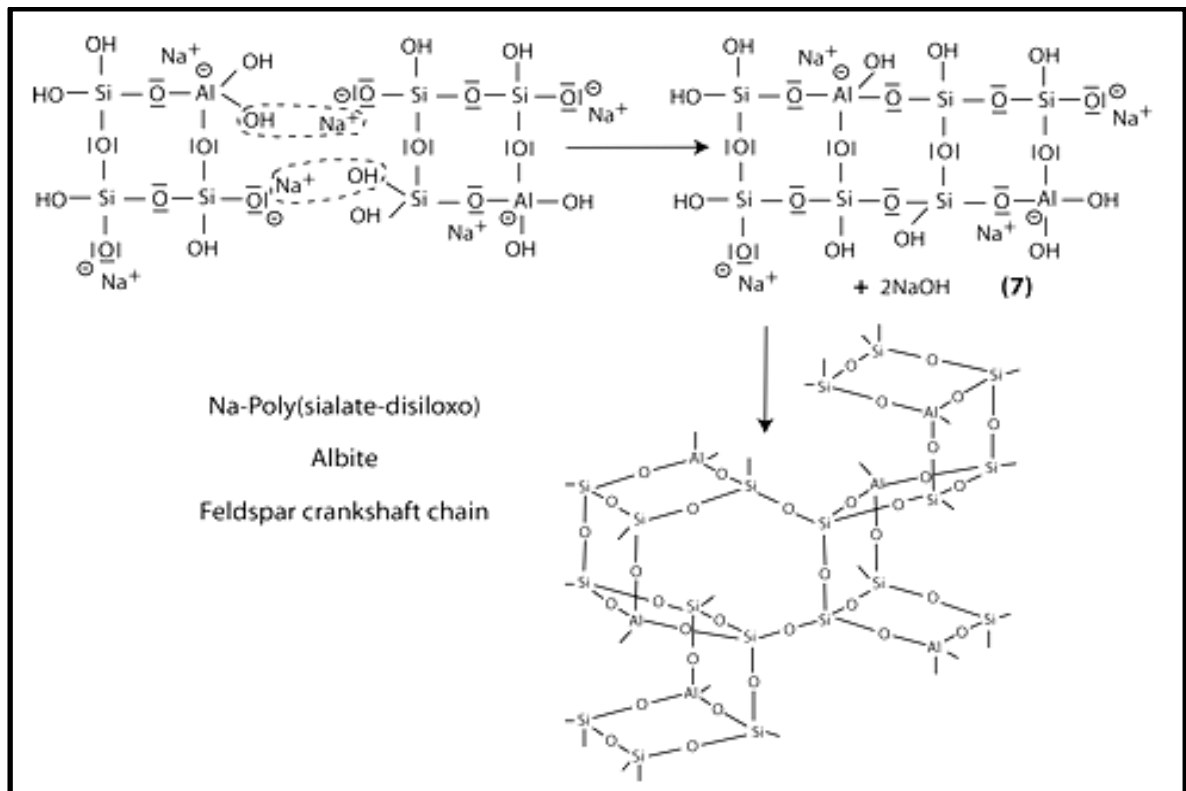


Figura 10 – Proceso de Geopolimerización, paso 7.

2.3 ALUMINOSILICATOS.

Las fuentes de aluminosilicato contienen Óxidos de aluminio (Al_2O_3) y de Sílice (SiO_2), suelen considerarse como derivados de los silicatos debido al remplazo de los iones Si^{4+} por los Al^{3-} , los cuales requieren cationes adicionales con la finalidad de poder neutralizar la carga eléctrica. Algunos aluminosilicatos, como por ejemplo, los feldespatos, se encuentran dentro de los minerales más abundantes de la corteza terrestre. Fuentes abundantes de este mineral en el país son la puzolana natural, escoria de alto horno y la ceniza volante.

En el escenario mundial, Europa Occidental destaca como el líder mundial en el uso de mezclas de cenizas y escorias residuales en hormigones a base de Cemento Portland Ordinario (OPC) y otras áreas, e incluso por más de una década, varios países del continente Europeo han reportado la utilización del 100% de las cenizas volantes, cenizas de fondo y escorias de alto horno [21,22].

2.3.1 Escoria de alto horno.

Las escorias de alto horno, son el resultado de la combinación de las gangas del mineral de hierro y las de cenizas de azufre del coque (ambas de carácter ácido), con la cal y la magnesita de las cenizas más o menos dolomíticas usadas como fundentes, las cuales presentan carácter básico. Estos subproductos industriales están constituidos tanto por fases vítreas como cristalinas, y al tratarse de un desecho industrial, este material debe ser manejado de forma adecuada para no contaminar el ambiente.

La composición química de las escorias depende del proceso siderúrgico aplicado y del tipo de acero refundido. En 1986 en el VIII Congreso Internacional de la Química del Cemento, Río de Janeiro [23], se establecieron los límites de la composición de la escoria de alto horno para uso como adición al cemento. Los límites se detallan en la Figura 11.

SiO ₂	= 27-40 %.
Al ₂ O ₃	= 5-33 %.
CaO	= 30-50 %.
MgO	= 1-21 %.
Fe ₂ O ₃	= < 1 %.
S	= < 3 %.
Cr ₂ O ₃	= 0,003-0,007 %.
Cl	= 0,19-0,26 %.
TiO ₂	= < 3 %.
F	= 0,09-0,23 %.
MnO ₂	= < 2 %.
P ₂ O ₅	= 0,02-0,09 %.
Na ₂ O + K ₂ O	= 1-3 %.

Figura 11 – Límites de composición de escoria de alto horno para uso en la fabricación de cementos siderúrgicos.

2.3.2 Puzolana natural.

La norma ASTM C618 [24], define: *"Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes"*.

Históricamente el cemento se producía a partir de las puzolanas, desde la antigüedad Romana hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX [25].

Las puzolanas naturales, principalmente hacen referencia a:

- Depósitos de residuos, en las que el constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de los productos de erupciones volcánicas, como lo son las cenizas volcánicas, las tobas, la escoria y obsidiana.
- Rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo (sílice amorfa), ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos. Por ejemplo, las tierras de diatomeas y arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

Particularmente, en la región metropolitana, lo que es actualmente las comunas de Lampa y Pudahuel, están situadas sobre un gran manto puzolánico que se extiende hasta la costa, salvo interrupciones breves. El origen de este material en un comienzo se atribuyó a la presencia de los volcanes Tupungato y San José, pero dada la extensión y distribución del material se ha atribuido actualmente al extinto volcán Diamante ubicado en la frontera con Argentina a la misma latitud que Santiago [6].

Las propiedades de las puzolanas dependen de la composición química y la estructura interna. Se prefiere puzolanas con composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) sea mayor al 70%, y que tengan una estructura amorfa.

2.3.3 Ceniza Volante.

Las cenizas volantes son residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de las partículas residuales que acompañan a los gases de combustión, provenientes de los quemadores en las centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados. En general su composición está formada por óxidos de silicio, aluminio, calcio y hierro, y poseen un tamaño de partícula que va desde los 10 a los 100 micrones [26].

La ceniza volante es una potencial fuente de aluminosilicatos para la formación de geopolímeros, ya que presenta fases de silíceo y alúmina en elevada cantidad. Su uso en el cemento portland no se limita a sus características puzolánicas y propiedades reológicas, sino que también, reduce la reacción álcali-agregado (fenómeno químico, que se produce en el interior del hormigón entre determinados minerales reactivos provenientes del agregado y los álcalis disueltos en la pasta de cemento hidratada en forma de hidróxidos), debido a su rápida reacción con los álcalis presentes en el cemento.

Existen dos grupos de ceniza volante, unas presentan un contenido de óxido de calcio (CaO) menor al 10%, denominadas Clase F, producidas principalmente por la combustión de antracita y carbones bituminosos (carbones de alto poder calorífico). Mientras que las cenizas volantes con un porcentaje de óxido de calcio mayor al 10% son denominadas Clase C, producidas a partir de la combustión de carbón sub-bituminosos y lignito (carbones de baja calidad). Por tanto, las cenizas Clase C al presentar mayores concentraciones de CaO son de carácter cementicio, mientras que las Clase F son de naturaleza puzolánica [27].

La clasificación según la norma ASTM C618 [24] se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 – Clasificación de cenizas volantes, según ASTM C618.

		Clase F	Clase C
SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃	mín%	70	50
SO₃	máx%	5	5
Humedad	máx%	3	3
Perdidas en la incineración (LOI)	máx%	6	6

Las cenizas volantes bajas en calcio junto con las arcillas calcinadas son los precursores más frecuentes utilizados en la síntesis de geopolímeros [14]. Además, son las consideradas en este estudio para el cálculo de emisiones de CO₂e.

2.4 SOLUCIONES ALCALINAS.

Para poder formar una estructura tetraédrica con grandes cavidades altamente cristalinas, permitiendo la hidratación con el paso del agua, es decir, una estructura zeolítica, como la presentada en la Figura 12, el contenido de calcio disponible de los aluminosilicatos normalmente utilizados debe ser bajo [28], por tanto, las soluciones compatibles son las caracterizadas como activadores alcalinos de bajo calcio, donde los más utilizados son los hidróxidos y silicatos alcalinos [29]. Una revisión de la química de sistemas geopoliméricos en base a la activación de soluciones de bajo calcio publicado el 2007 [14], al 2014 ya había recibido más de 200 citas en la literatura científica, lo que indica el alto nivel de interés existente en cuanto al diseño y utilización de este tipo materiales [25].

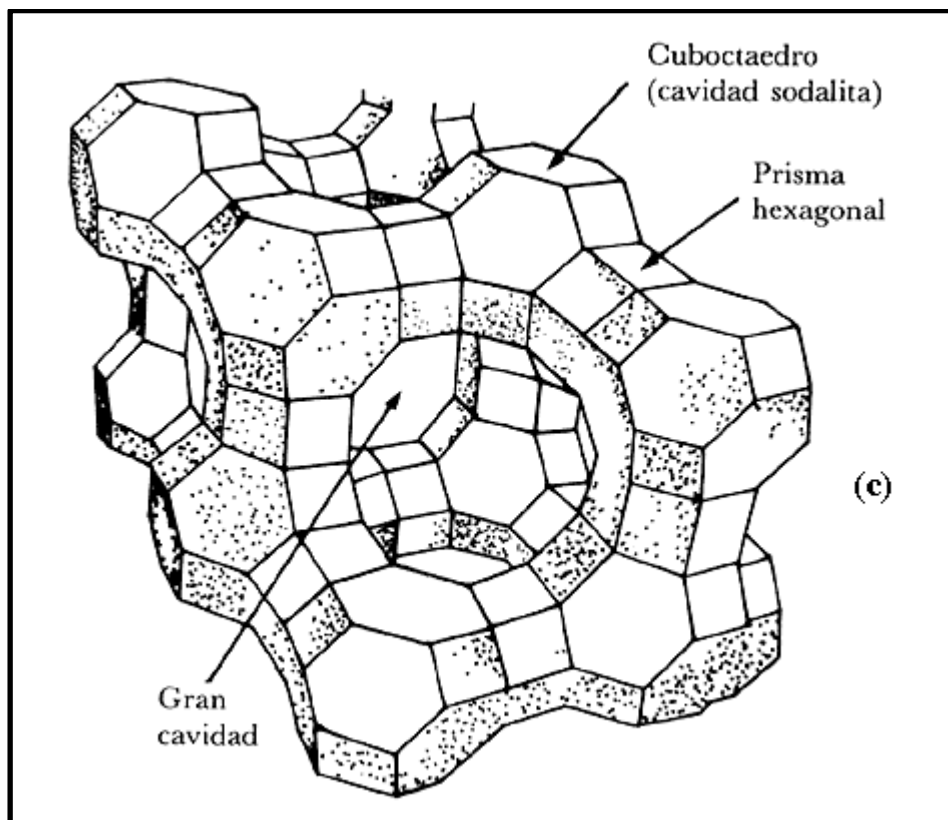


Figura 12 – Estructura zeolítica.

2.4.1 Activación alcalina.

Los activadores alcalinos cumplen la función de acelerar la solubilidad de la fuente de aluminosilicato, promover la formación de una estructura compacta con estos monómeros inorgánicos en solución y favorecer la formación de compuestos poliméricos estables, de baja solubilidad. Estos activadores pueden ser alcalinos o alcalinotérreos, tales como hidróxidos (ROH , R(OH)_2), sales de ácido débil (R_2CO_3 , R_2S , RF), sales de ácido fuerte ($(\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{CaSO}_4) + 2\text{H}_2\text{O}$) y sales silícicas del tipo $\text{R}_2\text{O}(n)\text{SiO}_2$ donde R es un ión alcalino del tipo Na, K o Li. Al respecto, los activadores comúnmente usados son el hidróxido de sodio o potasio, silicatos y carbonatos de sodio o potasio.

Los hidróxidos alcalinos generalmente se combinan con una fuente de aluminosilicato en forma de solución acuosa, ya que el calor liberado por la disolución de hidróxidos alcalinos sólidos en agua, es alto, y genera tensiones térmicas del gel en evolución [29]. Otra forma es calcinando los aluminosilicatos junto con los hidróxidos alcalinos, formando un producto que solo necesita del agua para formar un aglutinante, pero este proceso aún no se ha desarrollado a gran escala [30,31]. En particular, el hidróxido de sodio (NaOH) en comparación con el hidróxido de potasio (KOH), favorece una mayor extensión de la reacción de un precursor de cenizas volantes [25].

En cuanto al catión alcalino, juega un rol importante en la primera etapa de la geopolimerización, ordenando las moléculas de agua. Más tarde las moléculas de silicato solubles inician el proceso que permite la formación de la estructura geopolimérica y el catión determina la estructura final, sirviendo como guía o modelo para direccionar y controlar la velocidad, tan rápido como sea posible, de la policondensación y crecimiento estructural. Por otro lado, el catión K^+ parece ser el responsable de un mayor grado de condensación y resistencia mecánica del producto final en comparación al Na^+ , cuando son incorporados bajo las mismas condiciones [32]. No obstante, se ha encontrado cierta controversia al respecto, ya que algunos

investigadores [33] aseguran que el NaOH permite obtener un mayor grado de disolución de minerales naturales, comparado con la utilización de KOH, como agente activador.

En cuanto a la utilización de soluciones alcalinas con silicatos solubles de sodio o potasio, se sabe que estos generan velocidades de reacción más altas que las producidas por hidróxidos, así como producir una estructura más compacta y de mayor estabilidad [34]. Además, favorece la obtención de estructuras zeolíticas con mayor grado de cristalinidad. De esta manera, las propiedades y características microestructurales de sistemas geopoliméricos dependen tanto de la concentración de los silicatos solubles incorporados, así como de la alcalinidad de la solución, la cual determina el grado de polimerización que se obtiene [35].

2.5 APLICACIONES DEL HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO.

El hormigón geopolimérico ha sido introducido satisfactoriamente en la industria de la construcción para casos y/o aplicaciones específicas, ya que presenta buenas propiedades, como son una elevada resistencia mecánica, dureza superficial, estabilidad térmica y alta moldeabilidad. Aglutinantes geopoliméricos basados en escorias siderúrgicas, endurecen rápidamente a temperatura ambiente, después de solo 4 horas a 20 °C, presentando resistencias a la compresión cercanas a los 20MPa. Además, como nuevo material cementante muestra propiedades únicas, tales como, altas resistencias a edades tempranas, baja contracción, resistencias al hielo-deshielo, los sulfatos y a la corrosión [36].

Los geopolímeros han sido conocidos desde finales de los años 60 [37], sin embargo, aún no han sido producidos en grandes cantidades o en aplicaciones industriales de larga duración. Una aplicación industrial de este producto, son los durmientes de una línea férrea en el Este de Europa y Rusia. Recientemente, en España se ha utilizado el hormigón geopolimérico con el mismo propósito [38]. Desde

1983, Estados Unidos, se ha involucrado en el desarrollo del concepto de nuevos materiales cementicios, teniendo en consideración la química de la geopolimerización. En los años 90, con la expectativa original de aprovechar la ventaja de costos menores de manufactura frente a los respectivos de la producción de cemento [36], la cementera Lone Star Industries desarrolló geopolímeros con el nombre comercial de Pyrament, para uso en estructuras de Ingeniería Civil, construcción de carreteras, específicamente en la producción de pavimentos de rápida puesta en servicio, como es el caso de las pistas de aterrizaje de aeronaves para fines militares, y en la ingeniería hidráulica [39]. Sin embargo, estas aplicaciones cesaron en el año 1996. En el mercado actual, EE.UU. utiliza hormigón geopolimérico en la reparación de tuberías de aguas residuales [40].

En Europa, la empresa Slagstar® ha desarrollado hormigones basados en la activación alcalina de escorias siderúrgicas para la producción de algunos elementos prefabricados (pavimentos, ladrillos, tuberías, vigas), tanques bajo tierra, tanques de aguas residuales, pisos industriales, cimentaciones y encapsulamiento de residuos tóxicos.

En España, el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja es el líder y pionero en el desarrollo e investigación de sistemas de activación alcalina. Al respecto, se ha publicado una patente relacionada con el procedimiento de obtención de un conglomerante hidráulico basado en la activación alcalina de cenizas volantes [41].

Finalmente, en Australia, la empresa Zeobond E-CRETE produce elementos prefabricados no estructurales para diferentes aplicaciones en la industria de la construcción a partir del aprovechamiento de cenizas volantes y escorias siderúrgicas [42].

CAPÍTULO 3:

CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO ASOCIADA A LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES GEOPOLIMÉRICOS.

3.1 INTRODUCCIÓN.

En 1997, desde la firma del Tratado de Kyoto, las consecuencias del cambio climático pasan a ocupar un rol relevante a nivel internacional, promoviendo la adopción de medidas que buscan revertir o mitigar a mediano plazo el deterioro medioambiental asociado. Dado lo anterior, los países incrementan sus esfuerzos en controlar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). [43]. Bajo esta realidad nace la Huella de Carbono (HC), que se define por *“La totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto”*, según Carbón Trust, 2008 [44].

Tal impacto ambiental es medido llevando a cabo un inventario de las emisiones de GEI según la tipología de la huella, siguiendo normativas internacionales reconocidas. La HC se mide en masa (Kg) de CO₂e. Una vez conocido el tamaño de la huella, a través de diferentes programas, públicos o privados, es posible implementar una estrategia de reducción y/o compensación de estas emisiones.

Dada la creciente preocupación de los gobiernos, ciudadanía y entidades privadas frente al cambio climático, se ha promovido el desarrollo de metodologías y/o herramientas de cálculo para la estimación de la HC. Según el informe de la Comisión Europea *“Product Carbon Footprint – a study on methodologies and initiatives”* realizado por Ernst & Young [45], el año 2010 se detectan 44 metodologías y 18 iniciativas para el cálculo de la huella de carbono de producto, disponibles a nivel mundial.

En el presente capítulo, en primer lugar se detallan las fuentes a partir de las que se obtiene información sobre la disponibilidad de aluminosilicatos en el país y la cuantificación de los volúmenes correspondientes a los distintos recursos. En particular, el estudio se centra en la cuantificación de cenizas volantes, caolín y puzolana natural que estarían disponibles para la producción industrial de geopolímeros en el país. Luego, se presenta el procedimiento general que se usa en el cálculo de la huella de carbono de producto, realizando además, una síntesis de las principales metodologías existentes para la medición de las emisiones de gases de efecto invernadero. Finalmente, una vez escogida la metodología a seguir en el presente estudio, se presenta el detalle del procedimiento usado para cumplir con los objetivos.

3.2 DISPONIBILIDAD DE ALUMINOSILICATOS EN CHILE.

3.2.1 Cenizas volantes.

Las cenizas volantes, producto residual generado por la combustión de carbón en las centrales termoeléctricas, son consideradas como uno de los materiales idóneos a ser utilizados como fuente de aluminosilicato para la producción del hormigón geopolimérico. Por tanto, es de gran relevancia cuantificar las cantidades disponibles en este material en el país.

Para cuantificar las cenizas volantes, se contacta a las empresas generadoras de electricidad a través de una encuesta que consulta sobre las cantidades y características de la ceniza volante producida en cada una de ellas. En los casos en que no se obtiene información por parte de las empresas termoeléctricas, se realiza una estimación en base al carbón consumido por las distintas plantas, dato extraído desde la página web de la Comisión Nacional de Energía (CNE) [46], teniendo como referencia un estudio de ingeniería, donde se cuantifican las emisiones producidas por la combustión de varios tipos de carbón, 6 carbones de tipo bituminosos y 6 sub-bituminosos, los cuales, por lo demás presentan distintas procedencias.

También se constató que existen plantas generadoras cuyas cenizas volantes no estarían disponibles para la producción de geopolímeros, como es el caso de las Centrales Termoeléctricas Andina (CTA) y Hornitos (CTH), donde las cenizas volantes son utilizadas por Cementos Bio Bio para la fabricación de sus cementos [47].

3.2.2 Puzolana Natural y Caolín.

En el escenario productivo de geopolímeros a nivel mundial se tiene que materiales como la puzolana natural y el caolín sirven al mismo propósito que la ceniza volante, siendo fuentes de aluminosilicatos con uso potencial en la elaboración de hormigón geopolimérico.

El Caolín es un producto que se obtiene a partir del mineral Caolinita (en algunos casos a partir de Haloisita), arcillas presentes de forma natural. Se podría decir que el caolín abarca a las rocas que poseen porcentajes variables de minerales de arcilla de composición igual, o próxima, a la del mineral caolinita. Este material es usado principalmente en las industrias del papel, cerámica, plástico, caucho, química y cemento. El caolín al ser procesado térmicamente se transforma en Metacaolín, el cual, es un producto de excelentes cualidades para ser usado como fuente de aluminosilicato en la fabricación del hormigón geopolimérico. Por otro lado, la puzolana natural obtenida de depósitos de cenizas volcánicas, como se mencionó en la sección 2.3.2, es un material formado por aluminosilicatos de estructura amorfa que también es utilizada como materia prima para la elaboración de hormigón geopolimérico.

Con el fin de ampliar el espectro de las fuentes de aluminosilicatos en Chile, en este estudio se presenta más adelante, en Tabla 10 y Tabla 11, las cantidades de caolín y puzolana natural extraídas y procesadas en el país, información que se obtiene de la base de datos del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) [48].

3.3 PROCEDIMIENTO GENERAL VÁLIDO PARA LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO PARA PRODUCTO.

En un estudio de HC, se debe realizar un diagnóstico inicial, tener claro los objetivos de cálculo y finalmente realizar la cuantificación de la huella de carbono. Cabe mencionar que existen dos tipos de metodologías, las enfocadas al cálculo de huella de carbono de una organización y las orientadas a un producto en específico. El caso estudiado corresponde a un producto, por lo cual, se revisa el procedimiento general para el cálculo de la huella de carbono para producto.

3.3.1 Diagnóstico inicial y establecimiento de objetivos de cálculo.

En primera instancia, para una correcta implementación de la metodología del cálculo de la huella de carbono, es preciso definir los objetivos que explican la necesidad de llevar a cabo este cálculo. La definición clara de estos objetivos permite una mejor selección de las unidades funcionales a analizar, así como la definición de las bases que permitan establecer los alcances, límites y las fuentes de información para el desarrollo del proceso.

3.3.2 Cálculo de Huella de Carbono de Producto (procedimiento general).

A lo largo de la presente sección, se utiliza como base la guía: “*Enfoques Metodológicos para el cálculo de la Huella de carbono*”, desarrollada por el Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE) [49].

Las metodologías más utilizadas para el cálculo de la HC para productos están basadas en los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) correspondientes. La metodología consiste básicamente en recopilar toda la información sobre los consumos de materiales y energía en cada una de las etapas por las que atraviesa una determinada mercancía o producto (extracción, fabricación, transformación, transporte, almacenamiento, uso, etc.) y computar las emisiones de CO₂e asociadas.

Un diagrama general de los pasos a seguir en las distintas metodologías usadas para la determinación de huella de carbono se presenta en la Figura 13.

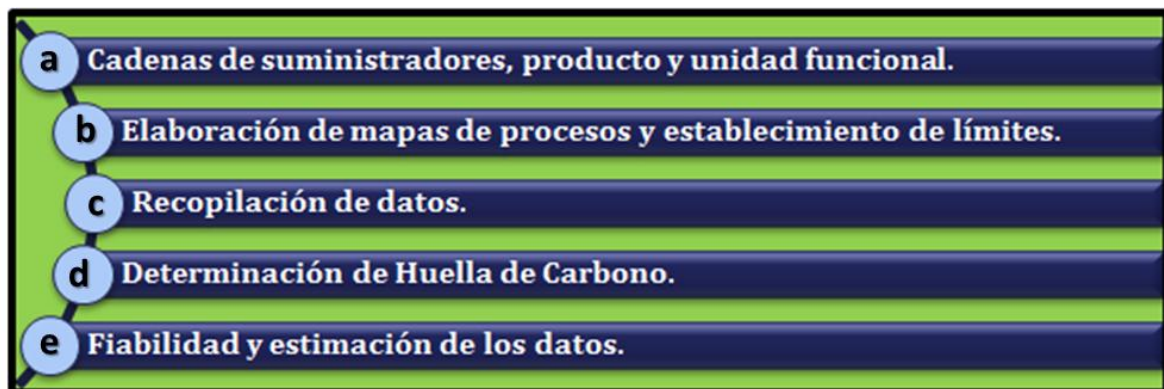


Figura 13 – Diagrama general de los pasos a seguir para el cálculo de huella de carbono de producto.

Los pasos mencionados se especifican a continuación:

a) *Identificación de la cadena de suministradores, producto y unidad funcional.*

El ciclo de vida incluye las emisiones derivadas de la obtención, transformación y distribución de las materias primas, además, las actividades necesarias para convertir las materias primas en el producto terminado, el reciclaje o eliminación del producto al término de su vida útil; el almacenaje y transporte entre cada fase del proceso; la distribución del producto; el uso que el consumidor final haga del producto, etcétera. Por tanto, es necesario identificar todas las empresas que conforman la cadena de suministradores vinculada al ciclo de vida escogido y determinar la unidad funcional del producto. *“Si, por ejemplo, el producto elegido es una marca de leche y el consumo habitual de leche se realiza en envases de 1,5 litros, esa sería la unidad funcional a la que se refiere la HC (por ejemplo, 10 tCO₂e por 1,5 litros de leche). Si las conservas de mejillón se consumen habitualmente comprando 3 latas de 125 gr, esa sería la unidad funcional a la que se referiría su huella. Puede resultar útil emplear una unidad común para varios productos, por ejemplo, la tonelada de producto”.* [49]

Si bien la cadena de suministradores que participa en la elaboración y distribución de un producto es realmente una red, en la práctica, generalmente se opta por definir una cadena de suministradores “lineal”, integrada por la empresa más representativa de la fase de materias primas, producción, distribución, consumo, eliminación y/o reciclaje.

b) Elaboración de mapas de procesos y establecimiento de límites.

Esta etapa, consiste en el análisis de todos los procesos que generen emisiones de GEI de las empresas participantes identificadas en la etapa anterior. Se elaboran mapas de proceso, diagramas que persiguen la identificación de las actividades que generan emisiones de GEI, incluyendo las relaciones entre ellas. “...*Se trata de una herramienta imprescindible para obtener resultados sólidos, pues sólo si se identifican y se muestran de modo simple y claro cada uno de los inputs y outputs participantes en la generación de emisiones se podrá realizar un cálculo preciso de la HC*” [49].

En conjunto a la elaboración de los mapas de proceso, se definen los límites del sistema, determinando las actividades que serán incluidas en el cálculo y definiendo así el alcance que tendrá la HC del producto. Por tanto, se genera un proceso iterativo en el que los límites del sistema conllevan a una redefinición del mapa de proceso, el cual a su vez influye sobre los límites del sistema analizado.

En conformidad con varias normas, en el caso de que exista una Regla de Categorización de Producto (Product Category Rule, PCR), los límites se definen en función de ésta. En una PCR, se definen un conjunto de reglas específicas, requisitos y directrices para el desarrollo de las declaraciones ambientales de uno o de un grupo de productos que puedan cumplir funciones equivalentes. En caso de no existir una PCR, los límites del sistema deben definirse de forma clara, tal como muestra la siguiente figura.



Figura 14 – Materiales/Actividades comunes a incluir dentro de los límites del ciclo de vida de un producto.

c) Recopilación de datos.

En la etapa de recopilación de datos, se obtiene la información que permite estimar las emisiones generadas en las diferentes fases productivas y actividades identificadas en los mapas de proceso. Luego de la adquisición de datos, se aplican factores de emisión que permiten transformar los datos de cada actividad en emisiones de gases de efecto invernadero.

Los datos asociados a la actividades, como los factores de emisión, pueden proceder tanto de **fuentes primarias como secundarias**, siendo primarias aquellas en las que la información procede de mediciones directas hechas sobre la cadena de producción del producto, y secundarias cuando la información hace referencia a mediciones externas, no específicas del producto, pero que representan una media general de las medidas de productos o procesos similares. Es recomendable emplear

datos primarios para todo el ciclo de vida estudiado, diseñando protocolos de cálculo para cada actividad relevada en el mapa de procesos. En caso de no disponer de información primaria o ésta sea de calidad cuestionable, será necesario utilizar información procedente de fuentes secundarias. Los datos en este caso se obtienen de fuentes externas relativas a actividades, procesos y productos similares a los que intervienen en el ciclo de vida estudiado.

En esta etapa, se trata de buscar bibliografía rigurosa que provea la información necesaria. Artículos publicados en revistas científicas con un proceso de selección estricto, informes sectoriales, estadísticas gubernamentales y bases de datos contrastadas son algunas de las fuentes de información secundaria recomendadas.

En la Figura 15, se detallan los datos comunes a relevar para cada actividad, lo cuales se deben identificar para tener un orden en la recopilación de datos.

Entradas y salidas	Energía utilizada	Emisiones directas	Distribución y Transporte
<p>Tipo y cantidades de todas las entradas y salidas.</p> <p>Para cada paso del proceso:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Entradas de material. * Salidas de producto. * Co productos. * Residuos. 	<p>Tipo, fuente y cantidad de toda la energía empleada.</p> <p>Electricidad.</p> <p>Otros combustibles.</p>	<p>Tipo y cantidad de emisiones directas de GEI.</p>	<p>Tipo de vehículo distancia media recorrida.</p> <p>Porcentaje de espacio llenado o compartido con otros productos.</p> <p>Porcentajes de espacio llenado en el viaje de vuelta.</p>

Figura 15 – Datos a considerar en las actividades de un análisis de ciclo de vida.

d) Proceso de cálculo de la Huella de Carbono.

La HC se determina multiplicando los datos de actividad por un factor de emisión unitario, que recoge las emisiones de CO₂e por dato de actividad unitario, como se presenta en la Figura 16.

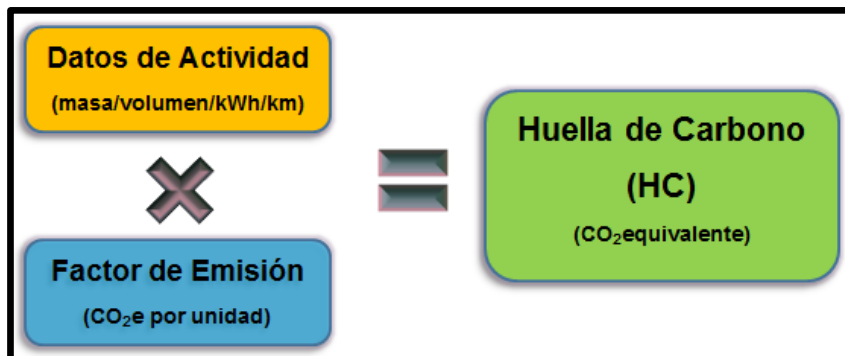


Figura 16 – Ecuación cálculo de huella de carbono.

Se trata de un cálculo muy sencillo, donde la dificultad de este método está dada por la obtención de datos fidedignos vinculados a los mapas de procesos, más que a los cálculos.

El cálculo de toda HC requiere de la realización de un balance de masas en el que se asegure que todos los flujos de entrada, salida y residuos sean contabilizados.

e) Fiabilidad de la estimación de los datos.

Un análisis de incertidumbre es una medida de la precisión del cálculo de la Huella de Carbono, mediante el cual se puede detectar las debilidades y posibles fuentes de error del cálculo.

Existen recomendaciones para reducir la incertidumbre, como por ejemplo reemplazar datos secundarios por primarios, realizar revisiones adicionales y/o certificación de la huella, utilizar información de fuentes secundarias de mayor calidad, mejorar el modelo de cálculo, entre otras.

3.4 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES METODOLÓGICAS EXISTENTES.

Hoy en día no se cuenta con un marco metodológico común y uniforme de medición de las emisiones de GEI. Sin embargo, el desarrollo de iniciativas de reducción voluntaria de GEI por parte de las empresas ha promovido la generación de distintas metodologías para la medición de éstas emisiones. Las metodologías más representativas poseen varios aspectos comunes, uno de éstos es el recurrir al análisis de ciclo de vida como eje conductor para el cálculo de la huella de carbono.

Para lograr una mejor comprensión de las similitudes y diferencias entre las distintas metodologías, se presenta, en la Tabla 2, una revisión de los siguientes estándares:

- “Publicly Available Specification” **PAS 2050**: *Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.* [50]
- “Greenhouse Gas Protocol” **GHG Protocol**: *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.* [51]
- “International Organization for Standardization” **PD ISO/TS 14067**: *Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication.* [52]

Tabla 2 – Análisis y revisión de las principales metodologías para el cálculo de huella de carbono de Producto.

METODOLOGÍAS			
	PAS 2050	GHG Protocol	ISO 14067
Características principales	<p>Metodología para calcular las emisiones de GEI asociadas a los productos.</p> <p>No hay requisitos para la comunicación.</p> <p>Esta metodología presenta:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Las fuentes de emisiones de GEI a tener en cuenta. -Principios para la definición de unidades de producto. -Principios de límites. -Las reglas sobre la materialidad. -Reglas para co-productos. -Reglas para datos primarios y secundarios. <p>Esta metodología, está siendo revisada para tener en cuenta la evidencia experimental.</p>	<p>Proyecto de metodología estándar para calcular la huella de carbono de producto.</p> <p>Esta metodología presenta:</p> <ul style="list-style-type: none"> -El establecimiento de la metodología. -Definición de la unidad funcional para el sistema de producto. -Identificación de los límites del sistema producto. -Extracción de datos. -Realización de la asignación. -Calcular las emisiones. -Realización de la evaluación de calidad de datos. -La garantía de concesión. <p>Se incluirá bases de datos en el futuro.</p>	<p>Parte 1 incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Directrices para definir el alcance, la unidad funcional y límites. -El tipo de datos a tener en cuenta. -Exclusiones. -Base de tiempo. -Directrices para la recopilación de datos, la asignación y validación. -Temporización. -Tratamiento de casos específicos. -Cálculo de Huella de Carbono e Interpretación. -Verificación de la presentación de informes. <p>Parte 2 incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Principios generales. -El uso de PCR. -Requisitos y directrices para la comunicación de la huella de carbono. - Verificación.
Aspectos ambientales cubiertos	<p>Enfoque Mono-criterio.</p> <p>Un gran panel de GEI se considera y se enumeran en la norma.</p> <p>Horizonte temporal PCA: 100 años.</p>	<p>Enfoque Mono-criterio.</p> <p>Este protocolo busca crear un estándar sólo para las emisiones de GEI.</p> <p>Se basa en los GEI contenidos en el tratado de Kioto, pero se puede añadir GEI adicionales.</p> <p>Horizonte temporal PCA: 100 años.</p>	<p>Enfoque Mono-criterio.</p> <p>La extensión a otros impactos ambientales es opcional.</p> <p>Se basa en los GEI contenidos en el tratado de Kioto, pero aparecen y se reconocen otros GEI.</p> <p>Horizonte temporal PCA: 100 años.</p>

METODOLOGÍAS		
PAS 2050	GHG Protocol	ISO 14067
Unidad funcional	<p>La norma reconoce la necesidad de unidades funcionales consistentes entre categorías de productos. Los siguientes elementos se deben abordar necesariamente al definir la unidad funcional del estudio:</p> <ul style="list-style-type: none"> -La calidad del producto. -Vida útil. -Usar patrones. -Características de rendimiento técnico. -Los requisitos de mantenimiento y de fin de vida del producto (por ejemplo, la disponibilidad de infraestructura de reciclaje y destino final del material, componentes o subcomponentes). <p>También se detallan las directrices específicas para definir una unidad funcional y se proporcionan ejemplos.</p> <p>Resultados deben ser expresados en masa de CO₂e por unidad funcional.</p>	<p>Para la determinación de las funciones características de rendimiento y la unidad funcional de un producto, se usarán las disposiciones pertinentes de la norma ISO 14044. La unidad funcional será coherente con el objetivo y alcance del estudio.</p> <p>El propósito principal de una unidad funcional es, proporcionar una referencia a la que los Inputs y outputs se normalicen (en un sentido matemático). Por lo tanto, la unidad funcional deberá estar claramente definida y medible.</p> <p>Adicionalmente, la norma establece que: El uso de una unidad funcional común como base soporta la comparación de los diferentes sistemas de productos.</p> <p>Resultados deben ser expresados en masa de CO₂e por unidad funcional.</p>

METODOLOGÍAS			
PAS 2050	GHG Protocol	ISO 14067	
<p>Límites del sistema y exclusión de reglas.</p>	<p>La evaluación de las emisiones de GEI debe incluir al menos el 95% de las emisiones del ciclo de vida probables de la unidad de producto.</p>	<p>Procesos que son atribuibles a la función del producto se incluyen en el límite del sistema del producto. Estos procesos están conectados directamente a través del ciclo de vida del producto de los flujos de materiales o de energía, desde la extracción y pre-procesamiento de los componentes del producto. Estos procesos se denominan procesos en primer plano.</p>	<p>Criterios de corte consistentes serán especificados durante la fase de definición del objetivo y alcance, que permita la omisión de ciertos procesos de menor importancia.</p>
	<p>Se deben incluir todas las fuentes de emisiones que puedan contribuir más del 1% de las emisiones totales de la unidad de producto.</p>	<p>Los procesos que no son directamente atribuibles a la función de un producto como las operaciones de las instalaciones, actividades corporativas, y bienes de capital, se conocen como procesos de fondo.</p>	<p>El total omitido de las emisiones no debe superar el 5% en comparación con las emisiones totales de todos los procesos dentro de la frontera del sistema definido.</p>
	<p>Cuando una sola entrada supera el 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida probables de un producto, el umbral del 95% se aplicará a las entradas restantes.</p>	<p>Los bienes de capital se incluirán en el sistema de producto si se considera significativo para el producto estudiado o sector de productos.</p>	<p>Los criterios de masas pueden ser utilizados para una primera proyección, pero no exime de la comprobación de que las fases omitidas no superen el 5% del impacto global.</p>
	<p>Se deben considerar todas las etapas asociadas al ciclo de vida del producto. (Enfoque B2C)</p>	<p>Las operaciones de las instalaciones y actividades corporativas deben ser incluidos en el sistema de producto cuando sea pertinente.</p>	
	<p>Se puede realizar un enfoque B2B, incluyendo todas las emisiones hasta el arribo del producto a la nueva organización.</p>	<p>Para los bienes de capital, mediante una prueba cualitativa o cuantitativa se verá la incidencia sobre la HC, pudiendo excluir aquellos procesos con menos de 1% del impacto sobre el escenario total del proceso o ciclo de vida.</p>	
<p>Si se utiliza un PCR se debe definir de acuerdo a él.</p>			

METODOLOGÍAS		
PAS 2050	GHG Protocol	ISO 14067
Recopilación de datos	<p>Para emisiones y remociones que varían en el tiempo, se debe recolectar información durante un periodo de tiempo determinado para establecer un promedio de emisiones y remociones.</p> <p>Se debe recopilar información primaria para aquellos procesos propios, operados o controlados por la organización, la información debe ser representativa del proceso para el cual se recolecta.</p> <p>La información secundaria debe ser requerida en caso de no disponer de información primaria.</p> <p>PAS 2050 define la PCR como un enfoque coherente, aceptado internacionalmente para definir el ciclo de vida de un producto. Esta se basa en PCR de www.environdec.com.</p>	<p>Para emisiones y remociones que varían en el tiempo, se debe recolectar información durante un periodo de tiempo determinado para establecer un promedio de emisiones y remociones.</p> <p>Los datos se deben obtener para todos los procesos unitarios incluidos en los límites del sistema.</p> <p>Se debe recolectar información primaria del lugar de todos los procesos bajo control operacional o financiero de la organización.</p> <p>La información secundaria se puede utilizar solo cuando no haya disponibilidad de información primaria.</p> <p>La información puede ser obtenida mediante mediciones, modelaciones o calculada.</p>

METODOLOGÍAS		
PAS 2050	GHG Protocol	ISO 14067
<p>Para la calidad de datos, la PAS 2050 se basa en la norma ISO 14044.</p> <p>Indicadores importantes para determinar la calidad de los datos y evaluar la variabilidad:</p> <p>-Cobertura relacionada con el tiempo: La edad de los datos y la longitud mínima de tiempo en el que se recogen los datos.</p> <p>-Especificidad geográfica: Zona geográfica de la que se recogen los datos.</p> <p>-Cobertura de la tecnología: Si los datos se refieren a una tecnología específica o para una combinación de tecnologías.</p> <p>-La exactitud de la información.</p> <p>-Precisión: Los datos que son más precisos tendrán prioridad.</p> <p>-Consistencia: Evaluación cualitativa de si la selección de los datos se lleva a cabo de manera uniforme en los distintos componentes del análisis.</p> <p>Además:</p> <p>-Se busca un umbral mínimo para la proporción de datos primarios.</p> <p>-Se ofrece una orden de preferencia en las fuentes de datos secundarios.</p>	<p>Establece realizar una evaluación de la calidad de datos para todas las fuentes de emisiones de GEI que acumulativamente suman el 75% del total las emisiones de productos, empezando por la fuente más grande de emisiones; Para todos los procesos cuantificados en donde se utilizaron datos primarios.</p> <p>Evaluación cualitativa de la calidad de datos sobre la representatividad tecnológica, temporal y geográfica, integridad y precisión.</p> <p>Para los procesos en que sólo se utilizaron datos secundarios, la evaluación de calidad de los datos se llevará a cabo basado en tecnología, temporalidad y representatividad geográfica.</p> <p>Se proporciona una tarjeta de puntuación para ayudar con la evaluación de datos.</p> <p>En la evaluación de calidad de datos, también se debe considerar la consistencia y la adecuación metodológica.</p>	<p>Se deben utilizar datos que reducen el sesgo y la incertidumbre.</p> <p>La norma establece un marco de puntuación de datos que permite combinar diferentes atributos de calidad de datos.</p> <p>Las siguientes áreas deben ser consideradas para la determinación de la calidad de los datos: Cobertura relacionada con el tiempo, representatividad geográfica, cobertura de la tecnología, la precisión, integridad, representatividad, consistencia, fuentes de los datos y la incertidumbre de la información.</p> <p>Dado que la recopilación de datos puede abarcar varias ubicaciones de información y referencias publicadas, se deben tomar medidas para llegar a un entendimiento uniforme y coherente de los sistemas de productos para ser modelado.</p>

Calidad de datos

METODOLOGÍAS			
	PAS 2050	GHG Protocol	ISO 14067
Incertidumbre	<p>Comprobación de la incertidumbre no está prescrita, pero se recomienda (opcional).</p> <p>El análisis de Monte Carlo se recomienda particularmente (es un método de análisis de incertidumbre común para ACV, basado en el estudio de los resultados de las variaciones de acuerdo a la variación de los datos de entrada principal).</p> <p>Cuando las emisiones asociadas al ciclo de vida varían con el tiempo, se deben recoger datos durante un período de tiempo suficiente (al menos un año de disponibilidad continua).</p>	<p>Los siguientes principios se detallan en la norma:</p> <p>Una evaluación de calidad de los datos se llevará a cabo para todas las emisiones de GEI fuentes que acumulativamente sumen el 75% de las emisiones totales de productos.</p> <p>Una declaración sobre la idoneidad general y metodológica se hará consistentemente con el inventario.</p> <p>Dependiendo del tipo de datos (primarios o secundarios), los detalles son proporcionados en relación con los criterios de calidad que deben evaluarse.</p> <p>Por otra parte, la norma detalla los indicadores globales de calidad de datos para ser analizados.</p> <p>Se presentan directrices para la evaluación cualitativa para cada indicador.</p>	<p>La fase de interpretación de un estudio de HC incluirá la evaluación cuantitativa o cualitativa de la incertidumbre, por ejemplo a través de la aplicación de las normas de redondeo o rangos.</p>
Sensibilidad	<p>Se recomienda el análisis de sensibilidad. (Opcional)</p>	<p>La sección de análisis de sensibilidad se encuentra actualmente en fase de desarrollo.</p>	<p>Se debe realizar un análisis de sensibilidad de todos los inputs, outputs y elecciones metodológicas realizadas.</p>

METODOLOGÍAS			
	PAS 2050	GHG Protocol	ISO 14067
Suposiciones metodológicas	<p>PAS 2050 da recomendaciones precisas para limitar supuestos:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Asignación de coproductos. -Límites del sistema se definen con precisión (materias primas, bienes de la energía, de capital, la fabricación, el transporte, almacenamiento, fase de uso, final de la vida útil del producto, etc.). -La matriz energética a elegir para la fase de uso. -Los datos de emisiones para el combustible, la electricidad y el calor están bien definidos. 	<p>A veces los supuestos son necesarios. De todos modos, se deben dar a conocer las hipótesis pertinentes y hacer las referencias adecuadas a las metodologías de contabilidad, cálculo y fuentes de datos utilizadas.</p> <p>Comprueba que las hipótesis y criterios para la selección de los límites, los años de base, los métodos, los datos de actividad, factores de emisión y otros parámetros son documentados.</p> <p>También proporciona directrices para utilizar otra referencia / guía para ayudar a las empresas a tomar supuestos.</p> <p>Se pueden establecer simplificaciones, decisiones y enfoques. Sin embargo, debe quedar claro que requisitos de la norma no se han cumplido y que por lo tanto el inventario de GEI no cumple con el estándar de GHG Protocol.</p>	<p>La norma establece que a veces se necesitan suposiciones. Es necesario comprobar que los supuestos y criterios para la selección de los límites, los años de base, los métodos, los datos de actividad, factores de emisión y otros parámetros son documentados.</p>
Compensación de GEI	<p>PAS 2050 Pretende reflejar la contabilidad de GEI del proceso de producción antes de la implementación de las medidas para compensar las emisiones de GEI. El uso de una fuente de energía de menores emisiones de GEI y, por tanto, con un factor de emisión más bajo, como la electricidad renovable o térmica convencional con captura y almacenamiento de carbono, no es una forma de compensación.</p>	<p>Este protocolo no está destinado a apoyar a la contabilidad de las compensaciones o reclamaciones de la neutralidad de carbono de las emisiones de GEI. Este estándar se centra en las emisiones generadas durante el ciclo de vida de un producto y no aborda las emisiones evitadas o las medidas adoptadas para compensar las emisiones liberadas.</p>	<p>ISO 14067-1 establece que HC no incluirá las compensaciones. Sin embargo, una nota indica que ciertos créditos como el traslado, almacenamiento en fregaderos, etc. Que no son compensaciones, pueden ocurrir dentro de los límites del sistema de producto.</p>
Comunicación de la Huella de Carbono	<p>No especifica requerimientos de comunicación.</p>	<p>Se presentan directrices y requerimiento sobre la información y la manera en que debe ser expuesta al público.</p>	<p>Se presentan directrices y requerimiento sobre la información y la manera en que debe ser expuesta al público.</p>

3.5 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO.

En base a lo anterior, para este estudio, se escoge la metodología dispuesta por International Organization for Standardization, específicamente la **PD ISO/TS 14067** [52].

3.5.1 Alcances del estudio y unidad funcional.

La huella de carbono asociada a los hormigones convencionales de mayor uso en el país, específicamente de los hormigones de grado H30 Y H40 (NCh 170), se utiliza como referencia para estimar el beneficio medioambiental derivado del uso de hormigones geopoliméricos. Dado que el HG se encuentra en las primeras etapas de desarrollo a nivel mundial, los contaminantes localizados si bien son importantes en un sentido de sustentabilidad, no son considerados en este estudio. En esta evaluación, las emisiones se obtienen utilizando un enfoque de análisis de ciclo de vida, en donde se consideran los impactos para la extracción u obtención industrial de las materias primas requeridas, la fabricación del geopolímero y el curado de las mezclas de hormigón geopolimérico. Las emisiones en la etapa de uso de los productos evaluados no se incluyen en el estudio, ya que se estima serian similares para los hormigones estudiados. Este es un enfoque útil para comparar productos similares, ya que reduce el tiempo requerido para la evaluación. Como no se cuenta con evaluaciones confiables sobre la durabilidad o vida útil del hormigón geopolimérico, no se ha considerado este aspecto en el presente estudio. Sin embargo, se cree que el hormigón geopolimérico posee una durabilidad o vida de servicio similar o mayor a la del hormigón convencional [11]. De ahí la hipótesis de igualdad de durabilidad y vida útil. El reciclaje de los productos al final de su vida útil también ha sido omitido.

En conformidad con la norma ISO 14067, para la determinación de la unidad funcional del producto, se usan las disposiciones pertinentes de la norma ISO 14044. Al tratarse de un estudio de “la cuna a la puerta”, es decir, que solo considera la fase de elaboración del producto, se utiliza una “Unidad declarada”, cantidad de producto de construcción que se usa como unidad de referencia, basada en el ACV, para expresar

la información ambiental necesaria para los módulos de información (etapas del ciclo de vida) considerados. En este caso, la unidad declarada corresponde a 1 m³ de hormigón, donde 1m³ es la unidad basal por la que se cuantifican los volúmenes de hormigón.

3.5.2 Diagramas de proceso, límites del sistema y descripción de los procesos unitarios.

Los diagramas de proceso tanto para las materias primas y de las mezclas de HG se presentan en la Figura 17, Figura 18 y Figura 19. Éstos se basan en los siguientes estudios:

- “Costs and carbon emissions for Geopolymer pastes in comparison to Ordinary Portland Cement”, Benjamin C. McLellan et. Al. (2011) [11].
- “Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: Acomparison between geopolymer and OPC cement concrete”, Louise K. Turner, Frank G. Collins. (2013) [53].

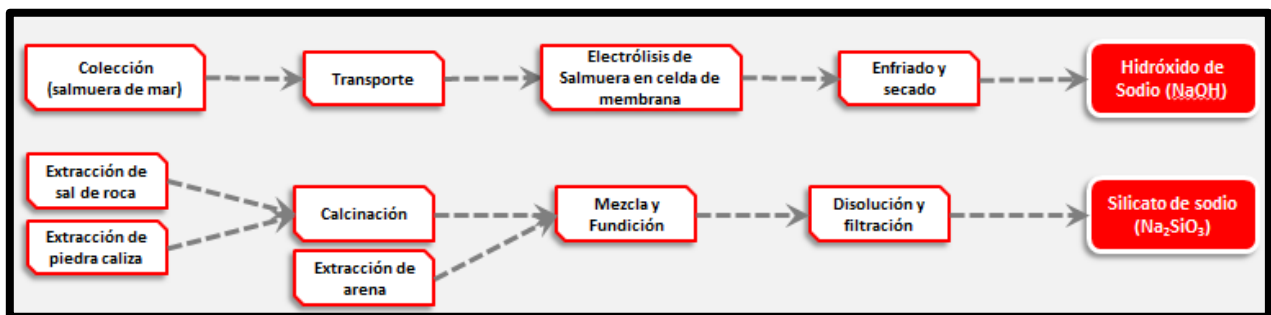


Figura 17 – Diagramas de proceso para la fabricación de soluciones alcalinas.

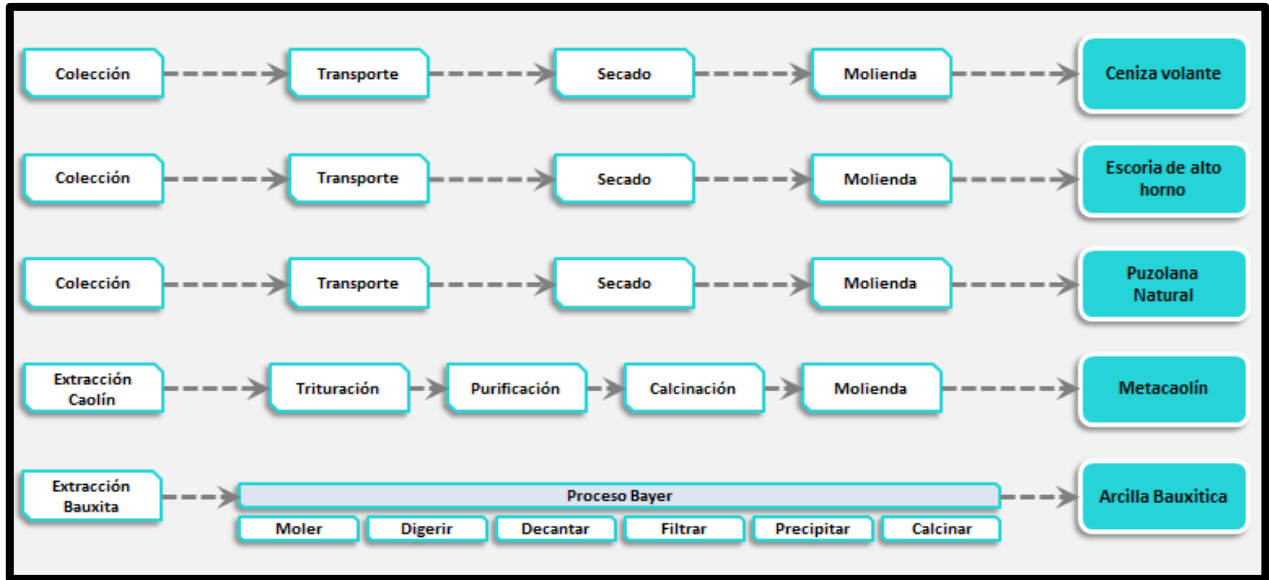


Figura 18 – Diagramas de proceso para la fabricación de aluminosilicatos.

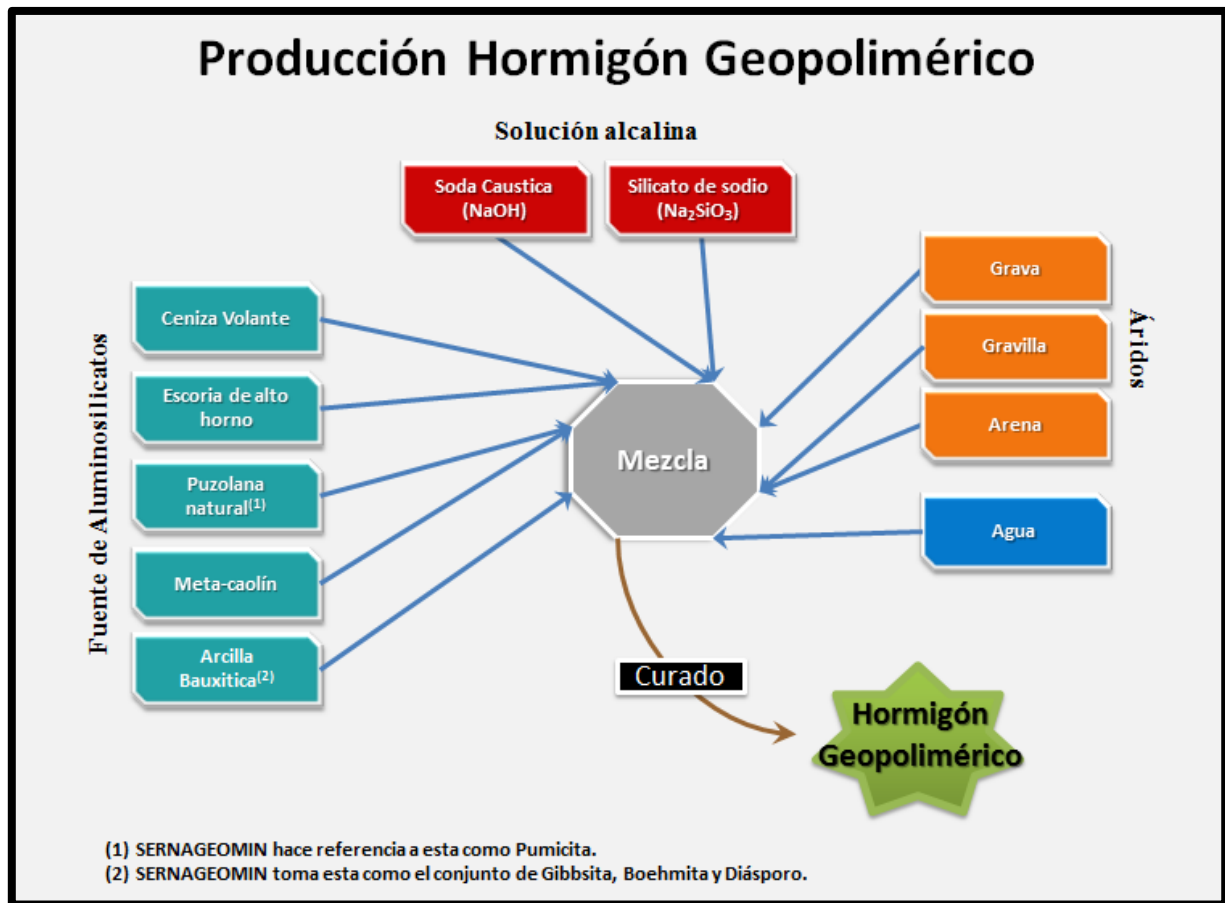


Figura 19 – Diagrama de proceso de la producción del Hormigón Geopolimérico.

Como indica la norma ISO 14067, siendo consistente con la definición de objetivos y alcances mencionados anteriormente, los límites considerados para el sistema se centran solo en la elaboración de los hormigones, dejando fuera la etapa de uso, eliminación y/o reciclaje. En la Figura 20, Figura 21 y Figura 22 se representan los límites mencionados, además, se describe el detalle de los procesos unitarios considerados dentro de los límites de cada sistema.

a) Preparación de ceniza volante.

La ceniza volante suministrada por las centrales termoeléctricas, generalmente no viene en condiciones óptimas de humedad y finura, por lo cual, puede ser necesario un proceso de secado y tamizado previo a su utilización. De acuerdo a la información provista por el profesor Jannie S.J. van Deventer, director ejecutivo del grupo Zeobond, empresa productora de hormigón geopolimérico en Australia, en su empresa no se realiza el proceso de molienda [54], por lo cual este proceso no está considerado en la modelación, al contrario de lo presentado en la Figura 18. En cuanto al transporte, se considera una distancia de 250 kilómetros desde la central termoeléctrica hasta la planta productora de HG.

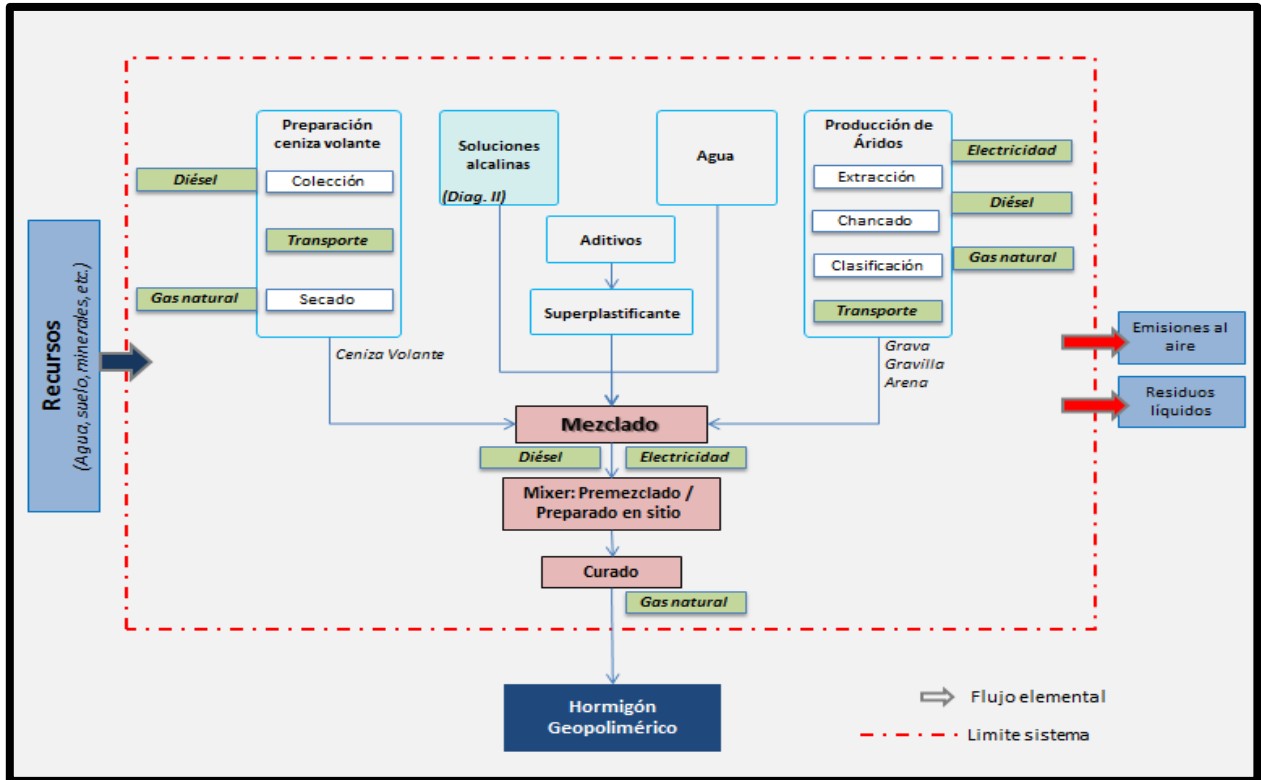


Figura 20 – Límite del sistema para la elaboración de hormigón geopolimérico.

b) Producción y procesamiento de los áridos.

Este proceso unitario comprende la extracción de material pétreo desde depósitos o yacimientos autorizados y los procesos de chancado, harneado, selección y acopio. Por tanto, este insumo se considera como material tratado. Los productos obtenidos son Grava, Gravilla y Arena. En cuanto a su transporte, se considera una distancia de 50 km.

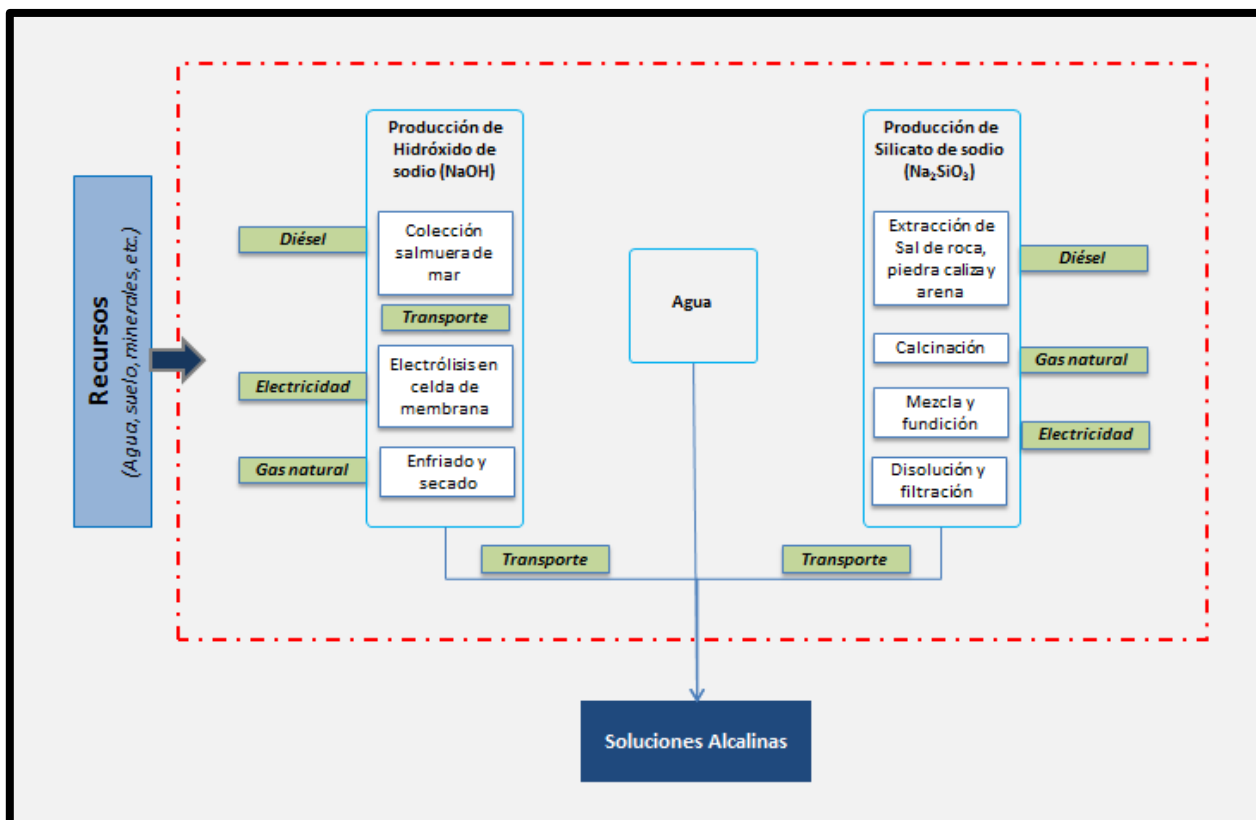


Figura 21 – Límite del sistema para la producción de soluciones alcalinas.

c) Producción de Hidróxido de sodio (NaOH).

Generalmente el NaOH, se produce en una Planta Cloro-Soda y el proceso productivo considerado consta de la producción de salmuera a partir de agua mar, el posterior transporte, electrolisis en celdas de membrana a temperatura de 80°C, el enfriado y secado de la solución de NaOH resultante, el peletizado y envasado. Se considera un transporte de 100 km por carretera de este producto hacia la planta de HG.

d) Producción de Silicato de Sodio.

Este proceso incluye la extracción y calcinación de mezcla de sal de roca, piedra caliza y arena, posterior fundición de la mezcla, disolución y filtración del material. Dado que en el mercado asiático este producto presenta un precio considerablemente mejor al que se encuentra en el mercado nacional, se considera la importación de esta materia prima al país, un supuesto flete de 27.000 km por mar.

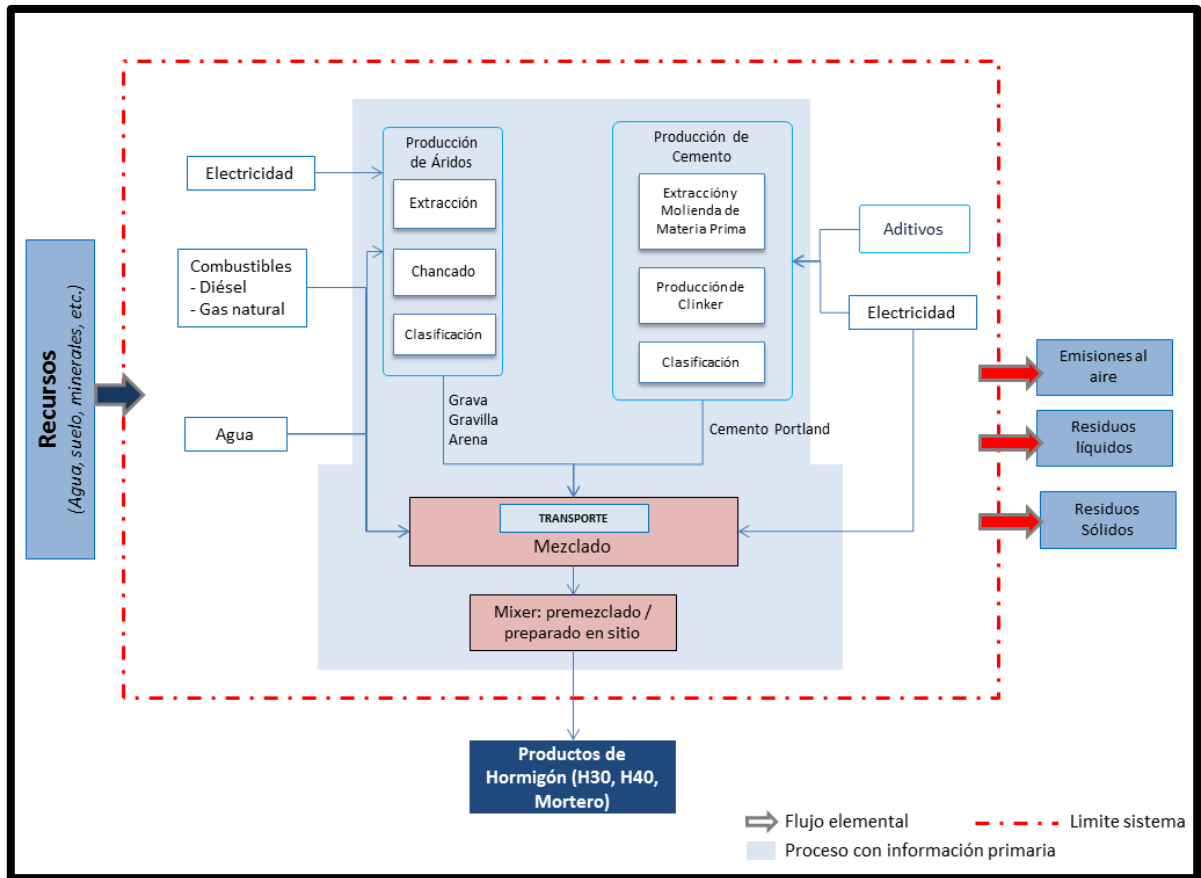


Figura 22 – Límite del sistema para la elaboración de hormigón convencional.

Fuente: Unidad de Sustentabilidad Organizacional – IDIEM.

e) Producción de Cemento.

El cemento se produce con la pulverización del clinker, más la adición de una o más formas de yeso y aditivos. Comprende la extracción de materias primas, homogeneización de materiales, dosificación, producción de Clinker a través de proceso de Clinkerización en horno a temperaturas cercanas a los 1500°C, molienda de Clinker, y molienda conjunta del Clinker más la adición de yeso.

f) Mezcla de Hormigón:

Consiste en el proceso de mezcla y amasado del total de componentes que forman el hormigón, en las proporciones específicas para cada producto.

3.5.3 Composición de hormigones seleccionados para el estudio.

a) Mezclas de Hormigón Geopolimérico.

En las diversas mezclas consideradas, se emplea ceniza volante como fuente de aluminosilicatos, y como activador alcalino se usa una combinación de solución de silicato de sodio con una solución de hidróxido de sodio.

Las mezclas específicas consideradas son:

- **HGHD (Hormigón Geopolimérico Hardjito, D)**, mezcla común de hormigón geopolimérico presentado en un estudio de Hardjito, D. y Rangan, BV. El año 2005 [16], mezcla que ha sido evaluada en estudios anteriores realizados en el IDIEM.
- **HG5 (Hormigón Geopolimérico Mix 5)**, elaborada en IDIEM el año 2011 en la Memoria de título de Pedro Manuel Díaz Sossa [5].

b) Mezclas de Hormigón en base a cemento.

Las mezclas usadas corresponden a dos hormigones modelados por la Unidad de Sustentabilidad Organizacional del IDIEM. Mezclas obtenidas del proyecto ECOBASE - Construcción. Las modelaciones consideradas en el proyecto, H30 y H40, pretenden ser las bases de referencia a nivel país de las emisiones de los hormigones utilizados en Chile.

3.5.4 Dosificaciones.

En la Tabla 3 se presentan las dosificaciones para 1 m³ de cada uno de los hormigones considerados en el estudio.

Tabla 3 – Dosificaciones a comparar.

Hormigón		HGHD	HG5	H30 REFERENCIAL	H40 REFERENCIAL
Producto					
Cemento	[Kg/m ³]	-	-	280	360
Ceniza volante	[Kg/m ³]	408	420	-	-
Solución de Hidróxido de sodio (14M)	[Kg/m ³]	41	91	-	-
Solución de Silicato de sodio (2:1)	[Kg/m ³]	103	182	-	-
Grava	[Kg/m ³]	277	234	-	-
Gravilla	[Kg/m ³]	1017	948	990	920
Arena	[Kg/m ³]	554	325	900	890
Reductor de agua	[Kg/m ³]	6	-	-	-
Agua Extra	[Kg/m ³]	22,5	40	140	162

Para las mezclas geopoliméricas, es esencial un buen aditivo reductor de agua para poder disminuir la cantidad de solución alcalina, y además, obtener una mezcla con buena trabajabilidad. En la empresa Australiana productora de Hormigón Geopolimérico Zeobond, se usa un aditivo superplastificante que aún no está disponible en el mercado, ni mucho menos en la literatura abierta, el cual permite la adición de activadores sólidos en la elaboración del HG de acuerdo a lo informado por el profesor Jannie S.J. van Deventer [54], director ejecutivo de la empresa.

3.5.5 Recolección de datos.

Para obtener la huella de carbono, se consideran los datos del proyecto “ECOBASE - Construcción” [55,56], el primer esfuerzo de investigación en Chile por generar los inventarios de ciclo de vida del hormigón, el cual busca entregar a la industria nacional una plataforma de información del desempeño en sustentabilidad ambiental de los principales materiales empleados en el sector construcción (hormigón, acero, madera, ladrillos y planchas de yeso cartón), bajo la metodología de análisis de ciclo de vida. Específicamente, de ese estudio fue posible obtener las emisiones de CO₂e generadas para la elaboración del hormigón que se utiliza en el país. Siendo consistente con la ISO 14067, ésta información, servirá como referencia para comparar

con las emisiones de CO₂e del hormigón geopolimérico, objetivo principal de este estudio.

3.5.6 Cálculo de las emisiones de GEI.

La norma ISO 14067, permite que la información pueda ser modelada, siempre y cuando sea específica para el proceso en el ciclo de vida del producto, como es el caso de este estudio, las emisiones asociadas a la elaboración de hormigones en Chile, son obtenidas a partir del proyecto Ecobase – Construcción, y luego fueron modeladas en el software Simapro (Sistema Integral de Medición y Avance de la Productividad, desarrollado por la empresa holandesa Pré Consultants). Dicho software, permite realizar los ACV requeridos, logrando evaluar las cargas ambientales asociadas a un determinado producto, proceso o actividad, mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) o de bases de datos disponibles (Ecoinvent, Buwal, Idemat, ETH, IVAM, etc.).

El software SimaPro, es usado como herramienta en la obtención de la huella de carbono del hormigón geopolimérico, ya que a través de éste se adquieren los factores de emisión para las materias primas y procesos involucrados en la elaboración del HG. Con los factores de emisión, y utilizando un programa desarrollado exclusivamente para este estudio [57], se llega a la cuantificación de la huella de carbono producto de la elaboración de 1 unidad de producción de hormigón geopolimérico en Chile.

CAPÍTULO 4:

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

4.1 CANTIDAD DE CENIZAS VOLANTES EN EL PAÍS.

A través de información de primera fuente con las centrales termoeléctricas se obtienen las propiedades y cantidades de las cenizas volantes generadas en el país. Además, paralelamente se consulta con las SEREMIS de salud regionales, que son los encargados del control de emisiones industriales en cada región.

Dado el recelo con que las centrales termoeléctricas manejan la información relativa a sus emisiones contaminantes, los datos obtenidos fueron escasos. Solo las centrales Angamos, Ventanas I y II, Nueva Ventanas y la central Campiche hicieron entrega de la información requerida.

4.1.1 Información sobre disponibilidad de cenizas volantes en Chile.

La **Central Angamos** pertenece al grupo NORGENER y se ubica en la segunda región de Antofagasta. Genera entre 15.000 a 20.000 toneladas de ceniza por mes, la que se produce a causa de la combustión del carbón bituminoso usado como combustible en la central.

La composición de la ceniza volante residual no fue facilitada por la central termoeléctrica, no obstante, se facilitó la composición de la ceniza presente en el carbón [58] la cual debiera ser similar a la señalada en la Tabla 4.

Tabla 4 – Composición ceniza volante presente en carbón ocupado en Central Angamos.

Composición		Unidad	
Silicio	SiO_2	%	59,59
Aluminio	Al_2O_3	%	18,55
Hierro	Fe_2O_3	%	9,25
Calcio	CaO	%	3,08
Magnesio	MgO	%	1,53
Titanio	TiO_2	%	0,88
Sodio	Na_2O	%	1,85
Potasio	K_2O	%	1,60
Fósforo	P_2O_5	%	0,13
Manganeso	Mn_3O_4	%	0,02
Azufre	SO_3	%	2,37
Indeterminado		%	1,15
TOTAL		%	100,00

De las **centrales Ventana I y II, Nueva Ventanas y Campiche**, solo se obtuvo las cantidades de cenizas totales [59], la cual se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 – Cantidades de ceniza totales, centrales 5 región.

Año	Ventanas I y II	Nueva Ventanas	Campiche
2013 (Ene-Dic)	84.276 (Ton)	109.299 (Ton)	94.818 (Ton)
2014 (Ene-Oct)	73.871 (Ton)	114.979 (Ton)	95.301 (Ton)

Como la información recopilada consta de las cantidades totales de cenizas, se considera conservadoramente que el 75% corresponde a cenizas volantes útiles. Esta aproximación, es basada en los datos del estudio de emisiones mencionado en la sección 3.2.1.

Del estudio de emisiones mencionado, se confecciona la Tabla 8, la cual detalla las cantidades de cenizas que se producen al combustionar distintos tipos de carbón en una misma caldera.

4.1.2 Estimación de las cantidades de cenizas generadas por la combustión de carbón.

Según lo mencionado en el apartado 3.2.1, a partir de un estudio del análisis de emisiones generadas por la combustión del carbón para una nueva central termoeléctrica en el país, es posible estimar la cantidad de cenizas volantes producidas por cada central termoeléctrica en función del carbón que consumen. Las propiedades de los carbones que se utilizaron en el estudio, y las eficiencias consideradas, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 – Propiedades del carbón estudiado y eficiencias consideradas.

Tipo de carbón	PCS Carbón	Origen Carbón	Consumo específico	Ceniza presente en el carbón	Eficiencia caldera	Eficiencia Ciclo	Eficiencia Precipitador Electroestático
-	kcal/kg	-	ton/Mwbruto	%	%	%	%
Bituminoso 1	6.078	AUSTRALIA	0,365	13,95%	91,9%	38,6%	97,09%
Bituminoso 2	6.350	AUSTRALIA	0,349	12,50%	92,2%	38,7%	97,21%
Bituminoso 3	6.444	COLOMBIA	0,344	8,50%	92,4%	38,8%	98,08%
Bituminoso 4	6.144	INDONESIA	0,361	11,80%	91,9%	38,6%	98,27%
Bituminoso 5	6.000	CANADA	0,361	10,50%	92,4%	38,8%	95,90%
Bituminoso 6	6.333	SOUTH AFRICA	0,361	13,80%	92,2%	38,8%	95,26%
Sub bituminoso 1	5.700	USA	0,361	9,50%	92,0%	38,7%	97,20%
Sub bituminoso 2	4.001	USA	0,361	9,15%	90,0%	37,8%	93,4%
Sub bituminoso 3	3.900	CHILE	0,361	16,35%	88,7%	37,3%	98,64%
Sub bituminoso 4	4.221	INDONESIA	0,525	3,30%	89,2%	37,5%	98,22%
Sub bituminoso 5	4.101	XII R.RIO EDO.	0,361	18,66%	88,7%	37,3%	91,53%
Sub bituminoso 6	4.030	XII R.LOS MANTOS	0,550	16,00%	89,0%	37,4%	97,88%

En el estudio fueron considerados distintos tipos de carbón, seis de ellos del tipo Bituminoso y seis del tipo Sub-bituminosos. A estos carbones, luego de ser combustionados en las calderas de una nueva central termoeléctrica, se les realizó un análisis para determinar la composición de las cenizas producidas, Tabla 7. Al mismo tiempo, se determina la cantidad de cenizas producidas, información presentada en la Tabla 8.

Tabla 7 – Composición de las cenizas producidas producto de la combustión de carbón en el estudio entregado.

Tipo de carbón	Sílice - SiO2	Al2O3	TiO2	Oxido Férrico Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	SO3	P2O5	SiO2 + Al2O3 + Fe2O3
-	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Bituminoso 1	67,6%	22,8%	1,3%	4,1%	0,9%	0,5%	0,3%	1,2%	0,5%	0,2%	94,5%
Bituminoso 2	60,0%	28,0%	1,3%	5,5%	0,7%	0,8%	0,4%	1,4%	0,5%	0,7%	93,5%
Bituminoso 3	60,6%	19,6%	1,0%	8,3%	2,2%	1,9%	0,8%	2,2%	2,3%	0,2%	88,5%
Bituminoso 4	49,4%	36,6%	2,4%	4,6%	2,0%	0,9%	0,3%	0,5%	3,0%	0,2%	90,6%
Bituminoso 5	57,0%	17,4%	0,6%	5,0%	11,6%	1,7%	0,7%	1,0%	3,9%	0,2%	79,4%
Bituminoso 6	54,0%	34,0%	2,0%	3,0%	3,5%	0,7%	0,2%	0,6%	1,2%	1,3%	91,0%
SUB BITU 1	55,2%	17,4%	0,7%	5,1%	11,7%	2,0%	1,4%	0,8%	4,6%	0,2%	77,8%
SUB BITU 2	49,5%	18,1%	0,9%	6,4%	15,7%	2,7%	0,3%	1,4%	4,1%	0,2%	74,0%
SUB BITU 3	46,5%	23,5%	1,1%	5,6%	8,1%	1,9%	2,0%	0,6%	8,2%	0,0%	75,6%
SUB BITU 4	27,0%	6,3%	0,8%	32,2%	9,6%	9,5%	10,0%	0,4%	10,0%	0,1%	65,5%
SUB BITU 5	53,4%	28,1%	1,0%	2,5%	6,7%	0,7%	1,4%	0,4%	2,1%	0,3%	83,9%
SUB BITU 6	42,0%	28,0%	1,3%	2,0%	8,4%	1,8%	1,8%	0,5%	2,9%	0,0%	72,0%

Tabla 8 – Cantidad de cenizas por la combustión de cada carbón.

Tipo de carbón	Consumo diario Carbón (Real)	Carbón presente en escoria	Carbón presente en ceniza	Ceniza de fondo	Ceniza Volante	Ceniza en chimenea	% de ceniza volante del carbón consumido	Escoria a Botadero	Ceniza a Botadero	Total de residuos a Botadero
	ton/día	ton/día	ton/día	ton/día	ton/día	ton/día	%	ton/día	ton/día	ton/día
-										
Bituminoso 1	3280,6	53,06	19,90	79,59	378,05	11,58	11,5%	132,65	386,37	519,02
Bituminoso 2	3140,1	45,51	17,06	68,26	324,25	9,53	10,3%	113,77	331,78	445,55
Bituminoso 3	3094,3	30,50	11,44	45,74	217,27	4,40	7,0%	76,24	224,31	300,55
Bituminoso 4	3245,4	44,40	16,65	66,60	316,35	5,74	9,7%	111	327,26	438,26
Bituminoso 5	3323,3	40,45	15,17	60,69	288,26	12,43	8,7%	101,14	291,00	392,14
Bituminoso 6	3148,5	50,38	18,89	75,56	358,93	17,91	11,4%	125,94	359,91	485,85
Sub bituminoso 1	3498,2	38,53	14,45	57,80	274,53	8,10	7,8%	96,33	280,88	377,21
Sub bituminoso 2	4983,6	52,87	19,83	79,30	376,70	26,37	7,6%	132,175	370,16	502,33
Sub bituminoso 3	5112,7	96,92	36,35	145,38	690,55	9,86	13,5%	242,2975	717,03	959,33
Sub bituminoso 4	4723,9	18,07	6,78	27,11	128,78	2,41	2,7%	45,185	133,14	178,33
Sub bituminoso 5	4862,1	105,19	39,45	157,79	749,48	66,85	15,4%	262,9775	722,08	985,06
Sub bituminoso 6	4947,8	91,79	34,42	137,68	653,97	14,58	13,2%	229,4625	673,80	903,27

La Comisión Nacional de Energía (CNE), mantiene una base de estadísticas de la cual se puede obtener la cantidad de combustible consumido por las generadoras de electricidad a lo largo del país [46], en particular, el carbón consumido por cada central termoeléctrica. Por otro lado, en relación a los datos presentados en la Tabla 8, dejando de lado los carbones del tipo Sub-bituminosos, los cuales generalmente producen cenizas volantes Clase C, y el carbón bituminoso 5, el cual presenta altos contenidos de CaO, se tiene como supuesto conservador que el 9,5% del carbón consumido corresponde a ceniza volante, permitiendo obtener una estimación de la cantidad de ceniza volante a lo largo del país en cada central termoeléctrica.

En base a lo anterior, en la Tabla 9 se tiene un compacto de las cenizas volantes estimadas en base al carbón consumido por cada central termoeléctrica, junto a las cantidades de ceniza volante informadas mediante el contacto directo de centrales termoeléctricas y las Seremis regionales correspondientes. Esto tomando como base las cantidades del año 2013.

Tabla 9 – Cantidad de cenizas volantes por centrales termoeléctricas.

Central Termoeléctrica	Región	Carbón consumido [Miles ton/año]	Estimación de cenizas volantes [ton/año]	Cenizas volantes informadas[ton/año]
Tarapacá	1 Tarapacá	356	33.858	-
Angamos 1	2 Antofagasta	1.305	123.938	126.000 - 168.000
Angamos 2	2 Antofagasta			
Andina	2 Antofagasta	457	43.369	-
Hornitos	2 Antofagasta	456	43.282	-
Mejillones 1	2 Antofagasta	728	69.153	-
Mejillones 2	2 Antofagasta			-
Tocopilla 1	2 Antofagasta	1.256	119.340	-
Tocopilla 2	2 Antofagasta			-
U12	2 Antofagasta	820	77.912	-
U13	2 Antofagasta			-
U14	2 Antofagasta			-
				-
Guacolda 1	3 atacama	471	44.755	-
Guacolda 2	3 atacama	458	43.463	-
Guacolda 3	3 atacama	457	43.396	-
Guacolda 4	3 atacama	466	44.289	-
Ventanas 1	5 Valparaíso	250	23.779	63.207
Ventanas 2	5 Valparaíso	530	50.369	
Nueva Ventanas	5 Valparaíso	791	75.117	81.974
Campiche	5 Valparaíso	713	67.716	71.114
Bocamina 1	8 Bio bio	317	30.134	-
Bocamina 2	8 Bio bio	747	71.003	-
Santa María	8 Bio bio	962	91.352	-
Petropower	8 Bio bio	186	17.651	-

4.2 CANTIDADES DE PUMICITA (PUZOLANA NATURAL) Y CAOLÍN EN EL PAÍS.

El Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), elabora un informe anual de la minería en el país [48]. Según lo estipulado en el Anuario de la Minería 2013, las cantidades de Pumicita y Caolín que se extraen en Chile desde el año 2004 al 2013, se resumen en la Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 10 – Toneladas de Caolín extraído en Chile.

Región \ Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Atacama (03)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coquimbo (04)	484	293	586	801	592	354	226	76	429	-
Valparaíso (05)	59	85	-	-	-	-	-	-	-	-
Metropolitana (13)	-	-	28.000	79.000	62.000	48.000	62.000	58.000	60.000	60.000
Lib. Gral. B. O'Higgins (06)	5.890	14.805	16.056	8.100	934	-	-	1.836	-	-
Maule (07)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bio bio (08)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Araucanía (09)	700	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	7.133	15.183	44.642	87.901	63.526	48.354	62.226	59.912	60.429	60.000

Tabla 11 – Toneladas de Pumicita extraída en Chile.

Región \ Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Antofagasta (02)	76.253	92.896	79.546	94.391	98.006	119.290	96.056	99.840	119.253	103.591
Metropolitana (13)	1.317.088	1.385.975	1.201.043	883.058	797.966	605.886	519.967	481.503	502.110	507.666
Lib. Gral. B. O'Higgins (06)	141.887	141.228	142.555	158.322	167.204	194.073	185.940	201.343	178.851	152.117
Maule (07)	-	-	-	-	-	-	22.086	33.879	26.565	36.657
Total	1.535.228	1.620.099	1.423.144	1.135.771	1.063.176	919.249	824.049	816.565	826.779	800.031

Dado que el término puzolana corresponde a una denominación industrial, aplicable a recursos naturales o subproductos industriales que se utilizan en la fabricación de cemento (Pumicita, diatomita, basaltos, etc.), su producción es integrada al recurso Pumicita, es por ello que se presenta la cantidad producida en el país de este recurso.

4.3 HUELLA DE CARBONO DEL HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO.

Para el cálculo de la huella de carbono del hormigón geopolimérico, es necesaria la definición de las características del transporte usado en el traslado de materias primas, del mismo modo, se deben precisar los tipos de combustibles necesarios al momento de efectuar la mezcla del hormigón. Desde el software SimaPro, es posible acceder a la base de datos Ecoinvent, donde se presentan diversos procesos de transporte y combustibles, pero la modelación de ellos no necesariamente representa las condiciones nacionales. Por lo anterior, la unidad de Sustentabilidad Organizacional del Idiem adaptó ciertos procesos para que representaran la realidad del país. Los procesos adaptados fueron:

- **Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}**: Trata del transporte de carga en camión de 16 a 32 toneladas métricas. La sigla {RoW} significa “rest of world” (Resto del mundo), ya que se tiene el mismo proceso pero para países específicos de Europa. Esta modelación es usada para simular el transporte de las materias primas involucradas en la elaboración del hormigón geopolimérico, como son áridos, ceniza volante y solución alcalina.
- **Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for**: Proceso que considera el transporte de carga por mar en una nave transoceánica. La sigla {GLO}, significa global. Este proceso es ocupado para el caso en que se tenga que considerar una importación al país de algún producto, como podrían ser los casos del Hidróxido de Sodio y Silicato de sodio.
- **Heat, district or industrial, natural gas {RoW} production, at industrial furnace >100kW**: Hace referencia a la producción de calor en un horno industrial >100kW usando como combustible el gas natural. Al igual que en el caso de transporte terrestre usando camiones este proceso es para países fuera de Europa (RoW).
- **Diesel, burned in building machine {GLO} market for**: Corresponde al diesel ocupado por una máquina de construcción de forma global.

En la herramienta confeccionada en este trabajo de título para el cálculo de la huella de carbono del hormigón geopolimérico [57] los procesos adaptados para que sean representativos a Chile, se identifican con la etiqueta de “ECOBASE”.

En términos de emisiones de CO₂e, dado que la forma de generación de energía es muy diversa y presenta grandes diferencias entre un país y otro, en el proyecto Ecobase – Construcción, fue necesaria la modelación de la matriz energética del Sistema Interconectado Central (SIC). Para este estudio, en el cálculo de la huella de carbono, se usa la modelación descrita, referencia con el nombre de **Electricidad SIC**.

Ingresando los datos de dosificaciones para cada mezcla en la herramienta de cálculo de huella de carbono para hormigón geopolimérico, se obtienen las emisiones de CO₂e tanto para los insumos como para la mezcla total. Estos resultados se presentan en los apartados 4.3.1 y 4.3.2.

4.3.1 Huella de Carbono de mezcla HGHD.

El detalle de la mezcla presentada en el documento del Prof. Dr. Djwantoro Hardjito, se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12 – Detalle de la mezcla HGHD.

Insumo/Producto	Cantidad	Tipo de Transporte		Detalle
ceniza Volante	408 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	250 Km	
Áridos	1848 Kg			
Grava	277 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	50 Km	
Gravilla	1017 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	50 Km	
Arena	554 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	50 Km	
Soluciones Alcalinas	144 Kg			
Solución NaOH	41 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	100 Km	Sodium hydroxide, concentration 14M, without water, {RoW}| chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell Agua, {CL} v1 ECOBASE
Solución silicato de sodio	103 Kg	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| market for | ECOBASE	27000 Km	Sodium silicate, without water, in 37% solution state {RoW}| production, furnace liquor Agua, {CL} v1 ECOBASE
Agua Extra	22,5 Kg			
Plastificante	6 Kg			

El combustible y energía ocupados para la estimación se detalla en la Tabla 13.

Tabla 13 – Combustibles y energía ocupados para la modelación.

Combustible	Tipo
Gas	<i>Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace >100kW | ECOBASE</i>
Diesel	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | ECOBASE</i>
Electricidad	<i>Electricidad SIC</i>

Utilizando la herramienta de cálculo elaborada [57], mencionada en el Capítulo 4, se obtienen las tablas con las emisiones de CO₂e para cada materia prima.

En la Tabla 14, se presenta el detalle de las emisiones de CO₂e para la ceniza volante. La “ceniza volante sin procesar” (colectada desde la central termoeléctrica), tratándose de un material de desecho, considera de forma conservadora una emisión nula. Por otro lado, en el caso del diesel, se usa la equivalencia al combustible correspondiente a la extracción de puzolana natural. El calor especificado, corresponde al calor necesario para poder secar la ceniza volante usando gas natural, y la cantidad asociada al transporte corresponde a toneladas por kilómetro. Notar que para diesel, gas natural y transporte, se consideran los procesos adaptados para representar las condiciones del país.

Tabla 14 – Emisiones de CO₂e para ceniza volante, mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Ceniza volante	408 Kg	15,99
Ceniza volante sin procesar	408 kg	0
Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | ECOBASE	6 MJ	0,52
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace >100kW | ECOBASE	0,53 MJ	0,04
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	102 tkm	15,43

En la Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 se muestra el desglose de las emisiones de CO₂e para los áridos usados en la mezcla HGHD. En estos casos, la producción de cada material es obtenida del proyecto Ecobase – Construcción.

Tabla 15 – Emisiones de CO₂e para grava, mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Grava	277 Kg	3,78
Producción Grava	1,68 CO ₂ e	1,68
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	13,85 tkm	2,1

Tabla 16 – Emisiones de CO₂e para gravilla, mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Gravilla	1017 Kg	10,66
Producción Gravilla	2,96 CO ₂ e	2,97
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	50,85 tkm	7,69

Tabla 17 – Emisiones de CO₂e para Arena, mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Arena	554 Kg	5,74
Producción Arena	1,55 CO ₂ e	1,55
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	27,7 tkm	4,19

En la Tabla 18 y Tabla 19, se tiene el detalle de las emisiones de CO₂e para las soluciones alcalinas usadas en esta mezcla. Se aprecia por lo demás, las cantidades de los componentes que forman la solución requerida. El agua usada para la formación de estas soluciones corresponde a agua potable con las adaptaciones necesarias para que represente las condiciones del país.

Tabla 18 – Emisiones de CO₂e para solución de Hidróxido de Sodio, mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Solución NaOH	41 Kg	23,14
Sodium hydroxide, concentration 14M, without water, {RoW}| chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell	17,7 Kg	22,51
Agua, {CL} v1 ECOBASE	23,3 Kg	0,01
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	4,1 tkm	0,62

Tabla 19 – Emisiones de CO₂e para solución de Silicato de Sodio, mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Solución Silicato	103 Kg	73,31
Sodium silicate, without water, in 37% solution state {RoW}| production, furnace liquor	55,99 Kg	48,62
Agua, {CL} v1 ECOBASE	47,01 Kg	0,01
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| market for | ECOBASE	2781 tkm	24,68

En el caso del aditivo plastificante reductor de agua, se usa una solución al 40% de policarboxilato y las emisiones asociadas a este producto se indican en la Tabla 20.

Tabla 20 – Emisiones de CO₂e para aditivo plastificante reductor de agua, mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Plastificante	6 Kg	7,02
Polycarboxylates, 40% active substance {RoW}| production	6 Kg	7,02

El agua extra añadida a la mezcla, para efectos de huella de carbono es despreciable como se detalla en la Tabla 21.

Tabla 21 – Emisiones de CO₂e para agua extra, mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Agua Extra	22,5 Kg	0,01
Agua, {CL} v1 ECOBASE	22,5 Kg	0,01

Teniendo las emisiones de cada materia prima necesaria para la elaboración de 1m³ de Hormigón Geopolimérico, se puede obtener la huella de carbono asociada a la mezcla. Las cantidades señaladas de diesel, gas natural y electricidad, corresponden a la elaboración de 1m³ de hormigón estándar, además, se utilizan las adaptaciones para el país que se desarrollaron en el proyecto Ecobase - Construcción. Finalmente, el detalle del cálculo de la huella de carbono para la mezcla HGHD se indica en la Tabla 22.

Tabla 22 – Huella de carbono para mezcla HGHD.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Hormigón Geopolimérico	1 m³	143,45
Ceniza volante	408 Kg	15,99
Grava	277 Kg	3,78
Gravilla	1017 Kg	10,66
Arena	554 Kg	5,74
Solución NaOH	41 Kg	23,14
Solución Silicato	103 Kg	73,31
Agua extra	22,5 Kg	0,01
Plastificante	6 Kg	7,02
Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | ECOBASE	22,7 MJ	1,96
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace >100kW | ECOBASE	16,6 MJ	1,27
Electricidad SIC	4,36 kWh	0,58

De forma adicional a lo especificado en las tablas, los resultados se muestran gráficamente, reflejando de forma más clara la incidencia de cada material y/o proceso involucrado en la elaboración de la mezcla. La representación gráfica para el hormigón geopolimérico, mezcla HGHD, se presenta en la Figura 23. Los gráficos asociados a las emisiones de CO₂e de cada materia prima partícipe de ésta mezcla se detallan en los anexos.

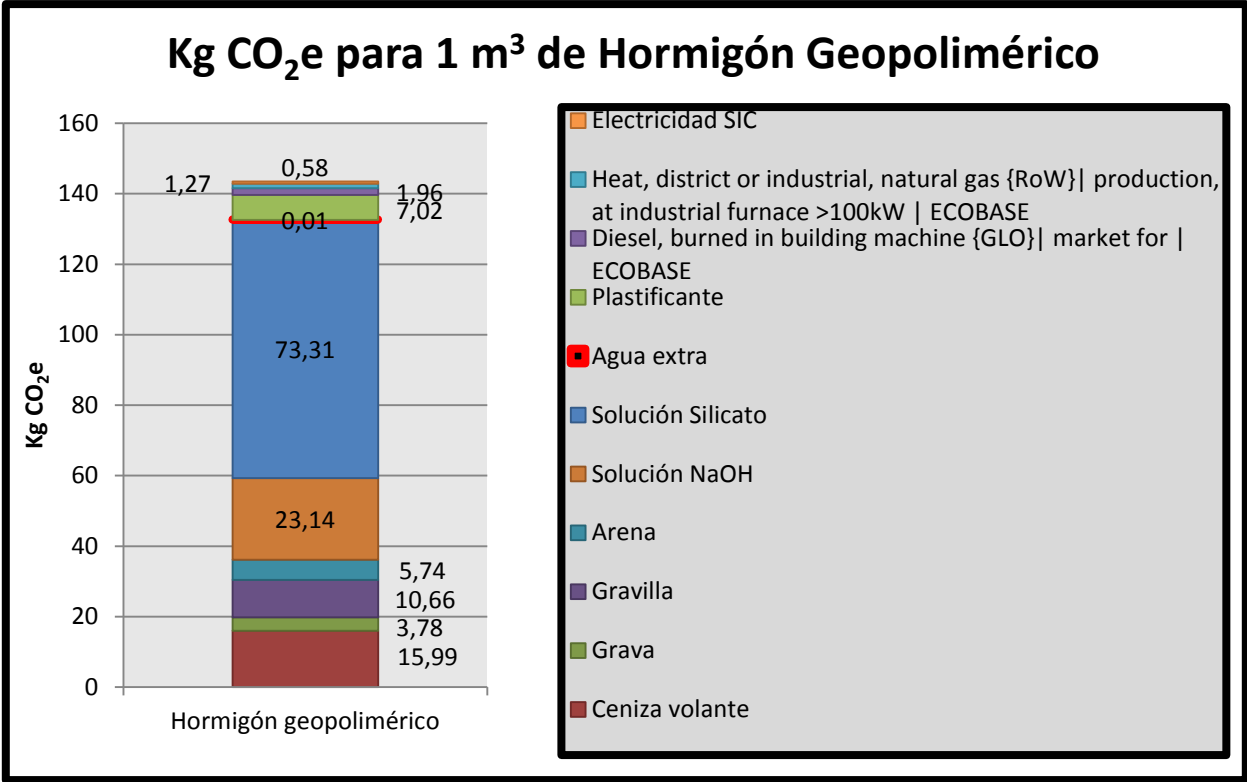


Figura 23 – Gráfico de columna apilada para 1m³ de hormigón geopolimérico, mezcla HGHD.

Es importante señalar que esta estimación de huella de carbono, no incluye las emisiones producidas por el curado a temperatura superior a la del aire ambiente para el HG. Para agregar estas emisiones, se asume un valor de emisión de **39,97 kg CO₂e/m³**, dato presentado el año 2013 en el estudio de Louise K. Turner y Frank G. Collins [53]. Este valor se obtuvo a partir de la auditoría al consumo de gas natural de cuatro fabricantes de hormigón prefabricado que usaban curado a temperatura elevada, 16 horas durante la noche a una temperatura de 50 °C. Para los cálculos expuestos en el estudio se extrapoló a 24 horas más 9 horas de calentamiento gradual.

4.3.2 Huella de Carbono de mezcla HG5.

El detalle de la mezcla estudiada en la memoria de Pedro Díaz, se presenta en la Tabla 23.

Tabla 23 – Detalle mezcla HG5.

Insumo/Producto	Cantidad	Tipo de Transporte		Detalle
Ceniza Volante	420 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	250 Km	
Áridos	1507 Kg			
Grava	234 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	50 Km	
Gravilla	948 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	50 Km	
Arena	325 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	50 Km	
Soluciones Alcalinas	273 Kg			
Solución NaOH	91 Kg	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| market for | ECOBASE	27000 Km	Sodium hydroxide, concentration 14M, without water, {RoW}| chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell Agua, {CL} v1 ECOBASE
Solución silicato de sodio	182 Kg	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	100 Km	Sodium silicate, without water, in 37% solution state {RoW}| production, furnace liquor Agua, {CL} v1 ECOBASE
Agua Extra	40 Kg			
Plastificante	0 Kg			

El combustible y energía usados en esta mezcla, son los mismos usados en la mezcla anterior, véase Tabla 13. Para el cálculo de la huella de carbono se utiliza la herramienta de cálculo elaborada en este estudio [57], obteniendo las tablas de las emisiones de cada materia prima que compone la mezcla.

Cumpléndose las mismas condiciones descritas en la mezcla anterior para el caso de las cenizas volantes, en la Tabla 24 se detallan las emisiones de este material.

Tabla 24 – Emisiones CO₂e para ceniza volante (HG5).

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Ceniza volante	420 Kg	16,46
Ceniza volante sin procesar	420 kg	0
Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | ECOBASE	6,17 MJ	0,53
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace >100kW | ECOBASE	0,55 MJ	0,04
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	105 tkm	15,88

En la Tabla 25, Tabla 26 y Tabla 27 se señala el desglose de emisiones de CO₂e para los áridos usados en este mix. Las consideraciones para cada material/proceso son idénticas a las del caso previo.

Tabla 25 – Emisiones de CO₂e para grava, mezcla HG5.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Grava	234 Kg	3,19
Producción Grava	1,42 CO ₂ e	1,42
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	11,7 tkm	1,77

Tabla 26 – Emisiones de CO₂e para gravilla, mezcla HG5.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Gravilla	948 Kg	9,93
Producción Gravilla	2,76 CO ₂ e	2,76
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	47,4 tkm	7,17

Tabla 27 – Emisiones de CO₂e para arena, HG5.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Arena	325 Kg	3,37
Producción Arena	0,91 CO ₂ e	0,91
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	16,25 tkm	2,46

En la Tabla 28 y Tabla 29 se detallan las emisiones de CO₂e asociadas a las soluciones alcalinas.

Tabla 28 – Emisiones de CO₂e para solución de Hidróxido de Sodio, mezcla HG5.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Solución NaOH	91 Kg	51,36
Sodium hydroxide, concentration 14M, without water, {RoW}| chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell	39,29 Kg	49,97
Agua, {CL} v1 ECOBASE	51,71 Kg	0,01
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	9,1 Tkm	1,38

Tabla 29 – Emisiones de CO₂e para solución de Silicato de Sodio, mezcla HG5.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ -eq
Solución Silicato	182 Kg	129,53
Sodium silicate, without water, in 37% solution state {RoW}| production, furnace liquor	98,94 Kg	85,92
Agua, {CL} v1 ECOBASE	83,06 Kg	0,02
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| market for | ECOBASE	4914 tkm	43,6

En este caso, no se cuenta con un reductor de agua, por ende, no se presenta una tabla asociada a las emisiones de este material.

El agua extra, al igual que en el caso de la mezcla HGHD, para efectos de huella de carbono, es despreciable como se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30 – Emisiones de CO₂e para agua extra, mezcla HG5.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Agua Extra	40 Kg	0,01
Agua, {CL} v1 ECOBASE	40 Kg	0,01

Teniendo las emisiones de cada materia prima necesaria para la fabricación de 1m³ de Hormigón Geopolimérico, se puede obtener la huella de carbono asociada a la mezcla. La huella de carbono para el mix HG5 se presenta en la Tabla 31.

Tabla 31 – Huella de carbono para mezcla HG5.

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO ₂ e
Hormigón Geopolimérico	1 m3	217,66
Ceniza volante	420 Kg	16,46
Grava	234 Kg	3,19
Gravilla	948 Kg	9,93
Arena	325 Kg	3,37
Solución NaOH	91 Kg	51,36
Solución Silicato	182 Kg	129,53
Agua extra	40 Kg	0,01
Plastificante	0 Kg	0,00
Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | ECOBASE	22,7 MJ	1,96
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace >100kW | ECOBASE	16,6 MJ	1,27
Electricidad SIC	4,36 kWh	0,58

El gráfico de columna apilada para la mezcla HG5 se puede observar en la Figura 24, mientras que los gráficos para cada materia prima usada en la elaboración de esta mezcla se presentan en los anexos, específicamente en la sección 7.2.2.

Kg CO₂e para 1m³ de Hormigón Geopolimérico

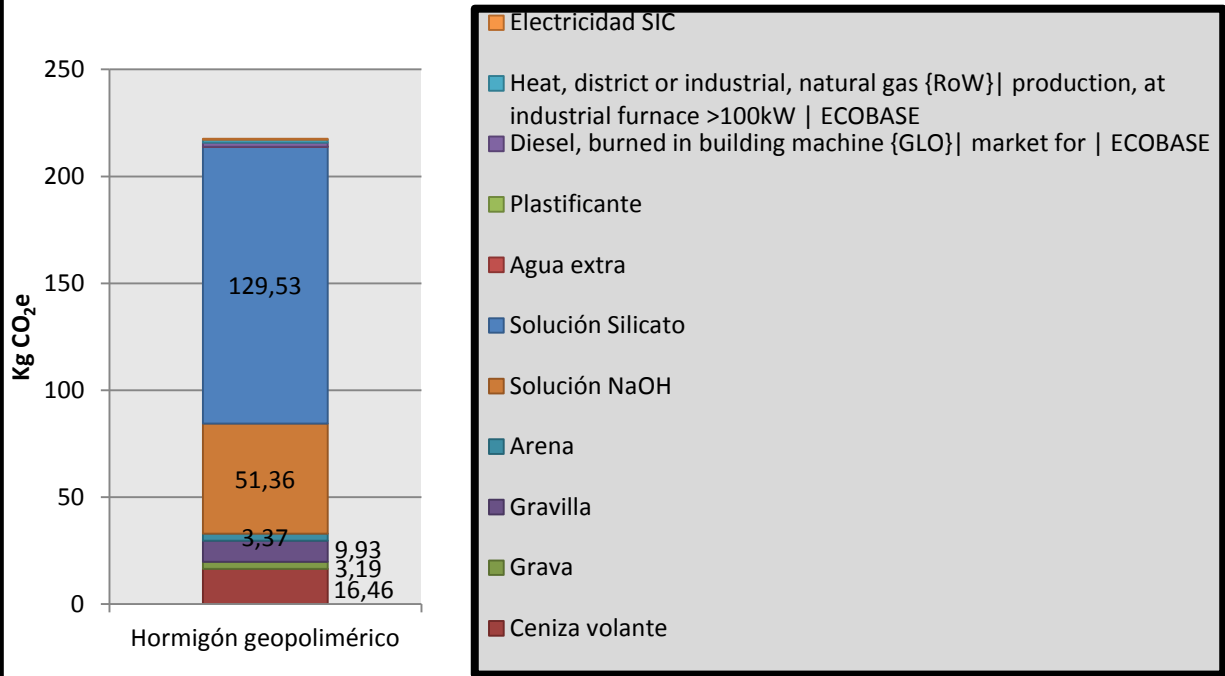


Figura 24 – Gráfico de columna apilada para 1m³ de hormigón geopolimérico, mezcla HG5.

Para añadir las emisiones de CO₂e producto del curado de la mezcla a una temperatura elevada se utiliza el valor descrito en la mezcla anterior (**39,97 kg CO₂e/m³**).

4.4 COMPARACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO CON LA DEL HORMIGÓN EN BASE A CEMENTO PORTLAND ELABORADOS EN CHILE.

Una vez obtenida la huella de carbono del hormigón geopolimérico, se puede realizar una comparación respecto a la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigón en base a cemento hidráulico en el país. Para esto, como se mencionó anteriormente, se ocupa la huella de carbono producto de la modelación hecha por la unidad de Sustentabilidad Organizacional de Idiem en el proyecto Ecobase – Construcción de las mezclas H30 y H40. En la Tabla 32, se presentan los valores de la huella de carbono para las mezclas geopoliméricas y las mezclas en base a cemento hidráulico.

Tabla 32 – Comparación de huella de carbono.

Producto	Huella de carbono
<i>1 m³</i>	<i>Kg CO₂e</i>
Mezcla HGHD	143,5
Mezcla HGHD c/curado	183,5
Mezcla HG5	197,2
Mezcla HG5 c/curado	237,2
H30 Referencial	230,8
H40 Referencial	289,1

En la Figura 25, se muestra un gráfico de los kg CO₂e/m³ asociados a la elaboración de cada una de las mezclas presentadas en este estudio.

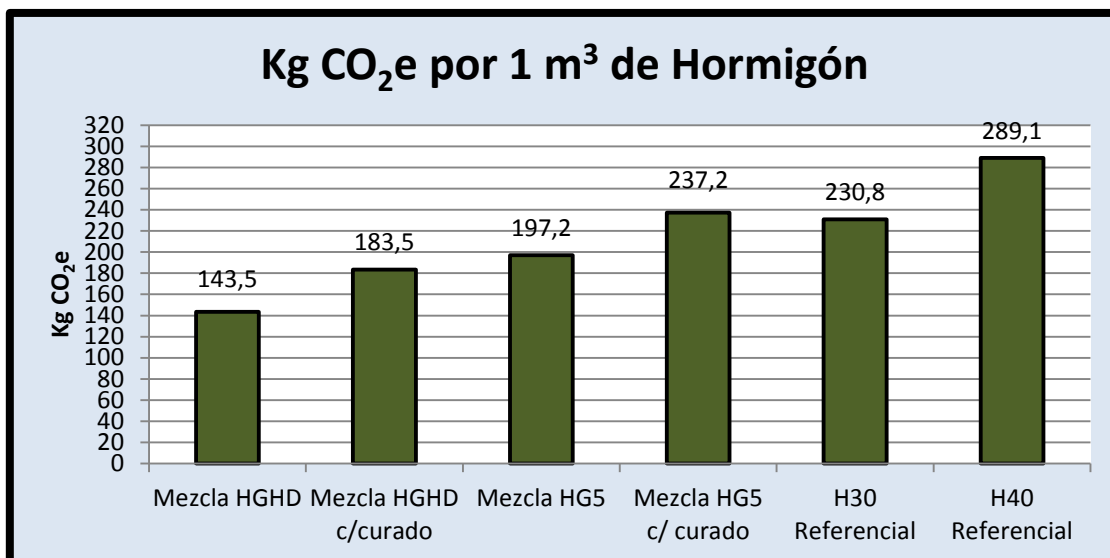


Figura 25 – Gráfico de comparación de kg CO₂e/m³ entre los distintos tipos de Hormigón.

4.5 COSTOS PRELIMINARES DE LAS MEZCLAS.

Adicionalmente, se realiza una estimación preliminar de los costos directos asociados al total de insumos necesarios para la elaboración de las mezclas mencionadas en la Tabla 3. Para esto, en primera instancia se utiliza los precios de mercado para compras al mayor de cada insumo o una estimación adecuada en el caso de insumos menores. La lista de precios unitarios de cada insumo se detalla en la Tabla 33.

Tabla 33 – Precios considerados para los insumos del hormigón.

Insumo	Cantidad [kg]	Precio [€]	Precio unitario [€/kg]
Cemento	42,5	€ 4.000	€ 94
Ceniza volante	42,5	€ 500	€ 12
Hidróxido de Sodio (escamas al 99%)	1000	€ 272.986	€ 273
Solución de Silicato de sodio (razón 2:1)	1000	€ 77.469	€ 77
Grava	2100	€ 8.000	€ 4
Gravilla	1500	€ 10.000	€ 7
Arena	1700	€ 10.000	€ 6
Plastificante (Policarboxilato)	235	€ 166.898	€ 710
Agua Extra (Agua potable)	1	€ 0,83	€ 1

El detalle de los precios unitarios para cada material, se presenta en el siguiente itemizado:

- **Cemento:** Se supone un precio bastante conservador por bolsa de 42,5 kg asumiendo una ganancia del 35% por parte de las distribuidoras, ya que el precio de mercado para el usuario común es de \$5.400 pesos [60,61].
- **Ceniza volante:** Si bien se trata de un desecho, se le atribuye un precio de \$500 pesos por bolsa de 42,5 kg.
- **Soluciones alcalinas:** Se determina un precio de mercado consultando distribuidores industriales del mercado asiático. El **hidróxido de sodio sólido** en escamas con un 99% de pureza tiene un precio de 370 Dólares + IVA por tonelada, mientras que, la **solución de silicato de sodio a una razón de 2:1**, presenta un precio de 105 Dólares + IVA por tonelada [62]. Se considera \$ 620 pesos el dólar.
- **Áridos:** Se fijan valores con los precios típicos del mercado en el país.
- **Plastificante reductor de agua:** Se usa un reductor de agua común, como lo es el caso de CB400 Plastocrete, se tiene un precio de mercado de \$ 166.898 pesos el tambor de 235 kg.
- **Agua potable:** Usando una aproximación simple del precio de mercado de agua potable, se obtiene un valor de \$0,83 pesos el litro, lo cual considerando una densidad de 1kg/lit, se tiene el precio por kilogramo.

Los costos de los materiales usados en la elaboración de 1m³ de hormigón para las diversas mezclas, se especifica en la Tabla 34.

Tabla 34 – Costos estimados para las distintas mezclas de hormigón.

Insumo	Mezcla HGHD		Mezcla HG5		Mezcla H30		Mezcla H40	
	Cantidad [kg]	Costo [\$]	Cantidad [kg]	Costo [\$]	Cantidad [kg]	Costo [\$]	Cantidad [kg]	Costo [\$]
Cemento	0	\$ -	0	\$ -	280	\$ 26.353	360	\$ 33.882
Ceniza volante	408	\$ 4.800	420	\$ 4.941	0	\$ -	0	\$ -
Solución de Hidróxido de sodio, 14M	41	\$ 4.835	91	\$10.732	0	\$ -	0	\$ -
Solución de Silicato de sodio, 2:1	103	\$ 7.931	182	\$14.014	0	\$ -	0	\$ -
Grava	277	\$ 1.055	234	\$ 891	0	\$ -	0	\$ -
Gravilla	1017	\$ 6.780	948	\$ 6.320	990	\$ 6.600	920	\$ 6.133
Arena	554	\$ 3.259	325	\$ 1.912	900	\$ 5.294	890	\$ 5.235
Plastificante	6	\$ 4.261	0	\$ -	0	\$ -	0	\$ -
Agua Extra	22,5	\$ 19	40	\$ 33	140	\$ 116	162	\$ 134
Costo total mezcla [\$]		\$ 32.940		\$ 38.843		\$ 38.363		\$ 45.385

Cabe destacar que para la solución de hidróxido de sodio, solo es necesario 432grs de NaOH sólido por kilo de solución para obtener una concentración molar de 14M.

En la Figura 26, se muestra la estimación preliminar de costos de manera gráfica.

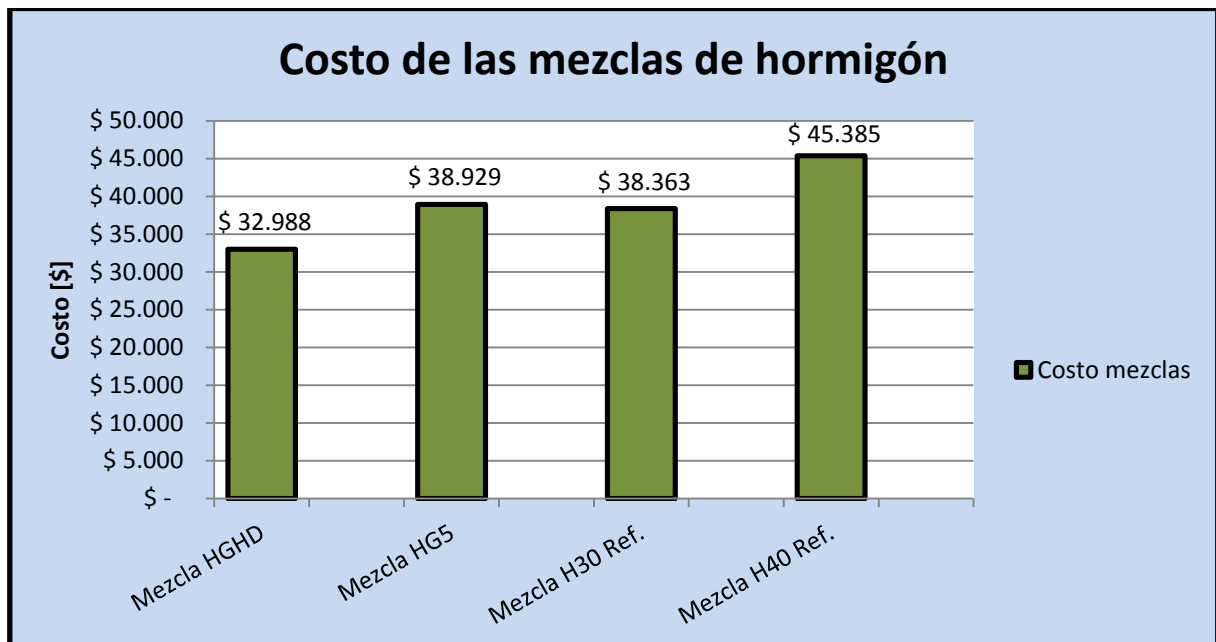


Figura 26 – Gráfica de costos para las mezclas de hormigón.

CAPÍTULO 5:

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1 FUENTES DE ALUMINOSILICATOS EN EL PAÍS.

Las cantidades de cenizas volantes estimadas en este estudio corresponden a valores bastante conservadores. Si se hace una comparación entre la información recopilada de forma directa, es decir, valores de primera fuente, y los valores estimados, se aprecia una diferencia de por lo menos 1.377 toneladas al año de cenizas volantes, donde los valores estimados son menores a los informados por las centrales contactadas. Luego, tomando los valores estimados de ceniza volante producida en el país se puede decir que en el año 2013 en Chile se produjo al menos 1.113.875 toneladas de ceniza volante. Descontando las cenizas volantes producidas por Petropower, CT. Andina y CT. Hornitos, ya que el carbón usado por Petropower trata de pet coke, y las cenizas volantes de las centrales termoeléctricas Hornitos y Andina están concesionadas por la cementera Bio Bío [47]. El 91% de las cenizas volantes producidas es material disponible para ser aprovechado como fuente de aluminosilicato en la elaboración de HG u otras aplicaciones.

En consideración de lo anterior, si se tomara la ceniza volante como la materia prima limitante, se podría producir aproximadamente 2.480.000 m³ de hormigón geopolimérico (408 kg de ceniza volante por m³ de HG), es decir, solo considerando la ceniza volante como fuente de aluminosilicato para la elaboración de hormigón geopolimérico, se satisface aproximadamente el 33% de la demanda de hormigón en el país (~7.500.000 m³/año [63]).

Comparando la composición de la ceniza presente en el carbón usado por la Central Termoeléctrica Angamos respecto a la presente en los carbones analizados en el estudio de emisiones, Tabla 7, se tiene que existe una alta probabilidad que el carbón consumido por la CT. Angamos, sea en su mayoría carbón Bituminoso 3, lo que tendría sentido si se considera el origen cercano de este carbón (Colombia) y su alto poder calorífico respecto de los demás carbones analizados, hecho que resulta favorable a la hora de producir energía eléctrica en una central termoeléctrica.

Con el fin de apreciar de mejor manera la similitud entre estos dos carbones, se presenta la Tabla 35.

Tabla 35 – Composición del carbón usado en CT. Angamos y carbón Bituminoso 3 del estudio de emisiones.

Tipo de carbón	CT. Angamos	Bituminoso 3
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	87,4%	88,5%
SiO_2	59,6%	60,6%
Al_2O_3	18,6%	19,6%
Fe_2O_3	9,3%	8,3%
TiO_2	0,9%	1,0%
CaO	3,1%	2,2%
MgO	1,5%	1,9%
Na_2O	1,9%	0,8%
K_2O	1,6%	2,2%
SO_3	2,4%	2,3%
P_2O_5	0,1%	0,2%

Es posible que exista una cierta correlación entre la calidad de la ceniza volante en cuanto a la composición de aluminosilicato y el poder calorífico del carbón. Los carbones bituminosos generalmente producen cenizas volantes correspondientes a la Clase F, mientras que los sub bituminosos las producen de clase C, y la diferencia de poder calorífico entre estos dos tipos de carbón es considerable. Se observa que todos los carbones bituminosos tienen un poder calorífico sobre las 6.000 kcal/kg, en tanto los carbones del tipo sub bituminosos solo presentan un poder calorífico cercano a las

4.200 kcal/kg. Respecto a lo anterior, y tomando en cuenta la composición de las cenizas volantes producidas en el estudio de emisiones, los mejores 4 carbones, que producirían cenizas volantes de buenas propiedades para la elaboración de hormigón geopolimérico serían Bituminoso 1, Bituminoso 2, Bituminoso 3 y Bituminoso 6.

La extracción de caolín en el país presentó un aumento considerable entre los años 2004 y 2007, luego entre los años 2007 y 2009, se observa una caída sostenida, hasta que en últimos 4 años (2010-2013), la cantidad extraída se ha estabilizado, con una extracción aproximada de 60.000 toneladas al año. Por otro lado, se aprecia que las regiones en donde se extrae el caolín han disminuido. Actualmente, solo en la región metropolitana se está extrayendo este material.

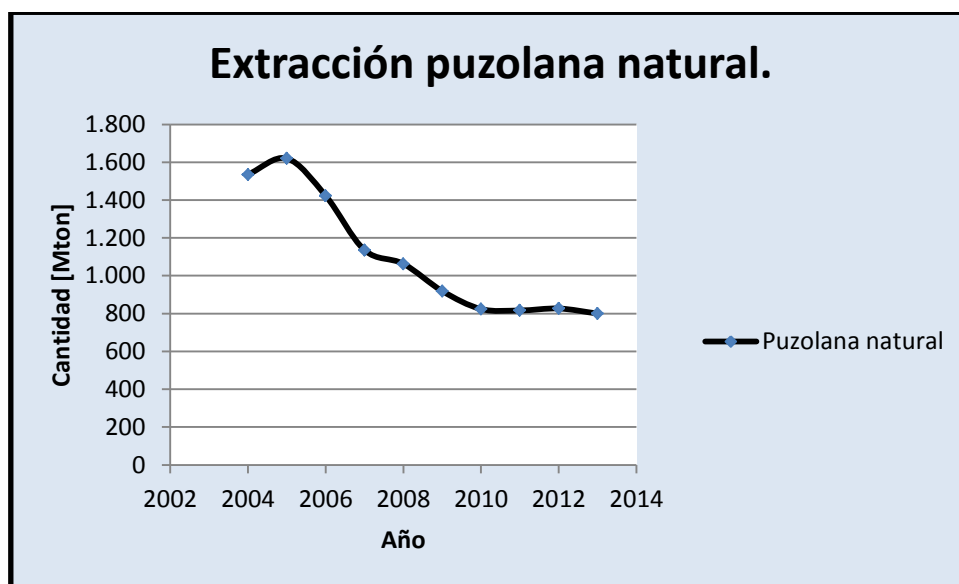
Dada la cantidad extraída y la disminución de regiones en las cuales se extrae, se confirma la premisa relativa a la escasez del material. Según lo comentado previamente, el Metacaolín no sería un recurso disponible en Chile para la elaboración de hormigón geopolimérico.

Tabla 36 – Extracción de Caolín en Chile.



En el caso de la puzolana natural, es clara la disminución de la cantidad extraída a lo largo de los años. Para este material, al igual que para el caso del caolín, se observa una estabilización de la cantidad extraída, aproximadamente de 810.000 toneladas al año.

Tabla 37 – Extracción de puzolana natural en Chile.



5.2 HUELLA DE CARBONO DEL HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO.

Las soluciones alcalinas son las que presentan un mayor aporte de CO_2e a la huella de carbono asociada a la elaboración del hormigón geopolimérico. En la mezcla HG5, las soluciones alcalinas representan el 81% de las emisiones de CO_2e , mientras que en la mezcla HGHD estas representan el 67%. En ambos casos, la solución de silicato de sodio es responsable aproximadamente del 47% de las emisiones de CO_2e . En la Tabla 38 se detallan los porcentajes de incidencia en la huella de carbono asociados a cada proceso o material que intervienen en las mezclas geopoliméricas.

Tabla 38 – Incidencia de Procesos/Materiales con respecto a la huella de carbono de las mezclas.

Proceso/Material	Mezcla HGHD	Mezcla HG5
<i>Ceniza volante</i>	11%	8%
<i>Grava</i>	3%	2%
<i>Gravilla</i>	7%	5%
<i>Arena</i>	4%	2%
<i>Solución NaOH</i>	16%	36%
<i>Solución Silicato de Sodio</i>	51%	45%
<i>Agua extra</i>	0%	0%
<i>Plastificante (Policarboxilato)</i>	5%	0%
<i>Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | ECOBASE</i>	1%	1%
<i>Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace >100kW | ECOBASE</i>	1%	1%
<i>Electricidad SIC</i>	0%	0%

Por otro lado, el agua extra y la electricidad ocupada en la elaboración de las mezclas no tienen un impacto considerable en la huella de carbono de las mezclas.

Las obtención de ceniza volante y de áridos, representan en conjunto cerca del 17% del total de las emisiones de CO₂e para cada mezcla de hormigón geopolimérico. Si se observa con detención el detalle de las emisiones de CO₂e asociadas a estos materiales, Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, Tabla 24, Tabla 25, Tabla 26 y Tabla 27, se ve que la mayor parte de las emisiones se atribuyen a operaciones de transporte de estos materiales, los que se emplean en volúmenes mayores en las mezclas.

Al considerar las emisiones producidas por el curado de las mezclas, se tiene que este proceso está dentro de los tres con mayor incidencia, para el caso de la mezcla HGHD representaría el 22% de su huella de carbono, mientras que, para la mezcla HG5 representa el 17%. Luego, las emisiones de CO₂e producidas por el curado junto con las correspondientes a las soluciones alcalinas de cada mezcla, se tiene cerca del 78% de la huella de carbono para ambas mezclas.

Para poder contrastar las emisiones de CO₂e de las mezclas geopoliméricas con las asociadas a las que se originan en la elaboración del hormigón convencional en base a cemento, se precisa definir un parámetro de comparación. En este estudio,

dicho parámetro trata de la resistencia a la compresión, donde la mezcla HG5 alcanza una resistencia del orden de los 35 MPa, mientras que, la expuesta por Hardjito, D. presenta una resistencia a la compresión cercana a los 46 Mpa.

Según lo anterior, se compara el hormigón H30 con la mezcla HG5 y el hormigón H40 con la mezcla HGHD. Para poder apreciar de mejor manera las diferencias entre las huellas de carbono, se crea la Tabla 39, la cual muestra las diferencias porcentuales de las emisiones de CO₂e de las mezclas geopoliméricas respecto de los hormigones convencionales en base a cemento.

Tabla 39 – Variación porcentual de la huella de carbono respecto de los Kg de CO₂e emitidos por los hormigones convencionales en base a cemento.

Producto	Huella de carbono	Variación porcentual respecto de mezcla H30	Variación porcentual respecto de mezcla H40
<i>1 m³</i>	<i>Kg CO₂e</i>	<i>Δ %</i>	<i>Δ %</i>
Mezcla HGHD	143,5	-38%	-50%
Mezcla HGHD c/curado	183,5	-21%	-37%
Mezcla HG5	197,2	-15%	-32%
Mezcla HG5 c/curado	237,2	3%	-18%
H30	230,8	0%	-20%
H40	289,1	25%	0%

El peor escenario se aprecia en la mezcla HG5, considerando el curado de la mezcla, donde las emisiones de CO₂e superan en un 3% a las presentadas por un hormigón en base a cemento, H30. Esto se debe a que el árido usado en la mezcla HG5 presentaba una alta cantidad de finos, y se hizo necesaria una mayor adición de solución alcalina para poder obtener una mezcla con buena compacidad y resistencia mecánica aceptable. Según la literatura, la razón entre solución alcalina y fuente de aluminosilicatos puede variar entre 0.3 y 0.45. En el estudio de Pedro Díaz, se tomó una razón de 0.65, aumentando considerablemente la cantidad de solución alcalina en sus mezclas.

Con respecto a la mezcla HGHD en comparación a los hormigones en base a cemento (H40), se observa una disminución considerable en cuanto a las emisiones de CO₂e. En el peor caso, se aprecia una reducción de un 37% de la huella de carbono.

5.3 COSTOS.

Al analizar los precios unitarios presentados en la Tabla 33, se observa que el mayor costo unitario lo tiene el aditivo plastificante reductor de agua con un valor de \$710 pesos/kg, pero dado que la cantidad de este material es relativamente baja en comparación al peso total de dosificación de la mezcla geopolimérica, el valor del insumo no representa una incidencia considerable. Por otro lado, como la cantidad de solución alcalina representa un contenido relevante, aunque muy inferior a la de los componentes sólidos, el costo de éstas si influye bastante en el precio final del hormigón geopolimérico, además, en el mercado para este producto se observan diferencias de precios de hasta un 300%.

Comparando los precios finales de cada mezcla, véase Tabla 40, se puede afirmar que en este trabajo de título, el hormigón geopolimérico presenta un costo menor al presentado por las mezclas en base a cemento.

Tabla 40 – Variación porcentual para costo de las mezclas respecto de los hormigones convencionales en base a cemento.

Hormigón	Costo [\$/m ³]	Variación porcentual respecto del H30	Variación porcentual respecto del H40
Mezcla HGHD	\$ 32.988	-14%	-27%
Mezcla HG5	\$ 38.929	1%	-14%
H30	\$ 38.363	0%	-15%
H40	\$ 45.385	18%	0%

CAPÍTULO 6:

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.

De manera general, los resultados permiten vislumbrar el gran potencial que tienen los hormigones geopoliméricos para su posible aplicación como sustitutos del hormigón de cemento Portland. Así mismo, se evidencia el atractivo para el desarrollo de proyectos de investigación innovadores con el objeto de profundizar el entendimiento en aquellos factores que intervienen en las reacciones de geopolimerización que permitan desarrollar materiales más competitivos técnica, económica y ambientalmente.

Dado que el uso de los hormigones geopoliméricos es una tecnología relativamente nueva, aún queda un amplio margen para su optimización, lo que podría conducir a condiciones aún más favorables, tanto técnicas como económicas, por lo que profundizar en su uso y estudio resulta relevante.

Al comparar las emisiones producidas a lo largo del ciclo de vida del HG con respecto a las del hormigón convencional, es posible concluir que, al usar el hormigón geopolimérico se pueden disminuir las emisiones de CO₂e, a la vez que, según la información presente en la literatura analizada se satisfacen los requisitos técnicos del hormigón (resistencia necesaria, resistencia a la corrosión, etc.), mostrando incluso propiedades superiores a las del hormigón convencional.

La disminución del impacto ambiental se debe principalmente a la utilización de materias primas secundarias, como lo son, las cenizas volantes, puzolana natural o bien escorias de alto horno, en lugar de cemento portland que aporta mayoritariamente a la huella de carbono de los hormigones convencionales.

Al comparar la ceniza volante, puzolana natural y caolín, la ceniza volante es la que posee menores emisiones de CO₂e, ya que estas se deben solo al transporte del material, secado y molienda básica (ligera), en caso de que fuese necesario. En el caso de la puzolana natural o bien la escoria granulada se requieren de moliendas altas (molienda fina), así mismo, el caolín necesita ser calcinado para poder transformarlo en Metacaolín y usarlo como fuente de aluminosilicato, por lo cual, estos últimos materiales generan un aumento considerable de la HC.

Para asegurar la sustentabilidad y trabajabilidad del HG es necesaria la utilización de un aditivo plastificante reductor de agua, que permita reducir las cantidades de solución alcalina (silicato de sodio o hidróxido de sodio) en la mezcla, ya que es a este producto al que está asociada la mayor parte de las emisiones generadas por el hormigón geopolimérico.

A partir de la Tabla 34, se concluye que el hormigón geopolimérico es económicamente competitivo respecto al hormigón convencional. Este factor es especialmente relevante si se espera que en un futuro cercano el HG sea una alternativa con impacto real en el mercado, evitando que se vea simplemente como un nicho de sustentabilidad.

El costo del hormigón geopolimérico es altamente dependiente de los proveedores de las materias primas básicas, y del orden de magnitud de las compras, en especial respecto a las soluciones alcalinas, que impactan en un alto porcentaje al valor total de 1m³ de HG.

Dada la cantidad de ceniza volante generada en el país, es factible generar un mercado asociado al Hormigón geopolimérico usando esta materia prima.

Al analizar el escenario mundial, se puede ver que en países desarrollados, altamente industrializados, los materiales de residuo como la ceniza volante y escoria

de alto horno, ya poseen un uso determinado, por lo que se ve poco probable que se destine su uso a la elaboración de HG. En países con economías en ascenso, como son China e India, la ceniza volante y la escoria de alto horno se generan en grandes cantidades, y no poseen un uso ya determinado, por lo que su implementación como fuente de aluminosilicatos en la elaboración de HG resulta ideal como opción de reciclaje.

En vista de la asociación de las centrales termoeléctricas Andina y Hornitos con la cementera Bio - Bio, se podría esperar asociaciones similares de otras centrales termoeléctricas con una planta de hormigón geopolimérico.

Al presentarse un convenio de utilización de las cenizas volantes de alguna central termoeléctrica con una potencial planta productora de HG, será necesaria una estandarización de los combustibles usados por las centrales termoeléctricas, con el fin de normalizar la composición de sus residuos. A futuro, luego de establecer los convenios correspondientes, es necesario crear un conocimiento base en cuanto a las dosificaciones óptimas para la calidad de las cenizas producidas.

Dada la baja producción de Caolín en el país, se debe realizar un estudio de mercado para analizar la factibilidad de importación de este material, con el fin de transformarlo en Metacaolín y producir hormigón geopolimérico en base a este.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Gartner, E., (2004), Industrially interesting approaches to "low-CO2" cements., *Concr Res*, Vol. 34(9), PP.1489-98.
- [2] Huntzinger, DN., Eatmon, TD., (2009), A life-cycle assessment of cement manufacturing: Comparing traditional process with alternative technologies, *J Clean Prod*, Vol. 17(7), PP. 668–75.
- [3] Meyer, C., (2009), The greening of the concrete industry, *Cem Concr Compos*, Vol. 31(8), PP. 601–5.
- [4] Davidovits, J., (1991), Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *J. Therm Anal*, Vol. 37, PP. 1633–56.
- [5] Díaz, P., (2012), Estudio de factibilidad de obtención de hormigones geopoliméricos a partir de desechos minerales, Tesis de Pregrado Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.
- [6] Valenzuela, M., (2013), Estudio experimental de las propiedades de geopolímeros sintetizados a partir de puzolana natural, Tesis de Pregrado Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.
- [7] Stengel, T., Reger, J., Heinz, D., (2009), LCA of geopolymer concrete – what is the environmental benefit?, *Proceedings Concrete 09, 24th Biennial Conf Australian Concrete Institute, Sydney, Concrete Institute of Australia*, PP. 54–62.
- [8] Witherspoon, R., Wang, H., Aravinthan, T., Omar, T., (2009), Energy and emission analysis of fly ash based geopolymers, *Proceedings SSEE int conf – solutions for a sustainable planet, Melbourne. Society for Sustainability and Environmental Engineering*, PP. 1–11.

- [9] Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, JB., Lanta, E., Roussel, N., (2010), Environmental evaluation for cement substitution with geopolymers, Proceedings 2nd int conf sustainable construction materials and technologies, Ancona, Italy, PP. 1–9.
- [10] G., d'Espinose de Lacaillerie, JB., Roussel, N., (2011) Habert, An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends, J Clean Prod, Vol. 19, PP.1229–38.
- [11] McLellan, BC., Williams, RP., Lay, J., van Riessen, A., Corder, GD., (2011), Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, J Clean Prod, Vol. 19, PP. 1080–90.
- [12] van Deventer, JSJ., Provis, JL., Duxson, P., Brice, DG., (2010), Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials, Waste Biomass Valor, Vol. 1, PP. 145–55.
- [13] Duxson, P., Provis, JL., Lukey, GC., Van Deventer, JSJ., (2007), The role of inorganic polymer technology in development of "green concrete", Cem Concr Res, Vol. 37, PP. 1590-97.
- [14] Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, JL., Luckey, GC., Palomo, A., Van Deventer JSJ., (2007), Geopolymer technology: the current state of the art. J Mater Sci, Vol. 42, PP. 2917–33.
- [15] Palomo, A., Grutzeck, MW., Blanco, MT., (1999), Alkali-activated fly ashes, a cement for the future, Cem Concr Res, Vol. 29(8), PP. 1323–29.
- [16] Hardjito, D. y Rangan, BV., (2005), Development and properties of low-calcium fly ash - based geopolymer concrete, Research Report GC 1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.

- [17] Taylor, M., Tam, C. y Gielen, D., (2006), Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry, International Energy Agency.
- [18] Broger, J., Carrasquillo, RL. y Fowler, DW., (1994), Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete, Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, TEMA: 6, PP. 267-74.
- [19] Davidovits, J., (1994), Properties of Geopolymer Cements, First International, PP. 131-49.
- [20] Davidovits, J., (2011), Geopolymer Chemistry and Applications, Geopolymer Institute, Francia, Ed. 3.
- [21] Manz, OE., (1997), Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products, Vol. 76(8), PP. 691-96.
- [22] vom Berg, W. y Feuerborn, HJ. (2001) CCPs in Europe, Proceedings of Clean Coal Day in Japan 2001, Tokyo, Japan. ECOBA (European Coal Combustion Products Association). [Online]. http://www.energiaskor.se/rapporter/ECOBA_paper.pdf
- [23] Uckikawa, H., (1986), VIII Congreso Internacional de la Química del Cemento (Río de Janeiro), Vol. I, TEMA: III, PP. 249-80.
- [24] Estados Unidos de América, American Society for Testing Materials, ASTM C618, (2012), Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete.
- [25] Provis, JL. y van Deventer JSJ., (2014), Alkali Activated Materials, State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AMM, Springer.
- [26] American Coal Ash Association, (2003), Fly ash facts for highway engineers.

- [27] Ahmaruzzaman, M., (2010), A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy*, Vol. 36, PP. 327-63.
- [28] Provis, JL., Lukey, GC. y van Deventer, JSJ, (2005), Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? - A reexamination of existing results, *Chem, Mater*, Vol. 17(12), PP. 3075-85.
- [29] Provis, JL., (2009), Activating solution chemistry for geopolymers. In: Provis, JL. y van Deventer, JSJ. (eds.) *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, PP. 50-71, Woodhead, Cambridge, UK.
- [30] Koloušek, D., Brus, J., Urbanova, M., Andertova, J., Hulinsky, V. y Vorel, J., (2007), Preparation, structure and hydrothermal stability of alternative (sodium silicate-free) geopolymers, *J. Mater. Sci.* Vol. 42(22), PP. 9267-75.
- [31] Feng, D., Provis, JL. y van Deventer, JSJ., (2012), Thermal activation of albite for the synthesis of one-part mix geopolymers, *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 95(2), PP. 565-72.
- [32] Steveson, M. y Sagoe-Crentsil, K., (2005), Relationships between composition, structure and strength of inorganic polymers Part I Metakaolin-derived inorganic polymers, *Journal of Materials Science* 40. PP. 2023 – 36.
- [33] Xu, H. y Van Deventer, JSJ., (2000), The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, *Int. J. Miner. Proc.* Vol.59 (3), PP. 247–66.
- [34] Alonso, S. y Palomo, A. (2001), Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio, *Materials Letters*, Vol. 47. PP. 55–62.
- [35] Criado, M., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. (2007), Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio. Part I: FTIR study, *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 106 (1-3), PP. 180-91.

- [36] Davidovits, J. (2002), 30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. Proceedings Geopolymer 2002 Conference. Melbourne, Australia.
- [37] Glukhovskiy, VD. (1959), Soil Silicates. Gosstroyizdat Ukrainy Publishing, Kiev.
- [38] Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., López Hombrados, C. y Lleyda, J., (2007), Railway sleepers made of alkali activated fly ashconcrete, Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 22, PP. 75-80.
- [39] Husbands, TB., Malone, PG. y Wakeley, LD. (1994), Performance of concretes proportioned with Pyrament blended cement, Technical Report, 3619. Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, PP.103 (CPAR-SL-94-2).
- [40] Allouche, E. y Montes, C., (2010), Geopolymer Coatings for Rehabilitation of Concrete-Based Wastewater Collection Systems. International Congress on modern Materials & Technologies, 12th International Ceramic Congress, Montecatini, Italy, 06/2010.
- [41] Palomo A., Blanco MT., Puertas F., (2003), Procedimiento de obtención de un conglomerante hidráulico basado en la activación cáustica de cenizas volantes. Oficina Española de Patentes y Marcas. Número de Publicación: 2 164 530. Número de Solicitud: 009901161, Fecha de Publicación del Folleto Patente: 01.10.2003.
- [42] Zeobond, E-Crete. [Online]. <http://www.zeobond.com/products-e-crete.html>
- [43] NACIONES UNIDAS. (1998) Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. [Online]. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- [44] Carbon Trust. (2014, Agosto) <http://www.carbontrust.com>. [Online]. <http://www.carbontrust.com/resources/guides/carbon-footprinting-and-reporting/carbon-footprinting>

- [45] Ernst & Young, (2010), Product Carbon Footprint - A study on methodologies and initiative.
- [46] Gobierno de Chile. CNE Comisión Nacional de Energía. [Online]. <http://www.cne.cl/estadisticas/energia/electricidad>
- [47] Power GDF Suez. E - CL, Energía Esencial. [Online]. http://www.e-cl.cl/prontus_ecl/site/artic/20140314/pags/20140314100828.php
- [48] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), (2013). Anuario de la Minería de Chile 2013, Ministerio de Minería, Gobierno de Chile. [Online]. <http://www.sernageomin.cl/sminera-anuario.php>
- [49] Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE). Enfoques metodológicos para el cálculo de la Huella de Carbono. [Online]. <http://www.blog.criterio-sostenible.com/wp-content/uploads/2011/12/2011-09-OSE-ESP-Enfoques-metodol%C3%B3gicos-para-el-c%C3%A1lculo-de-la-Huella-de-Carbono-60p.pdf>
- [50] Publicly Available Specification, PAS 2050, (2008), Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.
- [51] Greenhouse Gas (GHG) Protocol, (2012), Product Life Cycle accounting and Reporting.
- [52] International Standards Organisation ISO/TS 14067, (2013), Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication.
- [53] Turner, Louise K., Collins, Frank G., (2013), Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: Acomparision between geopolymers and OPC cement concrete.
- [54] van Deventer, JSJ.. (2015, Enero) Help for my thesis. Línea de producción del Hormigón Geopolimérico.

- [55] Fundación Chile. Consorcio por la Sustentabilidad. [Online]. <http://www.consorcioporlasustentabilidad.cl/ecobase/construccion/>
- [56] Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT. (2013, 28 de Noviembre) Eficiencia Energética y Construcción Sustentable. [Online]. <http://www.construccion-sustentable.cl/?p=1642>
- [57] Albornoz, JF., (2015). Herramienta para el cálculo de la huella de carbono del hormigón geopolimérico. [Online]. <https://www.dropbox.com/sh/rv84wwx00f8ycuz/AACUm4nHM0qMRoOs0dBsZxgUa?dl=0>
- [58] Trepiana, R. Central Termoelectrica ANGAMOS. [en línea] En: [rtrepiana@aes.com] 25 de Noviembre 2014 [jalborno@ug.uchile.cl],.
- [59] Beltrán, P. ANT. Resp. Su solicitud NoA0040C-Q000091 [en línea] En: [paloma.beltran@redsalud.gov.cl] 17 de Diciembre 2014 [jalborno@ug.uchile.cl],.
- [60] Sodimac. www.sodimac.cl. [Online]. <http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/search/?Ntt=cemento>
- [61] EASY. www.easy.cl. [Online]. <http://www.easy.cl/cemento>
- [62] Made-in-china. Sitio de ventas desde el mercado chino al resto del mundo. [Online]. <http://es.made-in-china.com>
- [63] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile - ICH, (2015). <http://www.ich.cl>. [Online]. http://ich.cl/estadisticas/hormigon/Hormigon_2013.xlsx.zip

ANEXOS.

7.1 FACTORES DE EMISIÓN USADOS PARA LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE EMISIONES DE CO₂E PARA HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO.

Tabla 41 – Factores de emisión, Agua.

Tipo	Factor de emisión
-	kg CO ₂ e / kg
Agua, {CL} v1 ECOBASE	0,000226
Water, completely softened, from decarbonised water, at user {RoW}| production	0,000007
Water, completely softened, from decarbonised water, at user {GLO}| market for	0,000007
Water, deionised, from tap water, at user {RoW}| production	0,001147
Water, deionised, from tap water, at user {GLO}| market for	0,001147
Water, ultrapure {GLO}| production	0,000749
Water, ultrapure {GLO}| market for	0,037739
Water, decarbonised, at user {GLO}| diethyl ether production	0,002328
Water, decarbonised, at user {GLO}| manganese dioxide production	0,001004
Water, decarbonised, at user {RoW}| water production and supply, decarbonised	0,000002
Water, decarbonised, at user {GLO}| market for	0,000002

Tabla 42 – Factores de emisión, Hidróxido de sodio.

Tipo	Factor de emisión
-	kg CO ₂ e / kg
Sodium hydroxide, without water, {RoW}| chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell	1,27
Sodium hydroxide, without water, {RoW}| chlor-alkali electrolysis, membrane cell	1,10
Sodium hydroxide, without water, {RoW}| chlor-alkali electrolysis, mercury cell	1,27

Tabla 43 – Factores de emisión, Silicato de sodio.

Tipo	Factor de emisión
-	kg CO ₂ e / kg
Sodium silicate, without water, in 37% solution state {GLO}| market for	0,91
Sodium silicate, without water, in 48% solution state {GLO}| market for	0,70
Sodium silicate, solid {RoW}| sodium silicate production, furnace process, solid product	0,71
Sodium silicate, without water, in 37% solution state {RoW}| production, furnace liquor	0,87
Sodium silicate, without water, in 48% solution state {RoW}| production, hydrothermal liquor	0,66

Tabla 44 – Factores de emisión, Transporte.

Tipo	Factor de emisión
-	kg CO ₂ e / tkm
Transport, freight, light commercial vehicle {GLO}| market for	1,4582
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {GLO}| market for	0,0945
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO}| market for	0,0803
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {GLO}| market for	0,0816
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO}| market for	0,1503
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {GLO}| market for	0,1322
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}| market for	0,1344
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {GLO}| market for	0,3713
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 {GLO}| market for	0,3562
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {GLO}| market for	0,3608
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {GLO}| market for	0,1950
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 {GLO}| market for	0,1788
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {GLO}| market for	0,1816
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}| market for	0,1276
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}| market for | ECOBASE	0,1276
Transport, freight, light commercial vehicle {RoW}| processing	1,4596
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RoW}|	0,0951
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW}|	0,0805
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}|	0,0818
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}|	0,1513
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}| ECOBASE	0,1513
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}|	0,1325
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RoW}|	0,1347
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}|	0,3722
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 {RoW}|	0,3570
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {RoW}|	0,3617
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}|	0,1955
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 {RoW}|	0,1792
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {RoW}|	0,1821
Transport, freight, lorry, unspecified {RoW}| size-specific lorry transport to generic market for	0,1276
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| market for	0,0089
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| market for | ECOBASE	0,0089
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| processing	0,0089
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| processing | ECOBASE	0,0089

Tabla 45 – Factores de emisión, Policarboxilato.

Tipo	Factor de emisión
-	kg CO ₂ e / kg
Polycarboxylates, 40% active substance {RoW}| production	1,17
Polycarboxylates, 40% active substance {GLO}| market for	1,23

Tabla 46 – Factores de emisión, Diesel.

Tipo	Factor de emisión
-	kg CO ₂ e / MJ
Diesel, burned in building machine {GLO}| market for	0,086
Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | ECOBASE	0,086
Diesel, burned in building machine {GLO}| processing	0,086

Tabla 47 – Factores de emisión, Gas natural (Calor).

Tipo	Factor de emisión
-	kg CO ₂ e / MJ
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at boiler condensing modulating >100kW	0,060
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at boiler modulating >100kW	0,064
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace >100kW	0,064
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace >100kW | ECOBASE	0,076
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| production, at industrial furnace low-NOx >100kW	0,071
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}| market for, district or industrial	0,034

Tabla 48 – Factores de emisión, Electricidad.

Tipo	Factor de emisión
-	kg CO ₂ e / kWh
Electricidad SIC	0,133

7.2 GRÁFICOS DE COLUMNA APILADA PARA CADA MATERIA PRIMA USADA EN LA ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO.

7.2.1 Columnas apiladas para las materias primas de mezcla HGHD.

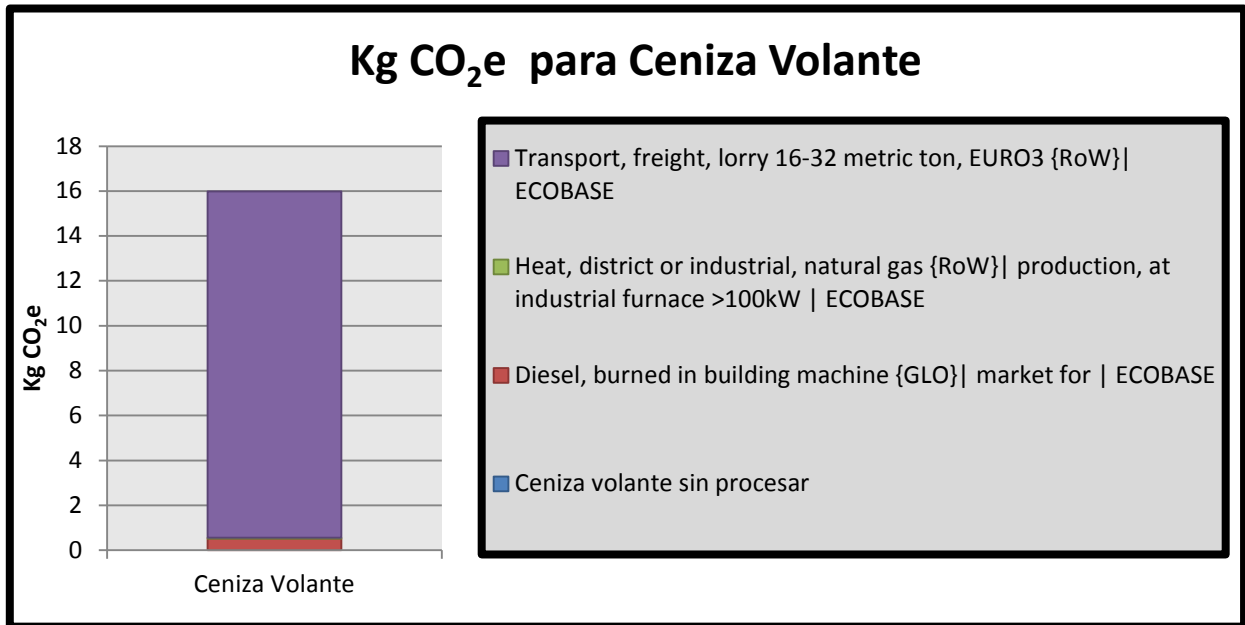


Figura 27 – Detalle kg CO₂e para ceniza volante, Mezcla HGHD.

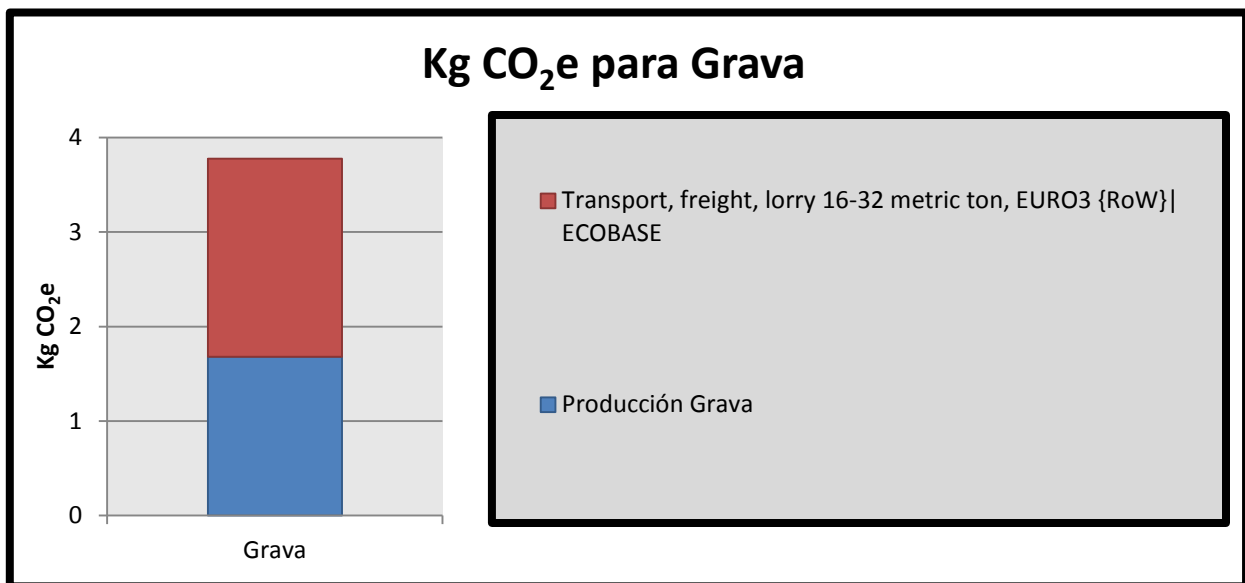


Figura 28 – Detalle kg CO₂e para grava, Mezcla HGHD.

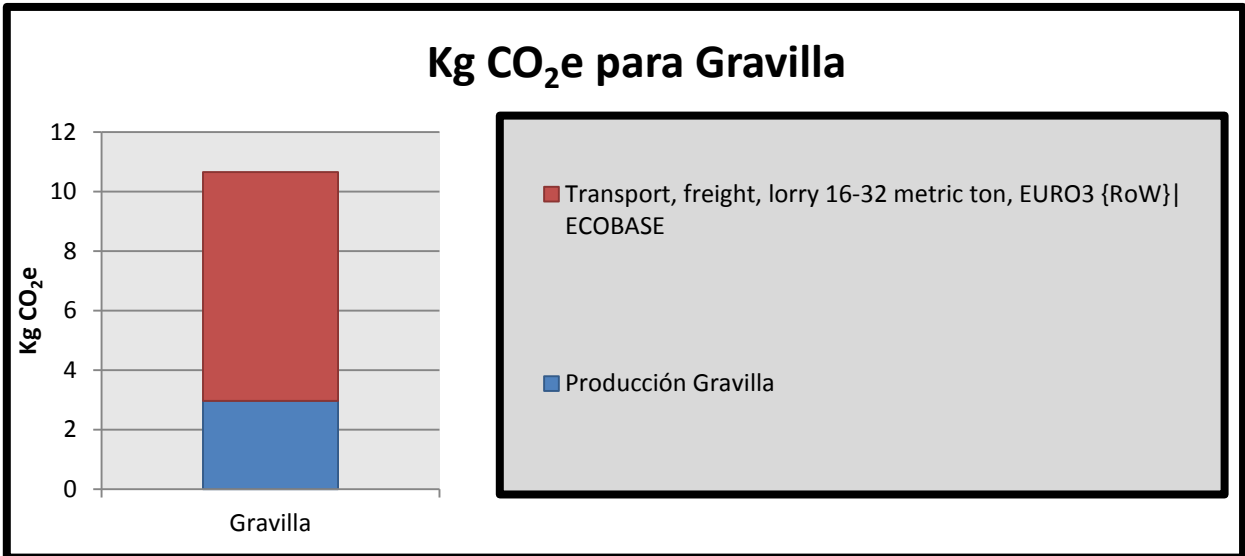


Figura 29 – Detalle kg CO₂e para gravilla, Mezcla HGHD.

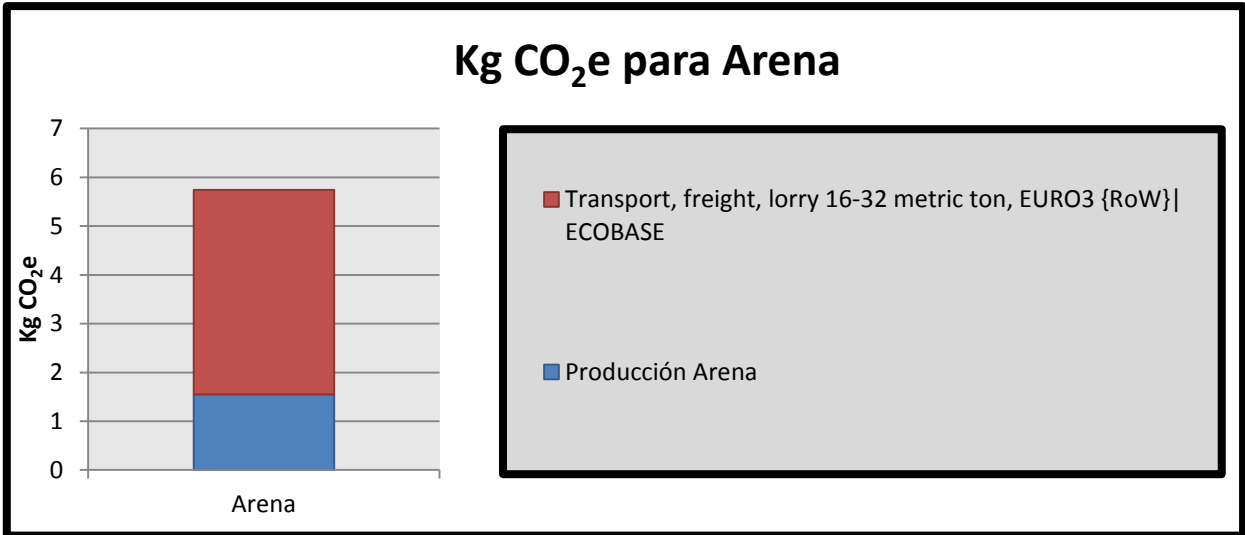


Figura 30 – Detalle kg CO₂e para arena, Mezcla HGHD.

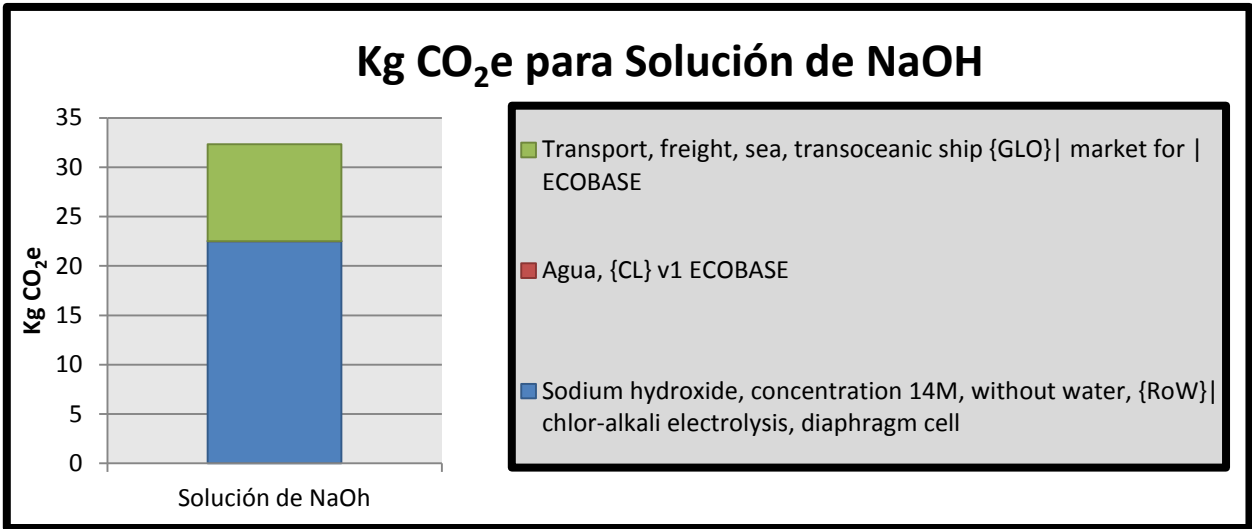


Figura 31 – Detalle kg CO₂e para solución de NaOH, Mezcla HGHD.

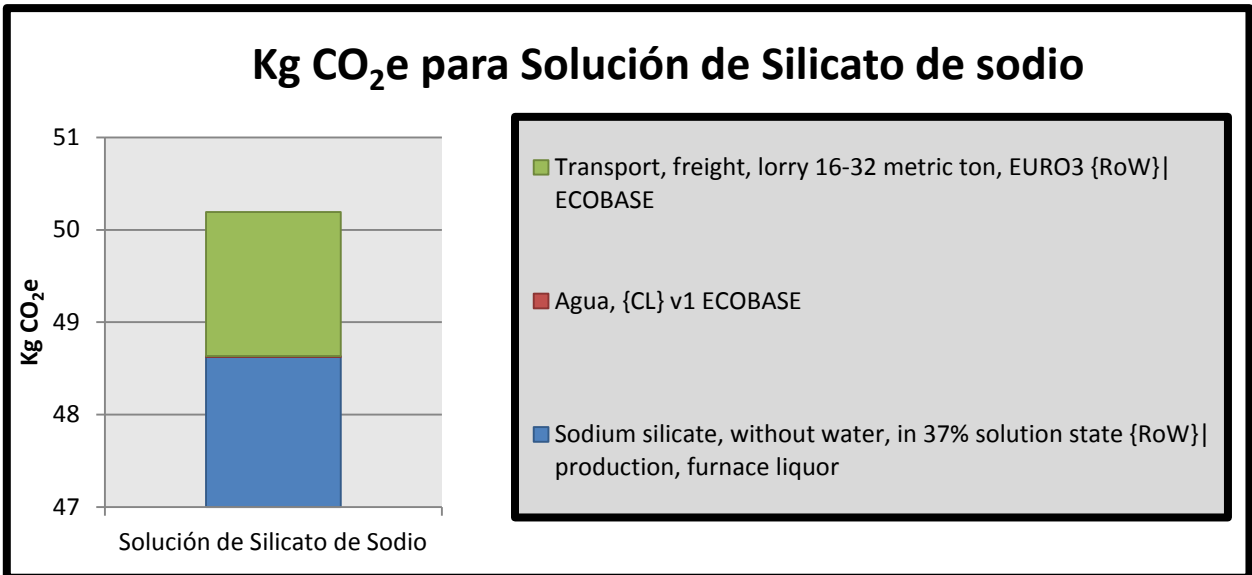


Figura 32 – Detalle kg CO₂e para solución de silicato de sodio, Mezcla HGHD.

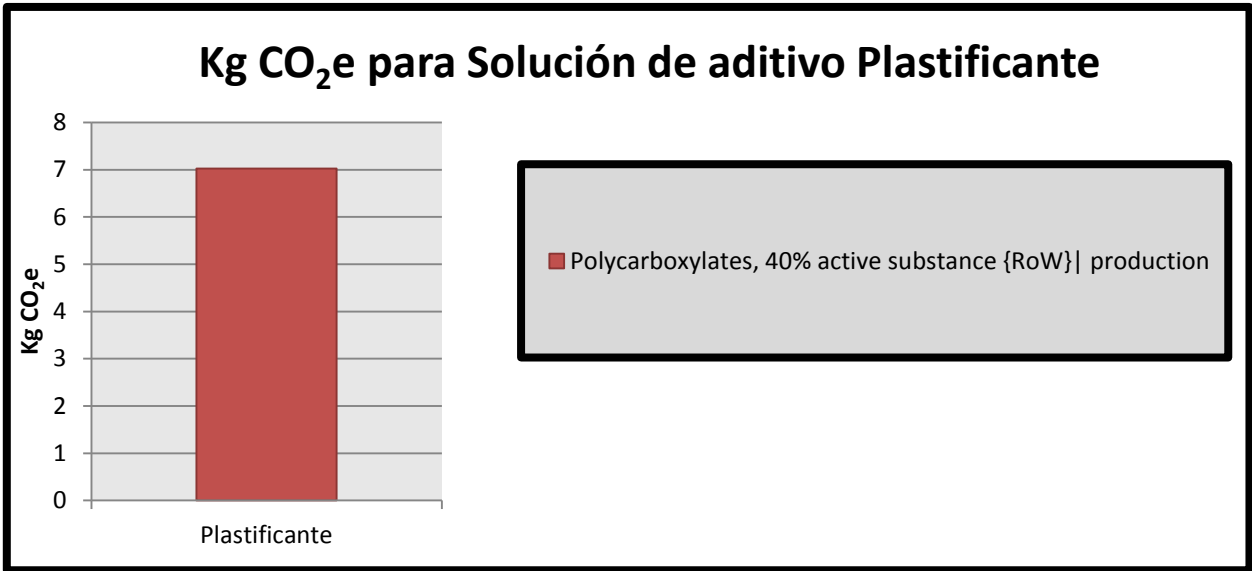


Figura 33 – Detalle kg CO₂e para plastificante, Mezcla HGHD.

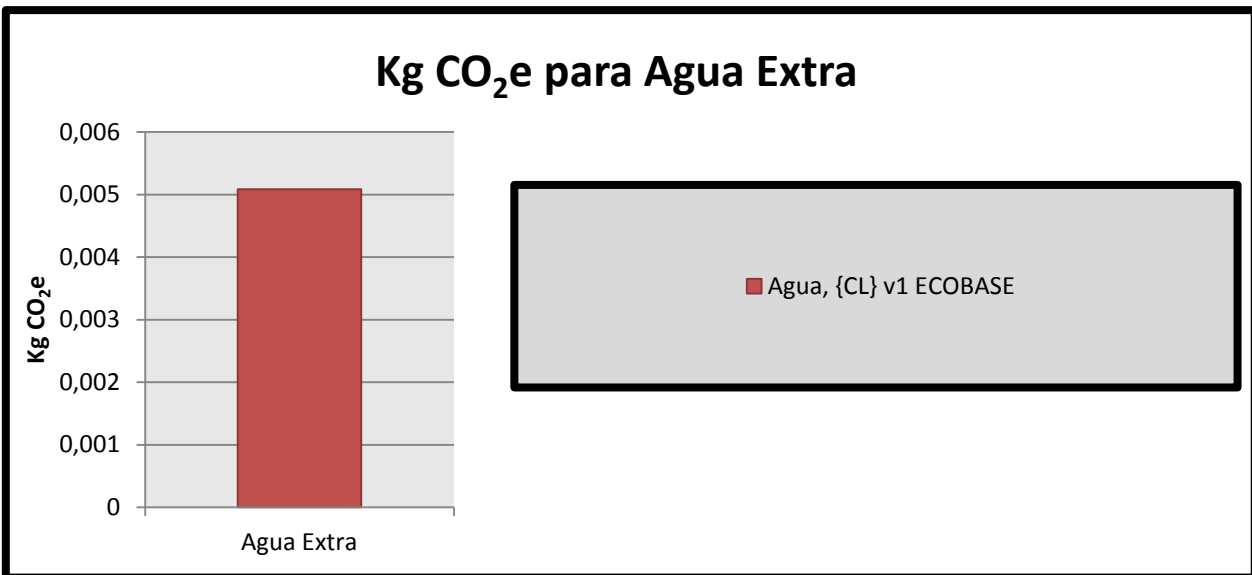


Figura 34 – Detalle kg CO₂e para agua extra, Mezcla HGHD.

7.2.2 Columnas apiladas para las materias primas de mezcla HG5.

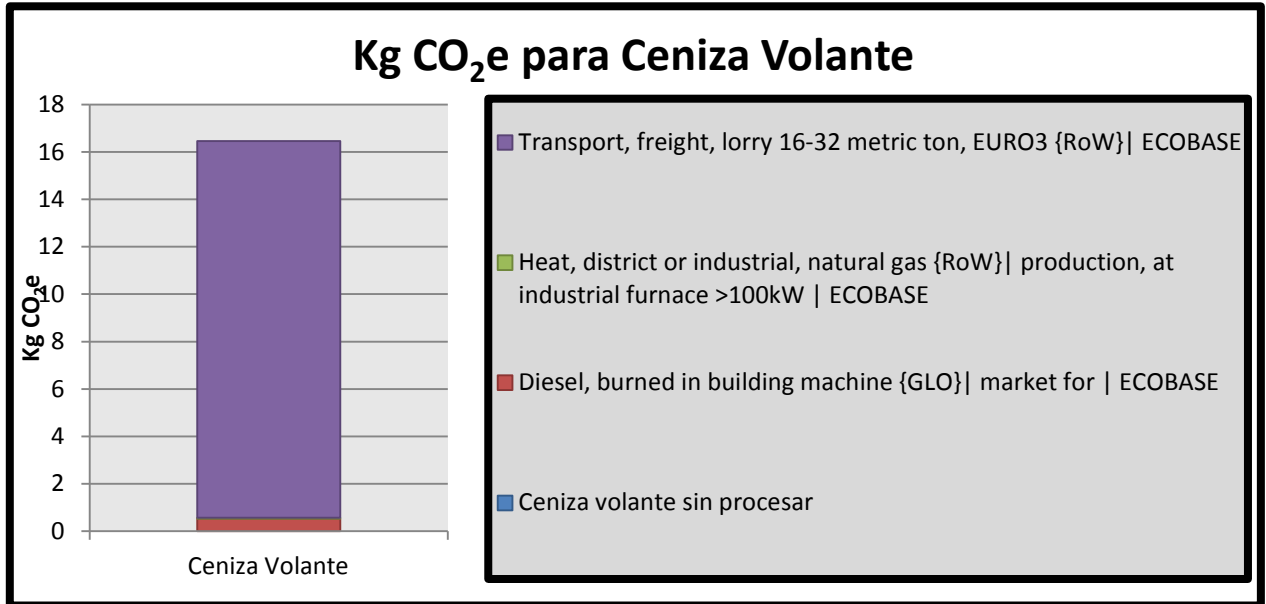


Figura 35 – Detalle kg CO₂e para ceniza volante, Mezcla HG5.

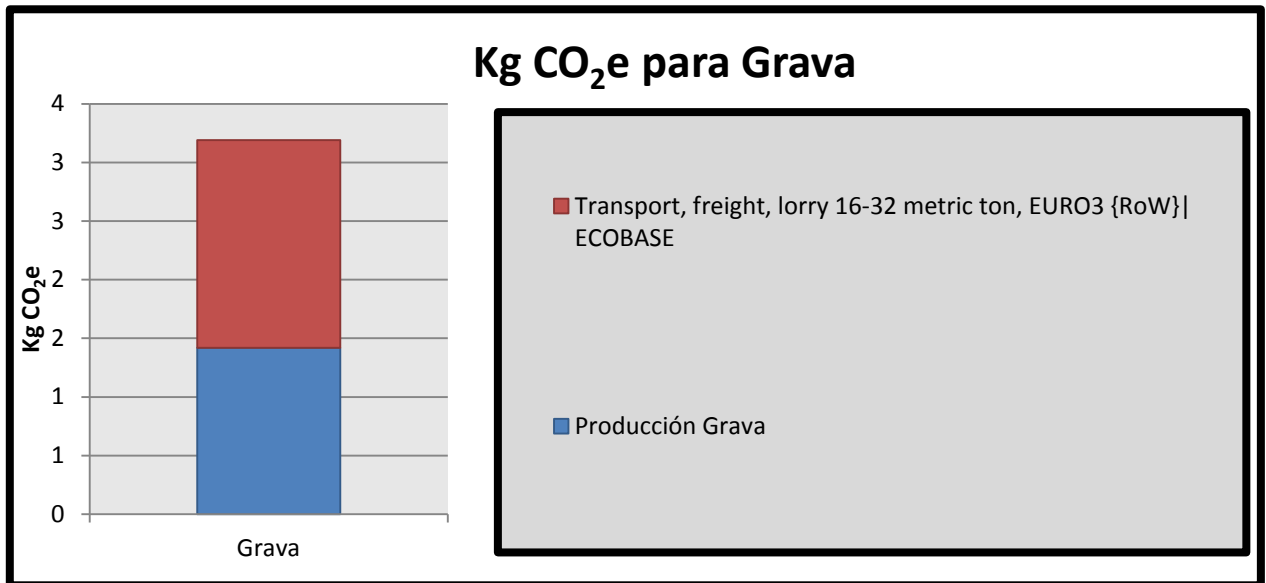


Figura 36 – Detalle kg CO₂e para grava, Mezcla HG5.

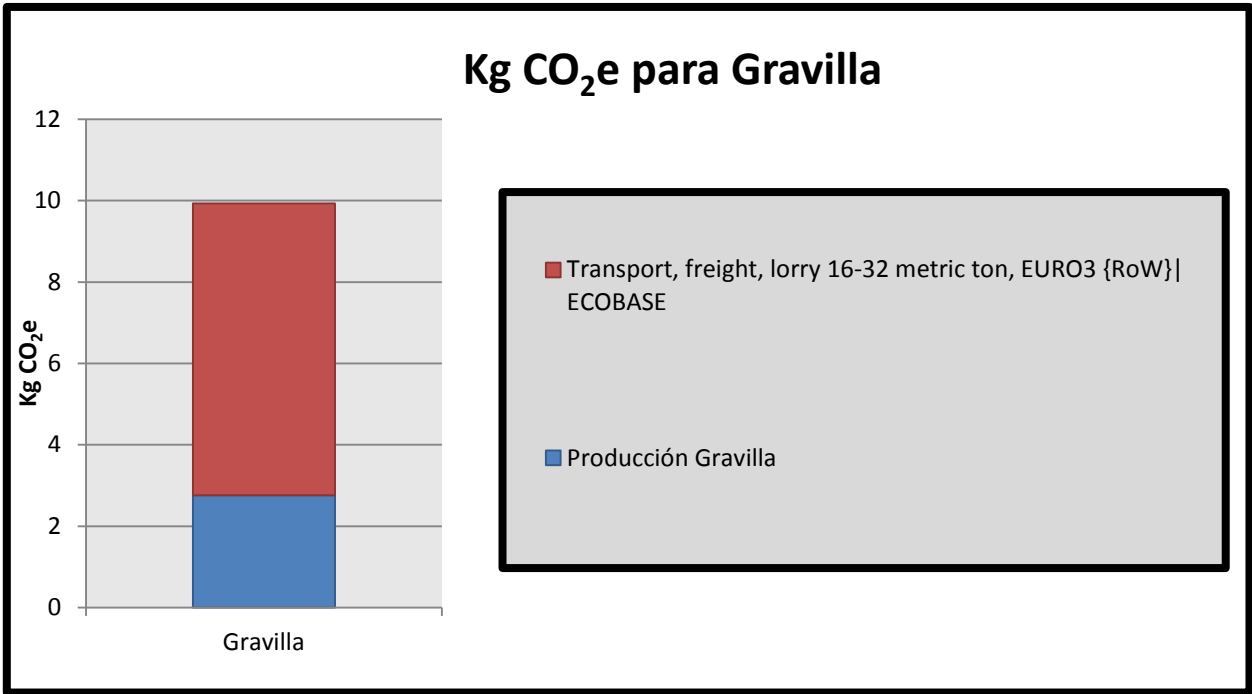


Figura 37 – Detalle kg CO₂e para gravilla, Mezcla HG5.

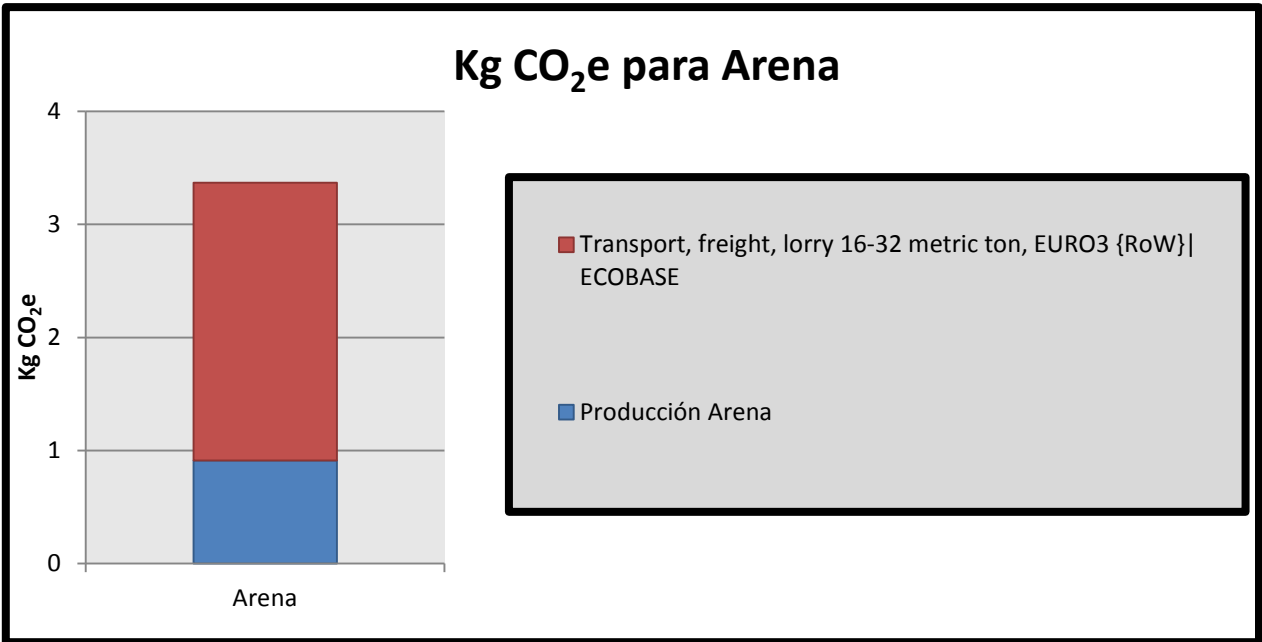


Figura 38 – Detalle kg CO₂e para arena, Mezcla HG5.

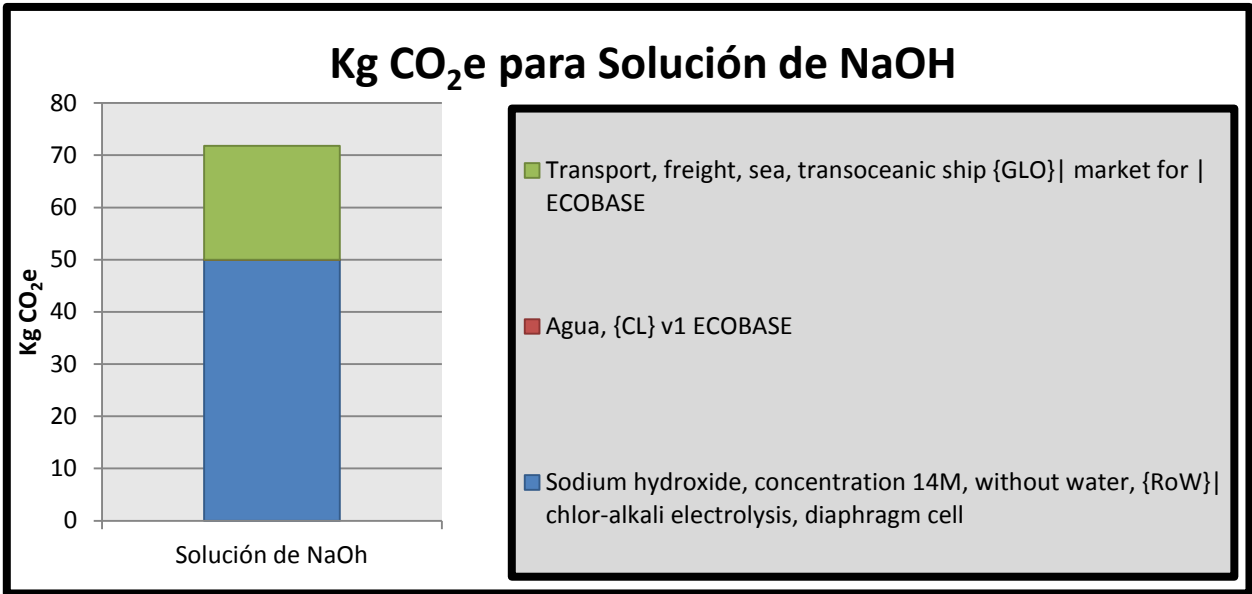


Figura 39 – Detalle kg CO₂e para solución de hidróxido de sodio, Mezcla HG5.

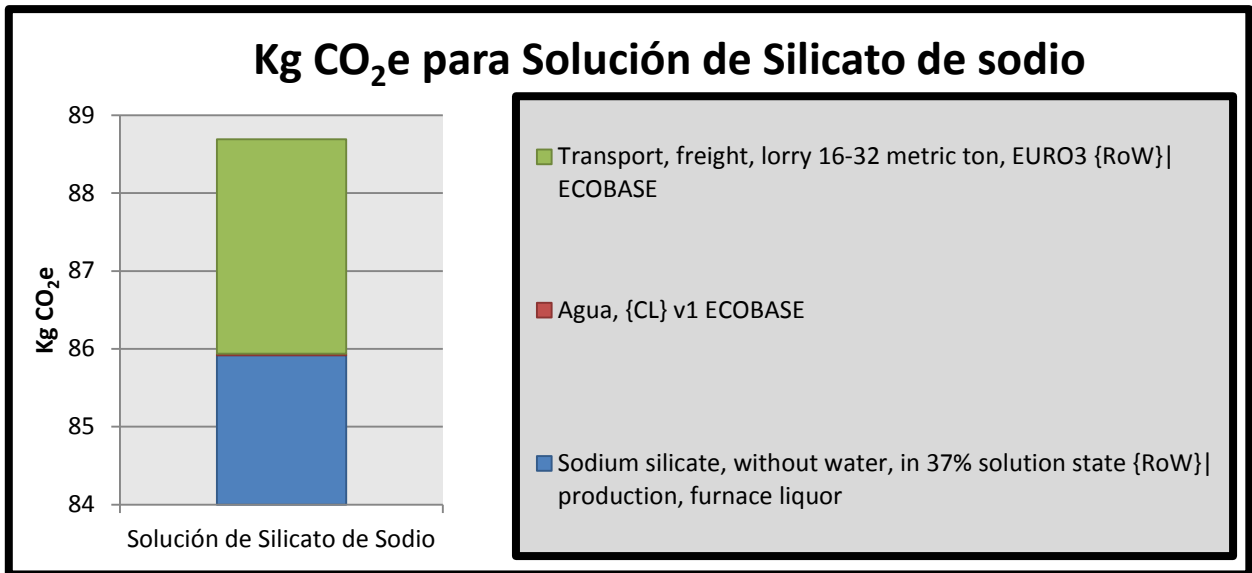


Figura 40 – Detalle kg CO₂e para solución de silicato de sodio, Mezcla HG5.

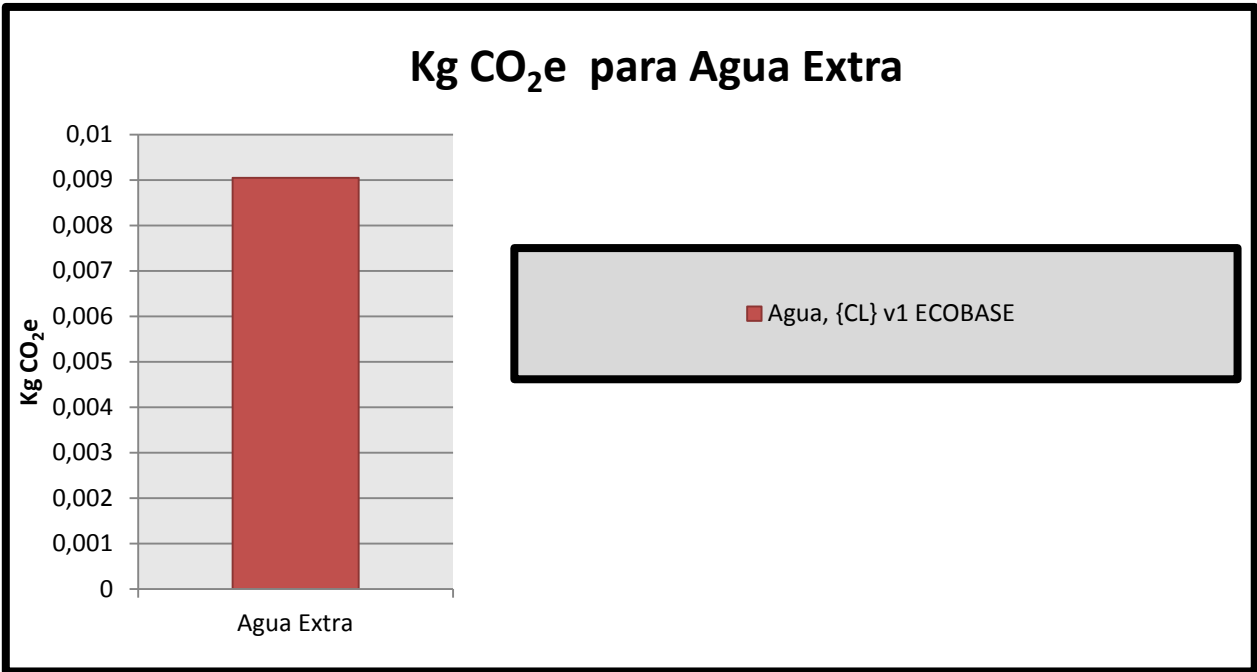


Figura 41 – Detalle kg CO₂e para agua extra, Mezcla HG5.