



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE  
CEMENTO PUZOLÁNICO Y CEMENTO A BASE DE ARCILLAS ACTIVADAS  
TÉRMICAMENTE EN UNA EMPRESA CEMENTERA DE GUATEMALA**

**Christian Andrés Ponce del Cid**  
Asesorado por el Ing. Roberto Díaz Durán

Guatemala, agosto de 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE  
CEMENTO PUZOLÁNICO Y CEMENTO A BASE DE ARCILLAS ACTIVADAS  
TÉRMICAMENTE EN UNA EMPRESA CEMENTERA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CHRISTIAN ANDRÉS PONCE DEL CID**  
ASESORADO POR EL ING. ROBERTO DÍAZ DURÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**  
GUATEMALA, AGOSTO DE 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira de Rossal
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE  
CEMENTO PUZOLÁNICO Y CEMENTO A BASE DE ARCILLAS ACTIVADAS  
TÉRMICAMENTE EN UNA EMPRESA CEMENTERA DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 27 de enero de 2021.



**Christian Andrés Ponce del Cid**





Guatemala 01 de marzo de 2022

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
Director de Escuela Ingeniería Química  
USAC  
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez Mejía:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO PUZOLÁNICO Y CEMENTO A BASE DE ARCILLAS ACTIVADAS TÉRMICAMENTE EN UNA EMPRESA CEMENTERA DE GUATEMALA.", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Christian Andrés Ponce del Cid, quien se identifica con el registro académico 2016-12412 y con el CUI 3016 00449 01 01.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Roberto Andrés Díaz Durán  
ASESOR  
Ingeniero Químico  
Colegiado activo no. 2236

ING. Q. ROBERTO DÍAZ DURÁN  
COLEGIADO NO 2236





Guatemala, 26 de abril de 2022.  
Ref. EIQ.TG-IF.009.2022.

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo 068-2020, le informo que reunidos los Miembros de la Tema nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL**

Solicitado por el estudiante universitario: **Christian Andrés Ponce del Cid.**  
Identificado con número de camé: **3016004490101.**  
Identificado con registro académico: **201612412.**  
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química.**  
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación.**

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Tema han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:


**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA  
PRODUCCIÓN DE CEMENTO PUZOLÁNICO Y CEMENTO A BASE DE ARCILLAS  
ACTIVADAS TÉRMICAMENTE EN UNA EMPRESA CEMENTERA DE  
GUATEMALA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Roberto Andrés Díaz Durán, profesional de la Ingeniería Química**

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ingrid Lora, Ing. en Ingeniería Química, C. 14  
profesional de la Química  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo





LNG.DIRECTOR.135.EIQ.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO PUZOLÁNICO Y CEMENTO A BASE DE ARCILLAS ACTIVADAS TÉRMICAMENTE EN UNA EMPRESA CEMENTERA DE GUATEMALA**, presentado por: **Christian Andrés Ponce del Cid**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
Ing. Williams G. Alvarez Mejia, M.I.Q., M.U.I.E.  
DIRECCIÓN  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, julio de 2022.


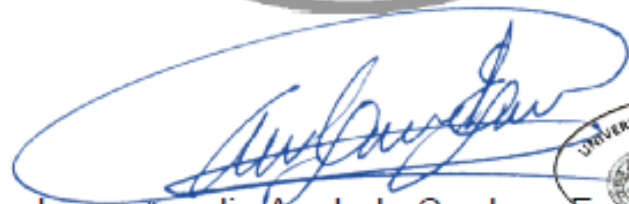




LNG.DECANATO.OI.458.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO PUZOLÁNICO Y CEMENTO A BASE DE ARCILLAS ACTIVADAS TÉRMICAMENTE EN UNA EMPRESA CEMENTERA DE GUATEMALA**, presentado por: **Christian Andrés Ponce del Cid**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, agosto de 2022

AACE/gaoc





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por siempre acompañarme a lo largo de mi vida. Su amor incondicional y bendiciones me permiten alcanzar una meta más.
- Mis padres** Juan Carlos Ponce y Nicté del Cid. Gracias por todo el amor, apoyo y sacrificios en todo el proceso. Sus palabras de ánimos me dieron fuerzas para seguir adelante cada día. Los valores y principios que me han inculcado son la base para alcanzar esta meta.
- Mis hermanos** Juan Carlos y Diego Ponce. Gracias por el apoyo y lecciones aprendidas en vida, y por ser ejemplo de lo que representa la unión familiar.
- Mis abuelos** Hernán Ponce y Alfredo del Cid. Sus ejemplos, consejos y enseñanzas de vida forman parte de la persona que soy hoy en día. Gracias por el legado que dejaron en mi familia y amigos.
- Mis abuelas** Miriam del Cid y Elida Valdéz. Su amor y apoyo han sido parte de este logro. Gracias por las pláticas, regaños y consejos que me permitieron llegar a este punto de mi vida.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Universidad de San Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios, la cual me permitió formarme como profesional. De igual manera, por brindarme las diferentes herramientas para desarrollarme personal y profesionalmente.

### **Facultad de Ingeniería**

Por brindarme todos los conocimientos requeridos, para desempeñarme como ingeniero químico en el ámbito profesional.

### **Mi madre**

Miriam del Cid, por su apoyo y amor incondicional. Sus palabras de ánimo fueron indispensables para seguir adelante en cada paso de la carrera.

### **Mi padre**

Juan Carlos Ponce, por los consejos, amor, apoyo y ejemplo que me ha brindado a lo largo de la vida para formar la persona que soy hoy en día.

### **Mis abuelos**

Hernán Ponce y Alfredo del Cid. Sus enseñanzas, apoyo incondicional, consejos y ejemplos a seguir en vida dejaron un legado en mi para desenvolverme como persona.

**Mi familia**

Por siempre estar presentes, siempre tener buenos deseos y brindar su apoyo incondicional.

**Mi asesor**

Ingeniero Roberto Díaz, por el apoyo, tiempo, paciencia, confianza y compromiso que me ofreció. Por la entrega de transmitir sus conocimientos y despertar en mí, el deseo de seguir aprendiendo más del tema.

**Mi novia**

Por estar siempre a mi lado a lo largo de mi carrera y en cualquier situación. Por su amor y siempre seguir alentándome para seguir alcanzando mis metas.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Cemento Portland.....	5
2.1.1. Hidratación del cemento Portland.....	6
2.2. Cementos hidráulicos adicionados .....	6
2.3. Cemento puzolánico .....	8
2.4. Proceso de producción del cemento.....	8
2.4.1. Extracción de materia prima .....	8
2.4.2. Trituración y prehomogenización.....	9
2.4.3. Molienda de materias primas.....	10
2.4.4. Clinkerización .....	11
2.4.5. Molienda de cemento .....	14
2.4.6. Envasado y paletizado.....	15
2.5. Componentes del cemento.....	16
2.5.1. <i>Clinker</i> .....	16

2.5.2.	Caliza .....	18
2.5.3.	Yeso .....	18
2.5.4.	Puzolanas.....	18
2.5.4.1.	Clasificación de las puzolanas según el origen.....	19
2.5.4.1.1.	Puzolanas naturales.....	19
2.5.4.1.2.	Puzolanas artificiales.....	20
2.5.4.1.3.	Puzolanas mixtas o intermedias.....	20
2.5.5.	Aditivos.....	21
2.6.	Propiedades del cemento.....	21
2.6.1.	Propiedades físicas .....	21
2.6.1.1.	Fineza.....	21
2.6.1.2.	Fraguado .....	22
2.6.1.3.	Resistencia.....	22
2.6.2.	Propiedades químicas .....	23
2.7.	Arcillas.....	26
2.7.1.	Propiedades fisicoquímicas de las arcillas .....	27
2.7.1.1.	Área Superficial .....	27
2.7.1.2.	Plasticidad.....	27
2.7.1.3.	Capacidad de absorción.....	28
2.7.1.4.	Hidratación e hinchamiento .....	28
2.7.2.	Aplicaciones industriales de las arcillas.....	28
2.7.3.	Métodos de activación de las arcillas .....	29
2.7.3.1.	Activación térmica de las arcillas.....	29
2.8.	Gases de efecto invernadero (GEI).....	31
2.8.1.	Emisión de gases de efecto invernadero.....	32
2.8.2.	Remoción de gases de efecto invernadero .....	32
2.8.3.	Sumidero de gases de efecto invernadero .....	32

2.8.4.	Fuente de gases de efecto invernadero .....	32
2.8.5.	Inventario de gases de efecto invernadero .....	32
2.8.6.	Datos de actividad (Da) .....	33
2.8.7.	Factor de emisión de gases de efecto invernadero (Fe) .....	33
2.8.8.	Dióxido de carbono equivalente (CO <sub>2</sub> e).....	33
2.9.	Huella de carbono.....	33
2.9.1.	Huella de carbono de organización .....	33
2.9.2.	Huella de carbono de producto.....	34
2.9.3.	Huella de carbono de eventos .....	34
2.9.4.	Huella de carbono de personas.....	34
2.10.	Alcances de la huella de carbono .....	34
2.10.1.	Alcance 1 .....	34
2.10.2.	Alcance 2.....	35
2.10.3.	Alcance 3.....	35
2.11.	Organismos referentes a la huella de carbono .....	36
2.11.1.	Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC).....	37
2.12.	Estándares y guías para el cálculo de la huella de carbono de una organización .....	37
2.12.1.	ISO 14064.....	37
2.12.1.1.	ISO 14064 – 1.....	38
2.12.1.2.	ISO 14064 – 2.....	38
2.12.1.3.	ISO 14064 - 3 .....	38
2.12.2.	“GHG PROTOCOL” - protocolo de GEI .....	38
2.12.2.1.	Estándar corporativo de contabilidad y reporte del protocolo de GEI .....	39
2.12.2.2.	Estándar de cuantificación de proyectos del protocolo de GEI.....	39

2.12.3.	“BILAN CARBONE” – Balance de carbono .....	39
2.12.4.	PAS 2060:2010 .....	40
2.13.	Tipos de fuentes de emisión de GEI y sus métodos de cálculo .....	41
2.13.1.	Combustión móvil.....	42
2.13.1.1.	Navegación marítima y fluvial.....	42
2.13.1.2.	Ferrocarriles .....	42
2.13.1.3.	Transporte todo terreno.....	43
2.13.1.4.	Transporte terrestre.....	43
2.13.2.	Combustión estacionaria .....	46
2.13.2.1.	Industrias energéticas .....	47
2.13.2.2.	Comercial-Institucional.....	47
2.13.2.3.	Industrias manufactureras y de la construcción .....	47
2.13.2.4.	Residencial y agricultura/ silvicultura/ pesca/ piscifactorías.....	47
3.	METODOLOGÍA .....	51
3.1.	Variables .....	51
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	52
3.3.	Recursos humanos .....	53
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos).....	53
3.4.1.	Equipo para manejo de datos.....	53
3.4.2.	Normas nacionales e internacionales.....	53
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	53
3.5.1.	Cuantificación de la huella de carbono para el cemento puzolánico y cemento en base a arcillas activadas térmicamente.....	54



4.	RESULTADOS .....	59
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	63
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES .....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES .....	77
	ANEXO .....	91



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Reacciones de hidratación del cemento Portland .....	6
2.	Extracción de materias primas del cemento.....	9
3.	Prehomogenización del cemento .....	10
4.	Molienda de materias primas en molino de bolas. ....	11
5.	Equipo de clinkerización en la producción de cemento .....	13
6.	Esquema del proceso de molienda del cemento.....	14
7.	Etapas de paletizado en la producción del cemento.....	16
8.	Pasta de cemento hidratada.....	25
9.	Representación esquemática de la capa tetraédrica y octaédrica .....	26
10.	Tipos de alcances de la huella de carbono .....	36
11.	Árbol de decisión para las emisiones de CO <sub>2</sub> procedentes de la quema de combustibles en vehículos terrestres. ....	44
12.	Árbol de decisión para las emisiones de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O provenientes de la quema de combustibles en los vehículos terrestres .....	46
13.	Árbol de decisión general para estimar las emisiones de la combustión estacionaria. AD: Datos de actividad, FE: Factor de emisión, CC: Control de calidad.....	49
14.	Huella de carbono en los cementos estudiados por formulación de una tonelada de cemento.....	59
15.	Huella de carbono en los cementos estudiados por cada 1000 psi de resistencia en una tonelada de cemento.....	60
16.	Huella de carbono del proceso térmico en el componente principal de los cementos estudiados.....	60

17.	Huella de carbono en el proceso de descarbonatación de la piedra caliza y deshidroxilación de las arcillas.....	61
-----	---	----

## TABLAS

I.	Composición cualitativa y cuantitativa del <i>clinker</i> .....	17
II.	Reacciones de hidratación de los compuestos del cemento Portland (óxidos).....	24
III.	Caracterización de estándares o guías.....	41
IV.	Factores y variables constantes.....	51
V.	Variables independientes.....	52
VI.	Variables dependientes .....	52
VII.	Potenciales de calentamiento global.....	55
VIII.	Factores de emisión de la combustión del diésel de los vehículos todo terreno.....	55
IX.	Factores de emisión de la combustión del diésel de los vehículos livianos.....	56
X.	Factores de emisión de la combustión del diésel de los grupos electrógenos .....	56
XI.	Factores de emisión de GEI en la red eléctrica nacional .....	56
XII.	Factores de emisión para la combustión estacionaria en las industrias manufactureras y de la construcción .....	57

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de calcio
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>gal</b>	Galones
<b>Gg</b>	Giga gramos
<b>g</b>	Gramos
<b>h</b>	Horas
<b>kg CO<sub>2e</sub></b>	Kilogramo de dióxido de carbono equivalente
<b>km</b>	Kilometro
<b>kW</b>	Kilowatts
<b>MJ</b>	Mega Joules
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cubico
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Óxido nitroso
<b>TJ</b>	Tera Joules
<b>ton</b>	Tonelada
<b>TM</b>	Tonelada métrica



## GLOSARIO

<b>Activación térmica</b>	Proceso que requiere una temperatura específica para inducir una reacción química.
<b>Cemento adicionado</b>	Mezcla de <i>clinker</i> y otros componentes molidos que añaden características beneficiosas al utilizarse como material conglomerante.
<b>Cemento puzolánico</b>	Cemento adicionado que contiene en su composición cantidades significativas de puzolana.
<b>GEI</b>	Gases de Efecto Invernadero.
<b>Huella de Carbono</b>	Indicador ambiental que refleja las emisiones de gases de efecto invernadero equivalentes a dióxido de carbono respecto a un individuo, organización u evento.
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
<b>ISO</b>	Organización Internacional de Normalización.
<b>LC3</b>	Limestone Calcined Clay Cement.
<b>NTG</b>	Normativo Técnico Guatemalteco.





## RESUMEN

Con el paso del tiempo es necesario implementar nuevas alternativas e innovar los procesos para reducir la contaminación ambiental. En el área de construcción, se genera gran cantidad de esta debido a su naturaleza en el proceso de producción. Por esto, una empresa cementera en Guatemala busca incorporar un nuevo producto más amigable con el medio ambiente y se crea la necesidad de cuantificar sus emisiones de dióxido de carbono.

El presente trabajo de investigación se realizó con el fin de justificar el beneficio ambiental que presenta la elaboración de un cemento a base de arcillas activadas térmicamente al cuantificar sus emisiones de CO<sub>2</sub> y compararlo con el proceso de fabricación de diferentes cementos puzolánicos tradicionales.

El proceso de cuantificación requirió metodologías y elementos proporcionados por el Panel Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático (IPCC), que son aceptados y utilizados a nivel mundial para la estimación de emisiones de GEI.

Debido a las necesidades específicas de la empresa, se adaptaron las metodologías por medio de los diferentes parámetros a evaluar, obteniendo cantidades estimadas en masa de dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano y óxido nitroso.

Los resultados se expresaron luego en términos de CO<sub>2</sub>eq con el fin de sintetizarlos y facilitar su análisis e interpretación. Se tomaron en cuenta los factores de energía térmica, energía eléctrica, combustibles, agua y distancias recorridas para lograr una cuantificación más aproximada a la realidad.

Luego del procesamiento de datos, se obtuvo que la huella carbono respecto a la formulación de una tonelada de cemento LC3 es 17 % mayor al P.1, 22 % y 34 % menor al P.2 y P.3 respectivamente. Por otro lado, se tiene que la huella de carbono en base al componente principal del cemento LC3 es 39,62 % menor respecto al de los cementos puzolánicos. Por último, se tiene que el proceso de deshidroxilación en las arcillas genera 56,45 % menos emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente comparado al proceso de descarbonatación de la piedra caliza referente a los cementos puzolánicos.

A partir de los resultados obtenidos, se justifica el beneficio ambiental que se tendría al implementar un cemento de arcillas activadas térmicamente en el mercado guatemalteco.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar una evaluación comparativa sobre la huella de carbono por medio de una calculadora electrónica sobre la producción de cemento puzolánico y cemento a base de arcillas activadas térmicamente en una empresa cementera de Guatemala.

### **Específicos**

1. Determinar la huella de carbono emitida por la formulación de una tonelada de cemento a base de arcillas activadas térmicamente y los cementos puzolánicos producidos en la industria cementera guatemalteca.
2. Obtener la huella de carbono emitida por el componente principal del cemento a base de arcillas activadas térmicamente y los cementos puzolánicos producidos en la industria cementera guatemalteca.
3. Establecer la huella de carbono emitida por el proceso de deshidroxilación de arcillas y descarbonatación de la piedra caliza en el cemento a base de arcillas activadas térmicamente y los cementos puzolánicos producidos en la industria cementera guatemalteca.

4. Cuantificar la huella de carbono emitida por cada 1 000 psi de resistencia a la compresión por tonelada en el cemento a base de arcillas activadas térmicamente y los cementos puzolánicos producidos en la industria cementera guatemalteca.

# HIPÓTESIS

## **Hipótesis de investigación**

Es factible en términos ambientales la utilización de arcillas activadas térmicamente para la fabricación de cemento que cumpla las especificaciones técnicas de la normativa nacional vigente, al cuantificar su huella de carbono en diferentes aspectos referente a su producción y compararlos con los diferentes cementos puzolánicos que ya se fabrican en la industria cementera guatemalteca.



## INTRODUCCIÓN

El cemento Portland es un material de construcción catalogado como uno de los más utilizados en el mundo, con una producción de 4 000 millones de toneladas en el año 2016. Considerado también como uno de los más importantes en su sector, debido a esto y otros factores como el crecimiento de población y construcciones, se estima que la producción para el 2050 sea de 3,7 a 4,4 millones de toneladas.

Conjunto con esto, la industria cementera a nivel global es responsable del 5 al 7 % de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> hacia el ambiente. Lo cual representa una problemática que se ha tratado de resolver a lo largo del tiempo utilizando diferentes materias primas no tradicionales, uso de combustibles alternativos y mejoramiento en la tecnología de los equipos utilizados en su producción.

El cemento puzolánico es un derivado del cemento Portland, posee una diferencia respecto a este por medio de la añadidura en el uso de puzolanas naturales o artificiales para mejorar su calidad y rendimiento en cuanto a resistencia y durabilidad. La negativa a este tipo de cemento es que los recursos son limitados variando en cada región y características del suelo donde se encuentre.

Respecto a los cementos tradicionalmente utilizados en la industria, se hace observar que en la etapa de clinkerización (calcinación) es responsable del 50 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso, debido principalmente por la descarbonatación de la piedra caliza al alcanzar los 900 °C, finalmente este

proceso requiere una temperatura de aproximadamente 1 400 °C para poder formarse el *clinker*.

Las arcillas son materiales naturales compuestos fundamentalmente por minerales de tamaño reducido de partícula, plásticos por naturaleza, con cierto contenido de agua que dan lugar al endurecimiento cuando estos se someten a secados con aire o calcinación.

Actualmente, una de las alternativas que ha generado bastante impacto, es el uso de arcillas activadas térmicamente, las que pueden ser utilizadas como reemplazo de *clinker* hasta un 50 %. Esto representa un beneficio ambiental y económico, debido a que necesita temperaturas menores que las utilizadas con materia prima tradicional. La activación térmica se puede realizar en conjunto con la etapa de clinkerización sin necesidad de modificaciones al equipo en uso.

La industria cementera en Guatemala cuenta con la implementación de equipos de última tecnología y utilización de combustibles alternativos en sus procesos de fabricación. Por otro lado, se encuentra en fase de exploración la implementación de cemento en base de arcillas activadas térmicamente, permitiendo la disminución de *clinker* hasta un 10 %.

En este trabajo se realizó una evaluación completa del proceso de elaboración de un cemento a base de arcillas activadas térmicamente y de tres diferentes tipos de cementos puzolánicos, que cumplen con la normativa técnica nacional vigente, enfocado principalmente en la etapa de clinkerización. Por otro lado, se toman en cuenta factores como energía eléctrica consumida, distancias recorridas y consumo de agua para tener valores más reales en cuanto a dichas cuantificaciones.



Durante el desarrollo del presente trabajo se tomaron como guía las distintas herramientas proporcionadas por el protocolo de gases de efecto invernadero y el panel intergubernamental del cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés).

Los resultados obtenidos se expresaron en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente emitidos al ambiente por la industria. Para tener una comparativa válida se descartan los valores de diferentes intervalos de tiempo utilizados y se centraliza en aspectos como formulación de una tonelada, aporte del componente principal, procesos térmicos y resistencia por cada 1 000 psi referente a cada cemento estudiado.

Dichas cuantificaciones de huella de carbono permiten justificar el beneficio ambiental que se tiene al producir cemento LC3 en la industria guatemalteca, debido a que sus emisiones en masa de CO<sub>2</sub> equivalentes son menores en su mayoría comparadas a sus referentes en cementos puzolánicos.



# 1. MARCO CONCEPTUAL

## 1.1. Antecedentes

Por parte de un centro de estudios en Reino Unido, se realizó un estudio de investigación llamado “*Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials. A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements*”<sup>1</sup>, cuyos objetivos fueron la evaluación de diferentes materiales alternativos como metacaolín, silica fume y nano-sílice para el mejoramiento del rendimiento térmico y reducción de la huella de carbono, asociadas a la elaboración y transporte de un cemento novedoso por parte de mezclas respectivas de estas materias primas, a comparación de un cemento Portland tradicional, así mismo su potencial para poder ser reciclados en industrias dedicadas a la fabricación de materiales.

El trabajo denominado “Energía contenida y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador”<sup>2</sup>, tuvo como objetivo cuantificar las emisiones de CO<sub>2</sub> y su consumo energético producidas por una planta cementera en dicho país, determinando que los factores más influyentes para dicha evaluación se deben de enfocar en la etapa de clinkerización, así como el consumo de caliza, combustibles fósiles y electricidad en el proceso.

---

<sup>1</sup> MADDALENA, Riccardo; ROBERTS, Jennifer; HAMILTON, Andrea. *Can portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements*. p. 25.

<sup>2</sup> LEÓN VELEZ, Ana; GUILLÉN MENA, Vanessa. *Energía contenida y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*. p. 13.

“Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico”,<sup>3</sup> es un estudio de tesis elaborado en Cuba, teniendo como objeto principal la evaluación de la temperatura en la etapa respectiva de activación térmica de arcillas que provienen de dicha región y su respectiva evaluación en los productos calcinados para determinar su potencial sustitución en un CPO.

El estudio “Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas,”<sup>4</sup> tuvo como procedimiento la elaboración de puzolanas artificiales partiendo de la activación térmica en arcillas con pureza limitada, determinando su implementación alternativa respecto al metacaolín logrando un incremento evidente en dicha actividad puzolánica, debido por su alto consumo de HC en pastas de cemento, y un mejoramiento en su resistencia mecánica en morteros.

La investigación denominada “Empleo de arcillas caoliniticas de bajo grado activadas térmicamente como una alternativa para el reemplazo parcial de cemento Pórtland,”<sup>5</sup> se basó en el desempeño en la reactividad puzolánica en sus productos calcinados, provenientes de un material arcilloso de Cuba, con bajo porcentaje de caolinita en su composición química y su respectivo potencial como parcial alternativa en un cemento Portland tradicional. Este determinó que su composición arcillosa se defina principalmente de 40 % de Caolinita-Montmorillonita-Illita y debido a sus bajos contenidos de Caolinita resultó en una reactividad puzolánica satisfactoria con sistemas de hasta 30 % reemplazo de *clinker* en un cemento Portland.

---

<sup>3</sup> ALVAREZ VIDAL, Anibal. *Activación térmica de arcillas de la región de cayo guam para su aprovechamiento como material puzolánico*. p. 3.

<sup>4</sup> CASTILLO, Rancés; FERNÁNDEZ, Rodrigo; ANTONI, Mathieu; SCRIVENER, Karen; ALUJAS, Adrián; MARTIRENA, José. *Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas*. p. 5.

<sup>5</sup> MARTIRENA HERNANDEZ, Jose Fernando; ALUJAS, Adrian; QUINTANA, Rafael. y FERNÁNDEZ, Rodrigo. *Empleo de arcillas caolíníticas de bajo grado activadas térmicamente como una alternativa para el reemplazo parcial de cemento Pórtland*. p. 1.

“Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clinker–arcilla calcinada–caliza (LC3),”<sup>6</sup> es un estudio donde se analizaron arcillas provenientes de dos diferentes yacimientos en una región de Cuba. Con el objetivo de la su determinación como de uso como materiales alternativa en la elaboración de cementos con materiales *clinker–arcilla calcinada–caliza*.

“Investigación sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de arcilla cocida”<sup>7</sup> en 2001, se realizó con el objetivo de identificar la opción en la utilización de materiales de desecho que provienen de arcilla cocida y procesada como material puzolánico y comparar los resultados con distintos residuos industriales, estos son ceniza y silica fume, materiales usados generalmente para elaborar hormigones y morteros.

En Hong Kong se elaboró un artículo de investigación denominado: “*Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready-mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong,*”<sup>8</sup> este cuantifica la huella de carbono en los materiales de construcción utilizados en Hong Kong considerando los factores locales que influyen en dicha medición y como las características específicas de la región afectan la medición, siendo uno de los países con mayor aporte en dichas emisiones a nivel mundial ya que el 85 % de estas provienen del sector de construcción.

---

<sup>6</sup> ALMENARES REYES, Roger S; ALUJAS DÍAZ, Adrián; POLL LEGRÁ, Lisandra; BASSAS NOA, Pedro R; BETANCOURT RODRÍGUEZ, Sergio; MARTIRENA HERNÁNDEZ, José F.; LEYVA-RODRÍGUEZ, Carlos A. *Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer–arcilla calcinada–caliza (LC 3)*. p. 1.

<sup>7</sup> SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I; FRÍAS, M; RIVERA, J; ESCORIHUELA, M. J. & MARÍN, F. P. *Research about the pozzolanic activity of waste materials from calcined clay*. p. 13.

<sup>8</sup> ZHANG, Jingliang; CHENG, Jack; LO, Irene. *Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong*. p. 14.

La investigación titulada como “*Methodology for calculating carbon dioxide emission in the production of ready-mixed concrete*”<sup>9</sup>, posee el objeto de demostrar una metodología de cálculo para las emisiones de CO<sub>2</sub> durante el proceso industrial de concreto premezclado tomando en cuenta factores como obtenciones de materia prima y los procedimientos de elaboración de las compañías cementeras.

El trabajo llamado “*Análisis de la huella de carbono de una industria de concreto y agregados en sus tres alcances*”<sup>10</sup>, tuvo como objetivo el análisis en la huella respecto a emisiones de CO<sub>2</sub> de una industria concretera, evaluado en los tres diferentes alcances. Así mismo se comparó los alcances de estas emisiones y se propusieron estrategias de reducción y oportunidades de mejora en reducir dicha contaminación atmosférica provenientes este sector.

En un estudio denominado “*Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica*”<sup>11</sup>, se analizó la activación térmica de material arcilloso proveniente de Argentina para su utilización como material puzolánico. Con el propósito de seleccionar diferentes arcillas caolinitas y bentonitas obtenidas en diferentes partes de este país. Al basarse en su caracterización, se estudió su proceso de activación, y la actividad puzolánica, la cual se utilizó para obtener una estimación en la reducción energética y de dichas emisiones, con el fin de proponer la producción de materias alternas para el procesamiento de Cemento Portland.

---

<sup>9</sup> SUKONTASUKKUL, Piti. *Methodology for calculating carbon dioxide emission in the production of ready-mixed concrete*. p. 12.

<sup>10</sup> GUEVARA PÉREZ, Américo. *Bebidas carbonatadas*. p. 124.

<sup>11</sup> TIRONI, Alejandra. *Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica*. p. 12.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Cemento Portland

El cemento es un material aglomerante inorgánico; posee propiedades adherentes y cohesivas que, por reacciones de hidratación, endurece y desarrolla resistencia manteniéndola en el transcurso del tiempo.

Según la NTG-41095, el cemento Portland es un conglomerante hidráulico, elaborado a partir del *clinker* y está compuesto por la mezcla en proporciones previamente establecidas de sulfato de calcio, hasta un 5 % en masa de caliza y otros componentes minerales minoritarios y aditivos de proceso. Estos pasan por procesos de molienda, homogeneización y calcinación para poder ser producido. Este material de construcción posee la característica que, al ponerlo en contacto con el agua, da lugar a propiedades de fraguado y endurecimiento. Estas propiedades se pueden llevar a cabo tanto al aire como sumergido en agua, siendo estables en ambos medios.

La composición química media de un cemento Portland está formada por un 62,5 % de CaO, 21 % de SiO<sub>2</sub>, 6,5 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, un 2,5 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y otros compuestos en menor proporción. Estos componentes no se encuentran libres en el cemento, sino en forma de silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, que son los componentes hidráulicos o componentes de mayor importancia en este.<sup>12</sup>

---

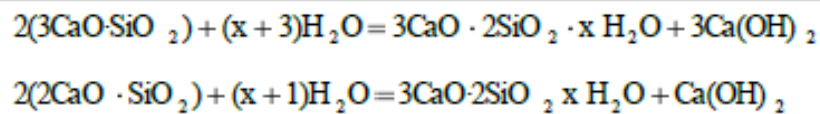
<sup>12</sup> CALLEJA, José. *Materiales de construcción*. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>. Consulta: 11 de noviembre de 2020.

### 2.1.1. Hidratación del cemento Portland

Cuando el cemento Pórtland es mezclado con agua ocurren una serie de reacciones químicas responsables del endurecimiento de la pasta que se genera, a estas reacciones se les conoce como reacciones de hidratación y los compuestos químicos resultantes de estas reacciones, como productos de hidratación o hidratos. La hidratación del silicato tricálcico (Alita), conduce a la formación del hidróxido de calcio y de silicatos de calcio hidratados, que son denotados de manera genérica como silicato de calcio hidratado.

Las dos principales reacciones de hidratación, que originan el proceso de fraguado y endurecimiento en el cemento Portland son:

Figura 1. **Reacciones de hidratación del cemento Portland**



Fuente: JIMENEZ MONTOYA, Pedro; GARCIA, MESEGUER, Álvaro. y MORÁN CABRÉ Francisco. *Hormigón armado*. p. 329.

### 2.2. Cementos hidráulicos adicionados

Los cementos hidráulicos adicionados, los define la NTG-41095 como dos o más ingredientes inorgánicos; uno de ellos es cemento Portland y el otro aditivo, que separados o unidos contribuyen al mejoramiento de las propiedades del cemento como resistencia, entre otras. Estos pueden ser fabricados en molienda conjunta o por otros procesos de mezclado. Se pueden clasificar según sus usos, siendo estos:



- Tipo UG: Cemento hidráulico para uso general. Utilizado en cualquier tipo de obra sin importar el tamaño de esta, donde no se exija propiedades especiales del cemento.
- Tipo AR: Alta resistencia inicial. Este se presenta como la opción a utilizar donde se necesiten resistencias iniciales altas, y desencofrado rápido.
- Tipo DLR: desarrollo lento de resistencia. Normalmente se despacha a granel y funcional para estabilización de suelos y construcción de presas.
- Tipo MRS: moderada resistencia a los sulfatos. Utilizado en concretos utilizados en agua y suelo que están expuestos a concentraciones regulares de sulfatos de calcio, sodio y magnesio. Como en los ambientes cercanos a cuerpos de agua.
- Tipo ARS: alta resistencia a los sulfatos. Para concretos expuestos a altas concentraciones de sulfatos de calcio, sodio y magnesio.
- Tipo MCH: moderado calor de hidratación. Utilizado en ambientes muy calurosos y en construcciones donde existe el riesgo de fuertes retracciones por variaciones térmicas y riesgo de fisuración.
- Tipo BCH: bajo calor de hidratación. Se utiliza cuando interesa que el concreto desarrolle poco calor a partir de la hidratación del cemento, como es el caso de las presas de concreto, bases de grandes dimensiones y otras construcciones masivas.

### **2.3. Cemento puzolánico**

Se denomina cemento puzolánico a la mezcla de cemento Portland con puzolanas ya sean naturales o artificiales. La utilización de las puzolanas en el cemento Portland, genera una disminución del calor de hidratación debido a que tienen una menor presencia los compuestos responsables del aumento en la temperatura durante el fraguado del cemento. Esto implica una generación de ventajas en el cemento como menos capilares, mayor densidad y menor cantidad de agua necesaria para el curado de los elementos elaborados con este tipo de mezclas. Además, estas adiciones activas mejoran el desarrollo de la resistencia mecánica y la durabilidad en las aplicaciones del cemento como la elaboración de morteros y hormigones.<sup>13</sup>

### **2.4. Proceso de producción del cemento**

El proceso de producción del cemento se subdivide en las siguientes etapas:

#### **2.4.1. Extracción de materia prima**

Se inicia por medio de la extracción de las materias primas de las canteras, donde se encuentran los componentes minerales necesarios, es decir, la caliza, arcilla y esquisto para la elaboración del *clinker*. Este proceso es llevado a cabo por medio de explosiones controladas o extracción mecánica, dependiendo de las características de los suelos.

Estos materiales se utilizan para elaborar una mezcla que cumpla con los componentes necesarios para la elaboración del cemento, siendo estos: cal, sílice, alúmina, hierro, entre otros. Luego de la extracción, estos materiales son transportados hacia una bodega de materias primas.

---

<sup>13</sup> CALLEJA, José. *Materiales de construcción*. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>. Consulta: 02 de mayo de 2021.

Figura 2. **Extracción de materias primas del cemento**



Fuente: Aulabiogeotoni. *Necesidades minerales y energéticas.*

<https://biogeotesttoni.blogspot.com/2015/11/ctm-2-bachillerato-necesidades.html>. Consulta: 5 de abril de 2021.

#### **2.4.2. Trituración y prehomogenización**

En esta etapa del proceso, se tiene como objetivo la reducción del tamaño de partícula proveniente de las rocas extraídas en el primer paso, estas pueden ser de tamaño inicial aproximado de 40 pulgadas. Estas pasan por dos procesos de trituración, la primera reduce a un tamaño de 5 pulgadas y la segunda a un tamaño de 1 a 2 pulgadas aproximadamente.

Como siguiente paso, se realiza una mezcla de las materias primas necesarias basándose en el cemento que se desea producir y se transporta a la galera de prehomogenización, la cual hace correcciones en el camino para llegar a los porcentajes necesarios. La prehomogenización se realiza por medio del

apilamiento del material que se extrajo y trituró inicialmente, y se someten a controles para la reducción de la variabilidad en la dosificación.

Figura 3. **Prehomogenización del cemento**



Fuente: Aulabiogeotoni. *Necesidades minerales y energéticas*.

<https://biogeotesttoni.blogspot.com/2015/11/ctm-2-bachillerato-necesidades.html>. Consulta: 5 de mayo de 2021.

### **2.4.3. Molienda de materias primas**

En este, se procede a la pulverización del material proveniente de la prehomogenización, obteniendo lo que se conoce como harina cruda. Existen diferentes procesos para llevar a cabo la molienda, estos son: seco, semiseco, semihúmedo y húmedo.

En el caso de los procesos seco y semiseco, se lleva a cabo la molienda de harina cruda y luego se procede a secarla hasta la obtención de un polvo fino,

por medio del uso de gases a altas temperaturas. Por otro lado, para los procesos semihúmedo y húmedo, se obtiene una pasta al llevar a cabo la húmeda, requiriendo un proceso de mezcla y homogenización para obtener la composición del crudo. Finalmente, se traslada a silos de almacenaje.

Figura 4. **Molienda de materias primas en molino de bolas**



Fuente: Aulabiogeotoni. *Necesidades minerales y energéticas*.

<https://biogeotesttoni.blogspot.com/2015/11/ctm-2-bachillerato-necesidades.html>. Consulta: 5 de mayo de 2021.

#### **2.4.4. Clinkerización**

Se conoce como la etapa crítica en la fabricación del cemento. Primero, se hace pasar la harina cruda por un precalentador; posee varios ciclones actuando como un intercambiador de calor entre los gases provenientes del horno y el material que es alimentado.

El precalentador realiza su función al elevar la temperatura de la harina cruda a unos 700 – 1 000 °C aproximadamente, para la alimentación del horno rotatorio, siendo responsable del 40 % de la calcinación. Por medio del aumento de temperatura en la harina cruda, se da inicio a la transformación química, conocida como descarbonatación de la piedra caliza, esta se da por la calcinación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), obteniendo como subproductos, óxido cálcico ( $\text{CaO}$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Las transformaciones continúan en el horno, alcanzando una temperatura de 1 400-1 450 °C, donde el óxido cálcico reacciona con la sílice, alúmina y óxido de hierro, dando como resultado la formación de los componentes fundamentales del *clinker*, estos son: silicatos, aluminatos y ferritos de calcio.

El hierro tiene el papel de elemento fundente, facilitando la fase líquida de la mezcla, beneficiando en el tiempo de reacción del silicio y el calcio, aumentando la eficiencia en el proceso. Como resultado, se favorece la formación de la Alita sobre la formación de Belita; aportando mejoras en las propiedades como resistencia mecánica.

El horno rotativo está formado por un tubo de acero con estaciones de apoyo como soportes, posee una inclinación aproximada de 4 % respecto a su longitud, favoreciendo el desplazamiento del material hacia la parte del horno donde se concentra mejor la calcinación. El interior del horno se encuentra cubierto con ladrillos refractarios, aportando protección al horno sobre ataques químicos y abrasivos a altas temperaturas, estos son elaborados de un material cerámico conteniendo 30-40 % de alúmina. Asimismo, no presenta deformaciones ni dilataciones, teniendo una vida útil de 11 a 23 meses.



Finalmente se encuentra un enfriador, este se encarga de inyectar aire del exterior produciendo un enfriamiento brusco al material y tiene como resultado la formación de piedras de *clinker* a unos 60 °C aproximadamente. El aire se recircula hacia el interior del horno tras haber absorbido el calor del *clinker*, mejorando la eficiencia del proceso.

Figura 5. **Equipo de clinkerización en la producción de cemento**



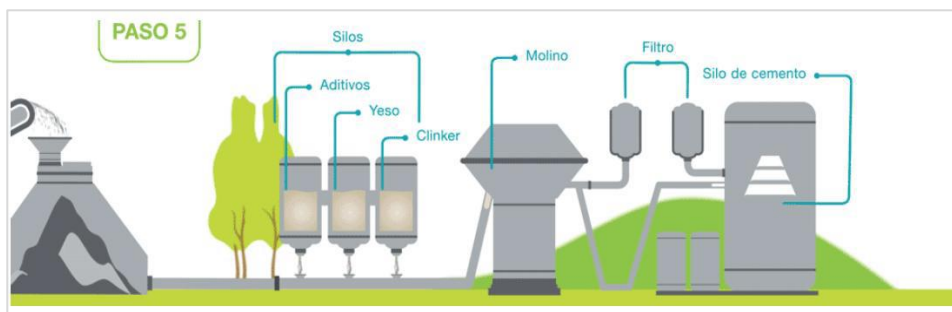
Fuente: Aulabiogeotoni. *Necesidades minerales y energéticas*.  
<https://biogeotesttoni.blogspot.com/2015/11/ctm-2-bachillerato-necesidades.html>. Consulta: 5 de abril de 2021.

#### 2.4.5. Molienda de cemento

En este punto, el *clinker* almacenado en silos, se mezcla con yeso y otros aditivos dependiendo de las características finales que se le quiera dar al cemento, dosificándolos en diferentes porcentajes para la elaboración de estos. Estos se transportan al molino para ser pulverizados y mezclados para su homogenización. Se utilizan normalmente molinos de bolas y verticales para llevar a cabo este proceso.

Los molinos de bolas se conforman por una carcasa cilíndrica que rota sobre sí mismo y que tiene bolas hechas de acero que varían en tamaños y proporciones. Su funcionamiento se basa en la trituración del material hasta su pulverización, haciendo que las bolas de acero choquen con el material de interés contra las paredes del mismo. Luego de esto, se procede a separar el material por medio de tamices; aseguran el tamaño de partícula requerido para la etapa final del proceso. El cemento molido es transportado a los silos de almacenaje, se traslada el producto hacia el área de envasado y paletizado.

Figura 6. Esquema del proceso de molienda del cemento



Fuente: GALVÁN, Víctor. *Determinación de factor clinker y cuantificación de componente amorfa en la industria cementera mediante difracción de rayos X*. p. 9.



#### **2.4.6. Envasado y paletizado**

El cemento se envasa a granel o en sacos. Cuando se habla de un despacho a granel, se hace referencia a la descarga en camión cisterna por medio de pipas para poder transportarlo, cumpliendo estrictas exigencias de inocuidad y seguridad para evitar fugas y alteraciones en la composición.

El envasado del cemento es el proceso de colocación del cemento en sacos, y estos cumplirán las etapas de almacenaje, distribución y venta. En este, se debe cumplir la rigidez y resistencia del saco, asegurando la calidad del producto durante la manipulación del empaque. Debe cumplir características como hermeticidad para evitar que factores externos como humedad afecten el cemento. Esto se logra por medio del material utilizado, siendo este papel y en ciertas ocasiones con revenimiento plástico.

La dosificación de cada saco de cemento es de 25 a 42,5 kilogramos dependiendo de su presentación. Estos pasan por un control de pesaje, donde se descarta los que no cumplan con los parámetros establecidos para su siguiente etapa. Luego son transportados por medio de bandas para ser identificados y llevados a una paletizadora, la junta de 30 a 35 sacos de forma ordenada para su almacenamiento en bodega de producto terminado.

Figura 7. **Etapa de paletizado en la producción del cemento**



Fuente: Aulabiogeotoni. *Necesidades minerales y energéticas.*

<https://biogeotesttoni.blogspot.com/2015/11/ctm-2-bachillerato-necesidades.html>. Consulta: 5 de abril de 2021.

## 2.5. Componentes del cemento

El cemento es elaborado a partir de *clinker* y diferentes adiciones que brindan diferentes propiedades al producto final dependiendo de su aplicación. Estos varían en proporción y generalmente son:

### 2.5.1. *Clinker*

Este se obtiene por medio de un proceso de calcinación, donde se divide en diferentes tratamientos térmicos, dando como resultado el *clinker*.

Para que un *clinker* cumpla con condiciones de calidad adecuadas, debe de estar formulado por al menos dos tercios de su masa por Silicatos de Calcio, estos son sus componentes principales que dan las características cementantes

respectivas, el resto son fases de aluminio, hierro y otros compuestos. Su composición cualitativa principal es silicato tricálcico ( $C_3S$ , Alita), silicato bicálcico ( $C_2S$ , Belita), ferrito aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ , Ferrita), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). Representados cualitativamente en la siguiente tabla:

Tabla I. **Composición cualitativa y cuantitativa del *clinker***

Fase	Fórmula	Abreviatura	Rango
Silicato tricálcico	$3CaO SiO_2$	$C_3S$	46-79
Silicato bicálcico	$2CaO SiO_2$	$C_2S$	5-30
Ferritoaluminato tetracálcico	$4CaO (Al_2O_3, Fe_2O_3)$	$C_4(A,F)$	4-16
Aluminato tricálcico	$3CaO Al_2O_3$	$C_3A$	6-18
Cal libre	$CaO$	C	0,1-4
Óxido de magnesio libre	$MgO$	M	0,7-1,5

Fuente: SANJUÁN BARBUDO, Miguel Ángel; CHINCHÓN YEPES, Servando. *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. p. 22.

La Alita ( $C_3S$ ), se conoce como el componente principal del *clinker*, debido a que es responsable de la resistencia mecánica temprana del cemento, velocidad de reacción y calor de hidratación altos. La Belita ( $C_2S$ ), es producida cuando el *clinker* no está del todo saturado y este posee velocidades de reacción menores al contacto con el agua y contribuye a las resistencias mecánicas tardías del cemento, luego de su tiempo de curado.

En el caso de la Ferrita ( $C_4AF$ ), es la que aporta el hierro y aluminio en el *clinker*, aportando poco a la endurecimiento y reactividad hidráulica. Este posee cierto porcentaje de óxido de magnesio libre, que caracteriza al cemento con el color gris tradicional. Por otro lado, el Aluminato ( $C_3A$ ), mejora la resistencia inicial del cemento debido a su presencia de silicatos provocando reacciones rápidas.

### **2.5.2. Caliza**

La caliza es un material un material que contiene carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), en su mayoría. Este al someterlo a procesos de calcinación, con temperaturas superiores de  $900\text{ }^\circ\text{C}$  forma óxido de calcio, conocido comúnmente como cal viva, La cal se clasifica principalmente como dolomítica si la piedra caliza contiene magnesio o hidráulica si se somete a procesos de hidratación. La cal hidratada o apagada, conocida como hidróxido de calcio, tiene la característica de capacidad de fraguar en el aire y bajo el agua.

### **2.5.3. Yeso**

La piedra natural del yeso está constituida principalmente por Sulfato cálcico dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), y puede ser sulfato de calcio hemihidratado o anhidro ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  o  $\text{CaSO}_4$ ). Este material se considera como un agregado al cemento, ya que beneficia al cemento en sus tiempos de fraguado, dándole mayor manipulación a la hora de sus diferentes aplicaciones. Este material es agregado al cemento alrededor de 4-5 % en masa.

El Sulfato cálcico hemihidratado es obtenido mediante la deshidratación del yeso una temperatura apenas superior a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , y el anhidro se forma por la deshidratación a una temperatura mayor a  $220\text{ }^\circ\text{C}$ , en donde el objetivo principal de estos es la pérdida de agua.

### **2.5.4. Puzolanas**

Los materiales puzolánicos se denominan como una subcategoría dentro de los materiales cementicios suplementarios. La Sociedad Americana de

Ensayos de Materiales (ASTM), define las puzolanas como aquellos productos naturales o artificiales (silicios o alúmina).

Estos en su forma inicial, poseen poca o ninguna propiedad aglomerante, pero luego de pasar por un proceso de molienda y en contacto con agua, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. Así mismo, presentan características como: inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad de reaccionar con otras sustancias para formar nuevos compuestos más estables. Las puzolanas pueden ser desde rocas y sedimentos hasta residuos industriales o agrícolas y arcillas calcinadas.

#### **2.5.4.1. Clasificación de las puzolanas según el origen**

Las puzolanas se clasifican en dos grandes grupos: naturales y artificiales, aunque existe un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamientos térmicos, con el objeto de aumentar su reactividad.

##### **2.5.4.1.1. Puzolanas naturales**

Son productos minerales con composiciones silico-aluminosos, estructura imperfecta o amorfa y de grano fino; son sometidos a diferentes procesos para utilizarlos como aditivos activos en la industria cementera. Las puzolanas naturales pueden tener dos orígenes distintos, uno puramente mineral y otro orgánico.

Las que provienen de origen mineral son productos de transformación del polvo y cenizas volcánicas que, como materiales procedentes de erupciones

explosivas por procesos geológicos de enterramiento se convierten en tobas, para luego convertirse en rocas volcánicas bastante porosas, característica que determina una gran superficie interna favoreciendo su reactividad.

Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada, formadas en yacimientos o depósitos que en su origen fueron submarinos, por medio de la acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales o plantas.

Todas las propiedades de las puzolanas naturales, especialmente las utilizadas en la industria del cemento, dependen principalmente de su composición y de su textura, relacionadas con su origen y formación.

#### **2.5.4.1.2. Puzolanas artificiales**

Son materiales cuya condición puzolánica la determina un tratamiento térmico adecuado. En estas, se incluyen los subproductos de ciertas operaciones industriales como: residuos de bauxita, polvos de chimeneas de altos hornos, cenizas volantes, entre otros.

#### **2.5.4.1.3. Puzolanas mixtas o intermedias**

Son las puzolanas de procedencia natural y se someten a un tratamiento térmico con el objeto de aumentar su reactividad química al cambiar sus propiedades. Dentro de éstos se incluyen las zeolitas, suelos, rocas, cascarilla de arroz y las arcillas.

### **2.5.5. Aditivos**

La Norma Técnica Guatemalteca 41001, describe a los aditivos como agregados en cantidades pequeñas al cemento hidráulico. Se distinguen en los aditivos de proceso y los aditivos funcionales.

Los aditivos de proceso tienen la función de ayudar en la manufactura y en el manejo del cemento. Los aditivos funcionales, modifican una o varias propiedades del cemento, como resistencia mecánica, permeabilidad, color, entre otras.

## **2.6. Propiedades del cemento**

Todo material tiene diferentes propiedades que lo caracterizan. Estas se dividen en propiedades físicas y químicas, se describe el funcionamiento y comportamiento de los materiales. Para el cemento, las más fundamentales son las siguientes:

### **2.6.1. Propiedades físicas**

Todo tipo de cemento posee diferentes propiedades físicas, que a su vez brindan las diferentes características y cualidades que estos poseen para sus diferentes tipos de aplicaciones. Estas son:

#### **2.6.1.1. Fineza**

La fineza del cemento está relacionada directamente con velocidad de las reacciones químicas que ocurren al fraguar, es por ello que se muelen las materias primas. En otras palabras, mientras las partículas de *clinker* sean de

menor tamaño, mayor será su resistencia mecánica, debido a que existe mayor superficie específica en el proceso de hidratación.

Se debe recalcar que tampoco la fineza del *clinker* tiene un límite, debido a que, si se sobrepasa este, se aumenta en mayor proporción sus propiedades de retracción y el calor de hidratación liberado, siendo susceptible al envejecimiento del material. Para el cemento UG es ideal una fineza en la que el 90-95 % de las partículas estén por debajo de los 45 micrones.

#### **2.6.1.2. Fraguado**

Se expone el fraguado como el cambio de las características en la pasta de un cemento, debido a que este se solidifica y endurece por medio de una reacción exotérmica de hidratación. Siendo responsable por la presencia de aluminatos y silicatos en la composición del *clinker*, y estos a su vez producen una red capilar, beneficiando su resistencia a la compresión.

Es importante mencionar que el fraguado debe de ocurrir en condiciones óptimas de curado para que se lleve a cabo de manera correcta. El curado se realiza para que no se dé una pérdida prematura en el contenido de agua del cemento, obteniendo las propiedades de desempeño esperadas.

#### **2.6.1.3. Resistencia**

Se define como la propiedad de medida máxima de resistencia a la carga axial que se somete, cuando está formada por una muestra de concreto o mortero. Esta se obtiene mediante un ensayo técnico, a través de normativas, se coloca el objeto de estudio y se le aplica compresión, hasta presentar una falla física como fisuras o fracturas.



El valor del resultado es expresado en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{kg/cm}^2$ ), megapascales (MPa), o en sistema inglés, como libras por pulgada cuadrada (Psi).

Estas pruebas se realizan en distintos tiempos de curado del cemento, siendo la más importante a 28 días, donde se alcanza el progreso de hidratación adecuado. Generalmente se realiza el ensayo en un cubo de 2" x 2" x 2" con cemento y arena sílice.

El resultado de resistencia a la compresión debe de cumplir dependiendo del tipo de cemento al que se le esté realizando la prueba.

### **2.6.2. Propiedades químicas**

“El cemento está catalogado un sistema químico de componentes anhidro-inestables, que forma compuestos hidratados estables al ponerse en contacto con agua. Estos forman una red cristalina resistente debido a que estos componentes se adhieren a los granos áridos.”<sup>14</sup>

Se define que el proceso de hidratación del cemento es el más importante para definir sus propiedades químicas, debido a que las reacciones que ocurren al agregarle agua son responsables del endurecimiento del cemento. Siendo un proceso exotérmico, en el que se forma la pasta de cemento y con el paso del tiempo esta forma una estructura con propiedades mecánicas e hidráulicas. Los principales hidratos formados son hidróxido de calcio, silicatos cálcicos hidratados mejor conocidos como Gel C-S-H, aluminatos hidratos y sulfoaluminatos de calcio.

---

<sup>14</sup> GUITART MASSANA, Jordi D. *Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo*. p. 42.

Tabla II. **Reacciones de hidratación de los compuestos del cemento Portland (óxidos)**

2 (3CaO·SiO <sub>2</sub> ) Silicato tricálcico	+ 11 H <sub>2</sub> O agua	= 3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ 3 (CaO·H <sub>2</sub> O) Hidróxido de calcio
2 (2CaO·SiO <sub>2</sub> ) Silicato dicálcico	+ 9 H <sub>2</sub> O agua	= 3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ CaO·H <sub>2</sub> O Hidróxido de calcio
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminato tricálcico	+ 3 (CaO·SO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O) Yeso	+ 26 H <sub>2</sub> O agua	= 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SO <sub>3</sub> ·32H <sub>2</sub> O Etringita
2 (3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Aluminato tricálcico	+ 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SO <sub>3</sub> ·32H <sub>2</sub> O Etringita	+ 4 H <sub>2</sub> O agua	= 3 (4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SO <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O) Monosulfoaluminato de calcio
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Aluminato tricálcico	+ CaO·H <sub>2</sub> O Hidróxido de calcio	+ 12 H <sub>2</sub> O agua	= 4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·13H <sub>2</sub> O Aluminato tetra-cálcico hidratado
4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Ferroaluminato tetra-cálcico	+ 10 H <sub>2</sub> O agua	+ 2 (CaO·H <sub>2</sub> O) Hidróxido de calcio	= 6CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O Ferroaluminato de calcio hidratado

Nota: Esta tabla enseña sólo las transformaciones principales y no todas las transformaciones que ocurren. La composición del silicato de calcio hidratado (C-S-H) no es estequiométrica (Tennis y Jennings 2000).

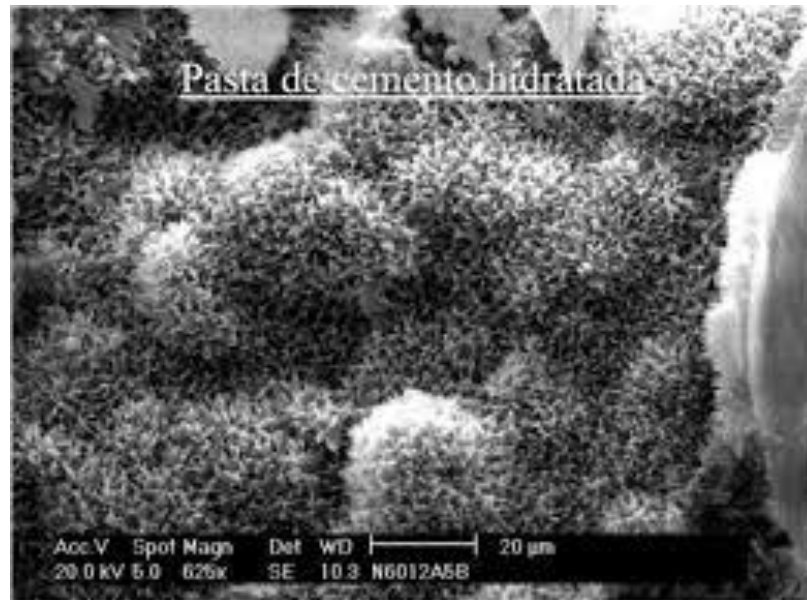
Fuente: GUITART MASSANA Jordi D. *Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo*. p. 74.

Los Geles de sílice son el producto principal de las reacciones de hidratación, con un 50-60 % del volumen total, provocando el endurecimiento y desarrollo de resistencia de las pastas de cemento.

La Portlandita o Hidróxido de Calcio, representa el 20-25 % del volumen de la pasta, aportando protección contra la corrosión a los metales por su alcalinidad.

Los Sulfoaluminatos de calcio, presentes en un 15-20 % del volumen de la pasta de cemento hidratado, aportan durabilidad en los medios sulfatados.

Figura 8. **Pasta de cemento hidratada**



Fuente: Universidad de Alcalá. *Cementos*. [https://portal.uah.es/portal/pa/ge/portal/epd2\\_profesores/prof121896/docencia/T3\\_CEMENTOS.pdf](https://portal.uah.es/portal/pa/ge/portal/epd2_profesores/prof121896/docencia/T3_CEMENTOS.pdf). Consulta: 22 de octubre de 2021.

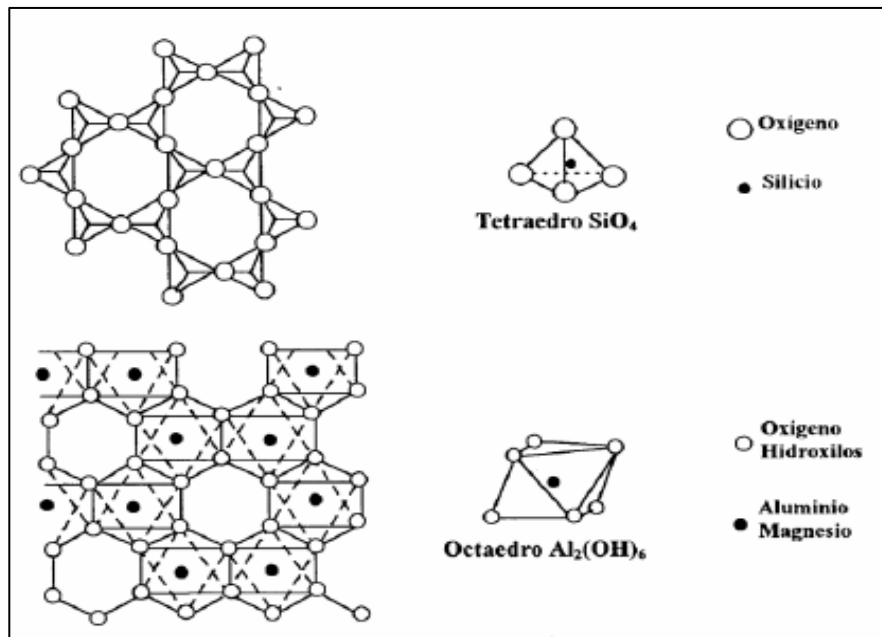
Cuando ocurre la mezcla de cemento y agua, las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se elevan, causa de la hidrólisis de los silicatos, provocando la hidratación del hidróxido de calcio, Gel de sílice y etringita.

El fraguado se inicia debido a que los productos de la reacción de hidratación aumentan, haciendo que la porosidad disminuya y que el entrecruzado de las fibras de C-S-H causen que la pasta se vuelva rígida. Conforme pasa el tiempo, la movilidad de la pasta disminuye totalmente, iniciando el proceso de endurecimiento, donde las velocidades de reacción disminuyen y da lugar al incremento de la resistencia.

## 2.7. Arcillas

En 1995 la AIPEA (Asociación Internacional Pour L'Etude des Argiles), y la CMS (Clay Minerals Society), definen las arcillas como material mineral de grano fino y plástico con cierta cantidad de agua, con propiedad de endurecer cuando se somete a secados con aire o calcinación. Están formadas por filosilicatos, en donde los iones de su estructura están arreglados en series de planos paralelos, y estos están unidos en forma de láminas. Su estructura cristalina está constituida por dos grupos: grupos de sílice tetraédricos y grupos de alúmina octaédricos.

Figura 9. **Representación esquemática de la capa tetraédrica y octaédrica**



Fuente: ALVAREZ VIDAL, Anibal. *Activación térmica de arcillas de la región de Cayo Guam para su aprovechamiento como material puzolánico*. p. 43.

El  $\text{Si}^{4+}$  y el  $\text{Al}^{3+}$  pueden sufrir sustitución isomórfica con elementos que tengan un radio iónico óptimo que logre su adaptación en la estructura. Este fenómeno es responsable de muchas propiedades de los minerales de arcilla.

### **2.7.1. Propiedades fisicoquímicas de las arcillas**

Estas propiedades radican en su tamaño de partícula (menor a 2 mm), morfología laminar (filosilicatos) y las sustituciones isomórficas en su estructura. Debido a esto, las arcillas tienen relativamente una gran área superficial que genera un valor alto de superficie activa que tienen enlaces no saturados. Consecuencia de esto, poseen un comportamiento plástico sobre las mezclas de arcilla y agua con elevada proporción sólido/líquido y en ciertas ocasiones son capaces de hinchar. Sus principales propiedades fisicoquímicas son:

#### **2.7.1.1. Área superficial**

Definida como el área de la superficie externa y área de la superficie interna de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en  $\text{m}^2/\text{g}$ . Las arcillas poseen una gran área superficial, que es fundamental para algunas aplicaciones industriales en los que la interacción sólido-fluido depende principalmente de esta.

#### **2.7.1.2. Plasticidad**

Las arcillas por su naturaleza son plásticas. La elevada plasticidad de estas es razón de su morfología laminar, tamaño de partícula muy pequeño y alta capacidad de hinchamiento. Entonces, se puede hacer la relación de cuanto menor tamaño de partícula y estructura más amorfa, entonces mayor plasticidad por parte del material.

### **2.7.1.3. Capacidad de absorción**

Ciertas arcillas se catalogan como absorbentes, capaces de absorber moléculas en su espacio interlaminar o en los canales estructurales. Esta propiedad depende de la superficie específica y porosidad de la arcilla.

Estas se pueden determinar por medio de absorción, en la que se da un proceso netamente físico, o adsorción, en la cual existe una interacción química entre la arcilla y el adsorbato.

### **2.7.1.4. Hidratación e hinchamiento**

Se puede decir que estas propiedades van de la mano debido a que la absorción de agua en las arcillas da lugar al hinchamiento de las propias. En otras palabras, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas de su estructura, provocando que estas propiedades provoquen una disociación completa de las láminas.

## **2.7.2. Aplicaciones industriales de las arcillas**

Un 90 % de la producción es referente a la fabricación de materiales de construcción y agregados, el 10 % restante se atribuye a otras industrias como fabricación de papel, pinturas, entre otros.

A las utilizadas en materiales de construcción se les conoce como arcillas cerámicas, arcillas para la construcción o arcillas comunes, están compuestas principalmente por dos o más minerales arcillosos, en su gran mayoría por illita y esmectita, con importantes cantidades de otros minerales como carbonatos y cuarzo. Al segundo tipo se les denomina arcillas especiales, están constituidas

por un sólo tipo de mineral arcilloso y sus propiedades dependen las características del propio.

### **2.7.3. Métodos de activación de las arcillas**

La etapa de activación en las arcillas se puede llevar a cabo por medio de métodos mecánicos, químicos o térmicos. Para el caso específico de las arcillas, se ha determinado que la activación térmica es el método con los mejores resultados y es la más utilizada. Este proceso provoca una modificación en la estructura cristalina de las arcillas, con esto se logra alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica.<sup>15</sup>

#### **2.7.3.1. Activación térmica de las arcillas**

Los minerales arcillosos no tienen la capacidad de ser utilizados como puzolanas en su estado natural debido que su estructura cristalina no permite que se liberen las sílices y alúminas, los cuales son participantes de la reacción puzolánica. Esto debido a su estructura en forma de capas, las cuales son vulnerables al deslizarse y agrietarse, de igual manera, su capacidad de retención superficial de grandes moléculas de agua. Estos son factores importantes que pueden disminuir la resistencia mecánica en su aplicación en la fabricación de cemento, mientras que la modificación de en la composición química de las soluciones acuosas es causada por su capacidad alta de adsorción de iones, afectando otras características del hormigón. Debido a todo esto, es necesaria la activación térmica en la utilización de las arcillas como materiales puzolánicos en cementos.<sup>16</sup>

La activación térmica de las arcillas se describe como el proceso que se da cuando se transfiere calor hacia el material, consiguiendo la eliminación del agua estructural de esta y provocando la alta reactividad del material.

Las diferentes etapas descritas en el proceso de calcinación de las arcillas empiezan con el aumento de la temperatura hasta 250 °C, en la cual se da la pérdida de agua interna y superficial de la arcilla. Alcanzando los 400 °C a 950 °C, se provoca lo que se conoce como la desoxhidrilación de la arcilla, consistiendo en el

---

<sup>15</sup> ALUJAS, Ana. *Evaluación del empleo de una roca arcillosa calcinada a diferentes temperaturas como material puzolánico para el reemplazo de altos volúmenes de cpo.* p. 42.

<sup>16</sup> MÜLLER, Christian Jörg. *Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics.* p. 55.

desorden parcial de la estructura cristalina formando fases metaestables, responsables de la alta reactividad química.<sup>17</sup>

La pérdida de los hidroxilos da lugar a la desestabilización en la carga de la estructura, principalmente en su capa octaédrica. Debido a esto las fases de alúmina son fundamentales en la reactividad puzolánica, ya que son las primeras en desestabilizar su estructura durante el proceso de desoxhidrilación.

“La reactividad puzolánica se logra de una manera más rápida cuando las fases poseen un bajo orden estructural, requiriendo una menor temperatura de igual manera, a comparación de fases minerales del mismo tipo, pero con un orden estructural elevado.”<sup>18</sup>

Sin importar el tipo de arcilla con la que se esté trabajando, se hace observar que al llegar a una temperatura aproximada de 950 °C es donde se da la reorganización de la estructura en la cual se forman fases cristalinas estables, las cuales son poco reactivas y son estables a temperaturas elevadas. Cuando se tiene presencia de impurezas como cuarzo y feldespatos (materiales no arcillosos), estos provocan una disminución de temperatura en la cual ocurre este fenómeno, el cual resulta en un intervalo más reducido donde se posibilita la activación térmica de la arcilla.<sup>19</sup>

La temperatura de calcinación donde se da la mayor reactividad puzolánica debe delimitarse dentro del intervalo en el final de la desoxhidrilación y el inicio de la recristalización, es decir, donde la fase arcillosa puede ser transformada en un material puzolánico por medio de una activación térmica.

Por otro lado, por medio del incremento de la temperatura, fenómenos de sinterización y crecimiento del tamaño de partícula provocan cambios

---

<sup>17</sup> ALUJAS, Ana. *Evaluación del empleo de una roca arcillosa calcinada a diferentes temperaturas como material puzolánico para el reemplazo de altos volúmenes de cpo.* p. 45.

<sup>18</sup> SAMET, Basma; MNIF, Thameur; CHAABOUNI, Moncef. *Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement.* p. 97.

<sup>19</sup> FERRAZ, Eduardo; ANDREJKOVIČOVÁ, Slávka; HAJJAJI, Walid; VELOSA, Ana Luísa; SILVA, António Santos; ROCHA, Fernando. *Pozzolanic activity of metakaolins by the french standard of the modified chapelle test: a direct methodology.* p. 54.



morfológicos en el sistema. Estos resultan en una capacidad de reacción más baja debido a una reducción del área superficial, incluso si la fase arcillosa presenta un bajo grado de desordenamiento estructural.

La temperatura de calcinación donde ocurre mayor desorden estructural no se debe en todos los casos a la mayor reactividad puzolánica, debido a que media vez se incrementa la temperatura de calcinación, existe una relación entre el aumento del desorden estructural, el desplazamiento de la distribución granulométrica con tamaños de partícula más grandes y la disminución del área superficial.

Se realizó una evaluación experimental sobre el comportamiento de las mezclas Clinker-CaCO<sub>3</sub>-CaSO<sub>4</sub>-Arcillas calcinadas, enfocándose principalmente en las resistencias a la compresión alcanzadas a los 7 y 28 días, dando como resultado una reducción de una mezcla que poseía 50 % de *clinker* en masa. Este estudio se realizó en los yacimientos de arcilla en una provincia de Cuba llamada Camagüey, que contenía caolinita en proporción de 58 % aproximadamente por medio de ATG y esta fue sometida a un proceso de calcinación en 60 minutos y 800 °C de temperatura.

## **2.8. Gases de efecto invernadero (GEI)**

Los GEI se definen como los diferentes gases presentes en la atmósfera de forma natural o antropogénicos. Capaces de absorber y emitir radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes.

“Por medio del Protocolo de Kioto, se clasifican seis diferentes gases de efecto invernadero, los cuales son: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>),

óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).”<sup>20</sup>

#### **2.8.1. Emisión de gases de efecto invernadero**

Es la masa total de un GEI liberado a la atmosfera en un determinado período de tiempo.

#### **2.8.2. Remoción de gases de efecto invernadero**

Definida como la masa total de un GEI removido de la atmosfera en un periodo determinado.

#### **2.8.3. Sumidero de gases de efecto invernadero**

Describe la unidad o proceso físico que remueve un GEI de la atmósfera.

#### **2.8.4. Fuente de gases de efecto invernadero**

Refiere a la unidad o proceso físico que libera un GEI hacia la atmósfera.

#### **2.8.5. Inventario de gases de efecto invernadero**

Se define como la identificación y clasificación de las fuentes de GEI, sumideros de GEI, como la estimación de las emisiones y remociones de GEI de una empresa.

---

<sup>20</sup> Naciones Unidas. *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. p. 54.

### **2.8.6. Datos de actividad (Da)**

Representación de los datos de las diferentes actividades como medida cuantitativa de la actividad que produce una emisión de GEI.

### **2.8.7. Factor de emisión de gases de efecto invernadero (Fe)**

Se define como el factor que relaciona los datos de la actividad con las emisiones de GEI.

### **2.8.8. Dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e)**

Definida como la unidad para comparar la cantidad de radiación emitida de un GEI al transformarla en emisiones de dióxido de carbono.

## **2.9. Huella de carbono**

Se describe la huella de carbono como la sumatoria de todas las emisiones directas e indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que son provocadas por una organización, un producto, un evento o las actividades de las personas que contribuyen al cambio climático. En otras palabras, es la medida del impacto ambiental como consecuencia de las actividades que tienen las actividades cotidianas a nivel mundial. Estas son expresadas en toneladas o kilogramos de dióxido de carbono equivalente.<sup>21</sup>

Las cuatro categorías para calcular la huella de carbono son:

### **2.9.1. Huella de carbono de organización**

Aporta información sobre la cantidad de los GEI emitidos por la actividad de una entidad.

---

<sup>21</sup> GARCIA RAMIRO, Roberto. *Estudio de la huella de carbono de los hogares españoles: evolución nacional (1998-2011) y por comunidades autónomas (2006-2011)*. p. 45.

### **2.9.2. Huella de carbono de producto**

Medición sobre la cantidad de GEI emitidos a lo largo del ciclo de vida de un producto específico.

### **2.9.3. Huella de carbono de eventos**

Cuantificación de GEI emitidos en la organización y desarrollo de un evento.

### **2.9.4. Huella de carbono de personas**

Muestra la cantidad de GEI emitidos por la actividad cotidiana de una persona.

## **2.10. Alcances de la huella de carbono**

La World Resources Institute define tres alcances en las mediciones de la huella de carbono directas e indirectas con propósitos de reporte, cuantificación y control de los GEI, estos son: alcance 1, alcance 2 y alcance 3. Las entidades privadas deben de contabilizar y reportar como mínimo las emisiones del alcance 1 y 2 por separado. Estas se describen a continuación:

### **2.10.1. Alcance 1**

Estas son las emisiones directas de los GEI. Son aquellas emisiones de gases de efecto invernadero que provienen de fuentes propias o controladas, estas son principalmente resultados de los siguientes tipos de actividades: generación de electricidad como resultado de la combustión de calderas, hornos, turbinas, entre otros. Así mismo, emisiones provenientes de la elaboración de

químicos y materiales como cemento, aluminio, cal, entre otros. Dentro de este alcance se incluye también el transporte de materiales, productos, residuos y empleados. Estos generan emisiones por medio de la emisión de la combustión de combustibles por medio de fuentes que son propiedad de la empresa, o bien, son controladas por ellas.

### **2.10.2. Alcance 2**

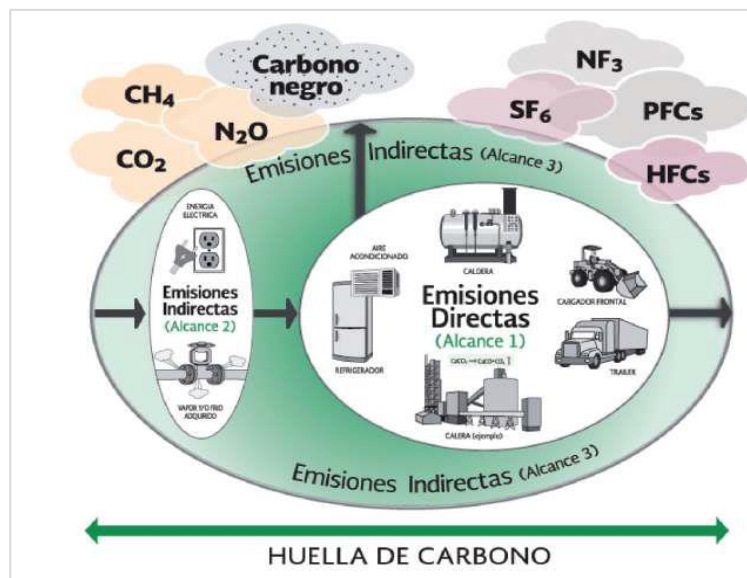
Emisiones indirectas de GEI asociadas a la electricidad. Estas incluyen las emisiones producidas por la generación de electricidad adquirida, y es consumida en operaciones, equipos propios o equipos controlados. En una gran cantidad de entidades privadas, la energía eléctrica que adquieren son las responsables de sus fuentes principales de emisiones de GEI, por lo que al identificarlas y cuantificarlas se facilita la reducción de estas.

### **2.10.3. Alcance 3**

Otras emisiones indirectas de GEI. En esta se catalogan el resto de emisiones indirectas por actividad de la entidad, pero a diferencia del alcance 2, estas son producto de fuentes externas a la empresa. Se puede mencionar la extracción o producción de materias primas adquiridas, actividades relacionadas al transporte, por ejemplo, transporte de materiales, bienes y combustibles adquiridos. En el alcance 3 también entran los viajes de negocios de empleados, viajes por parte de los empleados de ida y vuelta al trabajo, transporte de productos vendidos y transporte de residuos. Se indica que este alcance es opcional reportarlo, por otro lado, cuantificarlas puede ayudar a la administración, gestión y toma de decisiones al momento de tomar acciones en la reducción de los GEI. Sin embargo, son relevantes para las propias empresas por las siguientes razones:

- Pueden representar un alto porcentaje al compararlas con las emisiones de Alcance 1 y 2 en la organización.
- Son parte en la exposición del riesgo de GEI de la entidad.
- Existen reducciones potenciales de emisiones que pueden ser llevadas a cabo o influenciadas por la empresa.

Figura 10. Tipos de alcances de la huella de carbono



Fuente: SEMARNAT. *Manifestación de impacto ambiental modalidad particular de proyectos de extracción de materiales pétreos*. p. 22.

## 2.11. Organismos referentes a la huella de carbono

Existen diferentes organizaciones que velan por llevar a cabo de manera correcta la cuantificación en la huella de carbono para el sector industrial diferenciando sus aplicaciones para los tres tipos de alcance.

### **2.11.1. Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC)**

Esta organización se define como el organismo internacional para la evaluación del cambio climático. Creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1988. La función de esta es llevar registro de los inventarios de gases de efecto invernadero, y la orientación de buenas prácticas asociadas, en estas se ofrece las metodologías que son acordadas internacionalmente y sean propósito de uso a nivel global con el objetivo de cuantificar los GEI y reportarlos a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

### **2.12. Estándares y guías para el cálculo de la huella de carbono de una organización**

A nivel mundial existen diferentes certificaciones, manuales y procedimientos para el cálculo en la huella de carbono. Estas se diferencian dependiendo de su aplicación y su validez.

#### **2.12.1. ISO 14064**

Esta es una división de la ISO 14000, catalogada entre las normas internacionales para la gestión ambiental. Su función es la proporción de herramientas para la creación y desarrollo de programas para reducir los GEI, dirigidos especialmente a la industria y al gobierno. Esta se subdivide en las siguientes:

#### **2.12.1.1. ISO 14064 – 1**

Refiere a la especificación en cuanto a la orientación dirigida a las organizaciones, en cuanto a el informe de las cuantificaciones de las emisiones y remociones de los GEI.

#### **2.12.1.2. ISO 14064 – 2**

Especificación dirigida hacia los proyectos, ligada a la orientación para la debida cuantificación, seguimiento y el informe de la reducción o aumento de emisiones de los GEI.

#### **2.12.1.3. ISO 14064 - 3**

Especificación dirigida hacia la orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero.

#### **2.12.2. “GHG PROTOCOL” - protocolo de GEI**

Este protocolo de GEI es una alianza internacional conformada por empresas, organizaciones no gubernamentales, gobiernos y otras entidades. Específicamente es una organización no gubernamental, que se localiza en USA. Asimismo, el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD), que es constituido por 170 empresas internacionales, con sede en Ginebra, Suiza

El GHG Protocol se estima que es una de las herramientas internacionales más utilizadas para realizar la cuantificación de los GEI a nivel mundial. Esta radicalizada en los siguientes estándares:



### **2.12.2.1. Estándar corporativo de contabilidad y reporte del protocolo de GEI**

Este es un escrito que provee una guía destinada a empresas interesadas en cuantificar y reportar sus emisiones de gases de efecto invernadero, cubriendo los seis gases identificados en el Protocolo de Kioto.

### **2.12.2.2. Estándar de cuantificación de proyectos del protocolo de GEI**

Es la guía para la cuantificación de reducciones de emisiones de GEI derivadas de proyectos específicos.

### **2.12.3. “BILAN CARBONE” – Balance de carbono**

Esta es una metodología que está desarrollada por la Agencia de Medio Ambiente y Energía Francesa (ADEME), su proceso de cálculo es compatible con la ISO 14064 y el Protocolo GEI. Tiene como objeto la proporción amplia de las emisiones producto de los procesos y actividades de las empresas y entidades.

Esta se aplica a todas actividades ya sea industrial, residencial, servicios o sector público limitadas en Francia. Esta incluye los seis gases de efecto invernadero proporcionados por el Protocolo de Kioto. Comprende una versión de negocios y otra para autoridades locales, que se diferencia por actividades industriales para la primera, así como de activos y servicios para la segunda.

#### **2.12.4. PAS 2060:2010**

Esta hace referencia a la Public Available Specification, esta norma en específico fue elaborada por la British Standard Institution, y se explica como una ampliación de la PAS 2050, que es una metodología detallada al cálculo de la huella de carbono destinada a productos.

Tiene el propósito del cálculo de dichas emisiones en entidades públicas y privadas siendo objetivamente neutra hacia la cuantificación, reducción y compensación de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por una actividad, servicio, edificación o producto. Esta norma es una demostración hacia las empresas que quieren garantizar el nulo aumento de sus emisiones netas de GEI debido a sus diferentes actividades.

Esta herramienta también aporta a que las entidades se planteen objetivos de reducción en la huella de carbono que no pueden ser llevados a cabo por los esquemas planteados en el Protocolo de Kioto. Como beneficios adicionales, este tipo de metodología aporta a la empresa una verificación de la huella de carbono y una certificación de la neutralidad climática de dicha organización

Tabla III. **Caracterización de estándares o guías**

	ISO 14064	Protocolo de GEI	Bilan Carbone	PAS 2060:2010
<b>Organización responsable</b>	Organización Internacional de Normalización	World Business Council for Sustainable Development - World Resources Institute	ADEME	British Standard Institute
<b>Utilidad</b>	Huella de Carbono	Huella de Carbono	Huella de Carbono	Huella de Carbono y Compensación de emisiones
<b>Gases considerados</b>	Todos los GEI	6 incluidos en el Protocolo de Kioto (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFCs, PFCs, SH <sub>6</sub> )	6 incluidos en el Protocolo de Kioto (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFCs, PFCs, SH <sub>6</sub> )	6 incluidos en el Protocolo de Kioto (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFCs, PFCs, SH <sub>6</sub> )
<b>Nivel de aplicación</b>	Organización	Organización/ Producto/ Servicio	Organización/ Producto/ Servicio	Organización/ Producto
<b>Tipo de emisiones de GEI</b>	Directas + Indirectas + Otras Indirectas	Directas + Indirectas+ Otras Indirectas	Directas + Indirectas + Otras Indirectas	Directas + Indirectas + Otras Indirectas
<b>Uso internacional</b>	Si	Si	No	Si
<b>Certificación de verificación de la huella de carbono</b>	Si	No	No	No
	Permite la certificación de la verificación de la huella de carbono a nivel ISO.	El Protocolo de GEI no es un estándar de verificación (ofrece guías para hacerlo verificable), y no certifica las verificaciones	El Bilan Carbone no es un estándar de verificación, y no certifica las verificaciones.	Permite sólo la certificación de la neutralidad climática de la organización

Fuente: GARCÍA QUIROZ, María Olivia. *Análisis de la huella de carbono de una industria de concreto y agregados en sus tres alcances*. p. 42.

### 2.13. Tipos de fuentes de emisión de GEI y sus métodos de cálculo

Existen diferentes tipos de emisiones en los gases de efecto invernadero, pero su fuente principal es la combustión. El manual del IPCC los clasifica de la siguiente manera:

### **2.13.1. Combustión móvil**

Las fuentes móviles producen emisiones GEI de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), son producto de la utilización de diferentes tipos de combustibles y otros contaminantes. De igual manera, estas emisiones se logran cuantificar de una manera sencilla por la actividad principal de transporte, la se divide en las siguientes categorías:

#### **2.13.1.1. Navegación marítima y fluvial**

En esta categoría entra todo lo que hace referencia a transporte en vía marítima y fluvial, sin importar tamaño ni carga transportada. Aquí generalmente se utilizan motores diésel que pueden ser de baja, media y alta velocidad, y turbinas de gas o vapor. Esta es responsable de emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso principalmente y de compuestos como monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano, dióxido de azufre, material particulado y óxido nitroso, estos resultan como contaminantes potenciales hacia la atmósfera.

#### **2.13.1.2. Ferrocarriles**

Estas locomotoras pueden ser de funcionamiento con diésel, electricidad o por medio de vapor. Las primeras pueden ser locomotoras de maniobras, coches automotores y locomotoras de arrastre en línea, estos funcionan con motores diésel combinados con alternadores o generadores; generan la energía eléctrica necesaria para suministrarlas a los motores de tracción. En el caso de las locomotoras eléctricas tienen el objetivo de generar su energía por medio de centrales eléctricas estacionarias que generan emisiones por medio de combustiones estacionarias. Las locomotoras a vapor poseen emisiones de GEI

más bajos, debido a que se les da utilización como atractivos turísticos. Sus emisiones deben cuantificarse como combustión estacionaria, utilizando metodologías similares a las calderas de vapor.

#### **2.13.1.3. Transporte todo terreno**

Por medio de esta categoría, se clasifican los vehículos y la maquinaria móvil todo terreno utilizado en cualquier entidad en general. Generalmente estos equipos utilizan motores de diésel o motor de gasolina, ya sea de 2 o 4 tiempos. Se implementa en esta categoría equipos como excavadoras, cargadores frontales y todo vehículo utilizado dentro de la industria o fuera de esta.

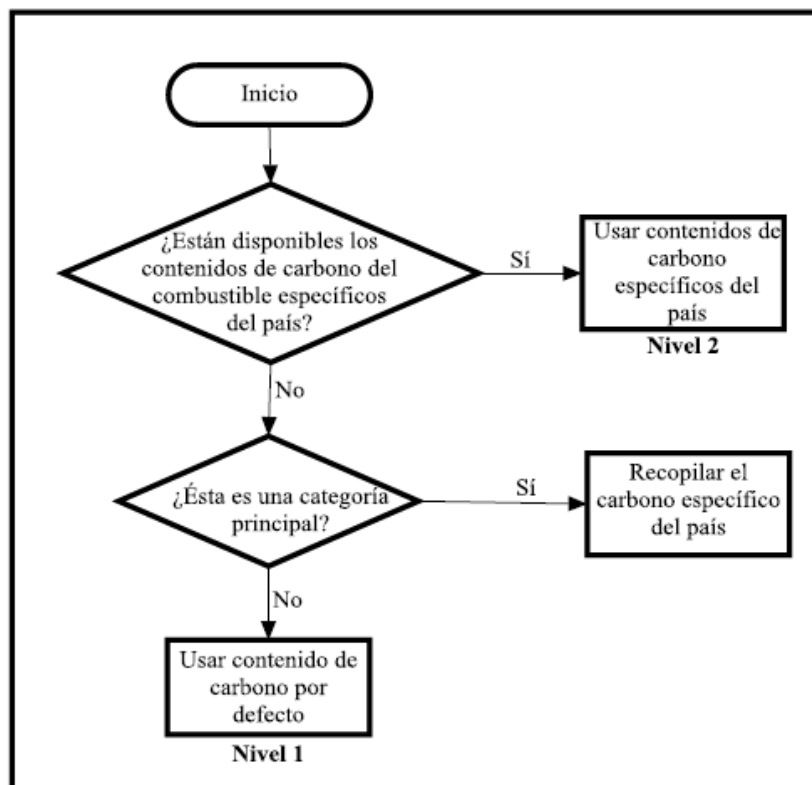
#### **2.13.1.4. Transporte terrestre**

Aquí se identifican todos los vehículos utilizados para servicio ligero y servicio pesado, ya sean automóviles convencionales, camiones, tractores de remolque, autobuses, entre otros. Para las emisiones de combustión móvil de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se selecciona el método de cálculo utilizando el árbol de decisión de la siguiente figura. Los métodos de cálculo se presentan en los siguientes niveles:

- Nivel 1: en este método, se realiza la multiplicación de la data de actividad, la cual implica el combustible vendido con el factor de emisión teórico por defecto, y es equivalente al contenido de carbono en el combustible, multiplicándolo por 3,66.
- Nivel 2: de igual manera con el método 1, pero con la diferencia de la utilización de contenido de carbono específico en el país del combustible vendido por medio del transporte terrestre. Asimismo, se aplica el factor

de emisión, este se basa en el contenido real de carbono de los combustibles consumidos en el país durante el año de inventario.

Figura 11. **Árbol de decisión para las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la quema de combustibles en vehículos terrestres**

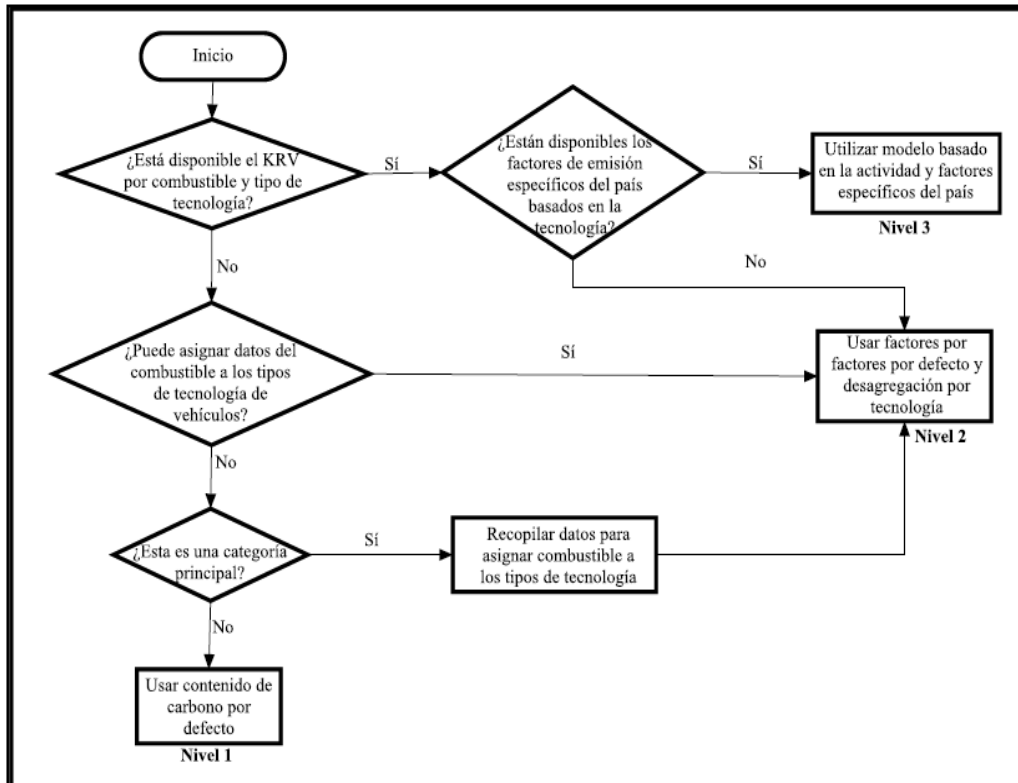


Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change CH. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. p. 43.

Se indica que para las emisiones provocadas por combustión móvil de metano (CH<sub>4</sub>), y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), se aplica la metodología de cálculo utilizando el árbol de decisión de la figura 15 clasificados por los siguientes niveles:

- Nivel 1: este método se calcula multiplicando los datos de combustible consumido, por el factor de emisión por defecto.
- Nivel 2: este método se calcula multiplicando el combustible consumido (representado por el combustible vendido) para una actividad de fuente móvil dada de acuerdo al tipo de combustible, tipo de vehículo y tipo de tecnología.
- Nivel 3: en esta metodología se multiplica el factor de emisión por los datos de actividad, correspondientes a la distancia recorrida durante la fase de funcionamiento térmico estable del motor en su actividad de fuente móvil que se diferencia por el tipo de combustible, tipo de vehículo y tipo de tecnología para el control de emisiones y condiciones de funcionamiento como tipo de carretera urbana, rural, clima, entre otros.

Figura 12. **Árbol de decisión para las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O provenientes de la quema de combustibles en los vehículos terrestres**



Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change CH. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. p. 50.

### 2.13.2. Combustión estacionaria

Se identifican las fuentes de combustión estacionaria como las responsables de producir emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, provenientes de la quema de combustibles, y otro tipo de contaminantes. Normalmente se incluyen en los sectores de procesos industriales y uso de productos, cuando las emisiones provienen de usos no energéticos de los



combustibles. Las categorías de las distintas fuentes de combustión estacionaria son las siguientes:

#### **2.13.2.1. Industrias energéticas**

En esta se incluyen las emisiones de la quema de combustibles ocasionados por la extracción de estos o por las industrias que producen y distribuyen la energía.

#### **2.13.2.2. Comercial-institucional**

En esta se incluyen las emisiones provocadas por la quema de combustibles provenientes de edificios comerciales e institucionales.

#### **2.13.2.3. Industrias manufactureras y de la construcción**

Generalmente entran las emisiones provocadas por las quemas de combustible a nivel industrial, incluyendo la generación de electricidad y calor necesarias para su uso en los diferentes procesos que manejan.

#### **2.13.2.4. Residencial y agricultura/ silvicultura/ pesca/ piscifactorías**

En esta categoría, se define de la siguiente manera:

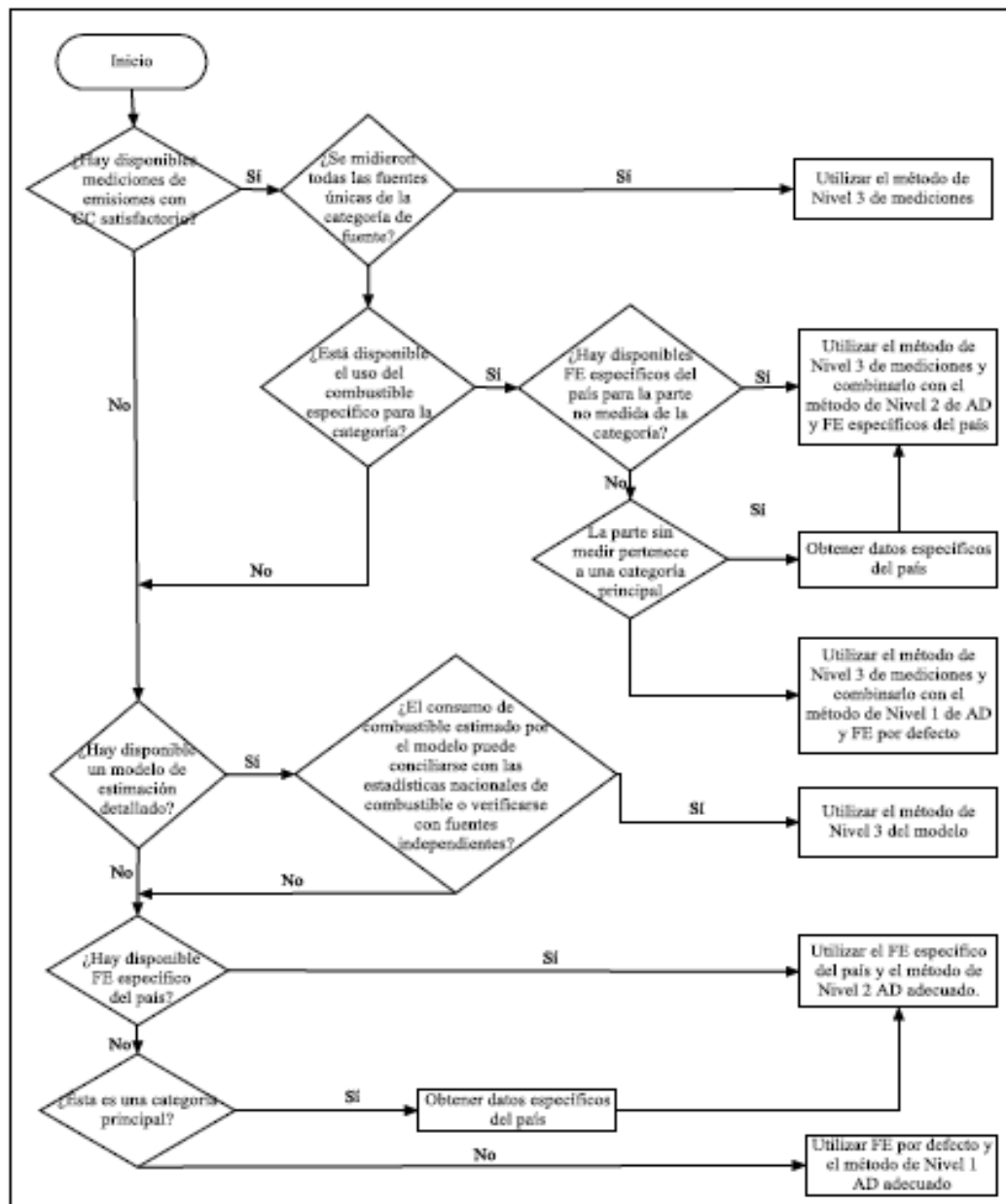
- Residencial: Emisiones generadas por la quema de combustible en hogares.

- Agricultura/ Silvicultura/ Pesca/ Piscifactorías: Son las emisiones provenientes de la quema de combustible en este tipo de actividades.

La IPCC, sintetizó un árbol de decisión para seleccionar el método de cálculo de las emisiones de combustión estacionaria de los componentes ya mencionados mostrado en la figura 12. Esta se presenta en los siguientes niveles:

- Nivel 1: aquí se realiza la multiplicación de los datos de actividad, que corresponde al combustible quemado, por el factor de emisión por defecto.
- Nivel 2: este nivel se basa en la multiplicación de los datos de actividad, que corresponde a la cantidad de combustible quemado, por el factor de emisión específico del país para la categoría de fuente y el combustible para cada gas.
- Nivel 3: este nivel se basa en la multiplicación de los datos de actividad, correspondiente al factor de emisión del GEI, tipo de combustible, tecnología y cantidad de combustible quemado por tipo de tecnología.

Figura 13. **Árbol de decisión general para estimar las emisiones de la combustión estacionaria. AD: Datos de actividad, FE: Factor de emisión, CC: Control de calidad**



Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change CH *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. p. 82.



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Variables

Para la comparativa presente se utilizaron variables constantes obtenidas del manual IPCC para el cálculo de emisiones en gases de efecto invernadero. De igual manera, los datos respecto a las variables independientes se identifican como datos de actividad y las emisiones de CO<sub>2</sub> como variables dependientes.

Tabla IV. Factores y variables constantes

No.	Factor o variable	Dimensionales	Descripción
1	Procedencia de Materias Primas	No Aplica	Yacimientos de industrias cementeras de Guatemala
2	Factor de emisión CO <sub>2</sub> por consumo térmico	kg CO <sub>2</sub> /TJ	Referencia teórica para los cálculos
3	Factor de emisión CH <sub>4</sub> por consumo térmico	kg CO <sub>2</sub> /TJ	Referencia teórica para los cálculos
4	Factor de emisión N <sub>2</sub> O por consumo térmico	kg CO <sub>2</sub> /TJ	Referencia teórica para los cálculos
5	Factor de emisión por el bagazo de caña en la red eléctrica nacional	kg CO <sub>2</sub> /kW*h	Referencia teórica para los cálculos
6	Factor de emisión por el carbón mineral en la red eléctrica nacional	kg CO <sub>2</sub> /kW*h	Referencia teórica para los cálculos
7	Factor de emisión por consumo de agua	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Referencia teórica para los cálculos
8	Factor de emisión por distancia recorrida en vehículos que utilizan diésel como combustible	kg CO <sub>2</sub> /km	Referencia teórica para los cálculos
7	Potencial de Calentamiento CH <sub>4</sub>	Adimensional	Referencia teórica para los cálculos
8	Potencial de Calentamiento N <sub>2</sub> O	Adimensional	Referencia teórica para los cálculos
9	Potencial de Calentamiento CO <sub>2</sub>	Adimensional	Referencia teórica para los cálculos

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Variables independientes**

No.	Variable	Dimensionales
1	Cantidad de agua utilizada	m <sup>3</sup>
2	kilogramos de <i>clinker</i>	kg
3	galones de combustible	gal
4	Energía térmica consumida	TJ
5	kilowatts de energía eléctrica consumida	kW/h
6	Distancia recorrida	km
7	Factor de calcinación en hornos	t CaO/t CaCO <sub>3</sub>

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Variables dependientes**

No.	Variable	Dimensionales
1	Kilogramos de CO <sub>2</sub> equivalente	kg CO <sub>2e</sub>

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación de campo de estudio

La delimitación del campo de estudio abarcará la evaluación de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por los consumos térmicos de cada combustible por cantidad y distancia recorridas, consumos de agua y eléctricos referentes a la producción de los diferentes cementos puzolánicos y cemento en base de arcillas activadas térmicamente. Estos datos se adaptaron a las diferentes metodologías propuestas para dicha evaluación. La obtención de resultados se llevó a cabo por el Centro de Investigación y Desarrollo de dicha empresa.

### **3.3. Recursos humanos**

- Investigador: Christian Andrés Ponce del Cid
- Asesor: Ing. Químico Roberto Andrés Díaz Durán. Colegiado: 2236

### **3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)**

Para el presente estudio, no se utilizaron equipos y materiales físicos. Solamente información proporcionada a lo largo de un año neto de producción en dicha empresa cementera.

#### **3.4.1. Equipo para manejo de datos**

- El equipo empleado para el manejo de datos será una computadora portátil Dell.

#### **3.4.2. Normas nacionales e internacionales**

- IPCC:2006
- NTG-41095/ ASTM C1157
- Balance energético 2019 Ministerio Energía y Minas

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

Las técnicas utilizadas para la recopilación de datos se conforman en cuantitativas y cualitativas. Para la determinación de variables a evaluar, se procedió a la elaboración del proyecto de prácticas finales, este se desarrolló en una empresa cementera guatemalteca, y consistió en la elaboración de la

calculadora electrónica, con las variables que se evaluarán en este trabajo de investigación.

La técnica cualitativa que permitió la cuantificación en las emisiones de dióxido de carbono en los cementos puzolánicos y el cemento con activación térmica de arcillas, fue el procesamiento de datos previamente tabulados por parte de los profesionales encargados de llevar registro de todos los datos de control en dicha empresa cementera, estas tienen la funcionalidad de permitir el desarrollo de las cuantificaciones de la huella de carbono. Esta se describirá en los siguientes pasos:

### **3.5.1. Cuantificación de la huella de carbono para el cemento puzolánico y cemento en base a arcillas activadas térmicamente**

- Determinación del límite de la organización y su límite operativo

Para el caso de la industria cementera guatemalteca, se evaluó el alcance 1 referente a emisiones directas y alcance 2 dirigido a emisiones indirectas por energía térmica y eléctrica utilizada.

- Determinación de las exclusiones en la cuantificación

En este caso, se excluyó la cuantificación de la huella de carbono del alcance 3, que indica las emisiones indirectas procedentes por fuentes externas de la organización.

- Identificación de las fuentes de emisiones de GEI



Para la industria de cemento, se identificaron las fuentes de emisiones de GEI como las involucradas en el proceso de elaboración del mismo. Incluyendo fuentes de combustión móvil (transportes utilizados dentro y fuera de la planta), combustión estacionaria (equipos utilizados en el proceso que necesiten algún tipo de combustible para su funcionamiento), energía eléctrica utilizada en los diferentes equipos, distancias recorridas en transporte de materias primas y consumo de agua.

- Determinación de valores teóricos de referencia para realizar cuantificaciones de huella de carbono.

Para ello, se utilizan los siguientes datos obtenidos de las guías IPCC 2006 y el reporte de balance energético del ministerio de energía y minas en 2019:

Tabla VII. **Potenciales de calentamiento global**

<b>Potencial de Calentamiento</b>	
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	25
N <sub>2</sub> O	298

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Factores de emisión de la combustión del diésel de los vehículos todo terreno**

<b>Vehículos</b>	<b>Factores de Emisión</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/ TJ</b>
Excavadoras y Cargadores frontales	F.E. CO <sub>2</sub>	74 100
	F.E. CH <sub>4</sub>	4,15
	F.E. N <sub>2</sub> O	28,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Factores de emisión de la combustión del diésel de los vehículos livianos**

<b>Vehículos que corresponden</b>	<b>Factores de Emisión</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/ TJ</b>
camionetas, camión-grúa, <i>mixer</i> , bombas, volquetes, semitrailer, camioneta de ploteo, minibús, minivan	F.E. CO <sub>2</sub>	74 100
	F.E. CH <sub>4</sub>	4,15
	F.E. N <sub>2</sub> O	28,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Factores de emisión de la combustión del diésel de los grupos electrógenos**

<b>Vehículos que corresponden</b>	<b>Factores de Emisión</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/ TJ</b>
Máquinas que mueven generadores eléctricos cuando hay cortes de energía eléctrica	F.E. CO <sub>2</sub>	74 100
	F.E. CH <sub>4</sub>	3
	F.E. N <sub>2</sub> O	0,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Factores de emisión de GEI en la red eléctrica nacional**

<b>Por energía consumida</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/ KW h</b>
Factor de emisión por utilización de bagazo de caña	0,026
Factor de emisión por utilización de carbón mineral	1,1682

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Factores de emisión para la combustión estacionaria en las industrias manufactureras y de la construcción**

<b>Combustible</b>	<b>Factores de Emisión</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/ TJ</b>
Coque para horno de coque y coque de lignito	F.E. CO <sub>2</sub>	107 000
	F.E. CH <sub>4</sub>	10
	F.E. N <sub>2</sub> O	30
Coque de gas	F.E. CO <sub>2</sub>	107 000
	F.E. CH <sub>4</sub>	1
	F.E. N <sub>2</sub> O	3
Coque de petróleo	F.E. CO <sub>2</sub>	97 500
	F.E. CH <sub>4</sub>	3
	F.E. N <sub>2</sub> O	0,6
Biomasa sólida primaria	F.E. CO <sub>2</sub>	100 000
	F.E. CH <sub>4</sub>	30
	F.E. N <sub>2</sub> O	4

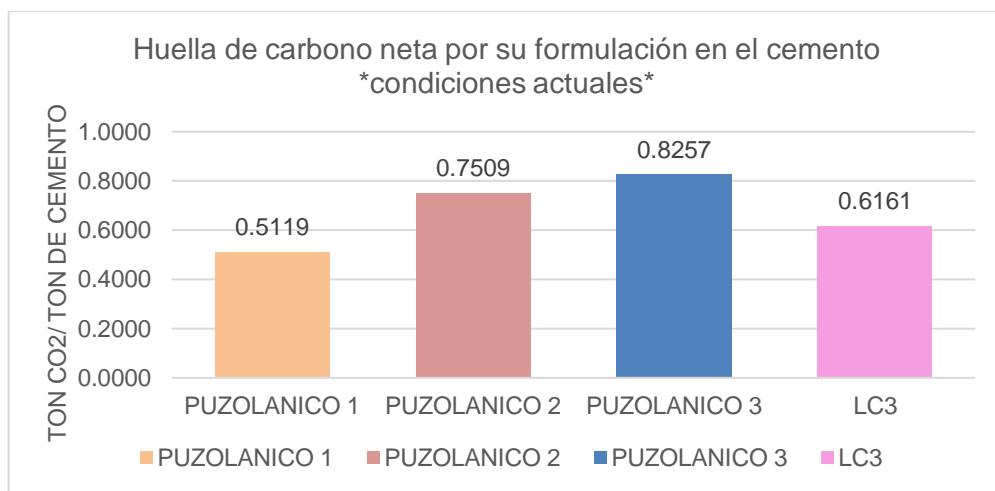
Fuente: elaboración propia.

- Recopilación de datos referentes a las cantidades de combustibles, agua, energía eléctrica, distancias recorridas y materiales utilizados en cada paso del proceso de fabricación en los cementos estudiados.
- Cuantificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de los factores expuestos en el punto anterior.
- Determinación de la huella de carbono por formulación de una tonelada de los cementos estudiados.
- Determinación de la huella de carbono por cada 1 000 psi en una tonelada de los cementos estudiados.

- Determinación de la huella de carbono por parte del proceso de fabricación del componente principal de cada cemento.
- Determinación de la huella de carbono por parte de los procesos de descarbonatación en la piedra caliza y deshidroxilación de las arcillas.

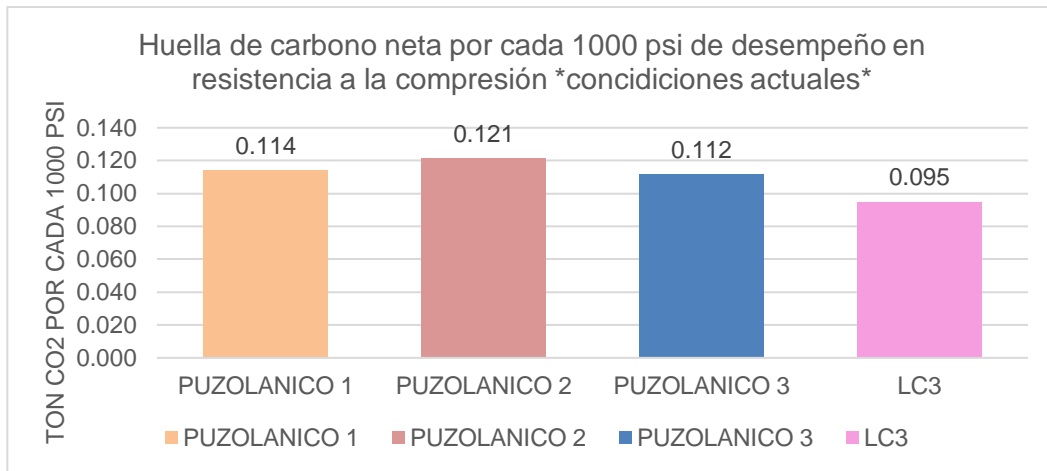
## 4. RESULTADOS

Figura 14. **Huella de carbono en los cementos estudiados por formulación de una tonelada de cemento**



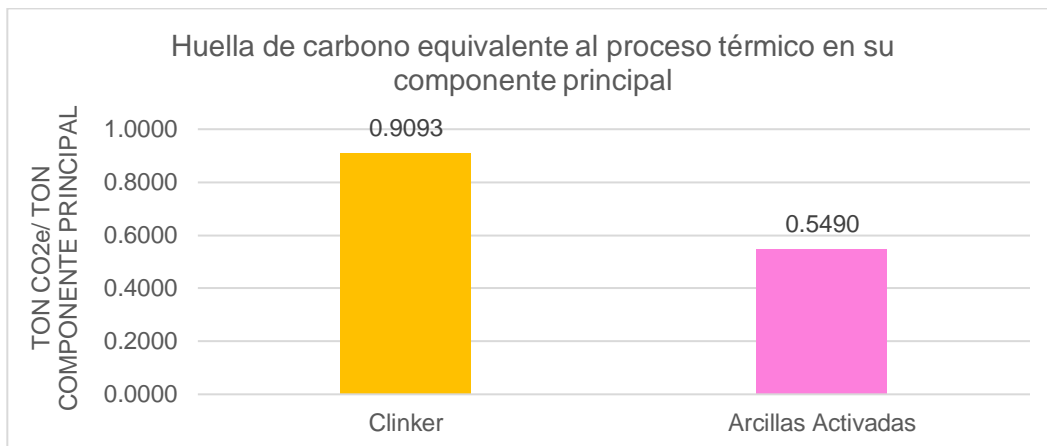
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Huella de carbono en los cementos estudiados por cada 1000 psi de resistencia en una tonelada de cemento**



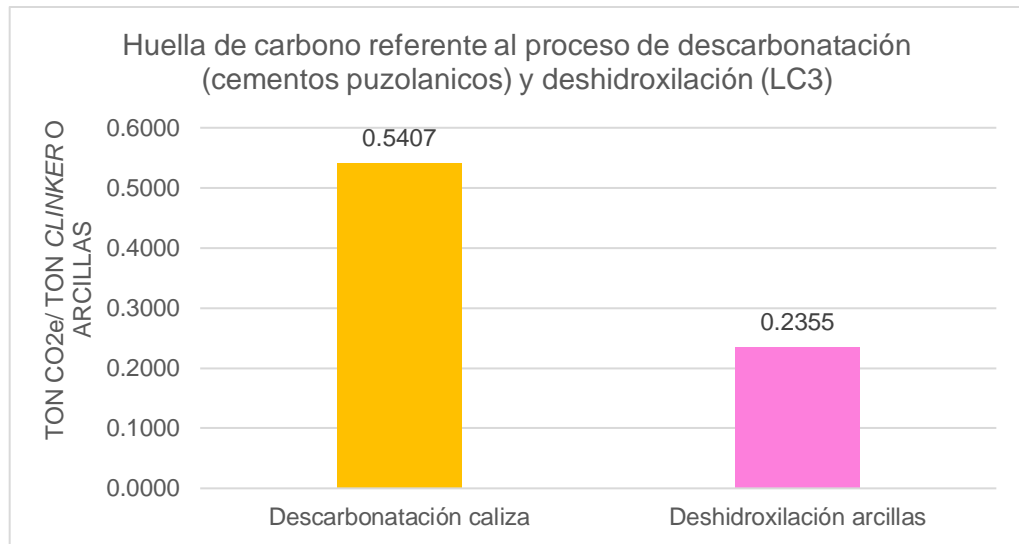
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Huella de carbono del proceso térmico en el componente principal de los cementos estudiados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Huella de carbono en el proceso de descarbonatación de la piedra caliza y deshidroxilación de las arcillas**



Fuente: elaboración propia.





## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como objetivo general del trabajo, se tiene la justificación beneficiosa en el aspecto ambiental al implementar un cemento que este elaborado en su mayoría por arcillas activadas térmicamente, reemplazando en gran cantidad el porcentaje de *clinker* que poseen los cementos adicionados de dicha industria guatemalteca. Se logró obteniendo y cuantificando la huella de carbono en diferentes ámbitos referentes al proceso de fabricación y formulación comparándolo entre ellos.

En la figura 14, se hace observar la comparativa en la huella de carbono por formulación. La cuantificación de emisiones para el tipo LC3, muestra un valor de 0 62 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento fabricado. Este valor objetivo muestra emisiones 17 % más altas comparados al cemento P.1, así como 22 % y 34 % más bajos para los cementos P.2 y P.3 respectivamente. En la justificación del beneficio ambiental se debe tomar en cuenta diferentes aspectos en las que estos fueron procesados.

Como primer punto, se tiene la proporción por la que estos son formulados en su componente principal, en este caso *clinker* o arcillas, y sus respectivas adiciones. Las tablas XXXIII y XXXIV, refieren a dicha composición y sus respectivas emisiones, mostrando que para el componente 1 la menor huella de carbono es para el cemento LC3 respecto al resto. La diferencia en estos se tiene al comparar dicha huella con el resto de componentes, donde se muestran valores mayores respecto al resto de cementos adicionados.

Dicho aumento de emisiones se tiene debido principalmente por las condiciones en las que estos fueron fabricados. Para el cemento LC3 por estar en fase de prueba se elaboró con equipos que poseen menor rendimiento y capacidad respecto al resto. Es decir, se necesita un mayor requerimiento energético o de combustibles para el proceso de secado y activación térmica. Así mismo, las distancias, cantidad de viajes y cantidad de ciclos respecto a la extracción de adiciones referidas en las tablas XXV, XXVI, XXVII y XXVIII, se traducen por emisiones respecto a combustión móvil, y se suman a la huella de carbono.

En la figura 15 se tiene una comparativa de la huella de carbono en formulación de una tonelada de cemento y por cada 1 000 psi de resistencia que estos ofrecen. Si se toma en cuenta que el cemento LC3 ofrece un promedio de 6500 psi a 28 días en su fase de prueba, se tienen emisiones de 0,0948 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de cemento fabricado, siendo menor por 20 %, 28 % y 18 % en los cementos P.1, P.2 y P.3 respectivamente. Esto debido por la reducción de adiciones que posee y benefician su resistencia tardía.

La etapa más crucial e importante en la elaboración de cemento es la clinkerización. En esta es donde ocurren los fenómenos químicos y físicos necesarios para la elaboración del componente principal, el *clinker*. De igual manera, esta fase es la que más aporta a la huella de carbono del proceso global. Por otro lado, el cemento LC3 aporta sus mayores emisiones en las etapas de secado-activación térmica de las arcillas. Al comparar estas etapas representadas en la figura 16, se denotan emisiones de 0,55 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de arcilla secada y activada producida, siendo esta 36,62 % menor respecto a las emitidas por tonelada de *clinker* fabricadas.

El fundamento de esta diferencia viene dado por sus reacciones químicas consecuentes de dichos procesos. Para la etapa de clinkerización se da la descarbonatación de la piedra caliza, aportando más emisiones que los propios consumos en combustibles y electricidad debido a la naturaleza del proceso. Esto viene dado por el factor de calcinación, siendo la relación estequiométrica en la formación de óxido de calcio por una unidad de caliza descarbonatada, convirtiéndose el resto en dióxido de carbono. Para que ocurra esta reacción, se necesitan de 1 000 a 1 200 °C de temperatura.

Por otro lado, en la activación de arcillas ocurre un fenómeno llamado deshidroxilación, el cual descompone los componentes principales de las arcillas para formar agua. Este proceso por naturaleza, no emite dióxido de carbono al ambiente, siendo los combustibles y el consumo eléctrico los únicos responsables en la huella de carbono en esta etapa debido que se necesita una temperatura promedio de 650 °C para provocar dicha reacción. Otro aspecto importante a mencionar, es la utilización exclusiva de combustibles alternos para llevar a cabo dicho proceso, aportando menores emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

En la figura 17, se hace observar dicha diferencia con valores de 0,2355 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de arcilla referente a la etapa de deshidroxilación. Aportando 56,45 % menos emisiones comparado a las emisiones que se producen al descarbonatar una tonelada de piedra caliza. Tomando en cuenta el requerimiento térmico para el proceso de las arcillas es aproximadamente menos de la mitad que el referente al *clinker*, traduciéndose en menor consumo energético tanto en electricidad como en combustibles para lograr dicho proceso, así como la naturaleza de las reacciones mencionadas anteriormente.

Otros factores que se pueden mencionar es el aporte en la huella de carbono por consumos eléctricos proporcionados en las moliendas de dichos componentes. Al observar las tablas XXIII y XXXII, la huella de carbono proporcional a la etapa para el cemento LC3 es de 0,024 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de arcillas molidas, teniendo una diferencia menor del 20,26 % y 29,41 % respecto a la molienda de cementos C.P.2 y C.P.3. Esta se fundamenta en base a que los materiales arcillosos requieren menos esfuerzo para dicha reducción de partículas proporcionando un ahorro significativo de energía eléctrica comparado con los cementos adicionados.

Al describir estas comparativas, se logra la justificación del beneficio ambiental en cuanto al requerimiento de combustibles, energía eléctrica y, por ende, menor huella de carbono global por formulación, proceso principal y térmico al cemento en base de arcillas activadas térmicamente que los cementos puzolánicos fabricados en la industria guatemalteca.

## CONCLUSIONES

1. La producción de cemento a base de arcillas activadas térmicamente es factible en términos ambientales debido a que el cemento P.1. presenta una huella de carbono 17 % menor por formulación de una tonelada de cemento comparado con el LC3, los cementos P.2 y P.3 poseen 21 % y 33 % mayores emisiones de CO<sub>2</sub> respectivamente con el cemento en base de arcillas activadas térmicamente.
2. La fabricación de LC3 emite una huella de carbono 39,62 % menor referente a su componente principal, arcilla activada, respecto al *clinker* de los cementos puzolánicos.
3. La huella de carbono referente a la deshidroxilación de las arcillas es 56,45 % menor respecto a la descarbonatación de la piedra caliza para la fabricación de *clinker*.
4. Los cementos P.1, P.2 y P.3 poseen una huella de carbono mayor del 20 %, 27 % y 17 % respectivamente por cada 1000 psi de desempeño en resistencia a la compresión por cada tonelada de cemento comparado con el LC3.



## RECOMENDACIONES

1. Implementar un sistema de captura de gases para evaluar su posible reutilización o como subproducto en los hornos para reducir a gran escala la huella de carbono producida en la etapa de clinkerizado, siendo responsable de las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente en el proceso de fabricación.
2. Realizar una calculadora de CO<sub>2</sub> organizacional, tomando en cuenta datos referentes a los colaboradores y aspectos externos al proceso de fabricación para tomar otro tipo de medidas en la reducción de emisiones.
3. Elaborar un manual interno de acciones a tomar para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, tomando en cuenta las distancias recorridas, consumos de energía eléctrica, agua y combustibles.
4. Efectuar un análisis respecto a los tipos de combustibles utilizados en la industria cementera, y propiciar el aumento al contenido de materiales cementantes suplementarios, como la puzolana y las arcillas activadas como sustitutos de *clinker* en el cemento producido en Guatemala, tomando en cuenta factores económicos y ambientales para beneficiar la reducción en la huella de carbono referente a su fabricación.





## BIBLIOGRAFÍA

1. ALMENARES REYES, Roger S; ALUJAS DÍAZ, Adrián; POLL LEGRÁ, Lisandra; BASSAS NOA, Pedro R; BETANCOURT RODRÍGUEZ, Sergio; MARTIRENA HERNÁNDEZ, José; LEYVA-RODRÍGUEZ, Carlos A. *Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer–arcilla calcinada–caliza (LC 3)*. Cuba: Minería y Geología, 2016. 76 p.
2. ALUJAS, Ana. *Evaluación del empleo de una roca arcillosa calcinada a diferentes temperaturas como material puzolánico para el reemplazo de altos volúmenes de cpo*. Cuba: Revista Cubana de Química, 2010. 71 p.
3. ALVAREZ VIDAL, Anibal. *Activación térmica de arcillas de la región de Cayo Guam para su aprovechamiento como material puzolánico*. Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2013. 73 p.
4. Aulabiogeotoni. *Necesidades minerales y energéticas*. [en línea]. <<https://biogeotesttoni.blogspot.com/2015/11/ctm-2-bachillerato-necesidades.html>>. [Consulta: 25 de julio de 2021].
5. CALLEJA, José. *Materiales de construcción*. España: Congreso Internacional de la Química de los Cementos, 1977. 512 p.

6. CASTILLO, Rancés; FERNÁNDEZ, Rodrigo; ANTONI, Mathieu; SCRIVENER, Karen; ALUJAS, Adrián; MARTIRENA, José. *Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas*. Cuba: Universidad Central de las Villas, 2010. 388 p.
7. FERRAZ, Eduardo; ANDREJKOVIČOVÁ, Slávka; HAJJAJI, Walid; VELOSA, Ana Luísa; SILVA, António Santos; ROCHA, Fernando. *Pozzolanic activity of metakaolins by the french standard of the modified chapelle test: a direct methology*. Chequia: Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2015. p. 289–298. <https://doi.org/10,13168/AGG.2015,0026>.
8. GARCIA RAMIRO, Roberto. *Estudio de la huella de carbono de los hogares españoles: evolución nacional (1998-2011) y por comunidades autónomas (2006-2011)*. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2013. 165 p.
9. GARCÍA QUIROZ, María Olivia. *Análisis de la huella de carbono de una industria de concreto y agregados en sus tres alcances*. Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina, 2016. 144 p.
10. GUEVARA PÉREZ, Américo. *Bebidas carbonatadas*. Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina, 2015. 16 p.
11. GUITART MASSANA Jordi D. *Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo*. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2010. 273 p.

12. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change CH). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. [en línea]. <<https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>>. [Consulta: 21 de noviembre de 2020].
13. JIMENEZ MONTOYA, Pedro; GARCIA, MESEGUER, Álvaro; MORÁN CABRÉ Francisco. *Hormigon armado*. España: Editorial Gustavo Gil S.A., 1982. 544 p.
14. LEÓN VELEZ, Ana; GUILLÉN MENA, Vanessa. *Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador*. Ecuador: Ambiente Construido, 2020. 625 p.
15. MADDALENA, Riccardo; ROBERTS, Jennifer; HAMILTON, Andrea. *Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements*. Países Bajos: Elsevier, 2018. 942 p.
16. MARTIRENA HERNANDEZ, Jose Fernando; ALUJAS, Adrian; QUINTANA, Rafael; FERNÁNDEZ, Rodrigo. *Empleo de arcillas caoliníticas de bajo grado activadas térmicamente como una alternativa para el reemplazo parcial de cemento Pórtland*. Cuba: 2010. 28 p.
17. Ministerio de Energía y Minas. *Balance energético 2019*. [en línea]. <<http://www.mem.gob.gt/wpcontent/uploads/2019/08/Balanceenergetico-2019.pdf>>. [Consulta: 1 de diciembre de 2020].

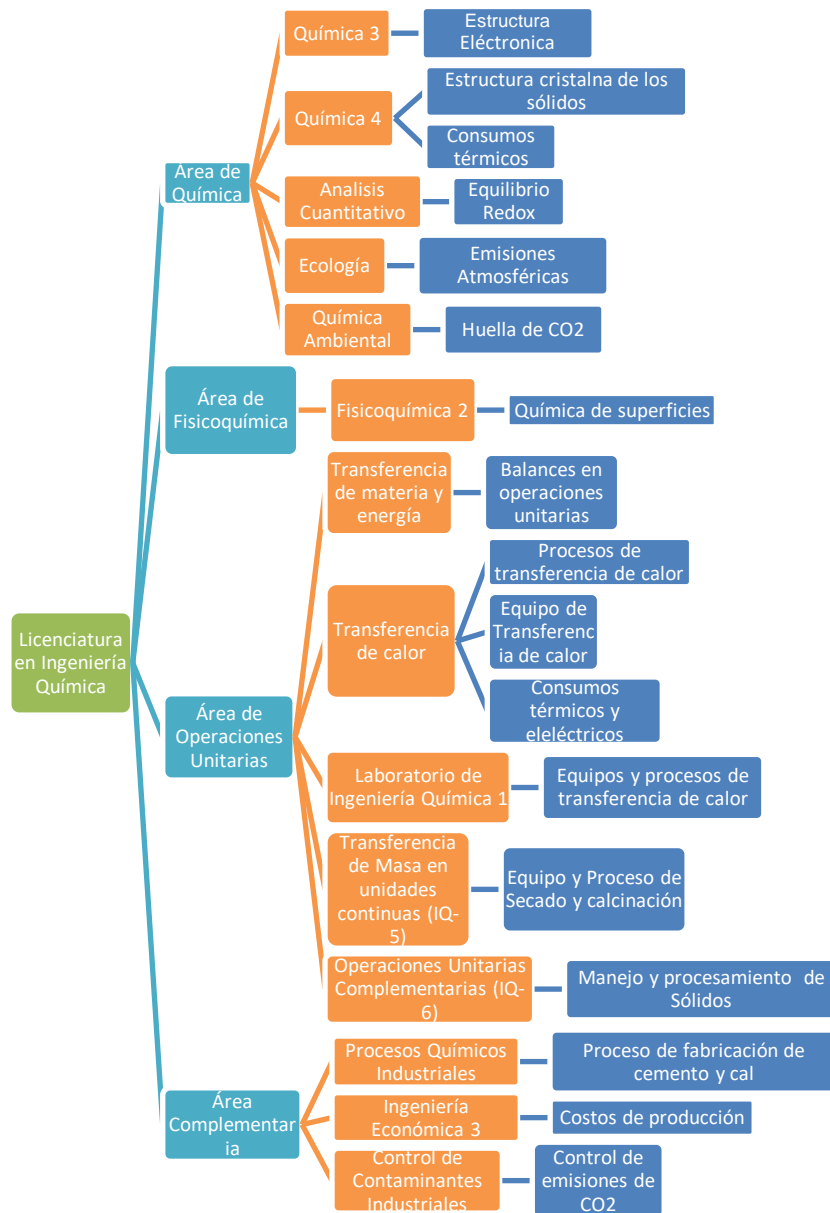
18. MÜLLER, Christian Jörg. *Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics* Suiza: Universidad Pública en Zúrich, 2005. 160 p.
19. Naciones Unidas. *Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. [en línea]. <<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>>. [Consulta:11 de noviembre de 2020].
20. SAMET, Basma; MNIF, Thameur; CHAABOUNI, Moncef. *Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement*. Cement and Concrete Composites, Países Bajos: Elsevier, 2007. 749 p.
21. SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I; FRÍAS, M; RIVERA, J; ESCORIHUELA, M. J.; MARÍN, F. P. *Research about the pozzolanic activity of waste materials from calcined clay*. España: Congreso Internacional de la Química de los Cementos. 2001. 512 p.
22. SANJUÁN BARBUDO, Miguel Ángel; CHINCHÓN YEPES, Servando. *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*. España: Universidad de Alicante, 2014. 253 p.
23. SEMARNAT. *Manifestación de impacto ambiental modalidad particular de proyectos de extracción de materiales pétreos*. México: Semarnat, 2009. 34 p.

24. SUKONTASUKKUL, Piti. *Methodology for calculating carbon dioxide emission in the production of ready-mixed concrete*. Tailandia: Universidad Pública en Bangkok, 2009. 20 p.
25. TIRONI, Alejandra. *Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica*. Argentina: Universidad Nacional de la Plata, 2013. 165 p.
26. WSP Parson Brinkerhoff and DNV GL. *Industrial decarbonisation & energy efficiency roadmaps to 2050: cross sector summary, glass, cement and pulp and paper reports*. [en línea]. <[www.gov.uk/government/publications/industrial-decarbonisation-and-energy-efficiency-roadmaps-to-2050](http://www.gov.uk/government/publications/industrial-decarbonisation-and-energy-efficiency-roadmaps-to-2050)>. <https://www.gov.uk/government/publications/industrial-decarbonisation-and-energy-efficiency-roadmaps-to-2050>>. [Consulta: 5 de enero de 2022].
27. ZHANG, Jingliang; CHENG, Jack C. P.; LO, Irene M. C. *Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong*. Alemania: Springer Nature, 2014. 757 p.



# APÉNDICES

## Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.



Apéndice 3. **Datos referentes a la energía eléctrica suministrada en la industria**

<b>Suministro energía eléctrica</b>	<b>MW utilizados por bagazo de caña</b>	<b>MW utilizados por respaldo carbón</b>	<b>Distribución en porcentaje</b>
<b>Ingenio 1</b>	13,13	18,38	41,67
<b>Ingenio 2</b>	10,42	14,58	58,33
<b>TOTAL</b>	23,54	32,96	100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Emisiones de CO<sub>2</sub> en extracción de materias primas**

<b>Emisiones CO<sub>2</sub> por diésel utilizado en extracción de materias primas</b>		
D.A. (gal)	D.A. (TJ)	Emisiones (ton CO <sub>2e</sub> )
500 998,85	75,07	<b>6 210,48</b>
<b>Emisiones CO<sub>2</sub> por agua utilizada en extracción de materias primas</b>		
D.A. (m3)		Emisiones (ton CO <sub>2e</sub> )
500 998,85		<b>41,87</b>
		<b>Total de emisiones (ton CO<sub>2e</sub>)</b>
		<b>6 252,36</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Emisiones de CO<sub>2</sub> en molienda de materiales crudos**

<b>No. de Molino</b>	<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emisiones (ton CO<sub>2e</sub>)</b>
<b>1</b>	8 854,943	6 129,79
<b>2</b>	17 466,138	12 090,85
<b>3</b>	26 695,816	18 480,05
<b>Total</b>	53 016,897	36 700,70

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Emissiones de CO<sub>2</sub> en clinkerización del horno 1**

<b>Emissiones de CO<sub>2e</sub> por utilización de combustibles</b>			
<b>Tipo de Combustible</b>	<b>D.A. (MJ)</b>	<b>D.A. (TJ)</b>	<b>Emissiones (ton CO2 e)</b>
Coque de petróleo	1 017,350 479,16	1 017,35	99 449,88
Fueloil Bunker	30 100,074,69	30,10	2 337,39
Llantas	37 308,823,22	37,31	3 493,67
Fueloil Bunker	63 461,021,20	63,46	4 927,99
Aceite reutilizado	24 099,966,01	24,10	1 813,33
<b>Total</b>	<b>1 303,190 283,40</b>	<b>1 303,19</b>	<b>122 781,30</b>
<b>Emissiones de CO<sub>2e</sub> por consumo eléctrico</b>			
<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emissiones (kg CO2 e)</b>	<b>Emissiones (ton CO2 e)</b>	
11 599,955,14	8 030 013,96	<b>8 030,01</b>	
<b>Emissiones de CO<sub>2e</sub> por descarbonación de piedra caliza</b>			
<b>Factor de calcinación (ton CaO/ton CaCO3)</b>	<b>Factor de emisiones CO2 (ton CO2/ton CaCO3)</b>	<b>Emissiones (ton CO2 e)</b>	
0,6487	0,3513	<b>164 533,11</b>	
<b>Emissiones de CO<sub>2e</sub> por molienda de coque</b>			
<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emissiones (kg CO2 e)</b>	<b>Emissiones (ton CO2 e)</b>	
1 098,787,72	760 630,59	<b>760,63</b>	
<b>Total de emisiones en ton CO<sub>2e</sub> producidas en horno 1</b>			<b>285 346,01</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Emissiones de CO<sub>2</sub> en clinkerización del horno 2**

<b>Emissiones de CO<sub>2e</sub> por utilización de combustibles</b>			
<b>Tipo de Combustible</b>	<b>D.A. (MJ)</b>	<b>D.A. (TJ)</b>	<b>Emissiones (ton CO2 e)</b>
Coque de petróleo	1 846,134 945,46	1 846,13	180 466,71
Bunker	42 982,196,32	42,98	3 337,73
Llantas	67 208,393,80	67,21	6 293,53
Bunker	151 249,885,93	151,25	11 745,13
Aceites reutilizados	35 144,096,22	35,14	2 644,31
Otros residuos sólidos	77 228,522,65	77,23	7 872,83
<b>TOTAL</b>	<b>2 219,948 040,38</b>	<b>2 219,95</b>	<b>212 360,24</b>

Continuación del apéndice 7.

<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por consumo eléctrico</b>		
<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emisiones (kg CO<sub>2</sub> e)</b>	<b>Emisiones (ton CO<sub>2</sub> e)</b>
23 155,676,94	16 029,407,60	<b>16 029,41</b>
<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por descarbonatación de piedra caliza</b>		
<b>Factor de calcinación (ton CaO/ton CaCO<sub>3</sub>)</b>	<b>Factor de emisiones CO<sub>2</sub> (ton CO<sub>2</sub>/ton CaCO<sub>3</sub>)</b>	<b>Emisiones (ton CO<sub>2</sub> e)</b>
0,65	0,35	<b>321 518,33</b>
<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por molienda de coque</b>		
<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emisiones (kg CO<sub>2</sub> e)</b>	<b>Emisiones (ton CO<sub>2</sub> e)</b>
1 993,915,03	1 380,278,23	<b>1380,28</b>
<b>Total de emisiones en ton CO<sub>2e</sub> producidas en horno 2</b>		<b>551 298,26</b>

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 8. Emisiones de CO<sub>2</sub> en clinkerización del horno 3

<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por utilización de combustibles</b>			
<b>Tipo de Combustible</b>	<b>D.A. (MJ)</b>	<b>D.A. (TJ)</b>	<b>Emisiones (ton CO<sub>2</sub> e)</b>
Coque de petróleo	1 050,796 063,06	1 050,80	102 719,31
Bunker	97 297,849,76	97,30	755,55
Coque de petróleo	1 603,610 172,66	1 603,61	156 758,99
Bunker	13 954,105,47	13,95	1 083,59
Otros residuos sólidos	135 465,508,02	135,47	13 809,62
<b>TOTAL</b>	<b>2 901,123 698,97</b>	<b>2 901,12</b>	<b>281 927,06</b>
<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por consumo eléctrico</b>			
<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emisiones (kg CO<sub>2</sub> e)</b>	<b>Emisiones (ton CO<sub>2</sub> e)</b>	
28 863,722,18	19 980,774,87	<b>19 980,77</b>	
<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por descarbonatación de piedra caliza</b>			
<b>Factor de calcinación (ton CaO/ton CaCO<sub>3</sub>)</b>	<b>Factor de emisiones CO<sub>2</sub> (ton CO<sub>2</sub>/ton CaCO<sub>3</sub>)</b>	<b>Emisiones (ton CO<sub>2</sub> e)</b>	
0,6485	0,3515	<b>473 428,34</b>	

Continuación del apéndice 8.

<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por molienda de coque</b>		
<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emisiones (kg CO<sub>2</sub> e)</b>	<b>Emisiones (ton CO<sub>2</sub> e)</b>
2 177,203,77	157 158,99	1 507,16
<b>Total de emisiones en ton CO<sub>2e</sub> producidas en horno 3</b>		<b>776 843,33</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Resumen de emisiones de CO<sub>2</sub> en clinkerización en hornos**

<b>Horno</b>	<b>ton CO<sub>2e</sub> netas</b>	<b>Clinker producido (ton)</b>	<b>ton CO<sub>2e</sub> netas / ton clinker producido</b>	<b>ton CO<sub>2e</sub> netas por hornos / ton cemento neto producido</b>
1	285 346,01	303 847,89	.0,939	<b>0,6454</b>
2	551 298,26	597 124,67	0,923	
3	776 843,33	873 509,67	0,889	
<b>Total</b>	<b>1 613,487,59</b>	<b>1 774,482,22</b>	<b>0,9093</b>	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Resumen de emisiones de CO<sub>2</sub> en descarbonación de piedra caliza en hornos**

<b>Horno</b>	<b>t CO<sub>2</sub> netas en descarbonación</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> netas en descarbonación/ ton clinker producido en los hornos</b>
1	164 533,111	<b>0,5407</b>
2	321 528,334	
3	473 428,335	
<b>Total</b>	<b>959 489,780</b>	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Huella de carbono en molinos de cemento**

<b>Molino</b>	<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emisiones (kg CO<sub>2</sub> e/año)</b>	<b>Cantidad de cemento molido (ton)</b>	<b>ton CO<sub>2</sub>e/ton cemento molido</b>
1	7 011,410	4 853,62	143 747	0,0391
2	8 778,877	6 077,14	163 421,50	0,0372
3	31 278,014	21 652,06	924 703,60	0,0243
4	32 646,869	22 599,64	1 267,969,74	0,0233
<b>Total</b>	<b>79 715,170</b>	<b>55 182,45</b>	<b>2 499,841,84</b>	<b>0,0221</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Resumen de emisiones de CO<sub>2</sub> por cemento adicionado en molinos de producto final**

<b>Molino</b>	<b>ton CO<sub>2</sub>e de C.P.1</b>	<b>ton CO<sub>2</sub>e de C.P.2</b>	<b>ton CO<sub>2</sub>e de C.P.3</b>	<b>ton de C.P.1 molido</b>	<b>ton de C.P.2 molido</b>	<b>ton de C.P.3 molido</b>
1	-	4 850,32	3 29	-	143673 00	74 00
2	-	6 077,14	-	-	163421 50	-
3	7 954,10	4 837,53	8860 42	428053 50	189859 10	306791 00
4	22 143,35	327,48	128 80	1249833 00	13563 20	4573 54
<b>Total</b>	<b>30 097,46</b>	<b>16 092,47</b>	<b>8 992,52</b>	<b>1 677,886,50</b>	<b>510 516,80</b>	<b>311 438,54</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Huella de carbono por cemento adicionado en molinos de producto final**

<b>Molino</b>	<b>ton de CO2e/ ton C.P.1 molido</b>	<b>ton de CO2e/ ton C.P.2 molido</b>	<b>ton de CO2e/ ton C.P.3 molido</b>
1	-	0,0338	0,045
2	-	0,0372	-
3	0,0186	0 0255	0,0289
4	0,0177	0,0241	0,0282
	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>
	<b>0,0181</b>	<b>0,0301</b>	<b>0,034</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Resumen de emisiones de CO<sub>2</sub> por empaque de producto final**

<b>Tipo de cemento</b>	<b>Datos de actividad (kW*h)</b>	<b>Emisiones (kg CO2 e/año)</b>	<b>Emisiones (ton CO2 e/año)</b>	<b>ton CO2e/ton cemento producido</b>
<b>C.P.1</b>	17 030,542,90	11 789,312,60	11 789,31	0,0047
<b>C.P.2</b>	5 181,747,55	3 587,040,18	3 587,04	0,0014
<b>C.P.3</b>	3 161,187,05	2 188,316,75	2 188,32	0,0009
<b>LC3</b>	1 705,20	1 180,42	1,18	0,000000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Cantidad de adiciones por tipo de cemento**

<b>Adición</b>	<b>Distancia cantera (km)</b>	<b>Distancia de ciclos (km)</b>
1	170	320
2	10	0
3	25	0
4	186	50

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Cantidad de adiciones por tipo de cemento**

<b>Tipo de Cemento</b>	<b>Cantidad de aditivo utilizado en cada cemento (ton)</b>			
	<b>Adición 1</b>	<b>Adición 2</b>	<b>Adición 3</b>	<b>Adición 4</b>
<b>C.P.1</b>	62 081,78	159 399,17	515 111,00	0
<b>C.P.2</b>	26 546,88	20 931,20	42 372,91	0
<b>C.P.3</b>	20 866,95	84 09,07	0	0
<b>LC3</b>	11,76	25,20	0	50,40
<b>Total</b>	109 495,62	188 739,44	557 483,91	50,40

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Cantidad de viajes por tipo de cemento en transporte de adiciones**

<b>Tipo de Cemento</b>	<b>Cantidad de viajes realizados por adición en cada cemento</b>			
	<b>Adición 1</b>	<b>Adición 2</b>	<b>Adición 3</b>	<b>Adición 4</b>
<b>C.P.1</b>	3 104	7 970	25 756	0
<b>C.P.2</b>	1 327	1 047	2 119	0
<b>C.P.3</b>	1 043	420	0	0
<b>LC3</b>	1	1,26	0	2,52
<b>Total</b>	5 475,78	9 438,23	27 874,20	2,52

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Emisiones de CO<sub>2</sub> en transporte de adiciones por tipo de cemento**

Tipo de Cemento	Toneladas de CO <sub>2e</sub> por adición			
	Adición 1	Adición 2	Adición 3	Adición 4
<b>C.P.1</b>	374,26	196,11	475,31	0
<b>C.P.2</b>	160,04	2,58	39,10	0
<b>C.P.3</b>	125,80	1,03	0	0
<b>LC3</b>	0,12	0,003	0	0,12
<b>Total</b>	660,21	199,72	514,40	0,12

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Huella de carbono en transporte de adiciones por cada tipo de cemento**

Tipo de Cemento	ton de CO <sub>2e</sub> / ton de aditivo				ton CO <sub>2e</sub> / ton netas de aditivos
	Adición 1	Adición 2	Adición 3	Adición 4	
<b>C.P.1</b>	0,006028	0,001230	0,000923	0	0 00142
<b>C.P.2</b>	0,006028	0,000123	0,000923	0	0 00224
<b>C.P.3</b>	0,006028	0,000123	0	0	0 00433
<b>LC3</b>	0,010253	0,000123	0	0,002288	0 00274
<b>Total</b>	0,028338	0,001599	0,001845	0,002288	

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 20. **Resumen de huella de carbono en secado de arcillas**

<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por consumo de combustible</b>			
Datos de actividad (ton)	DA (Gg)	DA (TJ)	Emisiones (ton CO <sub>2e</sub> )
45,48	0,05	0,75	76,68
<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por consumo eléctrico</b>			
Datos de actividad (kW*h)	Emisiones (kg CO <sub>2e</sub> )		Emisiones (ton CO <sub>2e</sub> )
43 602,17	30 183,39		30,18
<b>ton de CO<sub>2e</sub> totales en secado</b>			<b>106,87</b>
<b>ton de CO<sub>2e</sub>/ ton de arcilla secada</b>			<b>0,24</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Resumen de huella de carbono en activación térmica de arcillas**

<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por consumo de combustible</b>			
Datos de actividad (ton)	DA (Gg)	DA (TJ)	Emisiones (ton CO <sub>2e</sub> )
35,23	0,04	0,58	59,40
<b>Emisiones de CO<sub>2e</sub> por consumo eléctrico</b>			
Datos de actividad (kW*h)	Emisiones (kg CO <sub>2e</sub> )		Emisiones (ton CO <sub>2e</sub> )
54 452,30	37 694,35		37,69
<b>ton de CO<sub>2e</sub> totales en activación térmica</b>			<b>97,09</b>
<b>ton de CO<sub>2e</sub>/ ton de arcilla activada</b>			<b>0,31</b>
<b>ton de CO<sub>2e</sub>/ ton de arcilla secada y activada</b>			<b>0,549</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Resumen de huella de carbono en molienda de arcillas**

Estimación de emisiones CO2 por consumo eléctrico			Cantidad de arcillas molidas (ton)	ton CO2 e/ ton de arcilla molida
Datos de actividad (kW*h)	Emisiones (kg CO <sub>2e</sub> )	Emisiones (ton CO <sub>2e</sub> )		
10032 00	6944 60	6 945	286,20	<b>0,024</b>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Composición de cada cemento**

Tipo de cemento	Porcentaje componente 1 (%)	Porcentaje componente 2 (%)	Porcentaje componente 3 (%)	Porcentaje componente 4 (%)	Porcentaje componente 5 (%)
<b>C.P.1</b>	56,10	0	3,7	9,5	30,7
<b>C.P.2</b>	82,4	0	5,2	4,1	8,3
<b>C.P.3</b>	90,6	0	6,7	2,7	0
<b>LC3</b>	48,0	30	7	17	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Huella de carbono por composición en una tonelada de cemento**

Tipo de cemento	Huella de carbono componente 1 (ton CO <sub>2e</sub> / ton componente)	Huella de carbono componente 2 (ton CO <sub>2e</sub> / ton componente)	Huella de carbono componente 3 (ton CO <sub>2e</sub> / ton componente)	Huella de carbono componente 4 (ton CO <sub>2e</sub> / ton componente)	Huella de carbono componente 5 (ton CO <sub>2e</sub> / ton componente)
<b>C.P.1</b>	0,510	0	0,0010	0,00015	0,00057
<b>C.P.2</b>	0,749	0	0,0015	0,00007	0,00015
<b>C.P.3</b>	0,824	0	0,0019	0,00004	0
<b>LC3</b>	0,436	0,177	0,002	0,0003	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Huella de carbono neta por formulación de una tonelada de cemento**

<b>Tipo de cemento</b>	<b>Huella de carbono neta por su formulación (ton CO<sub>2e</sub>/ton cemento)</b>
<b>C.P.1</b>	0,5119
<b>C.P.2</b>	0,7509
<b>C.P.3</b>	0,8257
<b>LC3</b>	0,6161

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Huella de carbono neta por cada 1000 psi de resistencia en una tonelada de cemento**

<b>Tipo de cemento</b>	<b>Resistencia mínima a 28 días (psi)</b>	<b>ton de CO<sub>2e</sub>/ Resistencia</b>	<b>ton de CO2 por cada 1000 psi</b>
<b>C.P.1</b>	4500	0,000114	0,114
<b>C.P.2</b>	6200	0,000121	0,121
<b>C.P.3</b>	7400	0,000112	0,112
<b>LC3</b>	6500	0,000095	0,0948

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Huella de carbono equivalente al proceso térmico en el componente principal de los diferentes cementos**

<b>Tipo de Cemento</b>	<b>Componente principal</b>	<b>Huella de carbono equivalente al proceso térmico (ton CO<sub>2e</sub>/ ton componente principal)</b>
Cementos Puzolánicos	<i>Clinker</i>	0,9093
LC3	Arcillas Activadas	0,5490

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 28. **Huella de carbono equivalente al proceso de descarbonatación en la piedra caliza y deshidroxilación de arcillas**

<b>Tipo de Cemento</b>	<b>Componente principal</b>	<b>Huella de carbono equivalente al proceso térmico (ton CO<sub>2e</sub>/ ton componente principal)</b>
Cementos Puzolánicos	Descarbonatación de piedra caliza	0,5407
LC3	Deshidroxilación de arcillas	0,2355

Fuente: elaboración propia.

# ANEXO

## Anexo 1. Especificaciones físicas del cascabillo de café

 gestión integral de residuos	<b>CEMENTOS PROGRESO S.A.</b> LABORATORIO DE PROVERDE Finca San Miguel, kilómetro 46.5 Carretera al Atlántico Sanarate, El Progreso Tel (502) 7952 8000 ext. 7553, 7554 (502) 2338 9112 y 13	
---	---	---

<b>Cliente:</b>	<b>CETEC</b>	<b>Número de informe:</b>	<b>AFRLAB-2021-023</b>
<b>Dirección:</b>	<b>15 AVE. 18-01 ZONA 6 La pedrera</b>	<b>Fecha del informe:</b>	<b>02 de junio 2021</b>
<b>Teléfono:</b>	<b>2286-4100 ext. 6661</b>	<b>Número de muestra:</b>	<b>(ver tabla No. De muestra)</b>
<b>Contacto:</b>	<b>Ing. Roberto Díaz.</b>	<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	<b>N/A</b>

**Identificación de la muestra:** (ver tabla ID cliente)

**INFORME DE ENSAYO**

No. de muestra	ID cliente	Poder Calorífico bruto J/g	Poder Calorífico neto J/g	% Cloruro	% Humedad	% Ceniza	% Azufre
2021060201	CASCABILLO DE CAFE LP	17612	16377	0.10	8.91	1.11	---
2021060202	CASCABILLO DE CAFE LP	17402	16182	0.11	9.47	0.68	---
2021060203	CASCABILLO DE CAFÉ COPROCESO	18356	17069	0.04	8.33	0.46	0.14

**Observaciones:**


**Método:**  
Poder Calorífico bruto J/g ASTM D5468-02 /ASTM D5865 / D5965M – 19  
% Cloruro Método SW-846-EPA 9212  
% HUMEDAD Termogravimetría Sartorius MA150 -MA156  
%Ceniza ASTM D-482-03  
%Azufre ASTM D4239 - 10e1 LECO SC144DR

**Fecha de Análisis:** 2021060201 – AÑO 2016; 2021060202 – AÑO 2016, 2021060203 – AÑO 2018.

**Nota:** resultados de carácter informativo científico, no pueden ser utilizados con fines privados y/o legales.

---

Última Línea

  
**Lic. Carlos Suhul López**  
Químico  
C'eglado No. 3678

**Lic. Carlos Suhul**  
Jefe de Laboratorio

Fuente: Laboratorio de Análisis Físicoquímicos Proverde, Sede San Miguel Guatemala.

