



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE DIÓXIDO
DE CARBONO A TRAVÉS DE LA CARBONATACIÓN Y SU IMPACTO EN EL BALANCE DE
EMISIONES DE LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO EN GUATEMALA**

Israel Peinado Batz

Asesorado por el Ing. Oscar Rafael Pérez Ramírez

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO A TRAVÉS DE LA CARBONATACIÓN Y SU IMPACTO EN EL BALANCE DE EMISIONES DE LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO EN GUATEMALA

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ISRAEL PEINADO BATZ

ASESORADO POR EL ING. OSCAR RAFAEL PÉREZ RAMÍREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Walter Rolando Salazar González
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
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:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO A TRAVÉS DE LA CARBONATACIÓN Y SU IMPACTO EN EL BALANCE DE EMISIONES DE LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 22 de Junio de 2013.



Israel Peinado Batz



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142

ADSE-MEAPP-0015-2013

Guatemala, 26 de junio de 2013.

Director:
Hugo Leonel Montenegro Franco
Escuela de Ingeniería Civil
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de el estudiante **Israel Peinado Batz** con carné número **2002-12798**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"


MA. Ing. Oscar Rafael Pérez Ramírez
Asesor (a)


MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energética


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

Cc: archivo/la



Guatemala,
8 de agosto de 2013
Ref. IC. 042.13

Ingeniero
Hugo Humberto Rivera Pérez
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería
Guatemala

Ingeniero Rivera.

De manera atenta informo a usted que el estudiante Israel Peinado Batz, Carnet No. 200212798, ha cumplido con el proceso de graduación de Licenciatura mediante la modalidad "Estudio de Postgrado", presentando a esta Dirección de Escuela el DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO A TRAVÉS DE LA CARBONATACIÓN Y SU IMPACTO EN EL BALANCE DE EMISIONES DE LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO EN GUATEMALA, asesorado por el MA. Ing. Oscar Rafael Pérez Ramírez, debidamente aprobado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado, por lo que en calidad de Director de la Escuela de Ingeniería Civil, doy mi visto bueno para continuar con el procedimiento correspondiente.

Sin otro particular me suscribo de usted.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de Escuela de Ingeniería Civil



/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

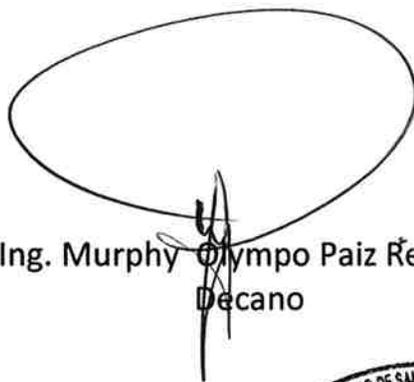


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 553.2013

El Decano 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 Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO A TRAVÉS DE LA CARBONATACIÓN Y SU IMPACTO EN EL BALANCE DE EMISIONES DE LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Israel Peinado Batz**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 9 de agosto de 2013



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por brindarme el privilegio de la vida y permitirme terminar con éxito mi carrera.
- Mis padres** Juan Peinado y Nohemí de Peinado por su amor, esfuerzo, dedicación y apoyo durante toda mi vida.
- Mi esposa** Vanessa Murillo, por ser mi compañera inseparable en cada jornada, por su amor, apoyo y su aliento en momentos de debilidad y cansancio. Te amo.
- Mis hijos** Diego Andrés y Camila Isabella, por ser mi motivación, esperando que en el futuro logren alcanzar sus sueños.
- Mis hermanos** Por su ejemplo, confianza, apoyo y cariño en todo momento.
- Mi familia y amigos** Por ser una parte importante en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por estar conmigo, darme sabiduría, guiarme y protegerme siempre.
Mi familia	Por creer y confiar en mí, además de apoyarme en todo momento.
Mis compañeros y amigos	En especial a Jose Antonio Letona, Kenny Paz, Pablo Montes, Nery Contreras y Christian Berganza.
Mi asesor	El Ing. Oscar Rafael Pérez Ramírez, por su ayuda en la realización de este trabajo.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Especialmente a la Facultad de Ingeniería, por darme las herramientas necesarias y permitirme forjar en sus aulas uno de mis más grandes anhelos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. OBJETIVOS	7
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
6. ALCANCES	13
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	15
7.1. Situación nacional ante el cambio climático	15
7.1.1. El cambio climático	17
7.1.2. Calentamiento global	18
7.1.3. Efecto invernadero.....	19
7.1.4. Incremento de los gases de efecto invernadero	20
7.1.5. El dióxido de carbono	21
7.1.6. Inventarios nacionales de emisiones	23
7.1.7. Escenarios de cambio climático y desarrollo en Guatemala	25
7.1.8. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático.....	28
7.2. La industria del cemento y concreto en Guatemala.....	30
7.2.1. El cemento y el concreto	30

7.2.2.	La producción de cemento y concreto en Guatemala.....	32
7.2.3.	El mercado del cemento.....	35
7.3.	Captura y almacenamiento de dióxido de carbono	37
7.3.1.	Captura de dióxido de carbono	38
7.3.1.1.	Precombustión	39
7.3.1.2.	Oxicombustión.....	39
7.3.1.3.	Postcombustión.....	40
7.3.2.	Tecnologías para la separación de gases	40
7.3.2.1.	Depuración con sorbentes / disolventes	40
7.3.2.2.	Separación por membranas	41
7.3.2.3.	Separación criogénica.....	41
7.3.2.4.	Tecnología de carbonatación mineral ..	41
7.3.3.	Transporte de dióxido de carbono.....	42
7.3.4.	Almacenamiento de dióxido de carbono	42
7.3.4.1.	Almacenamiento geológico	43
7.3.4.2.	Almacenamiento oceánico	44
7.3.4.3.	Carbonatación mineral	44
7.4.	La carbonatación del concreto	45
7.4.1.	Cemento, hidratación y adiciones.	45
7.4.2.	Carbonatación	46
7.4.3.	Química de la carbonatación.....	47
7.4.4.	Mecanismo de la carbonatación.....	49
7.4.5.	Velocidad de carbonatación	50
7.4.6.	Capacidad de absorción de dióxido de carbono.....	52
7.4.7.	Carbonatación natural y acelerada.....	53
7.4.8.	Técnicas de análisis y caracterización	54
7.4.8.1.	Indicador de pH de fenolftaleína.....	55

	7.4.8.2.	Análisis termo gravimétrico y análisis término diferencial.....	55
7.5.		Balance de emisiones de la producción de concreto.....	56
	7.5.1.	Análisis del ciclo de vida.....	56
		7.5.1.1. Definición del objetivo y el alcance	59
		7.5.1.2. Análisis del inventario	59
		7.5.1.3. Evaluación del impacto ambiental	60
		7.5.1.4. Interpretación.....	60
	7.5.2.	Balance de emisiones de la producción de concreto.....	62
8.		HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	67
	8.1.	Variables.....	67
		8.1.1. Variable independiente	67
		8.1.1.1. Definición conceptual e indicadores	67
		8.1.2. Variable dependiente.....	68
		8.1.2.1. Definición conceptual e indicadores	68
9.		CONTENIDO.....	69
10.		MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	73
	10.1.	Investigación preliminar	73
		10.1.1. Documental.....	73
		10.1.2. Administrativa	74
	10.2.	Desarrollo de la investigación.....	74
		10.2.1. Universo de trabajo.....	74
		10.2.2. Muestras	75
		10.2.3. Tratamiento previo.....	76
		10.2.4. Caracterización de las muestras.....	76

10.2.5.	Cálculo de las superficies de carbonatación	77
10.3.	Análisis de resultados	78
11.	RESULTADOS ESPERADOS	81
12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	83
13.	RECURSOS NECESARIOS	85
14.	BIBLIOGRAFÍA	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Producción de cemento en Guatemala 1910-1990	33
2.	Producción de cemento en Guatemala 1991-2009	34
3.	Etapas del ciclo de vida.....	57
4.	Etapas de un análisis de ciclo de vida.....	59
5.	Etapas para el análisis de las emisiones.....	61
6.	Fases del ciclo de vida del concreto	65

TABLAS

I.	Resumen de emisiones y absorciones nacionales 2005.....	25
II.	Producción y consumo de cemento América Latina 2009	35
III.	Perfil medioambiental del concreto	63
IV.	Generación de emisiones y energía usada en el ciclo de vida del concreto	64
V.	Normas aplicables para la elaboración de especímenes	75
VI.	Normas aplicables para la caracterización de las muestras	77
VII.	Recursos administrativos	85
VIII.	Materiales e insumos	85
IX.	Infraestructura y equipos.....	86
X.	Recursos humanos	86

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
atm	Atmósfera
CaCO₃	Carbonato de calcio
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
kg	Kilogramo
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
km	Kilometro
CH₄	Metano
m	Metro
m²	Metro cuadrado
MJ	Millones de Joules
Mt	Millones de toneladas
CaO	Óxido de calcio
O₃	Ozono
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
PIB	Producto Interno Bruto
Q	Quetzales
t	Tonelada

GLOSARIO

Adaptación	Se refiere a la permanencia, aprendizaje y realización de las modificaciones necesarias para convivir con las nuevas condiciones climáticas.
Balance de emisiones	Contiene la estimación de emisiones y absorciones de dióxido de carbono originadas durante el ciclo de vida de un producto.
Cambio climático	Fenómeno ambiental, de carácter esencialmente atmosférico, en el que se observa la alteración del clima a nivel global o regional.
Carbonatación	Reacción química, en la que el hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono y forma carbonato cálcico insoluble.
Cemento	Aglomerante formado de la calcinación y molienda de materiales calizos y arcillas que tiene la propiedad de endurecer al contacto con el agua.
Clinker	Producto de la calcinación de caliza y arcilla, componente principal del cemento Portland.
Concreto	Mezcla de cemento, agua y áridos de diferentes tamaños y composiciones

Emisiones	Exhalación o expulsión de gases producto de la quema de combustibles o procesos industriales.
IPCC	Panel Intergubernamental para el Cambio Climático.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
Vulnerabilidad	Condición en la que una población está o queda expuesta frente a una amenaza.

RESUMEN

La industria del cemento contribuye aproximadamente con el 4,5 por ciento del dióxido de carbono que se emite a la atmósfera a nivel mundial, producto de la calcinación de la piedra caliza y del consumo de combustibles para el proceso. El dióxido de carbono atmosférico se disuelve en el interior del sistema de poros del concreto, reaccionando con los álcalis presentes para formar carbonatos, a este proceso se le denomina carbonatación. El objetivo del presente trabajo, es determinar la captura de dióxido de carbono por carbonatación y establecer el impacto de esta captura sobre el balance de emisiones de dióxido de carbono en la producción de concreto de Guatemala.

Para esto, se determinará la profundidad de carbonatación mediante la aplicación de un indicador ácido-base de fenolftaleína sobre especímenes de concreto, elaborados en condiciones y con materiales comúnmente utilizados, sometidos a un período de carbonatación en atmósfera natural y en cámara de carbonatación. Se establecerá, entonces, el coeficiente o velocidad de carbonatación correspondiente, éste, en adición con el inventario de superficies susceptibles a carbonatación, se utilizará para determinar la cantidad total de concreto expuesta y carbonatada.

Se obtendrá el balance de emisiones de dióxido de carbono en la producción de concreto, con base en las técnicas de evaluación de ciclo de vida, para inferir de este modo el efecto que ejerce la captura por carbonatación.

1. INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país altamente vulnerable a la variabilidad climática. En años recientes se ha observado una creciente preocupación por el cambio climático, fenómeno que se ha reflejado en el país a través de eventos extremos como inundaciones y sequías, que afectan el desarrollo social, económico y ambiental de la sociedad.

El concreto es uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizados en el mundo. Es esencial en la sociedad moderna ya que constituye un material rentable, durable y resistente, aplicable a casi cualquier tipo de infraestructura y edificación. A nivel mundial, la industria del cemento contribuye con cerca del 5 por ciento del dióxido de carbono que se emite a la atmósfera, producto de la calcinación de la piedra caliza y del consumo de combustibles para el proceso.

En las últimas décadas, la industria del cemento ha efectuado un gran esfuerzo para reducir las emisiones de dióxido de carbono en sus procesos y se han alcanzado reducciones sustanciales. Una cuestión importante que rara vez es tomada en los debates ambientales sobre los materiales a base de cemento es la absorción o captura de dióxido de carbono. Tras la exposición al aire, el concreto absorberá dióxido de carbono de la atmósfera, este proceso es llamado carbonatación y es una propiedad intrínseca de los morteros y concretos a base de cemento.

En ese sentido se lleva a cabo este trabajo, para proveer información sobre el impacto de la carbonatación en el balance de emisiones de la

producción de concreto en Guatemala. El estudio se enmarca dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dentro de los lineamientos básicos de *Técnicas instrumentales avanzadas aplicadas al Medio Ambiente y Cambio Climático*.

En la primera parte de este documento se realiza una descripción de la situación nacional ante el fenómeno del cambio climático, se revisan los conceptos de calentamiento global, efecto invernadero, dióxido de carbono, así como los escenarios de cambio climático, desarrollo, vulnerabilidad y adaptación.

En segundo lugar se presenta un retrato de la industria del cemento y concreto en Guatemala, la historia de su desarrollo, la producción y el mercado de estos productos. A continuación se realiza una descripción del estado del arte en materia de captura y almacenamiento de dióxido de carbono, aplicable a la manufactura del cemento y a otras grandes industrias.

Dado que la captura de dióxido de carbono ocurre en el proceso de carbonatación del concreto, en la siguiente parte se describen las características de éste fenómeno, como la química, mecanismos de carbonatación, velocidad y capacidad de absorción, además se examinan las técnicas de caracterización para el análisis del concreto carbonatado.

En la última parte se describen los procedimientos para la elaboración del balance de emisiones de la producción del concreto, como la técnica de análisis de ciclo de vida, inventario de emisiones, evaluación del impacto ambiental, interpretación de los reportes y cargas ambientales específicas de la industria.

2. ANTECEDENTES

La metodología y el impacto que tiene la carbonatación en la evaluación de emisiones de dióxido de carbono del concreto no ha sido completamente documentada. En consecuencia, la contribución de la industria del cemento y concreto a los inventarios de emisiones podría estar sobre estimada. Gajda (2001) realizó un estudio para calcular la cantidad de dióxido de carbono atmosférico que es absorbido por el concreto. El cálculo indicó que el concreto producido durante un solo año en los Estados Unidos, absorbería aproximadamente 274 000 toneladas métricas de dióxido de carbono atmosférico durante el primer año luego de su construcción, indicó además, que el concreto continuaría absorbiendo dióxido de carbono durante toda su vida útil.

Kjellsen, Guimaraes y Nilsson (2005) en su estudio sobre el balance de dióxido de carbono del concreto, concluyen que la carbonatación del concreto ocurre gradualmente durante su ciclo de vida y aún más durante los usos secundarios como material reciclado. Indican que el efecto de captura por carbonatación no ha sido tomado en cuenta dentro de las evaluaciones ambientales de los productos fabricados con cemento.

En su investigación, Belbey et al., (2010) evalúan la influencia de la contaminación atmosférica sobre el avance del frente de carbonatación en ambientes urbanos. Los resultados obtenidos indican que la profundidad del frente de carbonatación se relaciona, fundamentalmente con el tipo de concreto, calidad, así como con las condiciones de humedad, sin detectarse diferencias

significativas entre los valores medidos para concentraciones variables de contaminantes ambientales.

Naik y Kumar (2010) establecieron que cerca del 19 por ciento del dióxido de carbono producido durante la fabricación del cemento, es reabsorbido por el concreto durante su ciclo de vida, determinando que 110 toneladas de cemento Portland ordinario pueden absorber alrededor de 19,1 toneladas de dióxido de carbono, lo cual podría conducir a la ganancia de créditos de carbono negociables mundialmente.

En el estudio de efecto sumidero de los materiales de base cemento, Galán et al., (2010) concluyen que la carbonatación está influenciada principalmente por la humedad, porosidad y tipo de cemento. Establecen que la absorción de dióxido de carbono durante la vida útil de los elementos de concreto varía entre el 1,3 y el 2,1 por ciento de las cantidades emitidas durante la fabricación del cemento utilizado en la construcción de los mismos.

Galán (2011) en su tesis doctoral sobre la carbonatación del concreto, lleva a cabo un estudio sobre la química del fenómeno de carbonatación y desarrolla la experimentación para determinar la absorción de dióxido de carbono y su efecto en el frente de cambio de pH. Establece la evolución temporal de la absorción y su relación con las características del concreto, del cemento y del ambiente de exposición, menciona también que los resultados obtenidos resultan esenciales para calcular la absorción de dióxido de carbono de estos materiales.

Possan, Cristiano y Maiara (2012), realizaron un estudio sobre la carbonatación del concreto en la estructura de la represa de Itaipú Binacional, entre Brasil y Paraguay, en éste se determinó que, la profundidad de

carbonatación oscilaba entre 43 y 71 milímetros, luego de 28 años desde el final de su construcción. Se confirmó también la influencia de las diferentes condiciones de exposición y humedad en la profundidad de carbonatación.

3. OBJETIVOS

General

Determinar el impacto de la captura de dióxido de carbono por carbonatación, en el balance de emisiones de la producción de concreto en Guatemala.

Específicos

1. Evaluar la capacidad de captación de dióxido de carbono en el proceso de carbonatación del concreto.
2. Establecer el inventario de superficies susceptibles a carbonatación de acuerdo a la producción de concreto en Guatemala.
3. Determinar el balance de emisiones de dióxido de carbono durante el ciclo de vida del concreto.

4. JUSTIFICACIÓN

El concreto es un material bien conocido y empleado ampliamente en la construcción, es considerado como un producto rentable, durable y resistente. Durante el proceso de fabricación del concreto no se emiten cantidades significativas de dióxido de carbono, no obstante, la fabricación del cemento, uno de los principales componentes del concreto, es un proceso industrial que produce emisiones de dióxido de carbono intensamente.

El conocimiento de la huella de carbono indica en qué medida se contribuye al cambio climático y es el primer paso para reducir las emisiones a la atmósfera, por esto, se desarrolla la evaluación del desempeño ambiental de este producto, sobre una sólida base científica, tomando todos los aspectos del ciclo de vida y se provee información sobre la carbonatación y su impacto sobre el balance de emisiones del concreto.

Esta información es cada vez más importante en la sociedad de hoy, consciente del cambio climático y del impacto de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. La sociedad es un actor esencial para lograr el cambio y promover acciones sostenibles, pero necesita disponer de información apropiada y actual. El presente estudio se orienta a la generación y divulgación de conocimiento, situado en la realidad guatemalteca.

Refleja y se enmarca en las principales áreas científicas de la Maestría en Energía y Ambiente, específicamente, en la aplicación de los lineamientos de las técnicas instrumentales avanzadas aplicadas al Medio Ambiente y Cambio

Climático, evaluando las interacciones e incidencia en el medio ambiente atmosférico por el consumo de energía y procesos químicos industriales.

Además, confiere a los grupos de interés información sobre el perfil ambiental de los productos a base de cemento, para ser usado en evaluaciones de ciclo de vida de estructuras específicas, así como la revisión de los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Favorece una más acertada cuantificación del balance de emisiones la industria del cemento, permite la evaluación los esfuerzos desarrollados para la reducción de emisiones y la cuantificación de los desafíos de reducción pendientes, estableciendo una línea base para promover una mejora continua.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero Año Base 2005 (MARN, 2012), los principales emisores de dióxido de carbono a nivel nacional son: el transporte, 5,976 millones de toneladas, la industria energética, 2,758 millones de toneladas, la industria manufacturera, 1,731 millones de toneladas y el proceso industrial de la producción de cemento, 1,414 millones de toneladas.

Típicamente, el 55 por ciento de las emisiones provenientes de la producción del cemento hidráulico emanan de la calcinación de la piedra caliza (Harnisch & Müller, 2008), proceso mediante el cual se obtiene óxido de calcio y otros productos que sirven como componentes del cemento.

Se han realizado estudios que demuestran que el concreto endurecido podría fijar parte del dióxido de carbono liberado en el proceso de fabricación del cemento a través de un proceso llamado carbonatación, formando de esta manera minerales carbonatados ambientalmente estables e inertes.

La capacidad del concreto para capturar el dióxido de carbono y la velocidad con la que sucede este proceso depende de muchas variables, incluyendo el tipo de concreto, su aplicación y el ambiente de exposición (Muñoz, Mora, Recalde, 2005). Esta información no ha sido plenamente documentada.

El volumen de dióxido de carbono capturado en la carbonatación del concreto no ha sido tomado en cuenta en los balances de emisiones de ese

producto, por lo tanto, la contribución de la industria del cemento y concreto a los inventarios de emisiones ha sido sobreestimada.

Así, se formula la pregunta central y objetivo general que deberá alcanzarse a través de este trabajo: ¿Qué impacto produce el volumen de dióxido de carbono capturado durante el proceso de carbonatación, en el balance de emisiones de la producción de concreto en Guatemala?.

Para resolver esto se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es la capacidad de captación de dióxido de carbono, por carbonatación, en el concreto endurecido?, de acuerdo a la producción de concreto en Guatemala ¿Qué dimensión total alcanzan las superficies susceptibles a carbonatación?, ¿Cuál es el balance de las emisiones de dióxido de carbono de las actividades relacionadas con el ciclo de vida del concreto?.

Además, puede esperarse como resultado de la investigación otros productos como la generación de nuevas líneas de investigación, fundamento para la formulación de políticas ambientales, influenciar en los criterios de certificación ambiental y alcanzar mejores estimaciones del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros.

6. ALCANCES

El alcance del presente estudio está enfocado a la industria del cemento, concreto y construcción nacional, pero trasciende a otras áreas como:

- Proyectos de investigación en materia de desarrollo sostenible, cambio climático, inventarios de emisiones y materiales de construcción.
- Ingenieros Ambientales, Ingenieros Civiles y desarrolladores de proyectos constructivos.
- Empresas dedicadas a la producción de cemento y concreto.
- Auditores ambientales y consultores.
- Autoridades del sector público ambiental y directivos encargados de la toma de decisiones.

Este estudio se enfoca a la captura de dióxido de carbono, el fenómeno de la carbonatación y el balance de emisiones en la producción de concreto, su análisis y determinación en base al volumen de cemento producido y utilizado para la elaboración de concreto a nivel nacional.

El alcance general de la investigación es descriptivo, cuantitativo y transeccional (Hernández, Fernández, & Baptista, 2008), es decir, que busca especificar las características y factores importantes para la captura de dióxido de carbono.

Se propone describir la química y el mecanismo de la carbonatación del concreto, utilizando dosificaciones, prácticas y materiales producidos y de uso común en Guatemala. Utilizando técnicas aceleradas para representar los

efectos de la carbonatación en ambientes naturales. Así también, pretende determinar cuantitativamente el volumen de dióxido de carbono capturado durante un período de tiempo de un año y evaluar si este volumen es significativo en relación al balance de emisiones de la producción de concreto.

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

7.1. Situación nacional ante el cambio climático

Guatemala es un país muy diverso, sus recursos de flora y fauna son abundantes y característicos, así también lo es su gente. La historia de su pueblo le ha heredado un sinnúmero de particularidades genéticas, ideológicas y culturales únicas.

El territorio nacional se encuentra en la región tropical del continente americano, sin embargo, debido a su amplio relieve, cuenta con una gran variedad de ecosistemas y condiciones de temperatura, humedad y precipitación particulares. El Consejo Nacional de Áreas Protegidas (2008), en su estudio Guatemala y su Biodiversidad, indica: “Así, resultan en variedad de unidades identificables, clasificadas en 10 regiones fisiográficas, 7 biomas, 14 ecorregiones, 66 ecosistemas (41 naturales y 25 intervenidos con actividades antropogénicas, propuesto por el Instituto Nacional de Bosques) y 14 zonas de vida de acuerdo con el sistema Holdridge.”

Guatemala es también uno de los países con mayor vulnerabilidad climática, se cuenta entre las cinco naciones de más alto riesgo en el mundo por la vulnerabilidad de su producto interno bruto (PIB) ante las amenazas, con el 83 por ciento de su PIB generado en áreas de riesgo. Este riesgo se asocia a muchas amenazas meteorológicas específicas y se magnifica por factores como la urbanización mal planificada, la degradación ambiental y la pobreza (IARNA-URL, 2012).

Desde finales de los años noventa esta vulnerabilidad climática se ha evidenciado en el país a través de eventos extremos, como los embates del huracán Mitch (1998) y las tormentas tropicales Stan (2005) y Agatha (2010). Estos eventos demostraron la vulnerabilidad de la infraestructura básica, que garantiza la provisión de agua, saneamiento, energía y el transporte. De igual forma que la infraestructura de tipo social, como las viviendas, las edificaciones, y los servicios de salud.

Es probable que la población de escasos recursos sea la más afectada por el cambio climático, pero todos los habitantes de Guatemala podrían sufrir efectos directos e indirectos. Entre los efectos directos podría estar la pérdida de infraestructura vial por eventos extremos de lluvia, que afectaría fuertemente la actividad comercial y productiva, tanto agrícola como industrial (PNUD, 2009).

Los desastres naturales en un país desarrollado pueden generar pérdidas mucho más altas en términos económicos que las que se puedan estimar en un país con menores grados de desarrollo, sin embargo, en los países pobres suelen perderse mayor cantidad de vidas o infraestructura, lo cual incrementa los índices de pobreza (IARNA-URL, 2012).

Indicadores básicos de la calidad de la vivienda registran que en 2000 la tercera parte de la población urbana de la región centroamericana habitaba viviendas precarias y únicamente el 43 por ciento de los hogares tenían tenencia segura. En 2003 el 43 por ciento de las viviendas rurales tenía piso de tierra, el 12 por ciento tenía techo de materiales no permanentes y el 20 por ciento tenían paredes de materiales livianos o no permanentes (CEPAL, 2011). El Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (2003) estimó que entre el 50 y el 75 por ciento de las pérdidas económicas causadas por el

huracán Mitch, se debieron a una mala gestión del riesgo, que incluyó el mal diseño y ubicación de viviendas, vías, puentes e industrias, así también, la calidad y condición de los materiales de las estructuras.

Las pérdidas también han aumentado progresivamente, debido al crecimiento de las zonas urbanas vulnerables y la carencia de un modelo de desarrollo en zonas ambientalmente frágiles.

Originada por la vulnerabilidad y a la variabilidad climática, en Guatemala se ha presentado una creciente preocupación por el incremento de la temperatura en el planeta y el fenómeno del cambio climático.

7.1.1. El cambio climático

El clima es el resultado de interacciones complejas de procesos en la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre. Las actividades humanas han afectado muchos de estos procesos a lo largo de la historia, pero en el último siglo la humanidad ha logrado un desarrollo científico y tecnológico sin precedentes, que le ha permitido modificar más drásticamente los procesos que regulan el clima (PNUD, 2009).

Se entiende por cambio climático aquel fenómeno ambiental, de carácter esencialmente atmosférico, en el que se observa la alteración del clima a nivel global o regional. Tales alteraciones se producen sobre los parámetros meteorológicos, principalmente a escala geológica, pero es observable en menores escalas de tiempo. Lo que llama la atención a este fenómeno es la violencia con la que se manifiesta, mediante episodios extremos y en breves intervalos de tiempo.

El cambio climático es un fenómeno incierto, aleatorio y generalizado, es por esto que existe la polémica científico - política acerca de si obedece solamente a causas naturales, o bien, puede atribuirse a la intervención humana, dado que el principal agente perturbador del ambiente identificado, el dióxido de carbono (CO₂), tiene su origen en la actividad económica del ser humano. Pero la relativa velocidad de sus manifestaciones, el conocimiento más profundo de sus mecanismos y el intenso seguimiento que se viene haciendo desde hace unas décadas, deja pocas posibilidades de que pueda obedecer solamente a causas naturales, siendo ya de general aceptación la influencia antropogénica en el fenómeno (IARNA-URL, 2012).

7.1.2. Calentamiento global

Los registros de la temperatura del aire en diversas regiones del planeta muestran una clara tendencia al calentamiento de la tropósfera desde la segunda mitad del siglo XIX. Se puede observar que la temperatura media del planeta ha experimentado un incremento de casi 0,5 grados Celsius, si se toma como nivel base la temperatura media registrada entre 1961 a 1990 y de casi 1 grado Celsius si se compara con la segunda mitad del siglo XIX (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007), los estudios sugieren que, sobre la base de las tendencias actuales, las temperaturas medias globales aumentarán en 2 y 3 grados Celsius en los próximos 50 años (Stern, 2006).

Como se indica en el Informe Ambiental de Guatemala (IARNA, 2003), el calentamiento global está estrechamente relacionado con la tendencia de incremento en la concentración del dióxido de carbono atmosférico, lo cual se puede interpretar como una intensificación del efecto invernadero. De allí que frecuentemente se usen indistintamente ambos términos, pero mientras uno

describe el fenómeno del incremento de temperatura reciente, el otro se refiere al mecanismo que lo causa.

7.1.3. Efecto invernadero

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea el planeta, en esta capa se encuentran varios gases que son fundamentales para el desarrollo de la vida en el planeta, además, representa un medio importante en el que reside una gran parte de la vida de la Tierra.

La atmósfera está compuesta mayoritariamente por dos gases, nitrógeno (N), en un 79 por ciento y oxígeno (O₂) en un 20 por ciento. El 1 por ciento del volumen restante está formado por diversos gases, entre los que los más abundantes se encuentran el argón (Ar) en un 0,9 por ciento y el dióxido de carbono en aproximadamente un 0,03 por ciento. Dado que los gases de la atmósfera están sujetos a la atracción gravitacional de la Tierra, los gases de mayor densidad se concentran cerca de la superficie terrestre, en donde se puede distinguir dos capas, la tropósfera, que tiene unos 10 kilómetros en promedio de espesor y la estratósfera, que llega hasta los 50 kilómetros (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007).

Del total de la energía solar que llega al planeta, el 30 por ciento es reflejado hacia el espacio, un 20 por ciento es retenido por la atmósfera y el 50 por ciento restante llega hasta la superficie terrestre. Dado que los gases que forman la atmósfera no pueden absorber con facilidad la luz solar con longitudes de onda corta (inclinadas hacia la luz visible y ultravioleta), dejan pasar la mayor parte hacia la superficie de la Tierra, calentándola.

Al calentarse la superficie de la Tierra, transforma la energía solar en radiación de ondas de longitud grande. Esta energía de onda amplia o infrarroja, puede ser absorbida de manera muy eficiente por algunos de los gases atmosféricos como el vapor de agua y el metano, pero de manera particular el dióxido de carbono, siendo ésta la principal fuente de calor para la atmósfera (IARNA, 2003).

A esto se le llama efecto invernadero y a los gases, cuya presencia en la atmósfera contribuye al efecto invernadero, se les denomina gases de efecto invernadero. Se observa entonces que la composición de la atmósfera afecta de manera fundamental al clima, mientras mayor sea la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre, mayor será la temperatura global. (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007).

7.1.4. Incremento de los gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) existen de manera natural en la atmósfera, pero las actividades humanas dan origen a emisiones adicionales de estos gases, que se acumulan y modifican los ciclos naturales, haciendo variar el clima. El vapor del agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y ozono (O_3) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre y conocidos como gases de efecto directo.

También son importantes los llamados precursores gases de efecto invernadero como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano (COVDM) y los precursores de aerosoles como el dióxido de azufre (SO_2) (MARN, 2012). Se considera el dióxido de carbono el gas de efecto invernadero más importante por ser el que se emite en mayor cantidad y por su período de permanencia en

la atmósfera. Por esto, los parámetros para medir la influencia de cada una de las otras sustancias se han homogeneizado, de forma que sus efectos se expresan en cantidades de dióxido de carbono equivalente.

El incremento en los niveles de GEI asociados a actividades humanas se debe a varios factores como el crecimiento demográfico, el aumento de las actividades industriales, la extracción y uso de combustibles fósiles y la mala disposición de desechos sólidos, pero fundamentalmente se puede atribuir a la quema de combustibles fósiles, a mayores cambios agrícolas y en el uso de la tierra (IARNA, 2003).

7.1.5. El dióxido de carbono

La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha ido aumentando progresivamente desde 280 partes por millón (ppm) en la época anterior a la Revolución Industrial, a 390 partes por millón en 2011 (Le Quéré, et al., 2012). El ritmo actual de crecimiento sigue algunos de los escenarios más intensivos de emisiones usados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), de acuerdo con esto, existe una probabilidad alta de que la temperatura media global experimente un aumento hasta de a seis grados Celsius sobre el nivel pre-industrial para el 2100 (Peters, et al., 2012).

Los bosques del planeta tienen una profunda influencia sobre el contenido de dióxido de carbono atmosférico, gran parte de las variaciones de la concentración atmosférica se relacionan con el ascenso estacional de la actividad de la fotosíntesis (Hengstenberg, 2008). La tala de los bosques, la extensión de la agricultura y la destrucción de las zonas húmedas aceleran la degradación del suelo, liberando dióxido de carbono que se emite a la atmósfera. En Guatemala, el cambio y uso de la tierra produjo el 40 por ciento

de las emisiones de dióxido de carbono reportadas en el Inventario Nacional 2005 (MARN, 2012).

El sector energía domina las emisiones nacionales de dióxido de carbono de origen antropogénico, lo que representa alrededor del 53 por ciento del total. Las emisiones son generadas principalmente por calderas y hornos que queman combustibles fósiles, para el 2005, las emisiones de este sector aumentaron aproximadamente al triple de los niveles reportados en el Inventario Nacional de 1990 (MARN, 2001; MARN, 2012), lo cual se relaciona directamente con el crecimiento de las actividades productivas y la economía en general.

Las emisiones de dióxido de carbono que no están relacionadas con la combustión, provienen de una variedad de procesos industriales que transforman materiales química, física o biológicamente, dichos procesos incluyen: el uso de combustibles como materia prima en los procesos petroquímicos, el uso de carbón como agente reductor en la producción comercial de metales a partir de minerales, la fermentación de biomasa (por ejemplo la producción de alcohol de caña) y la descomposición (calcinación) de la piedra caliza y dolomita en la producción de cemento y cal (IPCC, 2005).

Se prevé que las futuras emisiones de dióxido de carbono sean guiadas por diferentes factores como el desarrollo demográfico, desarrollo socio-económico y cambios tecnológicos. La tecnología específicamente es uno de los motores fundamentales de los escenarios a largo plazo, tanto por la innovación con procesos más eficientes de generación como en el consumo energético (Stern, 2006).

7.1.6. Inventarios nacionales de emisiones

El 13 de junio de 1992, el Gobierno de la República de Guatemala firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y la ratificó mediante el Decreto Legislativo 15-95 (MARN, 2001). En 1997, en el ámbito de la Convención, se asume el Protocolo de Kyoto, un acuerdo internacional que tiene como objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que aceleran el calentamiento global: dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O); además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6), en al menos un 5 por ciento, dentro del período que va desde 2008 a 2012, en comparación a las emisiones en 1990. En 2012 se ratificó el segundo período de vigencia del protocolo desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020 (Hengstenberg, 2008).

Guatemala se adhiere a este acuerdo en 1998 y lo ratifica en 1999, mediante el Decreto 23-99 del Congreso de la República, de acuerdo con esto, Estado de Guatemala adquiere el compromiso de:

- Promover programas de educación y la participación pública.
- Promover la conservación y el mejoramiento de los sumideros de gases (Cualquier proceso, actividad o mecanismo que elimine de la atmósfera un gas de efecto invernadero), la investigación científica relacionada con el cambio climático, así como el intercambio de información.
- Formular e implementar programas nacionales y regionales de mitigación del cambio climático.

- Tomar en cuenta el cambio climático en las políticas, sociales, económicas y ambientales.
- Establecer inventarios nacionales sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y el nivel de absorción por los sumideros.

En base a estos compromisos y con el apoyo de instituciones financieras internacionales, se inició en 1998 la elaboración de la Primera Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático, así como el correspondiente Inventario Nacional de Emisiones de Efecto Invernadero tomando 1990 como línea base. En abril de 2012 el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales publica el Inventario Nacional de Emisiones de Efecto Invernadero: Año Base 2005, que servirá de base para la elaboración de la Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático.

Los inventarios de GEI comprenden la identificación y cuantificación de las emisiones y absorciones de gases capaces de producir el calentamiento global y el cambio climático generadas en un territorio en particular, en este caso la República de Guatemala. Estas emisiones y absorciones son producidas durante el desarrollo de las actividades energéticas, en los procesos industriales, en las actividades de agricultura (agrícolas y pecuarias), en el cambio de uso de la tierra y silvicultura, y por los gases producidas en la disposición de los desechos sólidos y líquidos (MARN, 2012).

Para la elaboración de los inventarios se utiliza la metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) contenida en las Guías Revisadas de 1996 para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, utilizando la información nacional disponible y valores

predeterminados en la metodología mencionada. Las emisiones se presentan en Giga gramos (Gg) que equivalen a 1000 toneladas de cada compuesto.

Tabla I. **Resumen de emisiones y absorciones nacionales 2005**

Gases de Efecto Invernadero y Categorías de Sumideros	CO ₂ Emisiones	CO ₂ Absorciones	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	COVDM	SO ₂
Emisiones y Absorciones Nacionales (Total)	20 8177,88	-24 492,06	271,70	55,05	106,49	1 691,87	414,58	90,49
1. Energía	11 012,65	0	44,50	0,71	87,10	1 078,03	150,81	89,95
2. Procesos Industriales	1 541,09	0	0	0	0	0	263,77	0,54
3. Uso de solventes y otros productos	0			0			0	
4. Agricultura			167,51	53,66	16,88	525,55	0	0
5. Cambio y uso de la tierra silvicultura	8 264,14	-24 492,06	10,09	0	2,51	88,28	0	0
6. Desechos			49,60	0,61	0	0	0	0
7. Otros	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítems de Memo								
Depósitos de búnker internacional	220,96				0,78	0,51		
CO2 emisiones provenientes de la quema de biomasa	17 806,90							

Fuente: MARN. Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero. Año Base 2005. p. 4.

7.1.7. Escenarios de cambio climático y desarrollo en Guatemala

La generación y transformación de energía son las actividades mayormente responsables del aumento observado en la concentración de GEI en la atmósfera y el consecuente aumento en la temperatura media global. Las altas emisiones atribuidas al sector energético se deben a dependencia de los combustibles fósiles, tanto para la generación como para la movilización de los medios de transporte.

La demanda de energía de una sociedad está íntimamente ligada con su nivel de desarrollo económico y tecnológico, de esta cuenta, los países que más contribuyen con emisiones de GEI son los más desarrollados. China aporta el 26 por ciento del total de los gases. Estados Unidos y la Unión Europea en el segundo y tercer lugar mundial, aportan el 17 y 12 por ciento de las emisiones respectivamente. Los países en desarrollo, pero que cuentan con grandes poblaciones contribuyen también al problema, tal es el caso de India, con el 7 por ciento de las emisiones. Guatemala por su parte emite el 0,047 por ciento del total mundial (Le Quéré, et al., 2012).

La dificultad que presenta el cambio climático para ser atacado tiene aspectos tanto políticos como económicos. Por un lado está un modelo de desarrollo basado en la alta dependencia de combustibles fósiles como fuente de energía y por el otro está la falta de voluntad y responsabilidad de los países para generar los incentivos y políticas adecuadas que estimulen a las sociedades actuales a utilizar fuentes de energía más amigables con el ambiente. Lo más preocupante para Guatemala es lo que menciona en 2009 el PNUD sobre el cambio climático y sus efectos sobre el desarrollo humano en Guatemala: “Las sociedades que menos han contribuido a causar el problema serán las que más sufran las consecuencias ya que su pobreza limita las capacidades económicas para buscar una adaptación a fenómenos como inundaciones y sequías y usualmente estas poblaciones viven en lugares más vulnerables a estos fenómenos”.

A pesar que el desarrollo y crecimiento económico está relacionado con la emisión de gases de efecto invernadero, no es necesario elegir entre detener el cambio climático y el crecimiento, ya que, no solamente es posible, sino necesario trabajar en ambos sentidos. En las próximas décadas la mayor parte de las emisiones provendrán de países en desarrollo, debido al rápido

crecimiento de sus poblaciones y a su consumo energético excesivo, pero es en este período de tiempo que se tendrá que implementar medidas de mitigación para lograr al final del mismo una estabilización de la concentración de los gases en la atmósfera en niveles que se consideran aceptables (Stern, 2006).

En el análisis histórico del clima, realizado para la Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (MARN, 2001), se observó una tendencia al incremento en la temperatura media anual durante período 1961-1990. Las temperaturas altas pueden inhibir el desarrollo de ciertos cultivos y por lo tanto representan una amenaza para las poblaciones que dependan de ellos (el trigo por ejemplo). Sin embargo, en algunas partes altas hay cultivos cuyo desarrollo es inhibido por las temperaturas frías, y el incremento de éstas permitiría su cultivo por lo que también puede haber oportunidades.

En el caso de la precipitación, el análisis mostró una disminución de valores anuales a partir de la década de 1970, esta tendencia es significativa estadísticamente y parece ser resultado de la reducción que se observa en la precipitación del trimestre junio-agosto, durante el período llamado canícula. Debido a la dependencia de la lluvia para el desarrollo de la mayoría de cultivos, y en especial, en la agricultura de subsistencia, esta tendencia de sequía podría ser una de las fuentes mayores de vulnerabilidad en el país.

El exceso de lluvia es un problema bajo la perspectiva del riesgo de desastres. Aunque la proyección no muestra un aumento de la precipitación total anual, lo más relevante es la variación climática, puesto que son los eventos extremos de lluvia individuales los que pueden detonar desastres.

Aunque predecir tendencias de las condiciones sociales representa un reto significativo y cargado de incertidumbre, en esa Primera Comunicación

Nacional de Cambio Climático (MARN, 2001) también se crearon escenarios socioeconómicos y demográficos. Estos fueron elaborados considerando el comportamiento de la economía internacional, las políticas económicas nacionales y el grado de atención al desarrollo social enmarcado en el Acuerdo sobre Aspectos Socioeconómicos y Situación Agraria de los Acuerdos de Paz. Los escenarios demográficos fueron establecidos con base en las políticas de planificación familiar y de migración interna.

7.1.8. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático

Los guatemaltecos habitan un territorio en el cual convergen dos realidades, la primera es la exposición de los recursos naturales a procesos acumulativos de deterioro, agotamiento y contaminación, provocados por el sistema económico establecido y cuya dirección es el extractivismo irracional. La segunda realidad es la amenaza inducida por el cambio climático (IARNA-URL, 2012).

La vulnerabilidad se refiere a una condición en la que una población está o queda expuesta frente a una amenaza. Según el IPCC (2011), la vulnerabilidad tiene tres componentes:

- Exposición, que se refiere a la presencia de un riesgo climático, es decir, a los aspectos físicos de la vulnerabilidad.
- Sensibilidad, se refiere al grado en que un sistema responderá a determinado cambio del clima, incluidos los efectos beneficiosos y perjudiciales.

- Capacidad adaptativa, se refiere a la capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad climática y los cambios extremos) para aminorar daños potenciales, aprovechar las oportunidades, o enfrentar sus consecuencias.

Todos los países enfrentan los retos de la vulnerabilidad, pero algunos, ya sea debido a su ubicación geográfica o a sus condiciones socio económicas, poseen riesgos mayores al impacto del cambio climático que otros. Además, algunas naciones están más preparadas para lidiar con estos retos mediante la acción gubernamental, conciencia ciudadana y la capacidad de respuesta del sector privado.

En este sentido, el Instituto de Adaptación Global emplea los tres componentes de la vulnerabilidad, en correspondencia con los indicadores de agua, comida, salud, servicios de los ecosistemas, hábitat humano e infraestructura, para el cálculo del grado de vulnerabilidad de los países, así como el Índice de Adaptación Global (GAIN) (*Global Adaptation Institute*, 2012). Según la estimación del índice GAIN del 2010, Guatemala se encuentra en el puesto número 100 de 161 países considerados.

El índice GAIN se desarrolló como una herramienta para ayudar a priorizar y evaluar el progreso en materia de adaptación al cambio climático y otras fuerzas globales. Está orientado hacia los gobiernos, ONG, instituciones internacionales y sector privado, con el objetivo de que sea utilizada para destacar los desafíos, identificar las áreas de mayor impacto para la acción y orientar la inversión en áreas de adaptación. Al mismo tiempo, para ayudar a los gobiernos, las ONG e instituciones internacionales en la determinación de las acciones y políticas que promuevan y faciliten estas inversiones.

Por otro lado, la capacidad de adaptación está relacionada con la permanencia y el aprendizaje, se considera como una condición para asegurar la sostenibilidad de un sistema e implica la posibilidad de percibir e interpretar los cambios para adaptarse a ellos. La adaptación se refiere a realizar las modificaciones necesarias para convivir con las nuevas condiciones climáticas, en Guatemala, estas acciones han sido orientadas a la salud, recursos forestales, la adaptación de política, tecnología y prácticas de mitigación (IARNA, 2003).

7.2. La industria del cemento y concreto en Guatemala

A nivel mundial, el concreto es el material de construcción más utilizado, y Guatemala sigue esa tendencia. El proceso de desarrollo en que se encuentra inmerso el país, ha requerido disponer de este material para el desarrollo de casi cualquier proyecto constructivo y actualmente es utilizado ampliamente para en infraestructura y vivienda.

7.2.1. El cemento y el concreto

Cuando el hombre se vio en la necesidad de levantar edificaciones utilizando materiales arcillosos o pétreos, surgió la necesidad de obtener pastas o morteros que permitieran unir dichos mampuestos y poder conformar estructuras estables. Inicialmente se emplearon pastas elaboradas con arcilla, yeso o cal, pero se deterioraban rápidamente ante las inclemencias atmosféricas. Se idearon diversas soluciones, mezclando agua con rocas y minerales triturados, para conseguir pastas que no se degradaran fácilmente.

En el siglo I, en la Antigua Roma, de forma totalmente fortuita consiguieron descarboxilar parcialmente las rocas calcáreas y yeso en fogatas recubiertas

de piedra, convirtiéndolas en un polvo aglomerante que reaccionaba con el agua. En 1824 Joseph Aspdin y James Parker patentaron el Cemento Portland, denominado así por su color gris verdoso oscuro similar a la piedra de Portland. Isaac Johnson, en 1845, obtiene el prototipo del cemento moderno, con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura. En el siglo XX surge la industria del cemento, gracias a los avances tecnológicos promovidos por Vicat, Le Chatelier y Michaélis, que logran producir cemento a niveles comerciales y de calidad homogénea (Gomez, 1994).

El cemento es un aglomerante hidráulico, compuesto esencialmente de óxido de calcio, alúmina y sílice finamente pulverizados, que reacciona químicamente al ser hidratado y se endurece gradualmente hasta tomar una resistencia pétreo, tanto conservado bajo agua, como al aire (Velásquez, 2011). El cemento, mezclado con agua y áridos de diferentes tamaños y composiciones, se utiliza, principalmente, para fabricar mortero y concreto. Los morteros se preparan con agregados finos, es decir, arena, mientras que para el concreto son necesarios tanto finos como gruesos.

El concreto puede ser usado en masa o reforzado con armaduras de acero, siendo esta última aplicación la más importante, ya que se trata del material más extensamente utilizado en la construcción debido a sus notables ventajas en versatilidad, resistencia y durabilidad comparado con otros materiales (Galán I. , 2011).

En base al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, se estima que las consecuencias del cambio climático en América Latina y el Caribe serán significativas y la construcción de concreto ocupa una posición dentro de las medidas estratégicas de adaptación (Conde & Saldaña, 2007) . Guatemala se encuentra dentro de los países del mundo que experimentarán con severidad

los efectos del fenómeno, los cambios que provocará el calentamiento global tendrán repercusiones negativas en su población, cuya mayoría vive por debajo del umbral de pobreza.

La migración forzada podría ser una de sus graves consecuencias. En muchos casos, las medidas de adaptación requerirán la construcción de infraestructura preventiva de desastres, hídrica, de salud, vivienda mínima y vías de comunicación. El desarrollo de infraestructura preventiva de desastres, no sólo mejorarán la capacidad de afrontar el problema climático, sino que mejorarán nuestra calidad de vida en general e incluso pueden proveer de ventajas económicas adicionales. (PNUD, 2009).

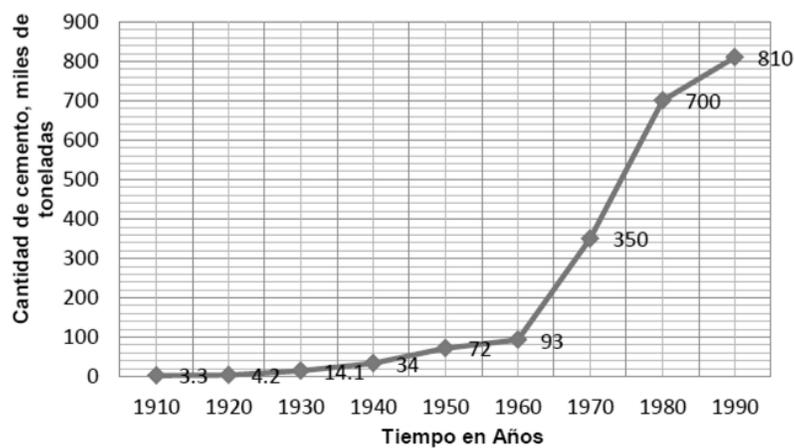
7.2.2. La producción de cemento y concreto en Guatemala

La industria del cemento nace en Guatemala en 1899, cuando Carlos Federico Novella Klee, fundó la empresa cementera “Carlos F. Novella y Cía.”, una de las primeras de América Latina. Inicia su producción en 1901 con una cantidad de 100 sacos de cemento diarios, la producción se mantuvo en pequeña escala durante los primeros quince años, principalmente por la poca práctica en el uso de ese material y por el costo, ya que era superior al de la construcción de adobe, usada predominantemente en esa época. Luego del terremoto de 1917 se incrementó la demanda del cemento, lo cual a su vez motivó a la expansión y modernización de las instalaciones de producción existentes (Porrás & Dougherty, 1992).

Cuando se estableció una producción constante de cemento y se empezó a reconocer el concreto como un material durable y resistente, se extendió su uso en la construcción de edificaciones e infraestructura. Al principio se utilizó solamente el concreto mezclado en obra, hasta que en 1954, con la apertura

de la primera empresa de producción de concreto premezclado, se estableció la industria del concreto (Velásquez, 2011). Esto se debió a la necesidad de construcción principalmente de vivienda, en esta época surge también la industria de prefabricados de concreto.

Figura 1. **Producción de cemento en Guatemala 1910-1990**

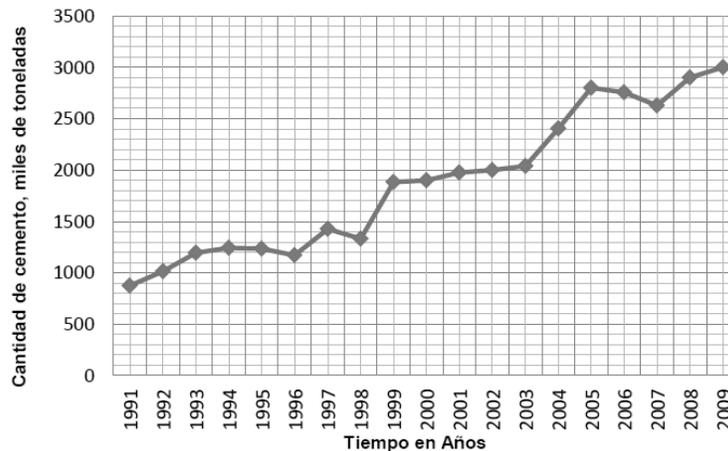


Fuente: VELÁZQUEZ, Martín. Evolución de la industria del concreto en Guatemala. p. 17.

En 1974 Cementos Novella construye una nueva planta de producción en el departamento de El Progreso, debido al aumento en la demanda nacional de cemento, especialmente desde la década de los sesenta. En esta época se cambió el nombre de la empresa a “Cementos Progreso S. A.”, nombre que aún conserva. Esta planta cuenta con capacidad de producir tanto clinker como cemento y, desde 1992, también cal. Esta empresa es la más grande de las cementeras que operan en Centroamérica con una capacidad instalada de producción, en 2009, de 2 millones de toneladas al año de clinker, 3 millones de toneladas de cemento y 0,32 millones de toneladas de cal (Millan, 2012).

En 2010 inician la construcción de una planta de producción de cemento, con capacidad de 2.1 millones de toneladas anuales, en la finca San Gabriel Buena Vista, San Juan Sacatepéquez, en la localización se dispone de reservas de materia prima para 50 años, se espera que las operaciones inicien en 2015 (International Cement Review, 2011).

Figura 2. **Producción de cemento en Guatemala 1991-2009**



Fuente: VELÁZQUEZ, Martín. Evolución de la industria del concreto en Guatemala. p. 35.

En 2004, la empresa *Global Cement*, integrada con capital guatemalteco y español, inicia la construcción de una fábrica de cemento en Guatemala, con capacidad de producción anual de 500 mil toneladas de cemento. Las instalaciones comenzaron a operar en 2005, en agosto de ese mismo año *Global Cement* fue adquirida por la empresa Cementos Mexicanos. De esta forma, CEMEX, se situó como segundo productor de cemento en Guatemala (Millan, 2012). Al 2012, las operaciones de CEMEX Guatemala consistían en un molino de cemento (con una capacidad de 0,5 millones de toneladas métricas por año), una terminal marítima, tres centros de distribución terrestre y cuatro plantas de concreto premezclado (*International Cement Review*, 2011).

En 2009 Guatemala produjo 2,75 millones de toneladas de cemento, con esta cifra, Guatemala se coloca en el primer lugar centroamericano y en el noveno de diecisiete países productores de cemento en Latinoamérica.

Tabla II. **Producción y consumo de cemento América Latina 2009**

PAÍSES	PRODUCCIÓN		CONSUMO	
Argentina	9,41	6,6%	9,22	6,7%
Brasil	51,70	36,5%	51,90	37,6%
Chile	3,88	2,7%	4,16	3,0%
Caribe*	6,81	4,8%	5,31	3,8%
Colombia	9,10	6,4%	8,40	6,1%
Costa Rica	1,60	1,1%	1,20	0,9%
Cuba	1,64	1,2%	1,32	1,0%
Ecuador	4,99	3,5%	5,30	3,8%
El Salvador	1,50	1,1%	1,50	1,1%
Guatemala	2,75	1,9%	2,86	2,1%
Honduras	1,70	1,2%	1,60	1,2%
México	35,81	25,3%	34,59	25%
Nicaragua	0,65	0,5%	0,60	0,4%
Panamá	1,10	0,8%	1,20	0,9%
Perú	7,23	5,1%	7,25	5,3%
Puerto Rico	0,80	0,6%	0,98	0,7%
Uruguay	1,05	0,7%	0,70	0,5%
Total	141,72%	100,0%	138,09	100,0%

* Incluye Bahamas, Barbados, Guadalupe y Martinica, Haití, Jamaica, Rep. Dominicana, Trinidad & Tobago

Fuente: FICEM. Informe Estadístico 2011. p. 12.

7.2.3. El mercado del cemento

La industria del cemento y productos a base de cemento es uno de los negocios de mayor crecimiento en el mundo, especialmente en países en desarrollo, como Guatemala. En el período comprendido entre 1998 y 2009 la producción de cemento creció desde 1,329 hasta 2,75 millones de toneladas, duplicando prácticamente su volumen (Schatan & Avalos, 2003; FICEM, 2011). Esto pudiera deberse a los cuantiosos capitales que en los últimos años han fluido al mercado cementero de Centroamérica de manera particular desde

principios de los años noventa cuando se iniciaron los procesos de fusiones de empresas nacionales con empresas multinacionales.

En 2000, el grupo suizo Holcim, segundo mayor productor de cemento y concreto a escala mundial, adquirió el 20 por ciento del capital accionario de Cementos Progreso (Romero & González, 2006), capital que vende de vuelta a los accionistas mayoritarios de la empresa en 2012. Otro aspecto que ha influido en el crecimiento del mercado es el de la innovación tecnológica, la empresa con la mayor capacidad de producir cemento en América Central, fue pionera en el uso de combustibles alternativos (petcoke y carbón mineral) y ha sido la primera en incinerar lubricantes y residuos de buques marinos y centrales termoeléctricas, así como de otros residuos (llantas, plásticos, etc.) (Schatan & Avalos, 2003).

La industria cementera, en general, tiene un comercio internacional limitado debido a una serie de restricciones naturales inherentes a las características del producto. El cemento, es un producto con un alto peso y de pronta caducidad (depende de la humedad del ambiente), por lo tanto, de difícil transporte y almacenamiento.

En 2010 el consumo de cemento en Guatemala ascendió a 2,67 millones de toneladas, el sector vivienda ocupó alrededor del 53 por ciento del consumo nacional de cemento, el comercio y la industria en conjunto contabilizan el 41 por ciento y la construcción de carreteras requirió el 6 por ciento o 0,175 millones de toneladas. La mayoría del cemento es transportado en bolsa, solamente el 15,2 por ciento se suministra a granel. (*International Cement Review*, 2011).

De acuerdo con el *Global Cement Report* (2011), Guatemala exportó alrededor de 0,11 millones de toneladas de cemento y clinker en el 2008, la mayor parte (73%) correspondiente al clinker. Durante 2009 y 2010, la exportación de clinker y cemento se redujo a 0,089 y 0,048 millones de toneladas respectivamente. Las exportaciones se realizan principalmente a los mercados de El Salvador y Honduras con pequeños envíos de producto hacia Panamá, Nicaragua, Costa Rica y República Dominicana.

En relación a las importaciones, en 2008 ingresaron al país 0,330 millones de toneladas de cemento y clinker, la mayor parte correspondiente nuevamente al clinker (56%). Durante el 2009 y 2010 la importación se vio también reducida. Mientras el clinker se importa desde México y Corea del Sur, el cemento proviene principalmente de República Dominicana, El Salvador, México, Colombia y Belice.

Aunque el sector construcción tuvo una caída en picada hacia la mitad del 2010, sigue habiendo un amplio margen para proyectos de construcción, particularmente después de la devastación causada por los desastres naturales ese año. Como resultado, se espera que la demanda se recupere, registrando un crecimiento entre de 1,4 y 4,3 por ciento anual en los siguientes tres años (*International Cement Review*, 2011).

7.3. Captura y almacenamiento de dióxido de carbono

De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático IPCC (2005), la captura y almacenamiento de dióxido de carbono es considerada como una de las opciones para reducir las emisiones de dióxido de carbono provenientes de las actividades humanas, ésta se refiere al proceso

mediante el cual se retira dióxido de carbono de la atmósfera, o bien, se evita que llegue a ella.

La técnica está compuesta por tres procesos principales, captura, transporte y almacenamiento. Tal como expone Stern (2006), ninguna tecnología por si sola logrará proveer de toda la reducción necesaria de emisiones para la estabilización de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, desde esta perspectiva, la captura y almacenamiento de dióxido de carbono es consistente con este objetivo mundial.

El dióxido de carbono es emitido principalmente en la quema de combustibles fósiles, ya sea en grandes unidades de combustión usadas para la generación eléctrica, como en pequeñas unidades residenciales y comerciales. Las emisiones también pueden ser resultado de algunos procesos industriales de extracción, transformación y la quema de biomasa en el sector agrícola.

7.3.1. Captura de dióxido de carbono

La principal aplicación de la captura de dióxido de carbono puede ser en grandes fuentes puntuales como plantas generadoras de energía, plantas de procesamiento de combustibles y otras plantas industriales, particularmente, la manufactura de hierro, acero, cemento y productos químicos a granel. La captura en fuentes de emisión pequeñas resulta más difícil y costoso (IPCC, 2005).

El almacenamiento de dióxido de carbono solo es posible si está lo suficientemente concentrado como para que sea posible su compresión hasta

alcanzar un estado denominado supercrítico (densidad de 760 kg/m^3 a $21,1^\circ\text{C}$). Por este motivo, los sistemas de captura tienen como objetivo la obtención de una corriente concentrada en dióxido de carbono preparada para su transporte y almacenamiento permanente. Muñoz, Mora & Recalde (2011) describen tres sistemas básicos para la captura de dióxido de carbono proveniente del uso de combustibles fósiles o biomasa: precombustión, oxcombustión y postcombustión.

7.3.1.1. Precombustión

La captura por precombustión involucra la reacción de un combustible con oxígeno, aire o vapor para producir un gas combustible compuesto de monóxido de carbono e hidrógeno. El monóxido de carbono se procesa en un reactor-cambiador catalítico para obtener dióxido de carbono y más hidrógeno. El dióxido de carbono es separado usualmente por un proceso físico o químico de absorción, dando como resultado un combustible rico en hidrógeno que puede ser utilizado en muchas aplicaciones como calderas, hornos turbinas a gas, motores y celdas de energía.

7.3.1.2. Oxcombustión

Las tecnologías de oxcombustión consisten en sustituir el aire por oxígeno como comburente. Como resultado, la concentración de dióxido de carbono en los gases efluentes se incrementa significativamente, pasando de un 7-33 por ciento en volumen de una combustión con aire a un 80 por ciento en una combustión con oxígeno o con una mezcla enriquecida con oxígeno. En este caso, la captura de dióxido de carbono resulta relativamente sencilla, simplemente con un proceso de purificación que elimine los compuestos de azufre y de nitrógeno.

7.3.1.3. Postcombustión

La captura de dióxido de carbono en procesos postcombustión implica la retirada del dióxido de carbono presente en los gases expulsados tras la quema del combustible. En lugar de descargarse a la atmósfera, los gases efluentes son conducidos a través de equipos que separan la mayoría del dióxido de carbono.

7.3.2. Tecnologías para la separación de gases

Los sistemas de captura, tienen como objetivo la separación del dióxido de carbono para la obtención de una corriente concentrada apta para su transporte y almacenamiento. Esta separación se puede desarrollar a través de diferentes tecnologías, cada una de ellas adaptada al tipo de proceso y caracterización de los gases efluentes.

7.3.2.1. Depuración con sorbentes / disolventes

La separación se alcanza por el paso del gas efluente a través de un medio que contiene un material líquido o sólido que absorbe el dióxido de carbono. El sorbente cargado con el dióxido de carbono, es transportado a un depósito donde libera el dióxido de carbono (regeneración) a través de un proceso de calentamiento, disminución de la presión o alterando las condiciones del material (CONAMA, 2010). Luego de regeneración se envía de regreso para realizar la captura nuevamente en un proceso cíclico.

7.3.2.2. Separación por membranas

Se basa en la interacción física o química de los gases con el material de la membrana, provocando que un gas pase a través de ella más rápido que otro. Se han desarrollado varios tipos de membrana para la separación del dióxido de carbono, incluidas membranas metálicas, poliméricas y cerámicas.

En general las membranas no tienen una elevada capacidad de separación, por este motivo se necesitan varias etapas o la recirculación de los humos para la adecuada separación de los gases, aumentando la complejidad del sistema, el consumo energético y los costes.

7.3.2.3. Separación criogénica

Este proceso consiste en la licuación de los gases para su posterior destilado, como la temperatura de licuación del dióxido de carbono es conocida, es posible filtrarlo del resto de gases. Este proceso tiene como inconvenientes: la excesiva presión que se necesita (más de 5,1 atm) y las reducidas temperaturas que se deben alcanzar (-56,6°C), por lo que se trata de un proceso con un intensivo consumo de energía (CONAMA, 2010).

7.3.2.4. Tecnología de carbonatación mineral

Esta tecnología de adsorción química permite capturar el dióxido de carbono a través de la carbonatación, esto se obtiene de las reacciones de óxidos (Calcio y Litio) con el dióxido de carbono para formar carbonatos, luego mediante la calcinación se puede realizar la separación controlada para obtener nuevamente el disolvente y reiniciar el ciclo. El mayor inconveniente de esta alternativa es que se requieren grandes cantidades de disolvente debido al

proceso de degradación que se presenta durante el proceso de adsorción, sin embargo el material degradado puede ser aprovechado en otros procesos, como el de fabricación del cemento.

7.3.3. Transporte de dióxido de carbono

A no ser que la planta generadora de emisiones se encuentre directamente en el punto de almacenamiento o aprovechamiento del dióxido de carbono, este debe transportarse, para esto se debe encontrar un medio de transporte económico y seguro. Para el transporte en tuberías se debe disponer del dióxido de carbono en estado supercrítico, ya que se ha demostrado que es la manera más viable. Cuando un compuesto o elemento está en dicho estado, este tiene la densidad de un líquido y la viscosidad de un gas, mientras que en forma de gas, el volumen específico es demasiado elevado lo que haría inviable la infraestructura desde un punto de vista técnico económico.

Para el transporte en vehículos, la opción más adecuada sería la licuefacción, tal y como demuestra la experiencia del gas licuado de petróleo (GLP) y del transporte a pequeña escala de dióxido de carbono con fines industriales (Muñoz, Mora, & Recalde, 2011).

7.3.4. Almacenamiento de dióxido de carbono

Luego de que se ha capturado el dióxido de carbono, éste debe almacenarse o utilizarse en algún proceso como materia prima. La mayor parte del dióxido de carbono capturado deberá ser almacenado, ya que, la demanda para su uso es muy inferior al nivel de emisiones, para esto se requiere tener un conocimiento preciso del medio de almacenaje.

7.3.4.1. Almacenamiento geológico

El almacenamiento geológico representa una manera de evitar la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, capturando el dióxido de carbono de las emisiones de fuentes estacionarias mayores, transportándolo e inyectándolo en una adecuada formación rocosa profunda.

El almacenamiento geológico de dióxido de carbono ha sido un proceso natural en la corteza terrestre por millones de años, el dióxido de carbono derivado de la actividad biológica y volcánica se acumula en el ambiente subterráneo en forma de minerales carbonatados, en solución o en estado gaseoso. La inyección tecnificada de dióxido de carbono en las formaciones geológicas subterráneas fue por primera vez aplicada en Texas, Estados Unidos, a principio de los años setenta y ha continuado desde entonces en muchos otros lugares. El almacenamiento geológico de dióxido de carbono como opción para la mitigación del efecto invernadero fue poco investigado hasta los años noventa cuando la idea ganó credibilidad a través de grupos de trabajo individuales (IPCC, 2005).

En poco más de una década el almacenamiento pasó de ser un concepto de interés limitado a uno que es considerado como una opción de mitigación importante. Esto se debe a varias razones, en primer lugar, se ha desarrollado mayor investigación y los proyectos comerciales se han llevado a cabo con éxito, además, existe la necesidad de ampliar la gama de opciones y esta tiene potencial para recortar las emisiones atmosféricas de dióxido de carbono.

7.3.4.2. Almacenamiento oceánico

El almacenamiento intencional de dióxido de carbono en el océano consiste en inyectar el gas captado directamente en el fondo oceánico, en el que la mayor parte queda aislada de la atmósfera durante siglos. Esto se logra mediante el transporte de dióxido de carbono por ductos o buques al lugar de almacenamiento oceánico, donde se inyecta en la columna de agua del océano. Posteriormente, el dióxido de carbono disuelto se dispersa y se convierte en parte del ciclo global del carbono (IPCC, 2005). El almacenamiento oceánico sigue en fase de investigación, aunque se han realizado experimentos sobre el terreno a pequeña escala, así como estudios de laboratorio y modelos de almacenamiento oceánico.

7.3.4.3. Carbonatación mineral

La carbonatación mineral se refiere a la fijación de dióxido de carbono en rocas y compuestos de silicatos a través de la reacción química que se produce con los óxidos alcalinos (óxido de magnesio y óxido de calcio) formándose compuestos como el carbonato de magnesio y el carbonato de calcio.

Existen reservas de óxidos metálicos en toda la corteza terrestre, adicionalmente estos óxidos también están presentes en materiales como el cemento, la cal y muchos desechos industriales como la escoria o ceniza volante. La carbonatación mineral produce elementos estables durante largos períodos de tiempo y que, por lo tanto, pueden eliminarse en distintos lugares sin producir efectos ambientales adversos o pueden reutilizarse con fines de construcción. El principal interés en la técnica de carbonatación mineral está relacionado con el carácter permanente de la captura del dióxido de carbono, ya

que, éste no es liberado nuevamente a la atmósfera (Muñoz, Mora, & Recalde, 2011).

7.4. La carbonatación del concreto

La industria del cemento contribuye aproximadamente con el 4,5 por ciento del dióxido de carbono que se emite a la atmósfera (Le Quéré, et al., 2012), destacando que el cemento en su proceso de fabricación desprende el dióxido de carbono como producto de la calcinación de la piedra caliza y del consumo de combustibles para el proceso. En ambiente natural, el dióxido de carbono atmosférico se disuelve al interior del sistema de poros del concreto, reaccionando con los álcalis presentes para formar carbonatos, al proceso se le denomina carbonatación.

7.4.1. Cemento, hidratación y adiciones

El cemento Portland se obtiene como resultado de la calcinación de piedra caliza y arcilla a una temperatura aproximada de 1 450 grados Celsius. Durante este proceso ocurre la fusión parcial de la mezcla de materiales para la formación de clinker, luego, se procede a la molienda de clinker junto con un pequeño porcentaje de sulfato de calcio para producir el cemento. La composición típica del cemento Portland es óxido de calcio (CaO, 67%), óxido de silicio (SiO₂, 22%), óxido de aluminio (Al₂O₃, 5%), óxido de hierro (Fe₂O₃, 3%) y otros componentes. Generalmente contiene cuatro fases mayoritarias: la alita o silicato tricálcico, la belita o silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico (Galán I. , 2011).

En proporciones correctas, la mezcla de cemento y agua forma una pasta, que endurece como consecuencia de las reacciones de hidratación en los

elementos que la constituyen. La relación agua/cemento (a/c) en masa en las pastas de cemento suele estar comprendida entre 0,3 y 0,6 (Galán I. , 2011).

Las propiedades mecánicas de resistencia y endurecimiento dependen de los productos de hidratación, que son la portlandita o hidróxido de calcio y el gel de silicato de calcio hidratado (CSH) (Gomez, 1994). Los llamados cementos compuestos, están formados por cemento Portland y uno o varios materiales inorgánicos, a estos materiales se les llama “adiciones minerales”. Las adiciones minerales activas más importantes son las escorias de alto horno, las puzolanas naturales, las cenizas volantes y el humo de sílice (Galán I. , 2011).

Para fabricar morteros y concretos se utiliza el cemento, mezclado con agua y agregados pétreos de diferentes tamaños. A pesar de que el concreto endurecido es sólido compacto y denso, éste es un material poroso y permeable, hasta cierto punto, a líquidos y gases (Galán I. , 2011).

7.4.2. Carbonatación

En relación a la carbonatación del concreto, Galán (2011) afirma:

La alta alcalinidad del hormigón (...) es debida principalmente a la portlandita formada durante la hidratación de los compuestos anhidros del cemento y a los hidróxidos de sodio y potasio presentes. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros del hormigón en valores entre 12,6 y 14, en el extremo más alcalino de la escala de pH. El descenso de la alcalinidad se produce principalmente por reacción de los compuestos de carácter básico de la fase acuosa del hormigón, hidróxidos de sodio, potasio y calcio, con los componentes ácidos de la atmósfera, dióxido de carbono (CO_2) y de azufre (SO_2), para

formar carbonatos, sulfatos y agua. (...) este proceso se denomina genéricamente 'carbonatación'.

Además del efecto en la corrosión del refuerzo, la carbonatación puede dar lugar a aumentos en las resistencias a tracción y a compresión de las zonas afectadas, así como a tensiones y microfisuración. Asimismo, dado que durante la reacción el dióxido de carbono atmosférico se fija de forma irreversible, la carbonatación del hormigón es también muy importante desde el punto de vista medioambiental. (p. 3).

7.4.3. Química de la carbonatación

La atmósfera contiene cantidades sustanciales de dióxido de carbono en estado gaseoso, sin embargo, éste no puede reaccionar directamente con los álcalis del concreto, para esto debe disolverse en agua y formar iones de carbonato que entonces reaccionaran con los iones de calcio contenidos en agua de los poros del concreto. El proceso de carbonatación se puede describir por las siguientes ecuaciones químicas:

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HCO}_3^-$ ión bicarbonato + H^+
- $\text{HCO}_3^- = \text{CO}_3^{2-}$ ión carbonato + H^+

El ión carbonato reaccionará con el ión de calcio contenido en la solución de los poros para formar el carbonato de calcio.

- $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{CaCO}_3$

Esto conducirá a una concentración menor de iones de calcio que a su vez dará lugar a la disolución de todo el hidróxido de calcio. La solubilidad del

carbonato de calcio es mucho menor que la del hidróxido de calcio, así, este proceso continuará hasta que todo el hidróxido de calcio sea consumido.

Además de hidróxido de calcio, la pasta de cemento contiene silicato de calcio hidratado (CSH) y otras fases hidratadas como la ettringita (AFt) y el monosulfato (AFm). Estos componentes se mantienen en equilibrio y son estabilizados por el pH elevado. A medida que la concentración de ión de calcio disminuye y se eleva el pH, se disuelven de manera congruente. Cuando el nivel de pH ha caído a un nivel menor de 9,2, no permanece ninguna de las fases originales que contienen calcio, ya que éste se habrá unido al carbonato de calcio, aunque alguna cantidad permanecerá en el gel CSH (Lagerblad, 2006).

Para poder determinar la cantidad de dióxido de carbono fijado se debe conocer cuánto calcio permanece en el concreto carbonatado. Frecuentemente, la profundidad de carbonatación en el concreto es determinada a través de un indicador colorante de fenolftaleína. Este pierde su color cuando el pH es menor a 10 que corresponde a una relación de óxido de calcio y óxido de silicio (CaO/SiO_2) menor que 0,8 (Galán I. , 2011). Se ha estimado que en una pasta de cemento con un contenido en peso del 65.3 por ciento de óxido de calcio, el 31,4 por ciento se une al silicato de calcio hidratado (CSH).

Todo el hidróxido de calcio formará carbonato de calcio, la mayoría del óxido de calcio del silicato de calcio hidratado (CSH) formará carbonato de calcio. Si asumimos que todo el óxido de calcio en el hidróxido de calcio y la mitad del óxido de calcio en el silicato de calcio hidratado (CSH) se transforma, cerca del 24 por ciento del óxido de calcio original en el cemento permanece sin carbonatar (Lagerblad, 2006).

7.4.4. Mecanismo de la carbonatación

El mecanismo de carbonatación ocurre en la fase acuosa del concreto y depende de la solubilidad y velocidad de difusión. La difusión es controlada por diferencia en las distintas concentraciones, además, se debe considerar el efecto de la capa carbonatada de la estructura. Los procesos de difusión de iones de carbonato y dióxido de carbono gaseoso ocurren hacia el interior del elemento de concreto, la difusión del gas es mucho más rápida que la de los iones (Lagerblad, 2006).

La velocidad de carbonatación depende también de la humedad del concreto, en el concreto seco el dióxido de carbono puede penetrar profundamente pero no existe suficiente agua para la reacción de carbonatación, por otra parte, en el concreto saturado con agua solo pueden penetrar los iones de carbonato y la carbonatación es lenta (Galán, Andrade, Prieto, Mora, Lopez, & Sanjuán, 2010). Por lo tanto, existe un punto óptimo donde la carbonatación es máxima.

La carbonatación acarrea también cambios volumétricos, la transformación del hidróxido de calcio en calcita produce un aumento de volumen del 11 por ciento. Los cambios de volumen afectarán la porosidad de la capa carbonatada y de esta forma la velocidad de difusión. Se sabe que éste cambio de volumen no afecta la estabilidad mecánica del concreto carbonatado, esto indica que el volumen adicional ocupa principalmente el espacio en el sistema capilar, densificando la pasta de cemento (Lagerblad, 2006).

7.4.5. Velocidad de carbonatación

Mientras se encuentre disponible dióxido de carbono y condiciones adecuadas de humedad, puede ocurrir la carbonatación del concreto. La velocidad de carbonatación depende de cuán rápido se puede mover el dióxido de carbono o los iones de carbonato dentro del concreto y reaccione con la pasta de cemento. En los casos cuando el concreto se encuentra sumergido o enterrado, la accesibilidad será limitada, pero ocurrirá (Lagerblad, 2006). En condiciones normales se considera que el dióxido de carbono gaseoso se encuentra disponible y se puede suponer como constante sobre la superficie del concreto.

La mayoría de modelos existentes para cuantificar la profundidad de carbonatación en el concreto se basan en distintas soluciones de la Ley de Fick y su Ecuación de Difusión. La difusión se refiere al flujo de materia a través de un medio en el cual existe un gradiente de concentraciones. Ésta ley nos dice que el flujo difusivo que atraviesa una superficie es directamente proporcional al gradiente de concentración (Galán, et al., 2010). No es posible un conocimiento exacto sobre todos los parámetros que gobiernan la velocidad de carbonatación, pero esta puede ser simplificada por coeficientes que toman en cuenta la influencia de los diferentes factores. Se puede calcular la profundidad de carbonatación para cada tipo de concreto y dado un ambiente específico, según la siguiente expresión:

$$x = k \sqrt{t}$$

Donde:

x = profundidad de carbonatación(mm)

k = velocidad o tasa de penetración del CO₂ ($\frac{\text{mm}}{\text{año}}$)

t = tiempo (año)

Esta ecuación se puede utilizarse para predecir profundidades a diferentes edades, al calcular o velocidad de carbonatación para un cierto tiempo, del concreto. El factor k puede corregirse para considerar tipos de cemento, recubrimiento, humedad, temperatura y otras condiciones, por lo tanto, se puede cubrir un amplio rango de condiciones:

- Humedad

En un concreto muy seco no puede ocurrir la carbonatación debido a la ausencia del agua necesaria para la formación de iones de carbonato. Por el contrario, en un concreto saturado la carbonatación es lenta por la obstrucción del sistema capilar. Entonces, la carbonatación máxima ocurrirá a una humedad específica entre estas dos condiciones.

- Temperatura

La velocidad de difusión y tasa de carbonatación se incrementan con la temperatura, por lo tanto y si se mantienen constantes los demás factores, en climas cálidos se tendrá una carbonatación más rápida (Lagerblad, 2006).

- Contenido de cemento

Se asume que la difusión ocurre en la pasta de cemento y no en los agregados. La cantidad de cemento no afecta la velocidad de carbonatación mientras la relación agua/cemento se mantenga constante, así que, a una mayor cantidad de pasta con la misma porosidad, se obtendrá la misma profundidad de carbonatación, pero mayor volumen de pasta carbonatada.

- Calidad del concreto

Una relación de agua/cemento más baja produce un concreto más denso, con menos poros conectados, por lo tanto, reducirá la velocidad de carbonatación no importando el ambiente al que se exponga (Galán I. , 2011).

- Estructura y textura

La carbonatación es una reacción que ocurre desde la superficie del elemento hacia el interior, es decir que el área expuesta al ambiente es importante. La difusión ocurre principalmente en los poros del concreto pero deben también considerarse las zonas expuestas en grietas y la superficie entre la pasta y el agregado. En estas zonas se observará una mayor profundidad de carbonatación, por lo tanto, la carbonatación también dependerá de la durabilidad y deterioro de las estructuras.

- Concentración de dióxido de carbono

Una mayor concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, conduce a un incremento en la velocidad de carbonatación. Ésta es mayor en las zonas urbanas y ambientes interiores donde la concentración de dióxido de carbono es más alta.

7.4.6. Capacidad de absorción de dióxido de carbono

Todos los concretos y materiales a base de cemento se carbonatarán ante la presencia de dióxido de carbono y, debido a que el dióxido de carbono puede encontrarse en casi todos los ambientes del planeta, es cuestión de tiempo para que esto ocurra.

Si la captura de dióxido de carbono por carbonatación debe considerarse en función del tiempo, se debe entonces conocer la información correspondiente al concreto producido en determinado período y relacionar esto con la profundidad de carbonatación en un tiempo determinado. Si se conoce la cantidad de concreto expuesto a la carbonatación, la cantidad de cemento en el concreto, la cantidad de óxido de calcio en el cemento y la proporción en la que este óxido de calcio se ha carbonatado, es posible calcular la cantidad de dióxido de carbono que se ha absorbido:

$$\text{CO}_2 \text{ capturado} = X \cdot S \cdot 0.75 \cdot C \cdot \text{CaO} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \quad (\text{kg})$$

Donde X corresponde a la profundidad de carbonatación (m), S es la superficie susceptible a carbonatación (m²), el coeficiente 0,75 equivale a la cantidad de óxido de calcio carbonatada, C es la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto (kg/m³), CaO es la cantidad de óxido de calcio en el cemento en porcentaje de peso, M es el peso molar del dióxido de carbono y del óxido de calcio (Pommer & Pade, 2005).

7.4.7. Carbonatación natural y acelerada

Debido al bajo contenido en dióxido de carbono de la atmósfera, aproximadamente 0,04 por ciento en volumen, los procesos de carbonatación natural son generalmente muy lentos.

Esto ha llevado a algunos investigadores a realizar estudios acelerados utilizando porcentajes de dióxido de carbono mayores que el atmosférico, para intentar predecir su comportamiento a largo plazo. La correlación entre los ensayos acelerados y los naturales no está claramente definida, las reacciones

a la exposición acelerada parecen ser diferentes según cuál sea la concentración de dióxido de carbono. Pero, en general, se acepta que a concentraciones por debajo del 3-4 por ciento de dióxido de carbono el proceso es similar al que ocurre al carbonatar en el aire o en ambientes naturales (Galán I. , 2011; Chávez-Ulloa, et al., 2010).

Estudios han determinado que la profundidad de carbonatación de probetas carbonatadas en cámaras al 4 por ciento durante una semana puede resultar similar a la de probetas carbonatadas en ambiente de laboratorio a lo largo de un año (Moreno, Dominguez, Cob, & Duarte, 2004). En 2007, luego de realizar ensayos a 21 días de carbonatación al 4 por ciento de dióxido de carbono Carvajal et al., concluyen que éste es un procedimiento adecuado para calcular velocidades de carbonatación, aún cuando no obtienen resultados similares con otros estudios similares.

La norma europea para materiales de reparación, UNE-EN 14630:2007, se basa en la realización de ensayos al uno por ciento de dióxido de carbono durante 56 días en atmósferas de humedad controlada del 60 por ciento para determinar la profundidad de carbonatación mediante la coloración por fenolftaleína, aunque no establece ninguna relación entre esa carbonatación y la natural.

7.4.8. Técnicas de análisis y caracterización

Es posible utilizar diversas técnicas para el análisis y caracterización del concreto carbonatado, entre ellas se pueden mencionar: indicador de pH de fenolftaleína, análisis termo gravimétrico (TGA), análisis térmico diferencial (DTA), difracción de rayos X (XRD), difracción de neutrones (ND), microscopía electrónica de barrido (SEM), poro simetría de intrusión de mercurio (MIP) y el

análisis de reacción resonante nuclear (NRRA). Todas ellas varían en complejidad de acuerdo con la tecnología empleada y son aplicables según sea la rigurosidad del estudio requerido.

7.4.8.1. Indicador de pH de fenolftaleína

En el análisis de durabilidad del concreto armado, el indicador de fenolftaleína es una técnica muy utilizada. En condiciones de pH por debajo de 8, el acero de refuerzo es susceptible a la corrosión, mientras que en condiciones de pH más altos se encuentra pasivo.

El indicador de pH de fenolftaleína permite diferenciar tres zonas de pH, inferior a 8, donde la disolución se torna incolora, entre 8 y 9,5, donde adquiere una tonalidad rosa suave, y mayor de 9,5, donde adquiere un color rojo púrpura intenso. A la profundidad que alcanza la zona de pH inferior a 8, zona incolora, se le suele llamar profundidad de carbonatación (Sanjuán, 1992)

7.4.8.2. Análisis termo gravimétrico y análisis térmico diferencial

El análisis térmico gravimétrico (TGA) permite determinar la pérdida o ganancia de masa de una muestra en función de la temperatura. Esta técnica consiste en el registro de las variaciones puntuales de masa de una muestra, al someterla a un gradiente de temperatura, en una atmósfera determinada.

En las muestras fabricadas con cemento sometidas a éste análisis se producen dos descomposiciones identificables dentro de las curvas de resultados. La primera de ellas, alrededor de 400 grados Celsius, corresponde a la descomposición del hidróxido de calcio para dar agua y óxido de calcio.

Calculando la pérdida de masa de agua se puede conocer la cantidad de portlandita que hay en la muestra. La segunda transformación ocurre alrededor de 700 grados Celsius y corresponde a la descomposición del carbonato de calcio para dar dióxido de carbono y óxido de calcio. En este caso determinando la masa de dióxido de carbono pérdida se puede calcular la cantidad de carbonato cálcico que hay en la muestra (Galán I. , 2011).

El Análisis térmico diferencial (DTA) se basa en el registro de la temperatura de una muestra y en su comparación con la de un material de referencia. Cuando se calientan en una atmósfera controlada a velocidad constante, las diferencias de temperatura en la muestra con respecto a la referencia se deben a procesos exotérmicos o endotérmicos, los cuales dan lugar a picos cuyas áreas dependen de la entalpía del proceso. En las muestras de pasta de cemento las descomposiciones del hidróxido de calcio y del carbonato de calcio son procesos endotérmicos, es decir, la muestra absorbe calor y disminuye su temperatura respecto a la de la muestra de referencia.

7.5. Balance de emisiones de la producción de concreto

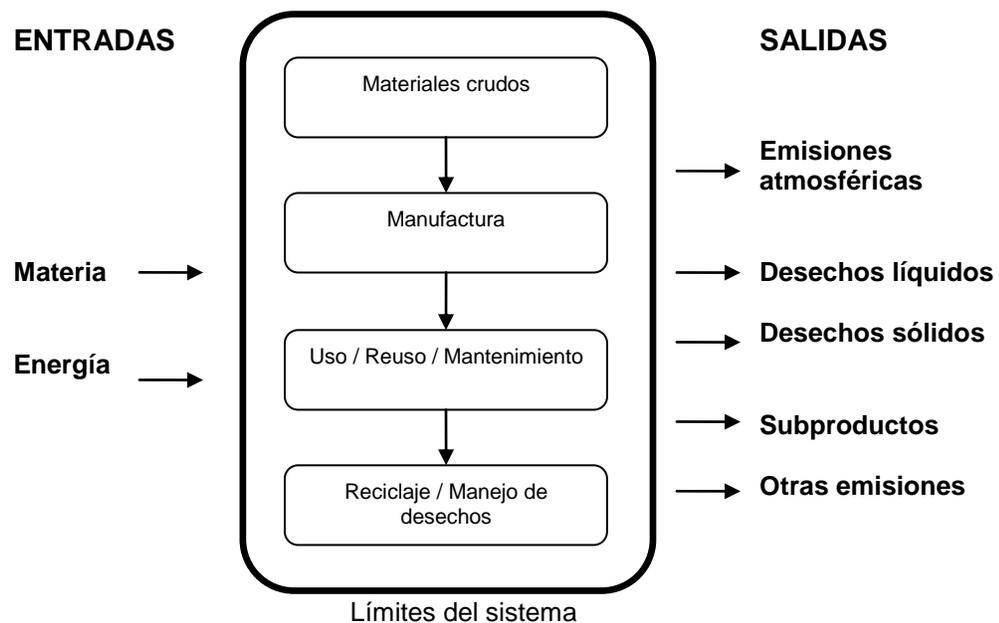
El balance de emisiones es un método de recuento de emisiones de gases de efecto invernadero, el cual permite la identificación de los principales focos de emisión, ya sean directos o indirectos, de una determinada actividad.

7.5.1. Análisis del ciclo de vida

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental y los posibles impactos asociados con la manufactura y el consumo de los productos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para

estimar y manejar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este sentido es el análisis del ciclo de vida (ACV).

Figura 3. **Etapas del ciclo de vida**



Fuente: U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Life Cycle Assessment*. p. 1.

El proceso de análisis del ciclo de vida es utilizado para evaluar los efectos ambientales de un producto o actividad en todo su ciclo de vida. En esta metodología, la evaluación ambiental se basa normalmente en la contabilización de las cargas ambientales que pueden ser analizadas cuantitativamente, entre las que se incluyen emisiones dañinas al aire, agua y suelo, además del consumo de recursos, (energía, agua, materias primas y tierra). Se evalúan también los posibles efectos dañinos al ambiente, por ejemplo, el potencial calentamiento global inducido por el dióxido de carbono o

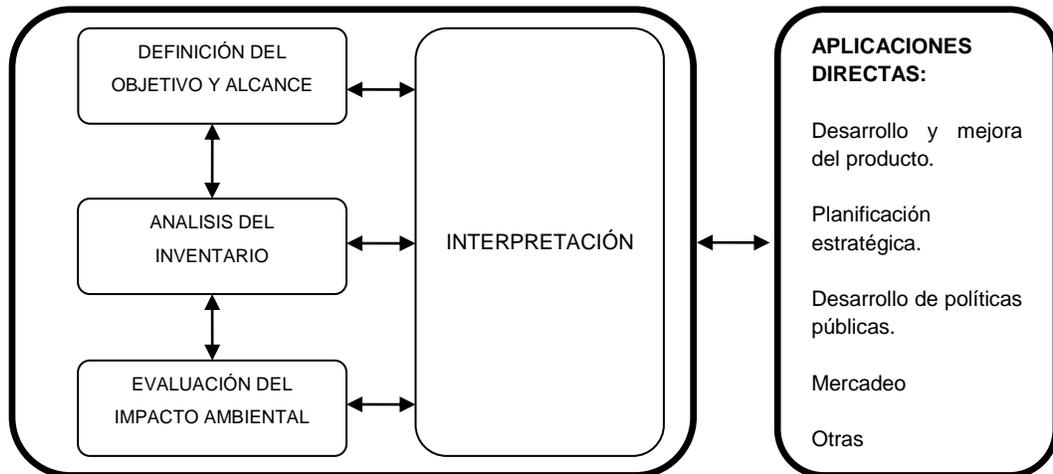
la acidificación inducida por óxidos de azufre y nitrógeno (Häkkinen & Vares, 1998).

El análisis del ciclo de vida tuvo sus inicios a principio de los años sesenta, debido a la preocupación sobre el agotamiento de los recursos energéticos y materias primas. Se despertó entonces el interés en encontrar maneras para contabilizar el uso de los recursos y proyectar estos consumos hacia el futuro, se realizaron estudios y publicaciones al respecto, algunos de ellos hechos por empresas privadas.

En los años noventa, originado por denuncias hechas por fabricantes de productos y la preocupación por el uso inadecuado del análisis de ciclo de vida para hacer mercadeo, se busca el consenso para uniformizar la realización de tales evaluaciones y sobre cómo este tipo de comparación ambiental puede ser objeto de publicidad no engañosa. Esta acción, junto con la presión de organizaciones ambientales para estandarizar la metodología de análisis de ciclo de vida, llevó a la elaboración de las normas del análisis de ciclo de vida en la Organización Internacional de Normalización (ISO) 14000 (*U. S. Environmental Protection Agency, 2006*).

De este modo, las normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) sobre análisis del ciclo de vida (ACV), permiten desarrollar e identificar oportunidades de mejora en las distintas etapas del proyecto, aportar información en la toma de decisiones, seleccionar aspectos ambientales relevantes y, además, mejorar el mercadeo y mejorar el compromiso ambiental de los distintos actores involucrados (Fernández, Rodríguez, Acosta, Delgado, Berzosa, & Barandica, 2010).

Figura 4. **Etapas de un análisis de ciclo de vida**



Fuente: *INTERNATIONAL STANDARD ISO 14040. Life cycle assessment.* p. 8.

De acuerdo con la norma internacional ISO 14040 se establecen y definen cuatro fases en un estudio de análisis de ciclo de vida.

7.5.1.1. Definición del objetivo y el alcance

El alcance de un análisis de ciclo de vida, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del análisis de ciclo de vida puede variar considerablemente dependiendo del objetivo de un análisis de ciclo de vida en particular.

7.5.1.2. Análisis del inventario

La fase de inventario de ciclo de vida (ICV) es la segunda fase del análisis de ciclo de vida. Es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con

el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido.

7.5.1.3. Evaluación del impacto ambiental

La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) es la tercera fase del análisis de ciclo de vida. Su objetivo es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario de ciclo de vida de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental.

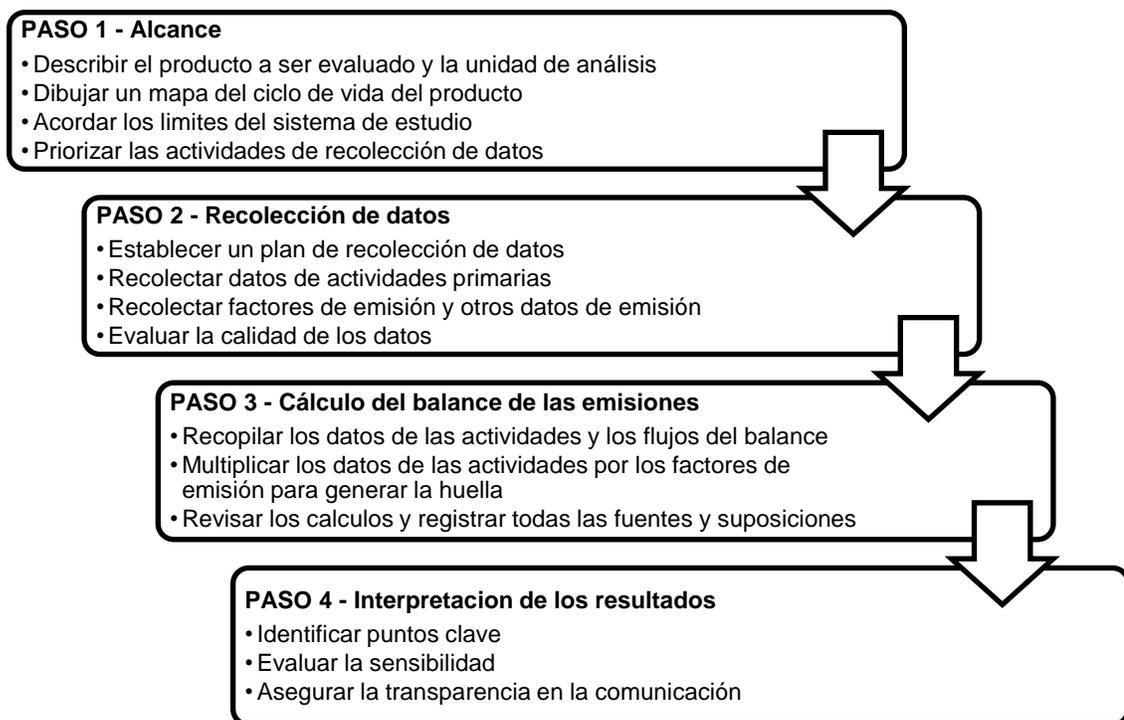
7.5.1.4. Interpretación

La interpretación del ciclo de vida es la fase final del procedimiento de análisis de ciclo de vida, en la cual se resumen y discuten los resultados del inventario, de la evaluación o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

Puede presentarse el caso en el cual el objetivo de un análisis de ciclo de vida se puede alcanzar desarrollando únicamente un análisis de inventario y una interpretación. Se hace referencia a esto como un estudio de inventario de ciclo de vida. Generalmente la información desarrollada en cualquiera de los dos tipos de estudio se puede utilizar como parte de un proceso de decisión mucho más amplio (Fernández, Rodríguez, Acosta, Delgado, Berzosa, & Barandica, 2010). Generalmente el análisis de ciclo de vida no considera los asuntos económicos o sociales de un producto, pero el enfoque del ciclo de vida y las metodologías descritas pueden aplicarse también a estos aspectos.

Las normas ISO 14040 y 14044 son los estándares generales relacionados con el análisis del ciclo de vida, sin embargo, pueden identificarse otras especificaciones basadas en el ACV, que se centran en las emisiones de gases de efecto invernadero, o bien, la llamada “huella de carbono”. Entre éstas se encuentran reconocidas normativas internacionales como la norma ISO 14064 – Gases de Efecto Invernadero Especificaciones y Orientaciones a Nivel de la Organización, para la Cuantificación y la Declaración de las Emisiones y Reducciones de Gases de Efecto Invernadero, ISO 14067 - Huella de Carbono de Productos; el *GHG Protocol Product Standard*, desarrollado por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) y el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD), y la norma PAS 2050:2008 con su correspondiente guía a la norma *Guide to PAS 2050*.

Figura 5. **Etapas para el análisis de las emisiones**



Fuente: *BRITISH STANDARD INSTITUTION. The guide to PAS 2050:2011. p. 4.*

Así, según estas normas, las etapas para la evaluación de emisiones del dióxido de carbono equivalente de un producto o proyecto se basan en un esquema muy similar, aunque más desarrollado y específico que aquél de la norma ISO.

7.5.2. Balance de emisiones de la producción de concreto

El concreto es uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizados en el mundo, es esencial en nuestra sociedad moderna ya que constituye un material rentable, durable y resistente, aplicable a casi cualquier tipo de infraestructura y edificación. Como muchos otros procesos industriales, la producción de concreto implica la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera.

El concreto está compuesto principalmente de agregados, cemento y agua. La mayor parte de las emisiones de dióxido de carbono de la producción de este producto está relacionada con la fabricación de cemento, ya que se requieren temperaturas aproximadas de 1 450 grados Celsius, liberando grandes cantidades de dióxido de carbono por la descarbonatación de la caliza y la quema de combustibles en el horno (Kjellsen, Guimaraes, & Nilsson, 2005).

Apenas existe bibliografía que desglose y cuantifique las emisiones del concreto en forma científica, los análisis de inventario comparativos no son factibles a menudo debido a la falta de homogeneidad en el formato y tratamiento de los datos, en la indefinición de los límites del sistema o la falta de claridad sobre los métodos analíticos usados o la validez geográfica de la información. Häkkinen y Vares (1998) establecieron el perfil medioambiental de una mezcla de concreto y establece una guía sobre la proporción entre las cantidades involucradas de un material y de otro.

Tabla III. **Perfil medioambiental del concreto**

Energía		
Combustibles fósiles	0,93-1,03	MJ / kg producto
Electricidad	0,20-0,30	MJ / kg producto
Materias primas		
Caliza	170	g / kg producto
Otros productos minerales	850	g / kg producto
Agua	80	g / kg producto
Emisiones		
Dióxido de carbono (dióxido de carbono)	128-166	g / kg producto
Óxido de nitrógeno (NOx)	0,58-0,70	g / kg producto
Óxido de azufre (SO ₂)	0,14	g / kg producto
Metano (CH ₄)	0,13	g / kg producto
Componentes orgánicos volátiles (COV)	0,18	g / kg producto
Polvo	0,023	g / kg producto
Metales Pesados (Cr, As, Cd, Hg, Tl, Pb)	21-26	µg / kg producto

Fuente: *HÄKKINEN, Tarja; VARES, Sirje. Environmental burdens of concrete and concrete products. p. 7.*

El clinker contiene aproximadamente 65 por ciento de óxido de calcio, el cual se origina de la calcinación del carbonato de calcio, la producción de una tonelada de clinker implica entonces la emisión de 510 kilogramos de dióxido de carbono producto de la calcinación. En la producción moderna de cemento, el total de emisiones de dióxido de carbono por tonelada de clinker se encuentra normalmente entre 800 y 900 kg (Kjellsen, Guimaraes, & Nilsson, 2005).

Tabla IV. **Generación de emisiones y energía usada en el ciclo de vida del concreto**

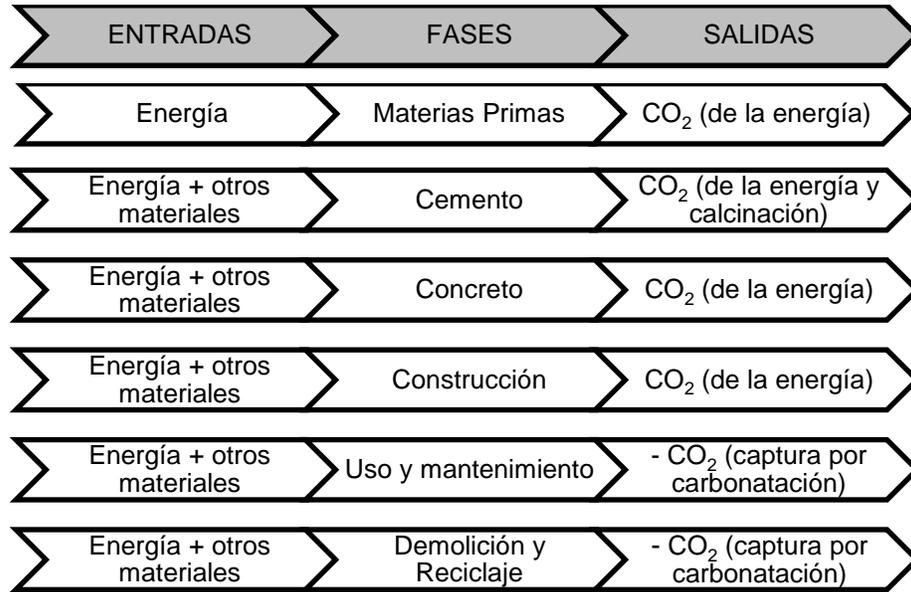
	Combustible fósil y electricidad	Emisiones de CO₂	Emisiones de NO_x	Emisiones de metales pesados
Cemento	69%	83%	71%	88%
Agregados	3%	1%	1%	1%
Transporte de materias primas	5%	3%	8%	<1%
Producción del concreto	16%	8%	5%	10
Transporte del producto	7%	5%	15%	<1%
	100%	100%	100%	100%

Fuente: *HÄKKINEN, Tarja; VARES, Sirje. Environmental burdens of concrete and concrete products. p. 8.*

Se aprecia que el cemento es la principal fuente de contaminación, éste representa del 70 por ciento del consumo energético y aporta más del 80 por ciento de las emisiones usadas en la fabricación del concreto debido a las altas temperaturas necesarias para su producción y para la descomposición del carbonato de calcio. Así pues, la cantidad total de efectos ambientales producidos por el concreto depende en gran parte de su contenido de cemento, dicho contenido se encuentra habitualmente en porcentajes del 10 al 15 por ciento en peso (Carrascón, Aguado, & Josa, 2007).

Para la estimación del inventario de emisiones es importante usar fuentes confiables de información, que describan de manera correcta los sistemas del producto, sin embargo, los datos de un proceso específico son escasos. Además, es necesario conocer la certeza de las mediciones y si la información obtenida es actual y representativa de la tecnología empleada.

Figura 6. Fases del ciclo de vida del concreto



Fuente: POMMER, Kirsten; PADE, Claus. *Guidelines - Uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete*. p. 15.

8. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

El volumen de dióxido de carbono capturado en el proceso de carbonatación ocasiona un impacto significativo en el balance de emisiones de la producción de concreto hidráulico en Guatemala.

8.1. Variables

Dado el tipo de fenómenos observados, las variables consideradas en el estudio y sus indicadores son del tipo cuantitativo, y son determinadas en escala de razón.

8.1.1. Variable independiente

Se definirá como variable independiente el volumen de dióxido de carbono capturado durante el proceso de carbonatación, en el concreto hidráulico producido y colocado en Guatemala.

8.1.1.1. Definición conceptual e indicadores

La captura por carbonatación se produce cuando el dióxido de carbono (dióxido de carbono) atmosférico reacciona con los componentes alcalinos del concreto, dando lugar a la formación de carbonato de calcio.

- Indicadores
 - Profundidad de carbonatación. Establecida a través del indicador de pH de fenolftaleína, aplicado a la sección de concreto expuesta a carbonatación.
 - Superficie susceptible a carbonatación. Determinada a través del modelo de Losa Equivalente (Galán, et al., 2010), a partir del espesor medio equivalente de los elementos típicos y del porcentaje de volumen sobre el total de la producción del concreto

8.1.2. Variable dependiente

La variable dependiente se define como el balance de emisiones y absorciones de dióxido de carbono de la producción de concreto hidráulico dentro del territorio nacional de Guatemala.

8.1.2.1. Definición conceptual e indicadores

El balance de emisiones contiene la estimación de emisiones y absorciones de dióxido de carbono originadas durante el ciclo de vida del concreto.

- Indicadores
 - Inventario de emisiones de dióxido de carbono. Determinado a través de de la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), al concreto, como material de construcción, en las fases de producción, uso y mantenimiento.

9. CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

OBJETIVOS

JUSTIFICACIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

ALCANCES

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1. SITUACIÓN NACIONAL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO
 - 1.1. El cambio climático
 - 1.2. Calentamiento Global
 - 1.3. Efecto invernadero
 - 1.4. Incremento de los gases de efecto invernadero
 - 1.5. El dióxido de carbono
 - 1.6. Inventarios nacionales de emisiones
 - 1.7. Escenarios de cambio climático y desarrollo en Guatemala
 - 1.8. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático

2. LA INDUSTRIA DEL CEMENTO Y CONCRETO EN GUATEMALA
 - 2.1. El cemento y el concreto
 - 2.2. La producción de cemento y concreto en Guatemala

- 2.3. El mercado del cemento

- 3. CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO
 - 3.1. Captura de dióxido de carbono
 - 3.1.1. Precombustión
 - 3.1.2. Oxidación
 - 3.1.3. Postcombustión
 - 3.2. Tecnologías para la separación de gases
 - 3.2.1. Depuración con sorbentes / disolventes
 - 3.2.2. Separación por membranas
 - 3.2.3. Separación criogénica
 - 3.2.4. Tecnología de carbonatación mineral
 - 3.3. Transporte de dióxido de carbono
 - 3.4. Almacenamiento de dióxido de carbono
 - 3.4.1. Almacenamiento Geológico
 - 3.4.2. Almacenamiento Oceánico
 - 3.4.3. Carbonatación mineral

- 4. LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO
 - 4.1. Cemento, hidratación y adiciones
 - 4.2. Carbonatación
 - 4.3. Química de la carbonatación
 - 4.4. Mecanismo de la carbonatación
 - 4.5. Velocidad de carbonatación
 - 4.6. Capacidad de absorción de dióxido de carbono
 - 4.7. Carbonatación natural y acelerada
 - 4.8. Técnicas de análisis y caracterización
 - 4.8.1. Indicador de pH de fenolftaleína

4.8.2. Análisis termo gravimétrico y análisis térmico diferencial

5. BALANCE DE EMISIONES DE LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO

5.1. Análisis del ciclo de vida

5.1.1. Definición del objetivo y el alcance

5.1.2. Análisis del inventario

5.1.3. Evaluación del impacto ambiental

5.1.4. Interpretación

5.2. Balance de emisiones de la producción de concreto

HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

MÉTODOS Y TÉCNICAS

RESULTADOS

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

10. MÉTODOS Y TÉCNICAS

Se considera este trabajo como un proyecto de investigación, de acuerdo a los objetivos planteados y las acciones que deberán tomarse para alcanzarlos.

En base al estado del conocimiento sobre el tema y la perspectiva que se pretende dar a la investigación se clasificó como un estudio no experimental de tipo descriptivo, de enfoque cuantitativo y transeccional.

Se adoptarán diversas estrategias, divididas en fases, orientadas según los objetivos específicos, con la finalidad de probar la hipótesis de investigación planteada.

10.1. Investigación preliminar

El propósito de la investigación preliminar es buscar información suficiente para poder dar inicio a la investigación, pretende definir los fundamentos y especificar un estimado de tiempo y costo para las próximas fases del desarrollo.

10.1.1. Documental

Se desarrollará una primera etapa de revisión para recoger la información bibliográfica, antecedentes de investigación y las normativas técnicas relacionadas con el tema de estudio.

En esta fase se completará la información necesaria para el desarrollo de la investigación, cálculo e interpretación de resultados.

10.1.2. Administrativa

Se establecerá el programa y presupuesto definitivo de trabajo, de manera que puedan adquirirse los recursos materiales, físicos, humanos, económicos y permisos necesarios para la ejecución de la investigación.

10.2. Desarrollo de la investigación

Se indican las normas aplicables para el muestreo y caracterización de las propiedades físico-mecánicas y químicas del concreto. Para el tratamiento preliminar de las muestras, la determinación del frente de carbonatación y el análisis de los coeficientes de carbonatación, se utilizarán los criterios y procedimientos aplicados por Moreno et al. (2004). Para la cuantificación de las cantidades de dióxido de carbono absorbidas y el cálculo de las superficies susceptibles a carbonatación se utilizarán como referencia los procedimientos planteados en las Guías para la Evaluación de la Captura de Dióxido de Carbono en el Inventario de Ciclo de Vida del Concreto (Pommer & Pade, 2005) y en el estudio de Galán et al. (2010), respectivamente.

10.2.1. Universo de trabajo

Se considerará como universo de trabajo el volumen de concreto hidráulico elaborado en Guatemala, utilizando materias primas producidas en el territorio nacional, a través de prácticas y dosificaciones actuales en la industria de la construcción.

10.2.2. Muestras

Se utilizarán probetas endurecidas de concreto de cemento hidráulico, las cuales se fabricarán con dos tipos de cemento, producidos y de uso común en Guatemala. Para cada tipo de cemento se elaborará un lote de 12 probetas, 4 de ellas se ensayarán a edades de 7 y 28 días para registrar la evolución de la resistencia mecánica, las 8 restantes se utilizarán para el tratamiento de carbonatación.

Se fabricarán utilizando dos tipos de dosificación, una que se considere representativa de la obra civil y otra que represente la construcción en general (entre 300 y 450 kilogramos por metro cúbico), conservando la misma relación agua/cemento para las mezclas. Para la elaboración de las mezclas se utilizará agregado triturado de calidad uniforme y se someterán todas al mismo tiempo de curado, el cual se establecerá en 28 días con condiciones controladas de humedad y temperatura.

Tabla V. **Normas aplicables para la elaboración de especímenes**

Normas Aplicables
<i>ASTM C42 - Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete</i>
<i>ASTM C192 - Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory</i>
<i>ASTM C31 - Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field</i>

Fuente: elaboración propia.

Además de las probetas fabricadas expresamente para el estudio, se tomarán muestras de estructuras de concreto antiguas, con edades conocidas, que deberán determinarse en la investigación preliminar.

10.2.3. Tratamiento previo

Con base en el procedimiento realizado por Moreno et al., se someterán las probetas a dos diferentes procesos de carbonatación, natural y acelerada. La carbonatación natural se llevará a cabo en un ambiente exterior, no protegido de la lluvia, es decir en un ambiente con humedad relativa y temperatura variable, pero en condiciones apropiadas para el resguardo y observación de las muestras.

Las carbonataciones aceleradas se realizarán en atmósferas al 4 por ciento de dióxido de carbono, en condiciones controladas de humedad relativa y temperatura.

10.2.4. Caracterización de las muestras

Se llevarán a cabo los ensayos para la caracterización de las muestras, tanto en estado fresco como endurecido, para determinar sus características de temperatura, asentamiento, peso unitario, contenido de aire y resistencia a la compresión. Con el uso del indicador de pH de fenolftaleína, se establecerá la profundidad de carbonatación para cada dosificación y tipo de cemento utilizado. Se determinará la cantidad de pasta de cemento de las muestras mediante el ensayo de residuo insoluble y se considerará la cantidad de carbonato de calcio presente inicialmente en el cemento mediante el análisis químico de los agregados.

Tabla VI. **Normas aplicables para la caracterización de las muestras**

Normas Aplicables
<i>ASTM C1064 - Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete</i>
<i>ASTM C143 - Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete</i>
<i>ASTM C138 - 12a Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete</i>
<i>ASTM C231 - Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method</i>
<i>ASTM C39 - Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens</i>
<i>ASTM C114 - Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement</i>
<i>ASTM D3042 - 09 Standard Test Method for Insoluble Residue in Carbonate Aggregates</i>

Fuente: elaboración propia.

10.2.5. Cálculo de las superficies de carbonatación

Se realizará un estudio de las superficies de los elementos constructivos susceptibles de carbonatarse, para lo cuál se implementará el modelo de Losa Equivalente (Galán, et al., 2010), que implica que a partir del espesor medio equivalente de cada elemento y del porcentaje de volumen sobre el total de la producción del concreto, se pueden calcular las superficies expuestas en cada uno de los elementos considerados.

10.3. Análisis de resultados

Los resultados de las propiedades físico mecánicas se utilizarán como parámetro de control para detectar desviaciones o posibles errores en la dosificación, muestreo y curado de las probetas. Así también se utilizarán para la clasificación de los resultados por tipo de dosificación (obra civil y construcción en general).

Con los datos obtenidos en los análisis se desarrollará un estudio estadístico descriptivo evaluándose la medida en que los datos se agrupan o dispersan. Entonces, se determinará el nivel de significancia de los resultados de los diferentes ensayos, haciendo uso de la estadística inferencial para confirmar la cercanía entre el valor calculado en la muestra y el parámetro estadístico poblacional.

Se establecerá la profundidad de carbonatación específica para cada tipo de concreto y se determinará entonces el coeficiente o velocidad de carbonatación correspondiente. Éste coeficiente, en adición con el inventario de superficies susceptibles a carbonatación, se utilizará para determinar la cantidad total de concreto expuesta y carbonatada.

Para el cálculo de la cantidad unitaria de dióxido de carbono capturado en el volumen de concreto, se utilizará la fórmula propuesta por Pommer y Pade, (2005), para cada una de las condiciones de dosificación, tipo de cemento y tratamiento previo. Con estos valores se evaluará la cantidad total de dióxido de carbono capturado en las estructuras de concreto.

Se establecerá el balance de emisiones de dióxido de carbono en la producción de concreto, para lo cual se aplicarán los montos totales de dióxido

de carbono capturado en base a las técnicas de Evaluación de Ciclo de Vida y el procedimiento propuesto por Pommer y Pade (2005).

Entonces, se podrá inferir efecto que ejerce la carbonatación sobre el balance total de emisiones del proceso productivo del concreto.

11. RESULTADOS ESPERADOS

De acuerdo con los objetivos planteados se espera obtener tres resultados principales:

- El coeficiente o velocidad de carbonatación y la capacidad de captación de dióxido de carbono del concreto en mezclas con diferentes dosificaciones, tipos de cemento y condiciones de exposición ambiental.
- El inventario de superficies susceptibles a carbonatación de acuerdo con la producción de concreto en Guatemala y el método de losa equivalente.
- Establecer el balance de emisiones de dióxido de carbono durante el ciclo de vida del concreto, tomando en cuenta la absorción por carbonatación durante la fase de uso y mantenimiento.

Finalmente en base a estos logros se logrará cuantificar y evaluar el impacto que la carbonatación induce en el balance de emisiones de dióxido de carbono de la producción de concreto.

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDADES	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	MES 8	MES 9
Investigación preliminar	█	█	█						
Elaboración y curado de las muestras		█	█	█	█				
Tratamiento previo				█	█	█			
Caracterización de las muestras						█	█	█	
Cálculo de la captura de CO ₂							█	█	
Análisis de resultados e informe final								█	█

Fuente: elaboración propia.

13. RECURSOS NECESARIOS

El financiamiento requerido para el desarrollo de la investigación será proporcionado por el estudiante con el apoyo del departamento de Gestión Ambiental de Cementos Progreso S. A., facilitando el uso de las instalaciones del laboratorio de la Unidad de Investigación y Desarrollo, proporcionando los materiales, insumos administrativos y apoyo humano necesario.

Tabla VII. **Recursos administrativos**

Administrativos	Costo
Insumos y materiales de oficina	
Vehículos y transporte	Q 6 300,00
Fletes de materiales	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Materiales e insumos**

Administrativos	Costo
60 sacos de cemento	
12 metros cúbicos de agregado grueso	
12 metros cúbicos de arena de río	Q 9 000,00
Aditivos y reactivos laboratorio	
Imprevistos	

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Infraestructura y equipos**

Instalaciones y equipos de laboratorio	Costo
Laboratorio concreto fresco	
Laboratorio concreto endurecido	
Laboratorio de morteros	Q 30 000,00
Laboratorio de análisis químico	
Patios, pilas y hornos de curado	
Imprevistos	

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Recursos humanos**

Recursos humanos	Costo
Asesor	Q 54 000,00
Estudiante	

Fuente: elaboración propia.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. Ali, M., Saidura, R., & Hossain, M. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 2252–2261.
2. Belbey, F., Carrasco, M., Guillarducci, A., Segovia, M., Yoris, A., Defagot, C., y otros. (2010). *Carbonatación del Hormigón Armado: Influencia de la Contaminación Ambiental Urbana*. Santa Fé, Argentina.: Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI).
3. BSI. (2011). *The Guide to PAS 2050:2011*. London, UK: British Standards Institution.
4. Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria* , 8, 2-12.
5. Carrascón, S., Aguado, A., & Josa, A. (2007). Evaluación medioambiental de productos de hormigón mediante el análisis de ciclo de vida. *Cemento hormigón : fabricación, investigación y aplicaciones del cemento y del hormigón* , 73, 40-48.
6. Carvajal, A., Silva, C., Valiente, J., & Venegas, A. (2007). Efectos de la Carbonatación Acelerada en Distintos Tipos de Cemento y Hormigones. *Revista de la Construcción* , 6, 88-97.

7. CEPAL. (2011). *La economía del cambio climático en Centroamérica*. Mexico: Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL.
8. Chávez-Ulloa, E., Pérez, T., Reyes, J., Corvo, F., & Osorno, J. (2010). Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada. *Revista CENIC. Ciencias Químicas* , 41, 1-13.
9. CONAMA. (2010). Captura y almacenamiento de CO2. *Documento de trabajo CONAMA 10*. Madrid: Congreso Nacional de Medio Ambiente.
10. Conde, C., & Saldaña, S. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe: Impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Cambio climático* , 23-30.
11. Consejo Nacional de Areas Protegidas. (2008). *Guatemala y su biodiversidad: un enfoque histórico, cultural, biológico y económico*. Guatemala: CONAP.
12. Engelsen, C., Henning, D., Mehus, J., & Pade, C. (2005). *Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete*. Oslo, Norway: Nordic Innovation Centre.
13. Fernández, G., Rodríguez, F., Acosta, F., Delgado, J., Berzosa, A., & Barandica, J. (2010). Emisiones de CO2 como indicador de sostenibilidad en infraestructuras viales. *XIV International Congress On Project Engineering* (págs. 1372-1383). Madrid: Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO); International Project Management Association (IPMA) & la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

14. FICEM. (2011). *Informe Estadístico 2011*. Mexico: Federación Interamericana del Cemento.
15. Gajda, J. (2001). *Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by Portland Cement Concrete*. Chicago, Illinois: Portland Cement Association PCA, Research and Development.
16. Galán, I. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas.
17. Galán, I., Andrade, C., Prieto, M., Mora, P., Lopez, J., & Sanjuán, M. (2010). Estudio del efecto sumidero de CO₂ de los materiales de base cemento. *Revista Técnica Cemento - Hormigón* , 70-83.
18. Global Adaptation Institute. (2012). *GAIN Index*. Washington: Global Adaptation Institute.
19. Gomez, J. G. (1994). *Tecnología del Hormigón* (Vol. XV). Colombia: Revista de La Asociación de Ingenieros Civiles Universidad Nacional.
20. Häkkinen, T., & Vares, S. (1998). *Environmental burdens of concrete and concrete products*. Finland: Technical Research Centre of Finland.
21. Harnisch, J., & Müller, N. (2008). *A blueprint for a climate friendly cement industry*. Nürnberg, Germany: World Wide Fund for Nature WWF International, Lafarge.

22. Hengstenberg, D. (2008). *Guatemala y la implementación del mecanismo de desarrollo más limpio en el contexto del Protocolo de Kyoto (1997)*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
23. Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2008). *Metodología de la Investigación*. Mexico: Mc Graw Hill Interamericana.
24. IARNA. (2003). *Informe Ambiental de Guatemala y Bases para la Evaluación Sistemática del Estado del Ambiente*. Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Agrícolas. Universidad Rafael Landivar.
25. IARNA-URL. (2012). *Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012. Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo*. Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, Universidad Rafael Landivar.
26. IARNA-URL. (2003). *Vulnerabilidad Sociambiental: Aplicaciones para Guatemala*. Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, Universidad Rafael Landivar.
27. INSIVUMEH. (2012). *Zonas climáticas de Guatemala*. Guatemala: INSIVUMEH.
28. International Cement Review. (2011). *The global cement report*. Tradeship Publications Ltd.

29. IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK: Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
30. IPCC. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
31. Kjellsen, K., Guimaraes, M., & Nilsson, A. (2005). *The CO2 Balance of Concrete in a Life Cycle Perspective*. Oslo, Norway: Nordic Innovation Centre.
32. Lagerblad, B. (2006). *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art*. Sweden: Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI.
33. Le Quéré, C., Andres, R., Boden, T., Conway, T., Houghton, R., House, J., y otros. (2012). The global carbon budget 1959–2011. *Earth System Science Data* , 5, 1107-1157.
34. MARN. (2012). *Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero. Año Base: 2005*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
35. MARN. (2001). *Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

36. Millan, M. (2012). *El mercado de cemento en Guatemala*. Guatemala: Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Guatemala.
37. Moreno, E., Dominguez, G., Cob, E., & Duarte, F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería* , 117-130.
38. Muñoz, C., Mora, P., & Recalde, J. (2011). *Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO2 en la industria del cemento*. Madrid: Agrupación de fabricantes de cemento de España.
39. Naik, T., & Kumar, R. (2010). *Global Warming and Cement Based Materials*. Milwaukee, Wisconsin: UWM Center for By-Products Utilization.
40. Peters, G., Marland, G., Le Quéré, C., Boden, T., Canadell, J., & Raupach, M. (2012). Rapid growth in CO2 emissions after the 2008–2009 global financial crisis. *Nature Climate Change* , 2-4.
41. PNUD. (2009). *El cambio climático y sus efectos sobre el desarrollo humano en Guatemala*. Guatemala: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD.
42. Pommer, K., & Pade, C. (2005). *Guidelines - Uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete*. Denmark: Danish Technological Institute.

43. Porras, C., & Dougherty, C. (1992). *La distribución de cemento en Guatemala*. Guatemala: Universidad Francisco Marroquín. Facultad de Ciencias Económicas.
44. Possan, E., Cristiano, J., & Maiara, C. (2012). Sequestro de CO2 devido á carbonatacao do concreto: Potencialidades da barragem de Itaipu. *Revista de estudos ambientais* , 28-38.
45. Romero, A., & González, C. (2006). *Condiciones generales de competencia en Guatemala*. Naciones Unidas, Unidad de Comercio Internacional e Industria. Mexico, D. F.: Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL.
46. Sanjuán, M. A. (1992). *Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas.
47. Schatan, C., & Avalos, M. (2003). *Condiciones de competencia en el contexto internacional: cemento, azucar y fertilizantes en Centro America*. Naciones Unidas, Unidad de Desarrollo Industrial. Mexico: Comisión Económica para America Latina y el Caribe CEPAL.
48. Stern, N. (2006). *Stern Review: The Economics of Climate Change*. London: HM Treasury London.
49. U. S. Environmental Protection Agency. (2006). *Life cycle assessment: Principles and practice*. Cincinnati, Ohio: Office of Research and Development. U. S. Environmental Protection Agency (EPA).

50. Velásquez, M. (2011). Evolución de la industria del concreto en *Guatemala*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

51. WRI; WBCSD. (2005). Protocolo de gases de efecto invernadero: Estandar *corporativo de contabilidad y reporte*. (W. B. Institute, Ed.) México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.