

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



DESARROLLO DE UN MATERIAL A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y CENIZA  
VOLANTE CON AGREGADO DE SARGAZO PARA UTILIZACIÓN EN  
EDIFICACIONES SUSTENTABLES

POR

FELIPE ESTEBAN ROSAS DÍAZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN  
INGENIERIA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

AGOSTO 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



DESARROLLO DE UN MATERIAL A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y CENIZA  
VOLANTE CON AGREGADO DE SARGAZO PARA UTILIZACIÓN EN  
EDIFICACIONES SUSTENTABLES

POR

FELIPE ESTEBAN ROSAS DÍAZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN  
INGENIERIA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

DIRECTOR DE TESIS

DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

# Resumen

## Desarrollo de un material a base de cemento portland y ceniza volante con agregado de sargazo para utilización en edificaciones sustentables

Hoy en día, temáticas medioambientales como el cambio climático a raíz del calentamiento global han dado lugar a nuevas investigaciones para el desarrollo de materiales amigables con el medio ambiente, que presenten una combinación de propiedades asociadas a un menor impacto ambiental y menores costos de producción.

El propósito de la investigación es desarrollar un material compuesto por una matriz a base de cemento Portland y ceniza volante reemplazando los agregados minerales finos por bioagregados a base de fibras naturales de *Sargassum fluitans* (comúnmente conocido como Sargazo) disponibles en las costas de México permitiendo mejorar las propiedades higrotérmicas del material, mejorando el comportamiento energético térmico de las viviendas y a su vez disminuyendo el impacto ambiental asociado al proyecto de edificación. Se determinaron las proporciones y métodos para el mezclado de la matriz cementante con el bioagregado expuesto a 4 diferentes tratamientos, obteniendo las mejores propiedades higrotérmicas. Se realizaron pruebas físicas y mecánicas para cuantificar las propiedades del material en sus distintas configuraciones, para esto, se trabajó con una matriz ortogonal Taguchi con variables de entrada y salida controladas. Se logró determinar que la inclusión de un bioagregado a base de Sargazo con tratamiento de  $\text{Ca(OH)}_2$  permite la obtención de un mortero con una resistencia mecánica a la compresión de  $4.3 \pm 0.0061$  MPa (superior a los 2 MPa de resistencia a la compresión mínima recomendada en la literatura para los concretos vegetales) y una conductividad térmica de  $0.3163 \pm 0.0117$  W/mK, lo cual es equivalente a un 21 % de la conductividad de los morteros convencionales.

Mediante la integración de la evaluación del ciclo de vida y la simulación energética de edificios, se logró demostrar que los edificios construidos con «concreto a base de sargazo» (SBC), permite importantes beneficios para el cambio climático debido a la reducida transmitancia térmica del SBC que reduce significativamente la demanda de energía para refrigeración y calefacción en la fase de uso. Se utilizó el clima de México y una casa residencial típica como caso de estudio, para estimar que se pueden lograr reducciones netas en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del ciclo de vida en 29 de los 32 estados mexicanos durante una vida útil del edificio de 50 años. El ahorro puede ser de hasta el 15,9 % en estados con climas rigurosos como el estado de Quintana Roo (con un clima cálido húmedo) o el estado de México (con un clima frío), y de hasta ~17 % si los edificios se diseñan para una vida útil más larga (100 años). Dado que algunos otros tipos de agregados a base de biomasa han demostrado propiedades térmicas similares a las del SBC, los hallazgos sugieren la promesa de investigar ampliamente los agregados a base de biomasa u otros materiales con propiedades térmicas mejoradas, como una estrategia para gestionar los riesgos ambientales y reducir los impactos del cambio climático del sector de la construcción a nivel mundial, particularmente en zonas de clima riguroso.

Asesor de tesis:

---

Dr. César Antonio Juárez Alvarado





# Dedicatoria

A Dios, la familia que me formó, la familia que estoy formando y amigos.

*... pero aunque nos vayamos a miles de kilómetros nadie  
escapará, la familia va con nosotros, estará ahí siempre, en  
los hábitos, en los gestos, en las decisiones que tomemos,  
jamás seremos libres, ni estaremos solos.  
Como Paul McCartney dijo una vez: Al final, el amor que  
recibes es igual al amor que das ...*

*Malcom in the middle*

# Agradecimientos

Mediante este espacio quisiera agradecer a todo el grupo académico, profesional, técnico y humano que me ha ayudado en el proceso de desarrollo de esta tesis. Agradezco también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo económico brindado mediante la beca otorgada con CVU 995549 y a México por haberme recibido y mostrado su mayor riqueza: su gente.

*... como no estás experimentado en las cosas del mundo, todas  
las cosas que tienen algo de dificultad te parecen imposibles.  
Confía en el tiempo que suele dar dulces salidas a muchas  
amargas dificultades ...*

*Miguel de Cervantes,  
Don quijote de la Mancha*



# Índice

Capítulo I- Introducción y planteamiento del problema .....	8
1.1.    Introducción .....	8
1.2.    Planteamiento del problema .....	9
1.2.1.    Impacto ambiental de la construcción .....	10
1.2.2.    Materias primas no valorizadas .....	15
1.3.    Justificación de la investigación .....	20
1.4.    Impacto de la investigación .....	20
Capítulo II – Generalidades .....	21
2.1.    Cemento Portland .....	21
2.1.1.    Producción de cemento Portland .....	22
2.1.2.    Composición química del cemento Portland .....	23
2.1.3.    Hidratación del cemento Portland .....	25
2.2.    Cenizas volantes .....	28
2.2.1.    Materiales puzolánicos .....	28
2.2.2.    Cenizas volantes .....	30
2.2.3.    Características y composición .....	30
2.2.4.    Uso de las cenizas volantes en concretos .....	31
2.3.    Fibras vegetales .....	32
2.3.1.    Agroindustria y bioresiduos .....	32
2.3.2.    Fibras naturales vegetales .....	32
2.3.3.    Propiedades de las fibras vegetales .....	33
2.3.4.    Clasificación de fibras vegetales .....	34
2.3.5.    Composición de fibras vegetales .....	35
2.4.    Energía en edificaciones .....	37
2.4.1.    Conductividad térmica [ $\lambda$ ] .....	37
2.4.2.    Transmitancia térmica [U] .....	38
2.4.3.    Consumo energético de viviendas .....	39
2.5.    Análisis de ciclo de vida .....	41
2.5.1.    Conceptos básicos de la evaluación del ciclo de vida .....	41
2.5.2.    Aplicación en la construcción .....	43
Capítulo III – Antecedentes .....	45

3.1.	Biocompuestos .....	45
3.1.1.	Contexto de los materiales de construcción bio basados .....	45
3.1.2.	Principales focos de investigación .....	46
3.1.3.	Propiedades aislantes .....	47
3.2.	Concretos vegetales .....	48
3.2.1.	Generalidades .....	48
3.2.2.	Agregados vegetales .....	49
3.2.3.	Comportamiento mecánico .....	49
3.2.4.	Comportamiento higrotérmico .....	51
3.2.5.	Problemáticas de los concretos vegetales.....	51
3.2.6.	Estrategias de mejora las problemáticas de durabilidad y compatibilidad .....	54
Capítulo IV – Hipótesis y objetivos .....		55
4.1.	Hipótesis.....	55
4.2.	Objetivos de la investigación .....	55
4.2.1.	Objetivo general.....	55
4.2.2.	Objetivos específicos.....	55
Capítulo V – Metodología .....		56
5.1.	Etapa I – Obtención y caracterización de materias primas.....	56
5.1.1.	Recolección de materias primas .....	56
5.1.2.	Caracterización de cementantes.....	56
5.1.3.	Caracterización del Sargazo.....	57
5.2.	Etapa II – Evaluación de compatibilidad de tratamientos.....	59
5.2.1.	Preparación de muestras .....	59
5.2.2.	Tratamientos sobre el agregado a base de Sargazo .....	59
5.2.3.	Caracterización del agregado de Sargazo .....	60
5.2.4.	Evaluación de los tratamientos en la fabricación del concreto vegetal.....	61
5.3.	Etapa III – Optimización del material compuesto .....	64
5.3.1.	Diseño y fabricación de especímenes .....	64
5.3.2.	Análisis de varianza .....	64
5.3.3.	Análisis microestructural.....	65
5.4.	Etapa IV – Estudio ambiental y energético .....	65
5.4.1.	Materias primas .....	65
5.4.2.	Objetivo y alcance .....	66

5.4.3.	Análisis de inventario .....	67
5.4.4.	Evaluación de impactos.....	69
5.4.5.	Simulación energética de casas construidas con distintos bloques .....	69
Capítulo VI	– Resultados y discusión .....	71
6.1.	Resultados etapa I – Obtención y caracterización de materias primas .....	71
6.1.1.	Recolección de materias primas .....	71
6.1.2.	Caracterización de cementantes.....	71
6.1.3.	Caracterización del Sargazo.....	77
6.2.	Resultados etapa II – Evaluación de compatibilidad de tratamientos .....	81
6.2.1.	Caracterización del agregado de Sargazo.....	81
6.2.2.	Evaluación de los tratamientos en la fabricación del concreto vegetal.....	84
6.3.	Resultados etapa III – Optimización del material compuesto.....	91
6.3.1.	Resultados del arreglo ortogonal.....	91
6.3.2.	Análisis de varianza .....	92
6.3.3.	Análisis microestructural.....	95
6.4.	Resultados etapa IV – Estudio ambiental y energético.....	96
Capítulo VII	– Conclusiones.....	106
Capítulo VIII	– Referencias bibliográficas .....	108
Anexo 1	.....	122
Anexo 2	.....	125
1.	Propiedades físicas de las fibras naturales .....	125
2.	Composición química de fibras naturales.....	126
3.	Descripción de los componentes principales de las fibras naturales .....	127
Anexo 3	.....	130
Anexo 4	.....	132
Anexo 5	.....	133
1.	Consideraciones del análisis de inventario .....	133
2.	Resultados globales del Análisis de Ciclo de Vida.....	136
3.	Resultados de la simulación energética.....	140

## Índice de figuras

Figura 1 - Evolución del PIB y las emisiones de GEI para la UE (Izquierda) y México (Derecha) .....	10
Figura 2 - Límites del sistema de la cuna a la tumba en la investigación de ACV en un edificio .....	12
Figura 3 - Impacto ambiental de diferentes fases de un proyecto según su desempeño energético .....	12
Figura 4 - Evolución de: a) consumo de electricidad en el sector residencial al 2030. b) emisiones de GEI del sector residencial al 2030 .....	13
Figura 5 - Cargas de climatización en México por sector .....	13
Figura 6 - Porcentaje del consumo eléctrico destinado a climatización del sector residencial .....	14
Figura 7 - Mapa de climas en el territorio mexicano por entidad federativa .....	15
Figura 8 - Mapa simplificado de la ubicación del mar del Sargazo en el GCSA .....	16
Figura 9 - Playa del Caribe mexicano afectada por el varamiento de Sargazo. Fuente: elaboración propia .....	17
Figura 10 - Problemáticas en torno al Sargazo .....	18
Figura 11 - Estimaciones de los volúmenes de Sargazo que llega a las costas mexicanas .....	18
Figura 12 - Consumo de cemento anual .....	21
Figura 13 - Transformación de la harina cruda en Clinker .....	23
Figura 14 - Sulfatos alcalinos depositados en el $C_3S$ , el $C_2S$ y en la fase intersticial .....	25
Figura 15 - Desarrollo de resistencia con la edad de curado en función de curado .....	27
Figura 16 - Variación de resistencias típicas para diversas relaciones agua/cemento .....	27
Figura 17 - Número de patentes y publicaciones en el área de geopolímeros .....	28
Figura 18 - Clasificación de fibras naturales .....	33
Figura 19 - Principales componentes químicos de los materiales lignocelulósicos. ....	35
Figura 20 - Diagrama de celulosa con la estructura de las membranas celulares de la planta .....	36
Figura 21 - Marco de ACV para el sector de la construcción .....	42
Figura 22 - Proyecciones de las emisiones de $CO_2e$ del sector residencial en México (2006 - 2050) .....	44
Figura 23 - Progreso anual del número de publicaciones de materiales de construcción bio basados .....	46
Figura 24 - Publicaciones científicas y patentes sobre aislantes a base de fibras naturales por año .....	47
Figura 25 - Influencia de la dosis de aglutinante en la resistencia a la compresión del concreto vegetal .....	50
Figura 26 - Despegue en la zona intersticial entre una matriz mineral y fibra de coco .....	52
Figura 27 - Diagrama del proceso de degradación alcalina de la fibra natural .....	53
Figura 28 - Esquema de la metodología experimental propuesta .....	56
Figura 29 - Disposición de las materias primase en México .....	65
Figura 30 - Límites del sistema para a) concreto vegetal y b) concreto convencional .....	67
Figura 31 - Análisis de inventario del proceso de producción de: a) bloque CM; b) bloque FA y c) bloque SBC .....	68
Figura 32 - Dimensiones del bloque de mortero estándar considerado en la evaluación del ACV .....	69
Figura 33 - Imágenes de la simulación energética realizada mediante Design Builder .....	70
Figura 34 - Fuente de materias primas principales .....	71
Figura 35 - Curvas de distribución granulométrica de los materiales cementantes. a) CPO; b) CV .....	72
Figura 36 - DRX de las muestras de cementantes. a) CPO; b) CV (M: Mulita; Q: Cuarzo; H: Hematita; G: Magnetita; C: Cristobalita) .....	72

Figura 37 - FTIR de los materiales cementantes. a) CPO; b) Ceniza volante .....	74
Figura 38 - Análisis TGA de los materiales cementantes. a) cemento Portland; b) Ceniza volante .....	75
Figura 39 - Micrografía sobre los materiales cementantes. a, b, c) cemento Portland; c, d, e) Ceniza volante .....	75
Figura 40 - Análisis EDS de los materiales cementantes. a, b, c) cemento Portland; d, e, f) Ceniza volante .....	76
Figura 41 - Tamaño de partícula del Sargazo como agregado .....	77
Figura 42 - Conductividad térmica y densidad del Sargazo .....	78
Figura 43 - Curva de absorción de agua del Sargazo .....	78
Figura 44 - DRX de la fibra de Sargazo. (Q: Cuarzo, Ca: Calcio; Mg: Magnesio).....	79
Figura 45 - Espectro FTIR del Sargazo.....	80
Figura 46 - Gráfica TGA del Sargazo.....	81
Figura 47 - Gráficas de absorción de agua.....	82
Figura 48 - Correlación entre densidad y conductividad térmica del agregado .....	82
Figura 49 - SEM de la fibra con los tratamientos en estudio. a, b, c) ST; d, e, f) TC; g, h, i) TH; j, k, l) TNaOH; y m, n, o) TP.....	84
Figura 50 - Curvas de la prueba de calorimetría sobre las muestras con tratamientos .....	85
Figura 51 - Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para las muestras con cada tratamiento. (ST: Sin tratamiento; TC: Tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; TH: Tratamiento de hornificación; TN: Tratamiento de NaOH; TP: Tratamiento de parafina).....	86
Figura 52 - Resultados de la evaluación de tratamientos a 28 días de curado.....	87
Figura 53 - EDS sobre la fibra de Sargazo posterior al tratamiento TC.....	88
Figura 54 - Micrografía del concreto vegetal estudiado. a y b) Concreto vegetal ST; c y d) Concreto vegetal TC....	88
Figura 55 - Resultados de conductividad térmica y resistencia a la compresión de concretos vegetales .....	89
Figura 56 - DRX en la pasta de cemento (CH: Portlandita; CS: Silicatos de calcio; $\text{C}_3\text{S}$ : Alita; $\text{C}_2\text{S}$ : Belita).....	90
Figura 57 - Resultados del análisis FTIR sobre la muestra 2TC a 7, 28 y 90 días de curado .....	90
Figura 58 - Resultados de la prueba TGA sobre la muestra 2TC a 7, 28 y 90 días de curado .....	91
Figura 59 - Resultados del concreto vegetal con Sargazo.....	92
Figura 60 - Correlación entre a) densidad y conductividad térmica; b) densidad y resistencia a la compresión .....	92
Figura 61 - Porcentaje de contribución de cada variable a los resultados.....	93
Figura 62 - Resultados de muestra M5 del concreto con Sargazo optimizado.....	94
Figura 63 - Microscopía de muestras de concreto vegetal .....	94
Figura 64 - Espectro DRX de la pasta de cemento .....	95
Figura 65 - FTIR de la pasta de cemento.....	96
Figura 66 - Contribución relativa de las materias primas en las categorías de impacto. a) Bloque de CM. b) Bloque SBC.....	96
Figura 67 - Contribuciones a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en bloque de mortero convencional (CM), bloque de ceniza volante (FA), bloque de concreto a base de Sargazo utilizando el método de laboratorio reportado (SBC [Power grid]), bloque de concreto a base de Sargazo utilizando electricidad fotovoltaica (SBC[pho]), y bloque de concreto a base de Sargazo utilizando métodos de secado mixto (SBC [Mix dry])......	97
Figura 68 - Emisiones de GEI por bloque en cada estado con base en la distancia de transporte del Sargazo y la CV .....	98



Figure 69 - a) Emisiones de GEI por bloque de CM para cada estado de México (kg CO<sub>2e</sub>); b) Emisiones de GEI usando AF como reemplazo parcial de OPC (25% v/v) como porcentaje del bloque de CM; Emisiones de GEI por bloque de SBC como porcentaje del bloque de CM usando c) la red eléctrica actual, d) energía fotovoltaica, y e) un proceso de secado mixto más eficiente energéticamente ..... 100

Figura 70 - Resultados por bloque para cada estado..... 100

Figura 71 - a) Demanda anual de energía para una vivienda residencial típica en cada estado de México construida con bloques CM [kWh/m<sup>2</sup>-año]; b) Emisiones de GEI de edificios construidos con SBC como porcentaje de edificios construidos con bloques CM; c) Demanda energética de climatización para los materiales en estudio ..... 101

Figura 72 - Ahorros de GEI a lo largo del ciclo de vida del edificio (50 años incluyendo la producción de bloques) y años de equilibrio entre el caso base (CM) y el caso de estudio (red eléctrica SBC)..... 102

Figura 73 - Gráfico de tornado que ilustra la sensibilidad de los resultados de las emisiones de GEI a tres factores clave: a y b) diseño del edificio (incertidumbre en el tamaño y el factor de forma); c y d) ubicación (incertidumbre climática y distancia de las materias primas); y e y f) parámetros de modelización (incertidumbre en la carga ocupacional y la infiltración) ..... 104

Figura 74 - Diseño arquitectónico de la vivienda unifamiliar (Dimensiones en metros) ..... 132

## Índice de tablas

Tabla 1 - Escritura simplificada de las fases cristalinas más importantes que componen el cemento Portland .....	24
Tabla 2 - Requerimientos porcentuales de composición estandarizado .....	24
Tabla 3 - Composición de óxidos en el cemento Portland .....	25
Tabla 4 - Composición química de la ceniza volante de acuerdo con ASTM C618 .....	31
Tabla 5 - Ventajas y desventajas de las fibras lignocelulósicas .....	34
Tabla 6 - Conductividad térmica de algunos materiales de construcción .....	37
Tabla 7 - Resistencia térmica de superficies [ $m^2K/W$ ] .....	38
Tabla 8 - Dosificación de la matriz experimental .....	61
Tabla 9 - Dosificación de las muestras en estudio .....	62
Tabla 10 - Clasificación de acuerdo con el índice de inhibición .....	63
Tabla 11 - Variables en estudio para proceso de optimización .....	64
Tabla 12 - Dosificación de la mezcla de concreto vegetal .....	66
Tabla 13 - Resultado de FRX sobre la CV y el CPO40R .....	73
Tabla 14 - Resultados del IAP de la Ceniza Volante .....	77
Tabla 15 - Resultados caracterización química del Sargazo .....	79
Tabla 16 - Resultado de FRX sobre muestra de Sargazo .....	80
Tabla 17 - Análisis de varianza .....	93
Tabla 18 - Valores de conductividad térmica de las principales fibras naturales estudiadas .....	125
Tabla 19 - Valores de la composición química de fibras naturales estudiadas en la literatura .....	126
Tabla 20 - Propiedades físicas y mecánicas de diferentes compuestos con agregado vegetal lignocelulósico .....	130
Tabla 21 - Fuente de cementantes considerados en el estudio .....	133
Tabla 22 - Capital de cada estado y distancia de transporte del cemento .....	134
Tabla 23 - Capital de cada estado y distancia de transporte de la ceniza volante .....	134
Tabla 24 - Capital de cada estado y distancia de transporte del Sargazo y la Arena .....	135
Tabla 25 - Resultados del ACV en la producción del bloque CM .....	136
Tabla 26 - Resultados del ACV en la producción del bloque FA .....	137
Tabla 27 - Resultados del ACV en la producción del bloque SBC (Red eléctrica) .....	138
Tabla 28 - Resultados del ACV en la producción del bloque SBC (Fotovoltaico) .....	139
Tabla 29 - Resultados del ACV en la producción del bloque SBC (Secado mixto) .....	139
Tabla 30 - Demanda energética normalizada por estado .....	140

# Capítulo I - Introducción y planteamiento del problema

## 1.1. Introducción

Desde 1950 se han producido avances sociales importantes como resultado de un crecimiento económico generalizado a nivel global [1,2] y que tienen como consecuencia directa impactos ambientales negativos que se intentan mitigar a través de políticas públicas [3–5]. Esto ha impulsado iniciativas de sustentabilidad, centradas en equilibrar impactos económicos, sociales y ambientales de la industria para la protección del medio ambiente [6,7].

La industria de la construcción es el mayor consumidor de materias primas, demandando aproximadamente un 40 % del uso de energía primaria [8] siendo el mayor contribuyente a nivel global con un 33 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [9]. El cemento es uno de los materiales de construcción más importantes por su uso en la fabricación concreto [10]. Su producción anual se estima en 4180 millones de toneladas (debido a la abundancia de sus materias primas), y se estima que es responsable de un 7 % de las emisiones de GEI [6,8,11,12]. Al mismo tiempo, el rubro de la construcción tiene el mayor potencial para reducir las emisiones de GEI en comparación con otros sectores económicos [8]. Diversos estudios muestran que la energía operacional es aproximadamente el 85 – 95 % del total de energía usada en viviendas con una vida de servicio de 50 años [9,13,14], representando alrededor del 40 % de la energía mundial, donde un tercio del consumo se destina a la climatización de los espacios, por lo que uno de los desafíos actuales es minimizar el consumo de energía operativa, mediante el uso de aislación térmica [1,15].

En México, las viviendas residenciales tienen el mayor impacto asociados al HVAC con un consumo eléctrico que se eleva casi la mitad el primer semestre del año, respecto a la carga base [16]. El consumo eléctrico total en agosto es 5 TWh superior que el promedio de diciembre a marzo, con un consumo anual equivalente al 8.9 % la electricidad generada en el país estableciendo una relación directa entre la clasificación climática y el consumo energético asociado [17,18]. Las iniciativas de sostenibilidad han promovido el desarrollo sostenible mediante el diseño de materiales utilizando materias primas locales con bajo costo de energía y bajo impacto ambiental, prestando especial interés al uso de fibras obtenidas de fuentes vegetales renovables, ya que presentan una interesante combinación de propiedades mecánicas y físicas con beneficios medioambientales ya que pueden almacenar carbono durante la vida útil de la construcción y suelen necesitar menos energía incorporada [4–7,19–23].

En este contexto, surge la iniciativa del uso de agregados lignocelulósicos en el desarrollo de concretos vegetales los cuales consisten en una mezcla entre granulados procedentes de materia vegetal que constituyen la mayor parte del volumen, y un aglutinante mineral [14]. En los últimos 30 años se ha demostrado que el uso de agregados vegetales tiene efectos mejorados sobre las propiedades higrótérmicas debido al incremento de la porosidad del material por la presencia de cavidades en la zona interfacial, así como, por la baja densidad intrínseca de estos agregados [13,14,20,24] y a su vez reduce los impactos ambientales respecto a los concretos convencionales, siendo una solución factible y viable mejorando aspectos de sostenibilidad y del uso eficiente de la energía de las edificaciones [13,20–22,25–27].

El comportamiento mecánico de los concretos vegetales está guiado por la matriz de aglutinante [14], por lo que en general, se sabe que es muy baja respecto a los concretos convencionales, y por lo tanto su aplicación es diferente, sin embargo, se recomienda garantizar un valor mínimo de 0.2 MPa para la resistencia a la compresión [22,26]. Los carbohidratos presentes en las fibras pueden reaccionar con iones de calcio, hierro y aluminio disipando la reacción de hidratación del CPO. Frente a esto existen tratamientos de distintas naturalezas que buscan eliminar los compuestos químicos presentes en las fibras, responsables de la inhibición de la pasta de cemento [28,29]. Por otro lado, aun hace falta la investigación en el desarrollo de compuestos que permitan el aprovechamiento de las fibras naturales locales pudiendo diversificar las materias primas aprovechando residuos agroindustriales.

Un tipo de fibra natural altamente disponible y poco estudiado es el *Sargassum fluitans*. Desde 2014, en Quintana Roo se han presentado arribazones de esta alga estimando que en junio de 2018 su peso fue de más de 20 millones de toneladas, distribuido a lo largo de una extensión de más de 8850 km [30], provocando un impacto económico y social en toda la región del caribe mexicano [31]. Debido a la urgencia de resolver el problema, el alga se colecta y se deposita en vertederos clandestinos terminando su ciclo de vida descomponiéndose, liberando azufre, el cual, por una reacción exotérmica en el agua, produce ácido sulfhídrico que es liberado tanto en el agua como en la atmósfera. El manejo sustentable del sargazo requiere también del desarrollo de industrias que lo utilicen en grandes volúmenes, de manera eficiente y con modelos de negocio que consideren la variabilidad interanual y estacional de los arribazones. Lo anterior permitirá transitar de un fenómeno complejo a una oportunidad real de desarrollo [32].

Investigaciones recientes han demostrado que el sargazo presenta factibilidad de ser usado en aplicaciones de construcción [33–40]. Esta materia prima ha demostrado tener una densidad de entre 0.136 - 0.305 g/cm<sup>3</sup> y una conductividad térmica de alrededor de 0.045 W/mK [33,41,42]. Además, al ser utilizado en matrices cementantes, el compuesto resultante posee una conductividad de entre 0.788 y 0.211 W/mK, inferior a los 1.5 W/mK de un mortero convencional [33,38,43,44]. Sin embargo, ha sido poco explorada en matrices de diferentes naturalezas y bajo los efectos de pretratamientos que permitan su incorporación en mayores volúmenes para generar mejores propiedades físico-mecánicas.

El objetivo de este estudio es desarrollar un compuesto base cemento Portland con agregado lignocelulósico de *Sargassum fluitans* disponible en la costa atlántica de México. Para esto se estudiarán la compatibilidad entre las materias primas seleccionadas y la influencia en la resistencia mecánica y conductividad térmica principalmente. Además se incluirá un reemplazo volumétrico parcial del cemento por ceniza volante por las ventajas medioambientales que pueda llevar la disminución del uso de cemento y el uso de un residuo de la generación de electricidad reduciendo el consumo de energía y la liberación de gases de efecto invernadero derivadas de la extracción inicial de piedra caliza, la calcinación y la molienda [6].

## 1.2. Planteamiento del problema

La problemática que aborda esta investigación abarca dos directrices principales, los cuales abarcan el consumo de materias primas y energía por parte de la construcción, y, por otro lado, la no valoración de materias primas. Estos temas son explicados de manera detallada en los siguientes apartados.

### 1.2.1. Impacto ambiental de la construcción

#### Contexto global

Las estimaciones demográficas exponen un aumento de la población en 2 mil millones de habitantes entre el año 2000 y 2030 [45–47], demandando infraestructuras adecuadas para sostener la configuración demográfica [2], incluyendo el reto de la vivienda digna, económica y sustentable [48,49]. De la mano a este fenómeno, las principales economías globales han tenido incrementos sostenidos en el tiempo [43]. Sin embargo, existe una relación directa entre estos antecedentes económicos y los indicadores ambientales negativos que resaltan en paralelo [1,45,50]. A nivel global, las emisiones totales de gases de efecto invernadero fueron asociadas en un 25 % a la producción de electricidad y calor en edificios y un 6.4 % a la construcción de edificios [14]. La demanda actual de energía del sector residencial obliga a buscar acciones que reduzcan la intensidad energética (relación entre la producción de energía y PIB real), directamente vinculada con el consumo eléctrico, las emisiones de CO<sub>2e</sub>, el uso de los combustibles fósiles y con ello el calentamiento global [51]. Esta problemática ha reducido la intensidad energética en países miembros de la OCDE, de la cual forma parte México, sin embargo, junto con Estados Unidos son los únicos países que no han reducido su demanda energética ni sus emisiones de GEI [51].

Al relacionar el crecimiento económico de México con los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se observa la estrecha relación que existe entre ambas curvas (Figura 1). Este fenómeno no se percibe de la misma manera en los países de la Unión Europea, en los que se advierte un desacoplamiento de las curvas debido a las medidas de sostenibilidad que han implementado [52,53]. Esto demuestra que las políticas energéticas deben centrarse el reto de mejorar los índices de eficiencia energética, el crecimiento económico, la reducción en la dependencia de los combustibles fósiles y la protección del medio ambiente [14,51,54,55].

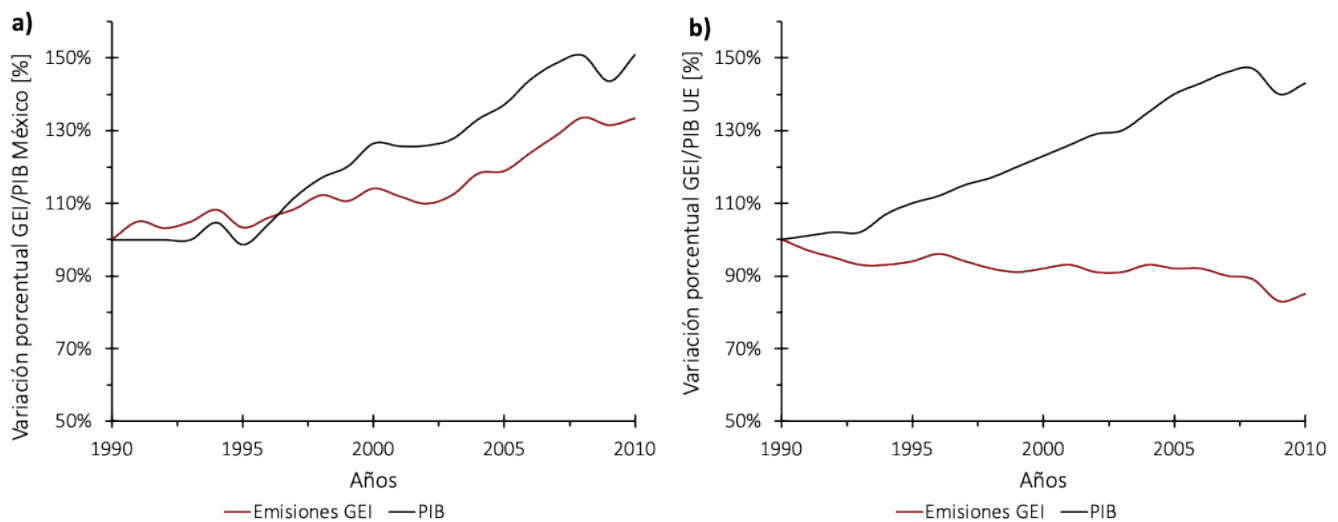


Figura 1 - Evolución del PIB y las emisiones de GEI para a) México y b) Unión Europea

#### Demanda de recursos por el sector edificación

A nivel mundial se estima que el sector edificación es responsable de entre un 30 a un 40 % del uso de la energía consumida, así como también de del 44.6 % de las emisiones de GEI [1,8,9,24,44–46,56–59]. Alrededor del 25 % de la energía se usa en la manufactura de materiales de construcción [20]. Estas emisiones de CO<sub>2e</sub> alcanzaron los 8.6 billones de toneladas en el 2004, cifra que podría alcanzar los 15.6 billones de toneladas para el 2030, en

caso de continuar construyendo de la manera actual [1,2,24,45,60]. Además, la construcción de edificios consume el 40 % de la piedra, la arena y la grava, el 25 % de la madera virgen y el 16 % del agua utilizada cada año en todo el mundo. Asimismo, es responsable de la generación del 30 % de los residuos sólidos mundiales (teniendo en cuenta la extracción de materias primas, la fabricación de componentes, la construcción, la restauración y la demolición de edificios) [1,2,8,19,44,47].

El cemento es el material de construcción más importante debido a que es la materia prima principal para la producción de concreto, material que ofrece numerosas ventajas y por esta razón es clave en las tendencias de desarrollo, urbanización y crecimiento demográfico [6,10,11,34,44,61,62]. Se calcula que la demanda de concreto alcanzará los 18000 millones de toneladas anuales en 2050, sin embargo, también se sabe que es uno de los principales responsables de la emisión de CO<sub>2e</sub> a la atmósfera [63,64]. En México la producción de cemento fue de 40.6 millones de toneladas en 2019, lo que supone una emisión de 40.6 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> al ambiente, posicionándolo como uno de los 15 países con mayor nivel de emisiones de GEI en el mundo [61].

La producción de 1 kg de cemento Portland supone la emisión a la atmósfera de entre 0.76 y 1.37 kg de CO<sub>2e</sub> dependiendo de la región y del método de fabricación utilizado, proveniente en un 55 % por la descarbonatación de la piedra caliza y en 40 % por el consumo de combustibles en el proceso productivo [6,12,59,61,64–66]. Por consiguiente, la producción de concreto es responsable de más del 3 % de la demanda mundial de energía, entre el 5 - 8 % de las emisiones antropogénicas mundiales de material particulado, y ~ 2 % de las extracciones mundiales de agua [6,11,59,63,67,68].

Para garantizar la competitividad futura del concreto como material de construcción, es esencial mejorar su sostenibilidad, centrándose en el uso de materias primas sostenibles y nuevas tecnologías de fabricación con bajo impacto ambiental [6,21,56]. Bajo esta premisa, la incorporación de subproductos industriales/materiales puzolánicos se está convirtiendo en un área activa de investigación debido a la mejora de sus propiedades, como la trabajabilidad, la resistencia a largo plazo, la durabilidad y la reducción del consumo de energía [6,68].

### *Energía en edificaciones*

La energía como recurso, es la base del desarrollo económico de cualquier ciudad o región [2]. El consumo mundial de energía se estimó en 53 billones de kWh en 2020. Esta demanda cada vez mayor, podría dañar potencialmente el medioambiente por las emisiones de gases efluentes de CO<sub>2e</sub> [6]. Se estima que los edificios consumen alrededor del 40 % de la energía mundial, donde un tercio se destina a climatización de los espacios. Es por esto que uno de los desafíos actuales es minimizar el consumo de energía en operación, mediante los códigos de vivienda sustentable [15,51]. Los factores que influyen en los aspectos energéticos de un edificio son el clima, el efecto de la forma y la orientación del edificio sobre sus cargas de calefacción y refrigeración; la influencia de la envolvente del edificio, la iluminación natural, la ventilación y la refrigeración natural; y por último, la gestión del edificio por parte de sus usuarios en las estrategias de ahorro energético y control ambiental [2].

Las fases del ciclo de vida de un proyecto de edificación se pueden separar según el proceso que implique como se observa en la Figura 2.

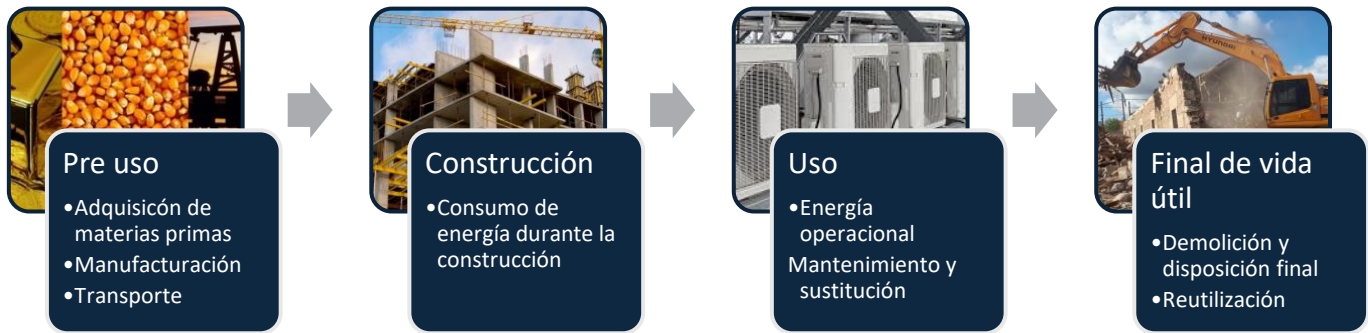


Figura 2 - Límites del sistema de la cuna a la tumba en la investigación de ACV en un edificio

Diversos estudios reportan que la fase de uso contribuye al mayor impacto ambiental debido a la duración y porque está asociada al uso de combustibles fósiles para la producción de energía [45,69]. Consumiendo la mayor cantidad de energía en el ciclo de vida del edificio como se observa en la Figura 3, llegando a valores que superan el 90 % [9,14,45,64,70].

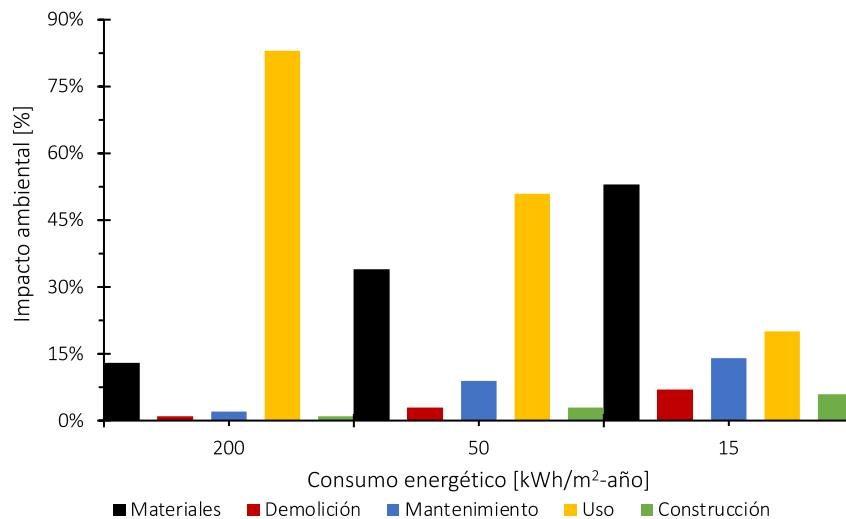


Figura 3 - Impacto ambiental relativo de las fases del ciclo de vida según la demanda energética

Los materiales de aislamiento térmico mejoran la eficiencia energética de los edificios y, por tanto, reducen el requerimiento energético para calefacción y refrigeración. Por lo tanto, también contribuyen indirectamente a reducir la cantidad de combustibles fósiles y a reducir las emisiones de GEI producidos durante la fase de uso [3,59,71]. A sí mismo, a medida que el consumo energético disminuye por el uso de sistemas de aislación, la energía incorporada en materiales comienza a ser relevante en el ACV debido a que, la producción de materiales aislantes conlleva una carga ambiental por el consumo energético y huella de carbono (generando considerables emisiones de CO<sub>2e</sub>, gases tóxicos y partículas como SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>), anulando parcialmente los beneficios de la mejora de la eficiencia térmica [15,59]. Además, al no ser biodegradables generan un problema a la hora de deshacerse de ellos al final de su vida útil [57].

La Figura 4 a) muestra las tendencias del consumo eléctrico en México al año 2030 en que se observa un crecimiento continuo de energía por aire acondicionado. Al consumir más energía se producen más emisiones a la

atmósfera, lo cual queda expuesto en la Figura 4 b) que muestra el incremento influenciado por el aire acondicionado, de las emisiones de GEI en el mismo periodo de tiempo [46].

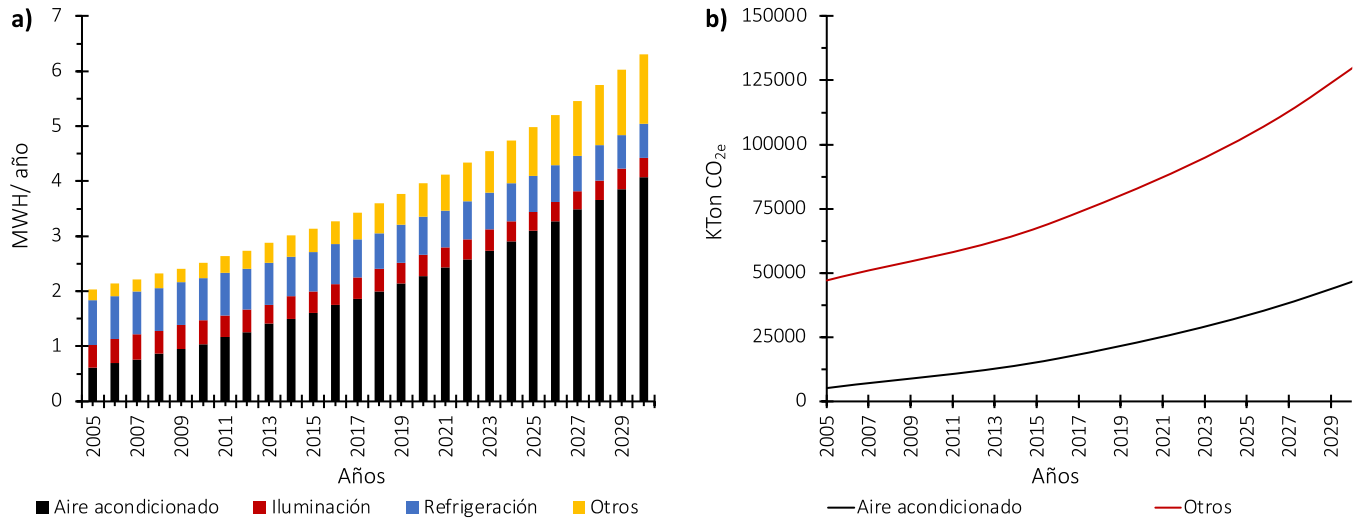


Figura 4 - Evolución de: a) consumo de electricidad en el sector residencial al 2030. b) emisiones de GEI del sector residencial al 2030

La Figura 5 muestra el impacto energético anual en la climatización de viviendas. El sector residencial es el que tiene el mayor efecto, con un consumo eléctrico que se eleva casi un 50 % en agosto, llegando a ser casi 5 TWh superior (casi un 30 %) al promedio de diciembre a marzo. Además, se aísla la carga de enfriamiento de cada sector al compararla con la carga base. De esta forma, se observa que los sectores residencial, comercial y mediano industrial cuentan con la mayor demanda energética en México. El consumo anual de climatización en 2015 fue de 22,6 TWh (8,9 % de la electricidad generada), con un impacto económico de 31 mil millones de pesos [18,72].

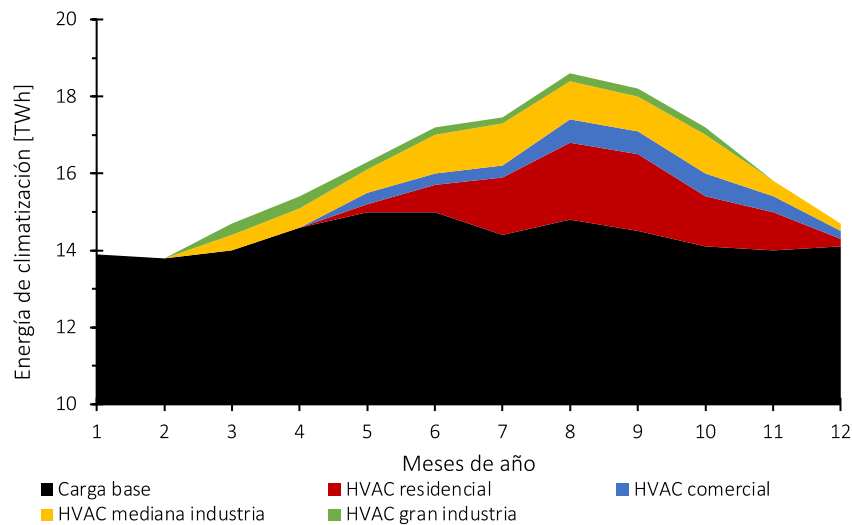
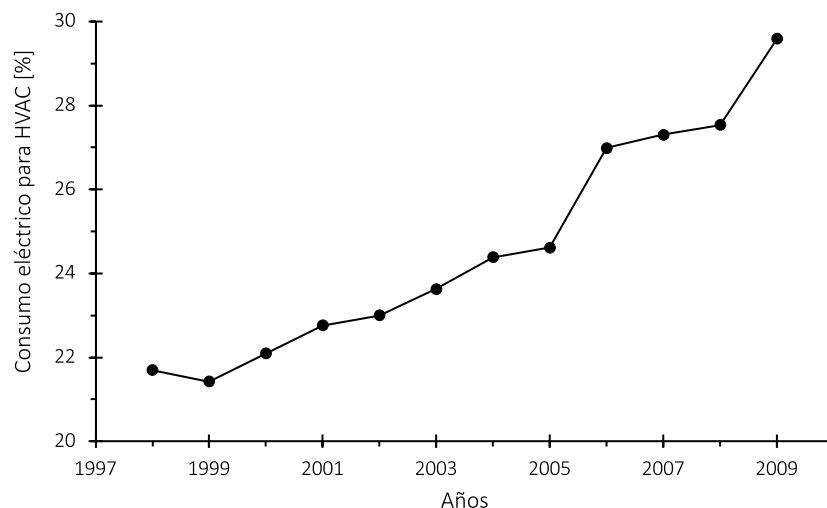


Figura 5 - Cargas de climatización en México por sector



Frente a esta premisa, diversos estudios muestran que el uso eficiente de energía tiene implicaciones que afectan a las diferentes escalas urbanas y a las comunidades, y, por lo tanto, organismos gubernamentales trabajan en la regulación de los códigos de vivienda. En México, la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), ha trabajado una guía sobre criterios para desarrollos habitacionales sustentables. De igual manera, la Comisión Nacional para Fomento a la Vivienda (CONAFOVI), elaboró en 2008 una guía sobre el uso eficiente de la energía, considerando sistemas pasivos de diseño (masa térmica, asoleamiento, control solar, vientos entre otros); y por lo tanto, una perspectiva de investigación aplicada, ha trabajado en la creación de tecnologías, incorporando sistemas eficientes de aire acondicionado y aislamiento térmico entre otros, los cuales son factores determinantes para resolver la problemática ambiental y energética del uso de la energía [51]. Otra iniciativa importante del gobierno mexicano fue la creación de la Comisión Nacional de Uso Eficiente de Energía (CONUEE), para promover la eficiencia energética y constituir un órgano de carácter técnico, en materia de aprovechamiento sustentable de la energía en todos los procesos y actividades, generando normatividades y políticas públicas para propiciar su uso óptimo en edificaciones. La Figura 6 presenta las tendencias del consumo energético al año 2009 (desde que nació la CONUEE). Se observa que el consumo energético utilizado para el confort disminuyó ligeramente en 1999, sin embargo, en los años siguientes se tiene una tendencia al aumento. Para controlar y disminuir el consumo energético de las edificaciones, es necesario realizar estudios multidisciplinarios para entender y analizar a fondo el comportamiento térmico de las edificaciones en relación con el clima para mejorar sus diseños y generar normativas estrictas [46].



**Figura 6 - Porcentaje del consumo eléctrico destinado a climatización del sector residencial**

En México la mayoría de las edificaciones se caracterizan por su alta dependencia y consumo de combustibles fósiles, además de no presentar una respuesta armónica a las condiciones climáticas. Reducir el uso de energía requiere examinar cada aspecto de la edificación incluyendo materiales, su relación con el ambiente y el comportamiento de sus ocupantes [46]. El consumo eléctrico por superficie de los edificios muestra un fuerte impacto del clima, debido al uso intensivo del aire acondicionado en las regiones más cálidas (norte y el sureste del país). Una forma simplificada de estipular las regiones climáticas, es definir las por entidad federativa asumiendo que cada estado corresponde a una única región climática, pudiendo ser Caliente seco, Caliente húmedo, Templado, y Frío como se muestra en la Figura 7 [73–75].



Figura 7 - Mapa de climas en el territorio mexicano por entidad federativa

En definitiva, el sector de la construcción enfrenta 4 diferentes impactos principales en el medio ambiente: las emisiones de GEI; el consumo energético; el consumo de materias primas y la generación de residuos [14], y, por lo tanto, las acciones que se tomen al respecto tendrán consecuencias significativas en este aspecto [46]. Las acciones de sustentabilidad en la construcción puede reducir del 35 % en las emisiones de CO<sub>2e</sub>, un ahorro en el consumo de agua de 30 % y de energía del 50 % [1,70]. Las investigaciones sobre el Análisis de Ciclo de vida en edificios identificó que la climatización consume la mayor cantidad de energía durante la fase de uso del edificio (48 %) [45]. Mejorar la aislación térmica de las edificaciones es una forma efectiva de ahorrar energía, reduciendo las pérdidas a través de la envolvente térmica. Para lograr esto, se utilizan materiales adicionales para desempeñar esta función, como tableros sólidos de poliestireno expandido y poliuretano, pero con impactos negativos asociados a energía y carbono contenido [16]. Una posible estrategia para contrarrestar este efecto es seleccionar materiales de construcción con baja energía incorporada. En este sentido, los materiales naturales son idóneos, ya que normalmente se someten a pocas operaciones industriales, por lo que acumulan poca energía incorporada [7,13–15,21,22,76]. Lamentablemente, su uso para estos fines no está especialmente extendido: un análisis de 2012 informó de que en 2011 la lana mineral y los plásticos predominaban en el mercado mundial de materiales aislantes (52 % y 41 % respectivamente) [71].

### 1.2.2. Materias primas no valorizadas

#### *Contexto global*

En todo el mundo, se han realizado constantes investigaciones para mejorar el rendimiento de la utilización de la biomasa en lugar de combustibles fósiles para la conversión de energía. Se estima que el crecimiento anual de biomasa se encuentra entre los 112 y los 220 mil millones de toneladas, sin embargo, su producción mundial con potencial energético se estima en 3 mil millones de toneladas para residuos forestales, entre 1.1 y 3.1 mil millones de toneladas para residuos agrícolas y cerca de 1.1 mil millones de toneladas para desechos sólidos municipales [77].

En la agroindustria, las materias primas captadas deben someterse a procesos para añadirles valor añadido y generar productos atractivos, optimizando las ganancias económicas de su producción. Las operaciones unitarias

que se implementan en la cadena productiva de cualquier materia prima conllevan una problemática ambiental: la alta producción de residuos asociados. Dependiendo del tipo de materia prima, estos pueden tratarse para reducir el impacto ambiental negativo y transformarse en un producto de valor que sirva de materia prima para otros procesos productivos, generando ingresos económicos adicionales. Un análisis del uso de los residuos agrícolas muestra que el fique aprovecha el 2 % de la biomasa producida, la industria cervecera emplea el 8 % de los nutrientes del grano, mientras que en la industria de aceite de palma y de celulosa menos del 9 % y 30 % respectivamente; y en la industria del café solo el 9.5 % del peso del fruto fresco es aprovechado quedando un 90.5 % como residuo [78]. En este contexto, en México, la cantidad anual de residuos es de alrededor de 45 millones de toneladas de materia seca para los diez principales cultivos (maíz, sorgo, trigo, frijol, arroz, cebada, soya, algodón, cártamo y ajonjolí); el rastrojo y olote de maíz (25.5 millones de toneladas), las pajas de sorgo (6.6 millones de toneladas) y de trigo (4.5 millones de toneladas) representan poco más del 81% de los residuos de cultivos [79].

### Problemática del Sargazo en México

El mar abarca aproximadamente el 71 % del mundo [36]. Las algas marinas, son recursos marinos de plantas sin flor [34,37,39]. El Sargazo es un conjunto de macroalgas marinas, del género *Sargassum*, y pueden ocupar extensas superficies en una gran variedad de hábitats. El género *Sargassum* comprende 350 especies [80], donde 60 especies habitan el océano Atlántico, siendo el *S. fluitans* y *S. natans* las especies más comunes [30,40,81]. A partir de un análisis de datos atmosféricos y oceanográficos se observó que el 2010 se produjo que grandes cantidades de algas del mar de los Sargazos llegaran al Atlántico Tropical. El Gran cinturón de Sargazo del Atlántico (GCSA) tiene su origen en el Atlántico Tropical, en la región denominada NERR (por las siglas en inglés de “North Equatorial Recirculation Region”) [38]. El Sargazo que se produce en esta zona es transportado por las corrientes, los vientos y el oleaje hacia el Caribe, Golfo de México y la costa este de Estados Unidos. De esta forma, el año 2011 marca el inicio de las invasiones masivas de Sargazo en el mar Caribe como se muestra en la Figura 8 [32,81,82].

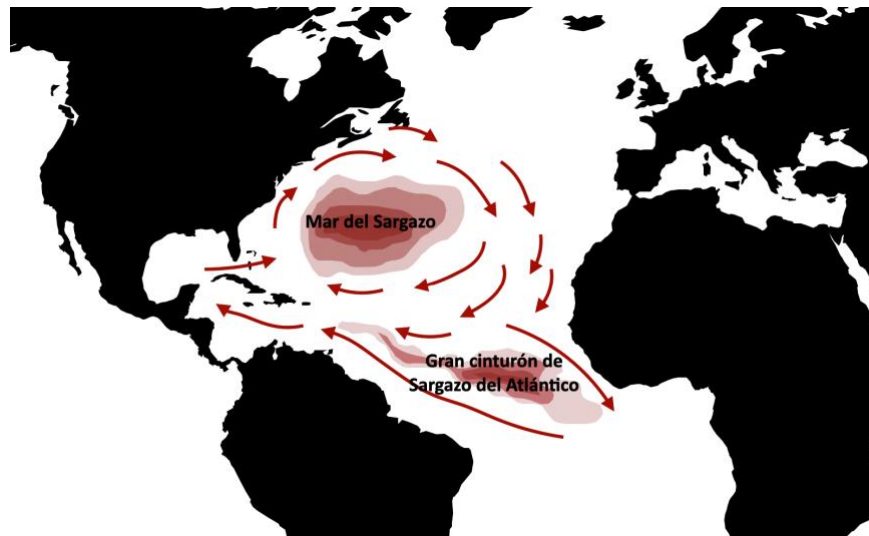


Figura 8 - Mapa simplificado de la ubicación del mar del Sargazo en el GCSA

En las costas de la península de Yucatán se presentan grandes arribazones de Sargazo en las que se han identificado, hasta el momento, dos especies principales: *S. fluitans* cuya presencia oscila entre el 78.1 y el 99.6 % y *S. natans* con el 6 y el 35.9 % [30,41,81]. En el pico de acumulación en 2015, la costa recibió 2360 m<sup>3</sup> de Sargazo

por kilómetro de playa [30,41]; dicha situación se ha mantenido, en donde se ha estimado que en junio de 2018 su peso vivo en el mar fue de 20 millones de toneladas en una zona de afectación de 8850 km [30–32,83]. Este fenómeno tiene repercusiones negativas de carácter social, económico y ambiental, sobre todo en las comunidades costeras (Figura 9) [31,81], representando un peligro emergente debido las escasas estrategias de respuesta. Frente a esto, existe un consenso generalizado de que la respuesta debe considerar la afluencia como una oportunidad económica tanto como una amenaza que exige coordinación y colaboración entre las regiones afectadas [30]. En un esfuerzo por controlar esta afluencia masiva, se han implementado algunas medidas como la recolección en mar antes de que llegue a las costas, o bien la recolección en la playa [32,41]. Existen registros de tiraderos clandestinos en la selva de Quintana Roo donde se está depositando Sargazo sin seguir normas de bioseguridad requeridas (ya que en su descomposición libera azufre, el cual, por una reacción exotérmica en el agua, produce ácido sulfhídrico que es liberado al ambiente afectando acuíferos, suelos y la salud humana), debido a que se ha rebasado la capacidad de la infraestructura disponible para atender la contingencia (\$3.2 millones de dólares asignados para la limpieza y extracción [32]). El turismo en el Caribe ha sufrido en mayor medida ya que es una actividad económica de gran relevancia, con un impacto estimado de 11500 millones de dólares en 2018 [31,32].

Dada la composición química del Sargazo, tanto en el agua como en la atmósfera. Los efectos inmediatos en la zona de descomposición incluyen el aumento de la temperatura, el agotamiento del oxígeno, el descenso del pH y la liberación de nutrientes hacia las lagunas arrecifales.



Figura 9 - Playa del Caribe mexicano afectada por el varamiento de Sargazo. Fuente: elaboración propia

Los constantes efectos negativos que más preocupan a los pobladores locales pueden agruparse en cuatro tipos de impactos: 1) socioambientales (por la incertidumbre frente a la fuente laboral y las afectaciones al paisaje y la salud humana); 2) ambientales (por la contaminación de mantos acuíferos y terrenos); 3) sociales (pérdida de empleos), y 4) económicos (Incremento de la vulnerabilidad social y económica), como se muestra en la Figura 10 [32].



Figura 10 - Problemáticas en torno al Sargazo

Atender el problema del Sargazo es de alta complejidad debido a los múltiples factores que están involucrados y porque no se conoce con precisión el volumen de la biomasa producida ni cuánto arribará a las costas, ya que los sistemas de teledetección determinan áreas, pero no profundidades, y sus espesores pueden ser de 1 a más de 10 metros. En México no existe un registro preciso del volumen de Sargazo recalado en las playas ni de la biomasa que se levanta, con una notable variabilidad de la información, que va de 5000 hasta 500000 toneladas recogidas. Esto pone en evidencia que México no cuenta con un registro oficial ni una articulación entre todos los sectores involucrados en la atención de la problemática. Desde 2019, la Secretaría de Marina tiene la encomienda presidencial de atender la limpieza de playas, pero esto se está efectuando solamente en el norte de Quintana Roo. Además, tiene un registro de lo que ha levantado (Figura 11), pero no existe comunicación con otras dependencias para obtener un dato global [32].

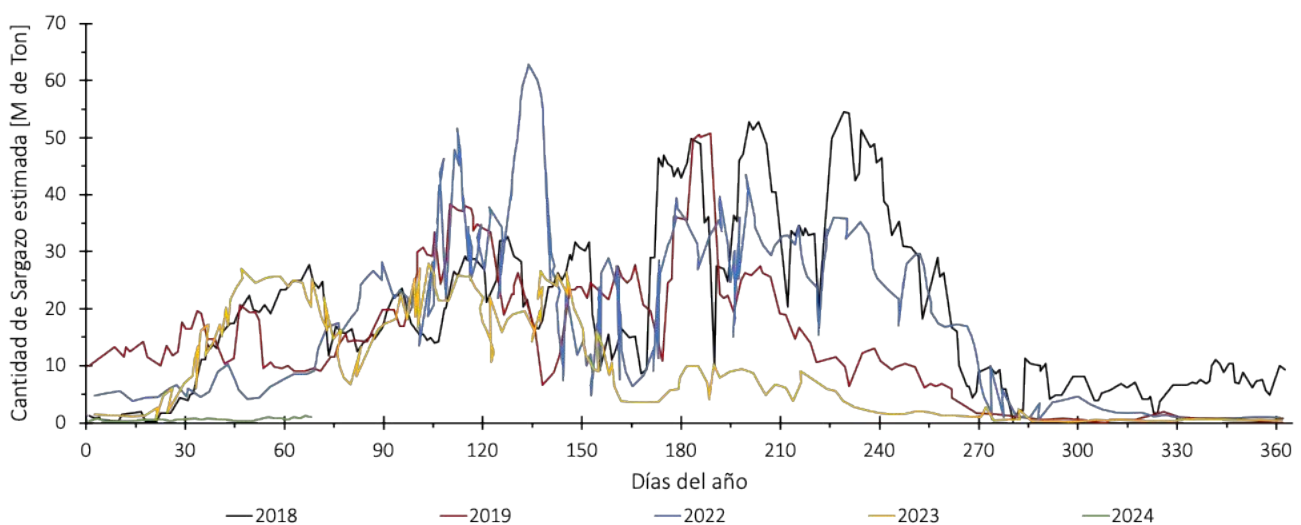


Figura 11 - Estimaciones de los volúmenes de Sargazo que llega a las costas mexicanas

El fenómeno del Sargazo en la región requiere de soluciones integrales a corto, mediano y largo plazo. Sin embargo, debido a la urgencia de resolver el problema, actualmente se han planteado “soluciones” rápidas que tienen que ver más con amortiguar los efectos de índole escénica. El manejo sustentable del Sargazo requiere del desarrollo de industrias que lo utilicen en grandes volúmenes, de manera eficiente y con modelos de negocio que consideren la variabilidad interanual y estacional de los arribazones. En este sentido, en los últimos dos años se han puesto en marcha varios proyectos que pretenden dar valor al Sargazo y analizan la factibilidad de usarlo en las industrias alimentaria, farmacéutica, textil, energética y de la construcción. Una alternativa es mezclar el Sargazo con matrices de distintas naturalezas para producir materiales, como bloques para la edificación, tapas de registros o coladeras, así como muebles para jardín. De lograrse algunas de estas innovaciones, el arribo masivo de Sargazo a nuestras costas podría pasar de ser un problema para constituir una oportunidad real para diversificar las economías del Caribe mexicano, así como de otros países afectados. Hace falta una visión completa e interés desde varios niveles para conseguir fondos de inversión destinados a la investigación básica y aplicada, con la cual podamos entender los efectos de los arribazones del Sargazo y generar soluciones concretas e innovadoras para utilizar estas macroalgas de manera sustentable. Lo anterior permitirá transitar de un fenómeno complejo a una oportunidad real de desarrollo.

#### *Ceniza volante como residuo de la producción de electricidad*

Las cenizas volantes corresponden a un subproducto de la combustión del carbón, siendo el material más abundante y menos utilizado en todo el mundo [63]. Este residuo es uno de los tipos de adiciones activas empleadas en la fabricación de concretos [84], debido a su reactividad y su alto contenido de  $\text{SiO}_2$  [61]. Los cementos híbridos logran combinar las características positivas de los materiales tradicionales (como el CPO) con los de activación alcalina, generando nuevos materiales con mayor durabilidad y propiedades mecánicas, debido a la coexistencia de los productos de hidratación de una mezcla de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y aluminosilicatos o geopolímeros gel (N-A-S-H) [65]. El uso de CV es una alternativa viable desde los puntos de vista técnicos, económicos y sobre todo ambientales, generando ahorros energéticos y reduciendo las emisiones de  $\text{CO}_{2e}$  [84].

La generación anual de cenizas volantes en todo el mundo supera los 900 Mt (millones de toneladas), teniendo casos como en Australia con una producción aproximadamente 14 Mt al año, India con 169.25 Mt, China con 580 Mt y Estados Unidos con 43.5 Mt [63]. La generación de cenizas se sitúa entre el 5 y el 20 % de la masa de carbón utilizada, de las cuales entre 85 - 95 % de la ceniza generadas corresponden a cenizas volantes (y el resto como cenizas de fondo de carbón) [67]. La utilización media actual de las cenizas volantes es sólo de alrededor del 53.5 % del total de cenizas [63]. Se estima que solo el 6 % del total de la producción anual de CV se usa en la industria de la construcción como adición o sustitución del CPO [63,84]. Esto sugiere un desaprovechamiento de un material como cementante alternativo debido al costo que genera su transporte generando graves problemas relacionados con la eliminación de cenizas no utilizadas que normalmente se depositan en vertederos o incluso en el océano con los consiguientes riesgos potenciales de contaminación atmosférica y del agua por lixiviación [63,84].

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) produce una mayor cantidad de ceniza volante de la que se utiliza. Principalmente tres termoeléctricas utilizan carbón como combustible: CFE Central Termoeléctrica Plutarco Elías Calles, CFE CT Carbón II y CFE CT José López Portillo. De acuerdo con datos del 2018 la producción de ceniza volante en México fue: 519.8 ton, 924.8 ton y 278.2 ton utilizando solo el 0.8, 16 y 11 % respectivamente [61,85]. Actualmente, se extraen 11.2 millones de toneladas de carbón mineral al año para su uso en la industria siderúrgica, pero se utiliza principalmente para producir electricidad quemando diariamente 15000 toneladas de



una mezcla de carbones (80 % sub-bituminosos de llama larga y 20 % bituminosos) para producir 1.2 millones de kW/h de energía eléctrica, lo que a su vez genera 2700 toneladas/día de residuos sólidos [86]. Cerca del 80 % de los residuos sólidos (cenizas volantes) se recuperan al ser precipitados electrostáticamente de los humos escapados de las estaciones de fuerza motriz [61,86]. No obstante, a pesar de que el uso de la ceniza volante como aditivo del concreto lleva años de investigación y desarrollo tecnológico, el nivel de reemplazo ha sido limitado debido a la resistencia mecánica a la compresión (debido a que la cinética de ganancia de resistencia es más lenta), lo que ocasiona que exista una cantidad significativa de este material depositado en vertederos con el grave riesgo ambiental que conlleva [85].

### 1.3. Justificación de la investigación

El problema de la limitación de materias primas y la contaminación global ha impulsado la investigación para producir materiales a base de recursos renovables [5,58,76,87–89]. Así mismo, el desarrollo de compuestos con materias primas vegetales se basa en la estrategia de prevenir el uso de recursos agrícolas y forestales, mejorando los rendimientos económicos para su cultivo [13,21,90]. La racionalización del consumo de energía y la promoción del uso de materiales de bajo impacto ambiental son medidas que deben adoptarse para frenar la degradación del medio ambiente [24,48,91], considerando la aislación térmica como un parámetro importante en lograr la eficiencia energética de los edificios [13]. Por este motivo, es necesaria la investigación y el desarrollo tecnológico que contribuya a generar nuevos y mejores materiales para las edificaciones actuales [46]. El impacto de esta investigación se centra en impulsar y divulgar el uso de materiales de bajo impacto ambiental para la construcción de edificaciones sostenibles con altos estándares de eficiencia energética. El proyecto busca reducir el impacto ambiental asociado a la producción de materiales de construcción y, a su vez, generar ahorros energéticos en la fase operativa de un proyecto, aprovechando ahorrar energía en la climatización y dando un uso final a un recurso no valorado, como es el caso del *Sargazo fluitans* y la ceniza volante. Además, por su pertinencia, se espera que genere un impacto futuro y cuente con un respaldo legal por parte de la entidad gubernamental competente que fomente el uso de materiales sostenibles en la construcción en México.

### 1.4. Impacto de la investigación

El impacto de esta investigación se enfoca en impulsar y divulgar el uso de materiales de bajo impacto ambiental para la construcción de edificaciones sostenibles con altos estándares de eficiencia energética.

Los problemas mundiales relacionados con el cambio climático y el calentamiento global han dirigido las líneas de investigación, volcando los intereses científicos y gubernamentales en buscar soluciones a este tipo de problemas, por lo que la eficiencia energética y la sostenibilidad en la construcción poseen una directriz importante. Debido a esto, el desarrollo de un material de construcción que utilice bioagregados y que presente ventajas en su desempeño energético para aislar viviendas y reducir las demandas de climatización pretende tener un impacto en la construcción en México, valorizando recursos en una cadena productiva importante, además de generar ahorros energéticos que se pueden traducir en menores costos económicos para los habitantes, lo que les permite mantener mejores condiciones de habitabilidad e impedir patologías en las viviendas a largo y mediano plazo. Se espera, además, que este tipo de iniciativas cuenten con el respaldo de la entidad gubernamental competente, que fomente la utilización de este tipo de materiales y establezca límites de transmitancia térmica sobre la envolvente de un edificio como medida de ahorro de energía.

## Capítulo II – Generalidades

### 2.1. Cemento Portland

El cemento es un término aplicado a todos los materiales aglutinantes. Las primeras civilizaciones de Egipto, Grecia y Roma lo fabricaron mediante la calcinación de la piedra caliza, que les proporcionaba cal viva [92]. Posteriormente, se descubrió que al mezclar escoria volcánica (ceniza volcánica) y ladrillos hechos con cal viva obtenían un cemento de mayor calidad, que recibe el nombre de «cemento romano». Estos morteros endurecen lentamente y alcanzan su máxima resistencia cuando se someten a un curado en agua. La reacción del cemento hidráulico romano demostró su calidad, y es el responsable de que hasta hoy en día podamos encontrar construcciones de aquella época histórica [62,77].

El 21 de octubre de 1824, Joseph Aspdin fabricó y patentó (patente Nro. 5022) un material grisáceo que, al amasarse con agua y arena, endurecía y formaba un conglomerado de aspecto similar al de las calizas de Portland [62]. Este cemento, se considera el precursor del cemento Portland actual, aunque la temperatura empleada para calcinar las arcillas y calizas era considerablemente inferior a la que se alcanza actualmente para completar la clinkerización. Unos años más tarde, Isaac Johnson observó que si se aumentaba la temperatura de calcinación de la mezcla, el material obtenido, pese a endurecer más lento, presentaba mejores propiedades mecánicas [65].

Según la ASTM C-150, el cemento portland es un material aglutinante que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, consistente en silicatos de calcio hidráulicos, con uno o más tipos de sulfato de calcio [62,93]. El concreto es el material de construcción más importante debido a que sus componentes están disponibles en todas partes con bajos costos, su producción es simple y su aplicación abarca una gran variedad de obras e infraestructuras [22,94]. La producción mundial de cemento pasó de 10 a 1500 millones de toneladas en entre el año 1900 y 2000 (Figura 12).

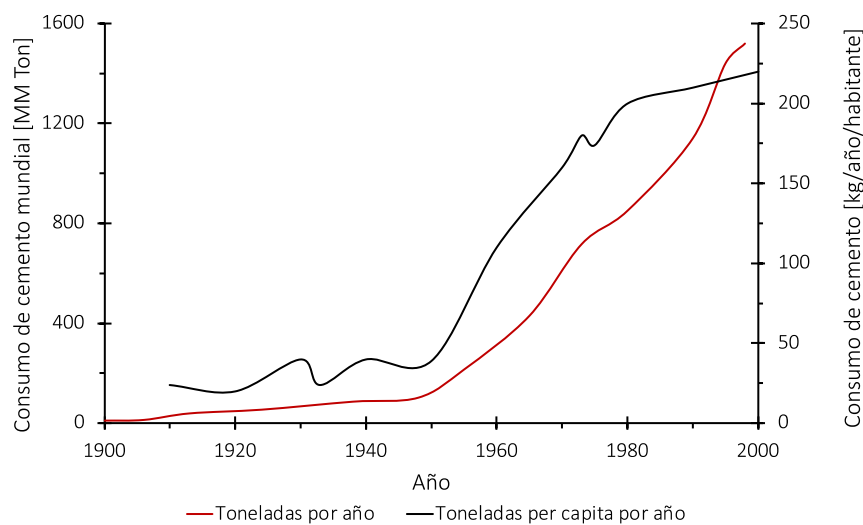


Figura 12 - Consumo de cemento anual



En la actualidad, es difícil hacer proyecciones sobre el consumo de cemento a largo plazo, porque esta industria está estrechamente vinculada no solo al desarrollo demográfico, sino también a la rapidez con que se aplique una política de desarrollo sostenible en todas las actividades humanas. Los principales productores de cemento del mundo son China, con el 19.04 % de la producción total, seguida de India, con el 14.9 %, EE. UU., con el 7.98 %, los Países Bajos, con el 6.91 %, Bélgica, con el 5.37 %, y Malasia, con el 4 % [11]. Existen grandes disparidades en el consumo de cemento a nivel mundial, lo cual está afectado por factores económicos, como la disponibilidad de materiales de construcción que compiten entre sí (madera, acero, aluminio, plásticos, materiales compuestos, vidrio, etc.), factores geográficos (países planos o montañosos), factores demográficos (densidad de población, grado de urbanización), factores climáticos, factores culturales y factores de naturaleza histórica, comercial, política y fiscal. Aunque el consumo de cemento tiende actualmente a disminuir en países industrializados, por el contrario, está aumentando rápidamente en muchos países subdesarrollados por lo que las empresas cementeras tendrán que trasladar sus principales actividades a los países en desarrollo.

### 2.1.1. Producción de cemento Portland

El procesamiento de la materia prima y la producción de cemento Portland han evolucionado a lo largo de los años, enfocándose en el desarrollo de un proceso de homogeneización eficiente para tratar grandes cantidades de materias primas. Al principio, la homogeneización se realizaba mediante un proceso húmedo que consistía en mezclar la harina cruda pulverizada con agua para formar una lechada homogénea. El proceso húmedo se realiza por lotes, lo que permite ajustar la composición química de la harina cruda antes de introducirla en el horno. Sin embargo, el alto consumo de energía que requería la evaporación hizo que se desarrollaran los procesos en seco y parcialmente húmedo, que consistían en incorporar una pasta con un 35 % de agua antes de secarla primero mecánicamente en prensas de filtro y, finalmente, con el calor recuperado del enfriamiento del Clinker o con el gas del horno. La cocción de la harina cruda dio lugar a importantes resultados. Al principio, los primeros Clinker se cocían en hornos verticales parecidos a los hornos de cal. El uso de hornos rotativos dio lugar a una multiplicación por diez de la producción de cemento. En la década de 1950, se desarrollaron los primeros precalentadores en los que la harina cruda se descarboniza parcialmente (40 %) mediante ciclones por los gases calientes provenientes del horno. Por último, en la década de 1970 se desarrollaron los primeros precalcinadores, que hoy en día se encuentran instalados en casi todos los hornos modernos. En consecuencia, es posible acortar el horno de cemento y aumentar su diámetro, reduciendo las pérdidas energéticas.

El cemento se fabrica a partir de una combinación de minerales naturales: calcio (60 % en peso) procedente de la piedra caliza, silicio (20 %), aluminio (10 %), hierro (10 %) y pequeñas cantidades de otros minerales, y se calienta en un gran horno a más de 1500 °C para convertir las materias primas en Clinker [6,62]. A continuación, se enfría, se pulveriza y se añade una pequeña cantidad de yeso para regular la reacción química inicial del cemento. Este producto es el cemento Portland acabado [62]. El esquema de la Figura 13 representan las materias primas y sus transformaciones hasta el apagado final del Clinker. Si se observa  $L_0$  y  $L_f$  se observa que para producir 1 tonelada de Clinker se requieren 1500 kilos de materia prima en el horno. En primer lugar, entre 500 y 600 °C, se pierde el agua de la arcilla. Luego, el cuarzo  $\beta$  se transforma en cuarzo  $\alpha$  a 565 °C. Después, entre 700 y 900 °C; se produce la descarbonatación de la caliza (generando considerables emisiones de  $\text{CO}_2$  al ambiente) [61]. Los primeros grupos de  $\text{CaO}$  que se liberan son bastante activos y se combinan con el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para formar  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  y con  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  para formar  $\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$ . A su vez, una parte de la cal se transforma en belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ).

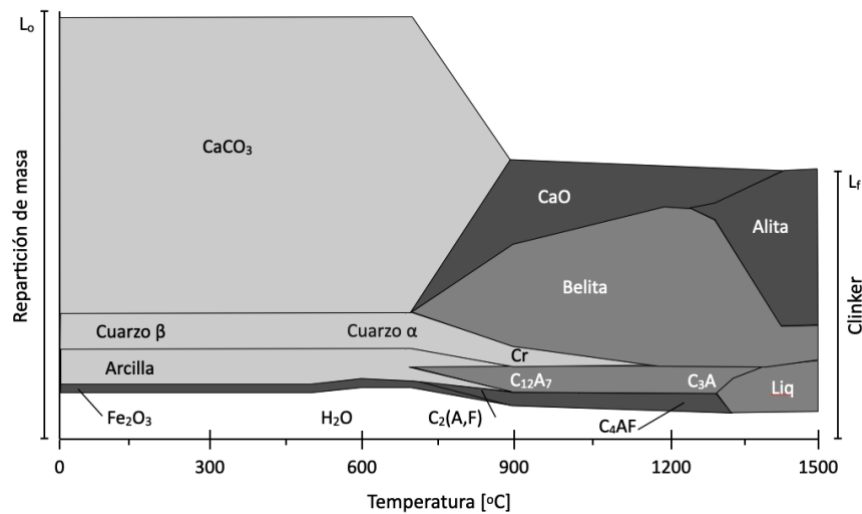
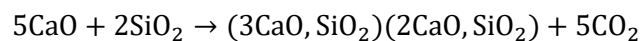


Figura 13 - Transformación de la harina cruda en Clinker

En este instante, aún existe una parte importante de cal que no se ha combinado con sílice en forma de cuarzo  $\alpha$ . A partir de los 900 °C se forman cristales de  $C_3A$  y  $C_4AF$  y la cristobalita se transforma en cuarzo  $\beta$ . A 1100 °C, la cristobalita se funde, lo que acelera su combinación con la cal. A 1300 °C, la mezcla de  $C_3A$  y  $C_4AF$  empieza a fundirse, actuando como catalizador para la transformación de belita en alita, difundiendo iones de  $Ca^{2+}$  en los cristales de belita. Por encima de los 1425 °C, prácticamente no hay más exceso de cal. En resumen, el proceso se puede sintetizar en la siguiente reacción [6]:



Habiéndose realizado todas las reacciones químicas para transformar la harina cruda en CPO, se forman tres fases diferentes: alita ( $C_3S$  impuro), belita ( $C_2S$  impuro) y una fase intersticial líquida. Cuando el Clinker ha sido expuesto a la temperatura de clinkerización, es necesario apagarlo para fijar el  $C_3S$  y  $C_2S$  en su forma activa. De este modo la fase intersticial tendrá tiempo o no de empezar a cristalizar o simplemente de cristalizar parcialmente y por ende es importante desde el punto de vista reológico.

### 2.1.2. Composición química del cemento Portland

El cemento Portland es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, que se procesan a altas temperaturas y se mezclan con yeso. El cemento Portland es un material multifásico complejo compuesto esencialmente de silicato tricálcico (alita, 37-60 % de la masa del Clinker), bicálcico (belita, 15-37 % del Clinker), y de otras fases minerales que existen en proporciones mucho menores. Esto hace que sean bastante difíciles de identificar, como el aluminato tricálcico (celita, 7-15 % del Clinker), el ferroaluminato tetracálcico (ferrita, 10-18 % del Clinker), el sulfato de calcio y la periclase (MgO). [62,77,92,95], los cuales quedan descritos en la Tabla 1. Por consiguiente, el material está compuesto por cuatro fases que representan el 90 % de la masa del CPO, los cuales pueden proporcionar distintas propiedades al concreto una vez que estas reaccionen.

Tabla 1 - Escritura simplificada de las fases cristalinas más importantes que componen el cemento Portland

Fase Pura	Nombre	Escritura simplificada	Fase impura
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	$\text{C}_3\text{S}$	Alita
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato bicálcico	$\text{C}_2\text{S}$	Belita
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	$\text{C}_3\text{A}$	Cellita
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferroaluminato tetracálcico	$\text{C}_4\text{AF}$	Ferrita
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de calcio	$\text{C}\bar{\text{S}}$	---
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	$\text{C}\bar{\text{S}}_2\text{H}$	---
---	Silicato de calcio hidratado	$\text{C}\cdot\text{S}\cdot\text{H}$	---

El  $\text{C}_3\text{S}$  genera el endurecimiento rápido siendo el causante del inicio del fraguado ya que sus productos de hidratación son el C-S-H y el hidróxido de calcio. Además, en el proceso genera una reacción exotérmica liberando gran cantidad de calor de hidratación que puede ser relacionada positivamente con el grado de hidratación. El  $\text{C}_2\text{S}$  está asociado a un proceso de hidratación más lenta y con una menor liberación de calor. Sin embargo, la resistencia del concreto se obtiene a mayores edades de curado. El  $\text{C}_3\text{A}$  en altos contenidos llega a ser contraproducente ya que puede reaccionar con los sulfatos y propiciar un efecto negativo en la durabilidad del concreto. Por otro lado, en cantidades moderadas, contribuye a la hidratación y endurecimiento a edades tempranas. Los productos de hidratación de este compuesto son cristales de aluminato de calcio hidratado. El  $\text{C}_4\text{AF}$  contribuye muy poco a la resistencia y proporciona el color característico al cemento. La reacción de hidratación de la ferrita genera cristales en forma de aguja de sulfoaluminatos de calcio hidratado (etringita,  $\text{AF}_1$ ), que es insoluble en agua y se envolverá en la superficie del Clinker de cemento [95]. Además, en la composición química del cemento se encuentran otros compuestos como el sulfato de calcio, yeso u óxidos. El CPO de cada uno de los diez tipos indicados en la normativa ASTM C 150 [93] debe ajustarse a los respectivos requisitos químicos en cuanto a la composición de óxidos y fases cristalinas como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 - Requerimientos porcentuales de composición estandarizado

Compuesto	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	---	6.0	---	---	---	
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	---	6.0	---	---	---	
$\text{MgO}$	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	
$\text{SO}_3$	Con $\text{C}_3\text{A}$ menor a 8 %	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
	Con $\text{C}_3\text{A}$ mayor a 8 %	3.5	---	4.5	---	---
Pérdida por ignición	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0	
$\text{C}_3\text{S}$	---	---	---	35	---	
$\text{C}_2\text{S}$	---	---	---	40	---	
$\text{C}_3\text{A}$	---	8.0	15	7	5	
$\text{C}_4\text{AF}+2(\text{C}_3\text{A})$	---	---	---	---	25	

Como se muestra en la Tabla 3, el contenido de  $\text{CaO}$  y el  $\text{SiO}_2$  puede representar más del 85 % de la composición química del CPO [92].

Tabla 3 - Composición de óxidos en el cemento Portland

Óxido	Contenido máximo [%]	Contenido promedio [%]
CaO	60 - 69	65
SiO <sub>2</sub>	18 - 24	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 - 8	6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 8	3
MgO	< 5	2
K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O	< 2	1
SO <sub>3</sub>	< 3	1

La morfología de los granos de Clinker puede observarse con microscopía electrónica como se muestra en la Figura 14 en la que se representan las superficies fracturadas de dos Clinker en las que pueden observarse grandes cristales poligonales (silicato tricálcico), así como redondos estriados (silicato bicálcico). Entre estos cristales se puede observar la fase intersticial, compuesta por aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico, que actúa como ligante que une las fases de silicato dentro de las partículas de Clinker. Las microscopías muestran que el cemento Portland está compuesto por dos fases de silicato de grano grueso, que están formadas por cristales impuros de silicato bicálcico y tricálcico, y están cementados por una fase intersticial formada por aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico, que varía en su grado de cristalización de un Clinker a otro. Los silicatos tricálcico y bicálcico son bastante toscos y están bien definidos, mientras que la morfología de la fase intersticial es más variable de un Clinker a otro.

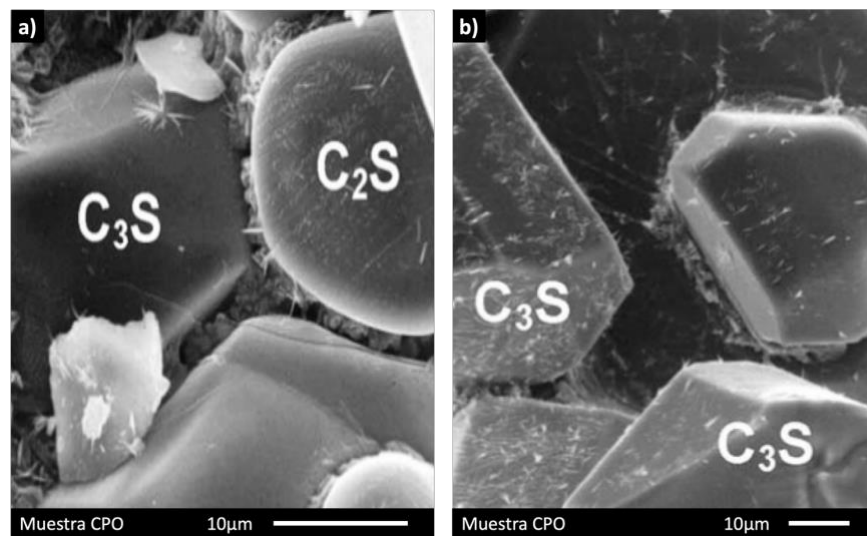


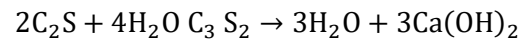
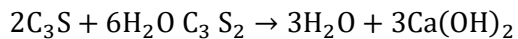
Figura 14 - Sulfatos alcalinos depositados en el C<sub>3</sub>S y el C<sub>2</sub>S

### 2.1.3. Hidratación del cemento Portland

El CPO tiene el principio de potencial hidráulico, es decir, la aptitud de un material pulverizado de fraguar y endurecer en presencia de agua y de formar compuestos estables [77]. La hidratación del cemento es un proceso

fisicoquímico bastante complejo que ocurre desde que entra en contacto con el agua, cambiando de un estado fluido a uno sólido, que resulta en un compuesto de residuos no hidratados de granos de cemento y productos de hidratación como hidratos de silicato de calcio (C-S-H), portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), etringita ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ; incluye algo de Fe; monosulfatos ( $[\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})(\text{OH})_6] \cdot (\text{SO}_4, \text{OH}, \text{etc.}) \cdot \text{XH}_2\text{O}$ ); poros capilares grandes con diámetros entre 50-10000 nm, poros capilares medianos con diámetros de 10-50 nm y poros de gel con diámetros inferiores a 10 nm [28,62,96]. El conocimiento de la velocidad de reacción entre el cemento y el agua es importante porque determina el tiempo de fraguado y endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta permitiendo transportar y colocar el concreto. Una vez que el concreto ha sido colocado y acabado, es deseable un endurecimiento rápido. El yeso, que se añade en el molino de cemento al molerse el Clinker, actúa como un regulador del fraguado inicial del cemento Portland [97].

Cronológicamente, el proceso comienza en el momento en que el cemento entra en contacto con el agua, llevando a cabo cinco etapas de hidratación. En el estado inicial de fraguado la mezcla es trabajable y se puede colocar sin esfuerzo mayoritario de energía en cierto lapso, además de exhibir una pérdida del revenimiento en el transcurso de los minutos. Para el periodo de fraguado inicial de la pasta de cemento, empezará la hidratación de la fase  $\text{C}_3\text{S}$  que es el principal responsable de la temprana resistencia del concreto. Esto se puede observar por la cristalización de la etringita como factor inicial de este comportamiento inicial. La primera etapa es la de disolución que dura aproximadamente una hora, en la que el cemento se mezcla con el agua. Durante esta etapa se forma  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , etringita y comienza la hidratación del silicato tricálcico [98–100]. Las reacciones son:



Durante la segunda etapa, (entre la hora 1 y 3.5 aproximadamente), los productos de hidratación aumentan, se forma silicato de calcio hidratado, más etringita y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La tercera etapa se conoce también como fraguado de la pasta y tiene lugar entre las tres horas y media y las siete horas en donde la pasta pierde movilidad y por lo tanto su comportamiento plástico, comenzando a comportarse como un sólido. Durante este período domina la hidratación del silicato tricálcico observándose una importante producción de silicato de calcio hidratado y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Cuando la pasta ya fraguó, comienza su endurecimiento. Se termina de consumir el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) presente en el cemento y la etringita se transforma en mono sulfatos, que tienen mayor densidad. Mientras tanto el  $\text{C}_3\text{S}$  continúa hidratándose, aumentando el contenido de C-S-H en la pasta endurecida. Posteriormente, comienza un proceso difusivo, por lo que el proceso desacelera. La hidratación continúa pero de forma más lenta [101]. El aumento de la resistencia con la edad continúa siempre que se den condiciones como que el cemento no hidratado aún esté presente; el concreto permanezca húmedo o la humedad relativa del aire esté arriba de aproximadamente 80 %; la temperatura del concreto permanezca favorable y haya suficiente espacio para la formación de los productos de hidratación [62]. La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75 % de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10 % y 15 % mayores [62]. La Figura 15 enseña la relación entre incremento de resistencia y el curado húmedo, en donde puede observarse que existen formas de optimizar las propiedades mecánicas de un concreto [97].

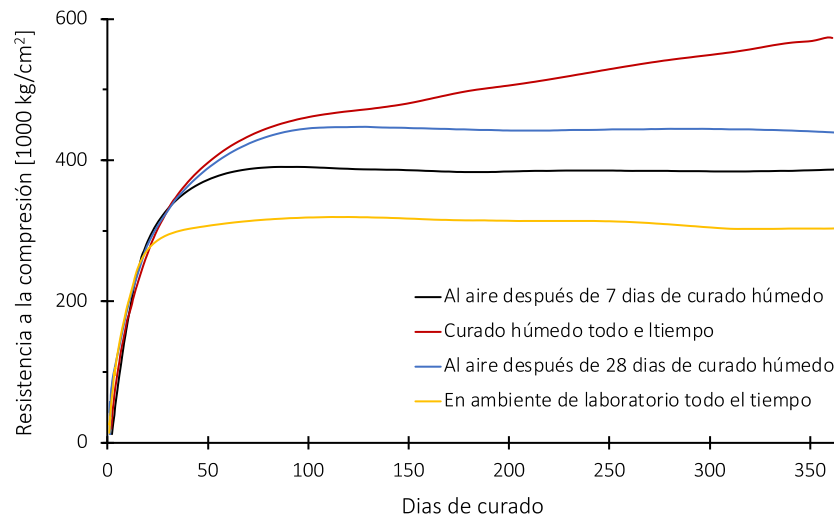


Figura 15 - Desarrollo de resistencia con la edad de curado en función de curado

La finura del cemento, aditivos, cantidad de agua adicionada y temperatura de los materiales en el momento de la mezcla son otros factores que influyen la tasa de hidratación. La microestructura es el conjunto del cuerpo sólido y una porción del cuerpo no sólido (la estructura de poros) y se puede determinar a partir de la naturaleza química y estructura cristalina [77,102]. Algunos factores que dependen de la microestructura son las propiedades físicas y químicas del tipo de cemento, el tipo y cantidad de aditivos agregados, la temperatura, el periodo de hidratación y la relación agua/cementante. Según la extensión en que se completan las reacciones de hidratación, se determina la resistencia y durabilidad del concreto como se muestra en la Figura 16 en función de la relación agua/cemento [100].

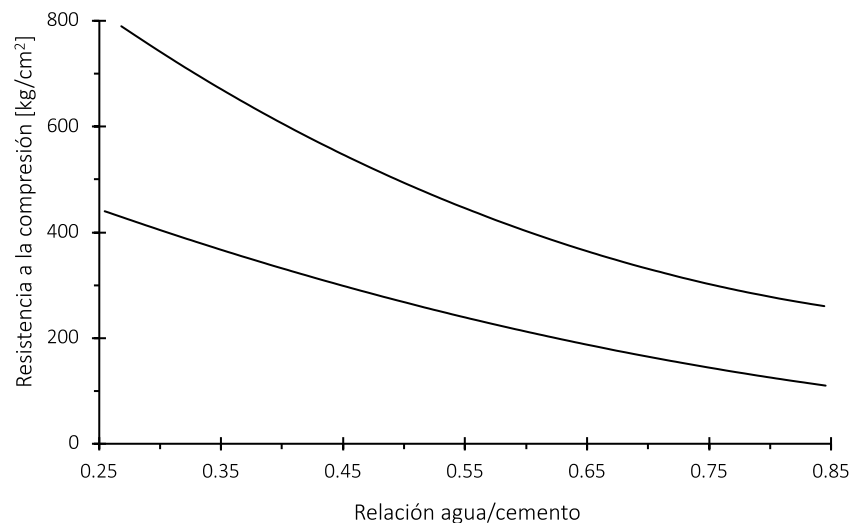


Figura 16 - Variación de resistencias típicas para diversas relaciones agua/cemento

Para un volumen dado de cemento, la pasta con el mayor contenido de agua tendrá el mayor volumen total de espacio disponible, pero después de la hidratación completa, todas las pastas contendrán la misma cantidad de

productos sólidos resultantes de tal proceso, por lo que la pasta con el mayor espacio total termina en un correspondiente mayor volumen de huecos capilares. Estos espacios huecos se atan entre sí, creando la llamada porosidad. Frecuentemente, los poros crean unas quebraduras finísimas dentro del concreto, debilitándolo. Además, los poros están entretejidos e interconectados, permitiendo así el pasaje lento del agua a través del concreto. Cuanto más denso el concreto, más apretados los poros y menos agua pueden pasar a través de ellos. Por lo tanto, la estructura de la porosidad en el concreto influye fuertemente en sus propiedades, determinando las proporciones a las que las especies agresivas pueden entrar en la masa y causar destrucción. En consecuencia, se define una relación directa entre la porosidad del compuesto con la resistencia a la compresión y durabilidad [100].

## 2.2. Cenizas volantes

### 2.2.1. Materiales puzolánicos

Los geopolímeros corresponden a polímeros inorgánicos constituidos por redes tridimensionales de enlaces del tipo siloxo (silicio-oxígeno) y enlaces sialato (silicio-oxígeno-aluminio), los cuales se pueden obtener mediante la activación alcalina de materiales ricos en óxidos de aluminio y silicio. Estos materiales pueden emplearse como aglutinante en sustitución del cemento, dando origen a concretos geopoliméricos cuyas características de resistencia a la compresión son similares y en algunos casos superiores a las de concretos a base de cemento Portland [103]. Se observa que en el período 1997 – 2017 se han documentado un total de 880 patentes y 3208 publicaciones científicas en el área de geopolímeros. La Figura 17 muestra el detalle de la búsqueda, donde se observa un ritmo creciente, evidenciando el interés de la comunidad científica en la generación de conocimiento y el desarrollo de aplicaciones para este nuevo material [104]. Los países líderes en el desarrollo de patentes para esta tecnología son China, con un total de 212 patentes, la República de Corea con 116 patentes y Estados Unidos con un total de 80 patentes en el área. En líneas generales se observa que en esta línea de investigación los países líderes también presentan un mayor número de publicaciones científicas, siendo la República de Corea el único país que presenta igual número de patentes que de publicaciones científicas [12].

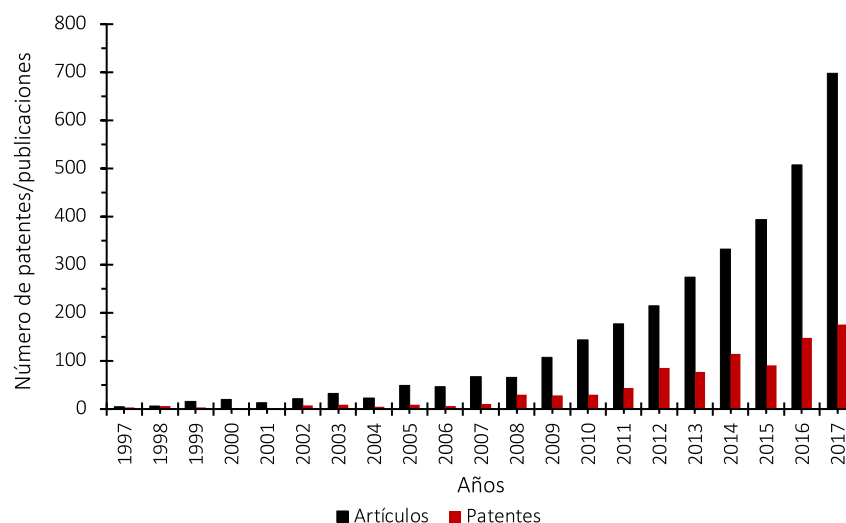


Figura 17 - Número de patentes y publicaciones en el área de geopolímeros

La norma ASTM C618 [105] define las puzolanas como materiales silíceos o silicoaluminatos que en sí mismos poseen poco o ningún valor cementante pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio del cemento a temperaturas normales para formar compuestos con propiedades cementantes [106].

Las puzolanas naturales pueden dividirse por una parte en las cenizas volcánicas, llamadas tobas cuando están induradas, en las que el constituyente amorfo es un vidrio producido por el enfriamiento rápido del magma y por otro lado las derivadas de rocas o tierras en las que la sílice es principalmente ópalo, como la diatomea y en donde la calcinación, dependiendo del contenido de arcilla, y/o la molienda pueden ser necesarias para su uso como puzolana. Las puzolanas volcánicas son una mezcla de silicatos y a menudo contienen tanto vidrio como cristales. Mediante la desintegración explosiva del magma, se liberan gases que forman vesículas, y la descomposición de las vesículas produce fragmentos de vidrio que tienen mayor superficie. La mayor superficie aumenta la inestabilidad y la susceptibilidad a la meteorización. Los productos finales de la meteorización volcánica son las cenizas, arcillas y las zeolitas. Las zeolitas, formadas por la meteorización hidrotermal del vidrio volcánico, también reaccionan con la cal cuando están finamente molidas.

Tanto los griegos como los romanos eran conscientes de que ciertos depósitos volcánicos, finamente molidos y mezclados con cal, daban lugar a un mortero de fuerza superior y resistente a la acción del agua dulce o salada. Los griegos utilizaron toba volcánica puzolánica procedente de la isla de Thera (Santorini). Los romanos utilizaron toba volcánica encontrada en la bahía de Nápoles, pero el material preferido era una toba zeolítica de las estribaciones del monte Vesubio, extraída en Pozzvoli. Las puzolanas naturales utilizadas hoy en día se fabrican a partir de tobas que contienen entre un 50 y un 100 % de vidrio riolítico o de tierra de diatomeas, que se compone de esqueletos silíceos de algas secretoras de sílice. La tierra de diatomeas es la más reactiva a la cal de todas las puzolanas naturales. Esta reactividad se debe en parte a que su principal componente es la sílice amorfa, hidratada y opalina, que contiene entre un 6 y un 10 % de agua. La tierra de diatomeas contiene generalmente minerales arcillosos que deben calcinarse a 800-900 °C convirtiendo la estructura cristalina de los minerales de arcilla en una estructura amorfa y desordenada que tiene un mayor grado de actividad puzolánica.

Entre las puzolanas artificiales se encuentran la arcilla y la pizarra quemadas y las cenizas de combustible pulverizadas o las cenizas volantes. Aunque las arcillas son naturales, sus características o actividad puzolánica se incrementan mediante calcinación; por lo tanto, se consideran artificiales. La calcinación es necesaria para destruir la estructura cristalina existente y formar una estructura de silicato de aluminio amorfa o desordenada. Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión de carbón finamente molido para aplicaciones industriales o para la producción eléctrica. Los mayores productores de cenizas volantes son las centrales eléctricas, en las cuales se retiran de los gases de combustión mediante precipitadores electrostáticos, filtros de mangas o colectores mecánicos. La composición de las cenizas volantes depende del carbón que se quema y de la eficacia del proceso de combustión. La mayoría de las partículas de cenizas volantes son esféricas y vítreas [106]. A su vez, varios estudios han informado del peligro que surge durante la manipulación y eliminación de las cenizas volantes, por lo tanto, su gestión se considera un problema importante en muchas partes del mundo. Se necesitan nuevas aplicaciones eficientes de las cenizas volantes como materia prima por lo que se requiere caracterizarlas completamente, ya que las distintas condiciones durante la incineración dan lugar a diferentes propiedades [85,86].



### 2.2.2. Cenizas volantes

Las cenizas corresponden a la parte inorgánica e incombustible del carbón, y está formada por minerales y partículas de roca [67,68,103]. El carbón destinado a la generación de electricidad se tritura finamente, y se introduce con aire en una cámara de combustión a 1040 - 1480 °C. Durante la combustión del carbón, la materia volátil se convierte en gas, y el carbón arde para calentar los tubos de la caldera. La materia inorgánica (ceniza) se funde y permanece en la cámara de combustión en forma de escoria en los tubos de la caldera, es arrastrada por la corriente de gases de combustión o cae al fondo de la caldera. Los minerales fundidos, como la arcilla, el cuarzo y el feldespato, se solidifican en la corriente de gases al salir de la cámara de combustión. El rápido enfriamiento y el movimiento del aire dan a aproximadamente el 60 % de las partículas de cenizas volantes una forma esférica, siendo depositadas en el fondo de la tolva formando las cenizas de fondo, y otras se adhieren a las paredes de los tubos de la caldera, formando la escoria de caldera. Se utilizan varios tipos de quemadores de carbón pulverizado y la cantidad de cenizas volantes, que varía según el método de combustión, oscila entre el 65 % y el 85 %. La recogida de cenizas volantes es necesaria para eliminar las partículas de los gases de combustión antes de que se liberen a la atmósfera con distintos métodos. Los precipitadores electrostáticos pueden tener una eficacia de hasta el 99 % y son el dispositivo anticontaminación más utilizado. Los precipitadores mecánicos son menos eficientes (especialmente en partículas del rango 0-20  $\mu\text{m}$ ), aunque los clones de alta eficiencia pueden alcanzar una eficiencia global del 85 % [106].

El uso de cenizas volantes en el cemento, como la mayoría de las puzolanas, reduce el coste del concreto y ahorra energía al sustituir al cemento que habría que comprar. El ahorro puede ser significativo, ya que la fabricación de cemento es un proceso que consume mucha energía. Una menor calcinación de la piedra caliza en el proceso del cemento es beneficiosa para el medio ambiente, ya que reduce la cantidad de  $\text{CO}_2\text{e}$  generada. El uso de cenizas volantes también disminuye la necesidad de extraer materiales para el cemento y reduce el coste de procesamiento [106].

### 2.2.3. Características y composición

Las características físicas de las cenizas volantes incluyen el tamaño, la morfología, la finura y la gravedad específica. La finura suele determinarse por el porcentaje de cenizas retenidas en un tamiz de 45  $\mu\text{m}$ ; en donde la norma ASTM C618 [6,105], exige que no se retenga más del 34 %. La distribución de tamaños puede ser muy variable, dependiendo del tipo de precipitador. Una gran parte de las partículas tiene menos de 3  $\mu\text{m}$  de diámetro, pero el tamaño medio es de 7 - 12  $\mu\text{m}$ . La gravedad específica de las cenizas volantes está relacionada con la composición química, el color y la forma de las partículas. Con un mayor contenido de cuarzo y mulita, la gravedad específica disminuirá. Las cenizas volantes con una gran fracción de partículas de baja densidad son más reactivas que las cenizas volantes con partículas de mayor densidad que contienen impurezas de hierro. La reactividad puzolánica depende de la cantidad de vidrio presente con bajo peso específico.

Los componentes químicos de las cenizas volantes se presentan en forma de óxidos. Estos óxidos son sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), calcio ( $\text{CaO}$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ), titanio o rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), azufre ( $\text{SO}_3$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), y potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) [6]. El  $\text{SiO}_2$  y el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  constituyen el 60-70 % de la ceniza total en algunas cenizas volantes, pero no en todas. El LOI es un indicador del carbono no quemado, que se expresa en porcentaje y depende en parte del grado de pulverización del carbón, la velocidad de combustión y la relación aire-combustible, así como del tipo y el origen del carbón [103,106,107].

Según la norma ASTM C618, que clasifica las cenizas volantes para su uso como aditivo mineral en el concreto, existen dos clases de cenizas volantes, C y F como se muestra en la Tabla 4. La clase C procede normalmente de la combustión de hulla sub-bituminosa y lignito, y la clase F de la combustión de carbones bituminosos. La diferencia significativa entre las cenizas volantes es el porcentaje de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  [6,107]. En general, el mayor contenido de CaO indica un mayor grado de auto endurecimiento. Las cenizas volantes de Clase C tienen un LOI muy bajo, <1%. Las fases cristalinas de las cenizas volantes de clase C suelen incluir anhidrita, aluminato tricálcico, cal, cuarzo, periclita, mulita, merwinita y ferrita [106].

**Tabla 4 - Composición química de la ceniza volante de acuerdo con ASTM C618**

Constituyente	Clase C	Clase F
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Porcentaje mínimo)	50	70
CaO (Porcentaje máximo)	----	----
MgO (Porcentaje máximo)	----	----
$\text{SO}_3$ (Porcentaje máximo)	5.0	5.0
Álcali disponible (Porcentaje máximo)	1.5	1.5
LOI (Porcentaje máximo)	6.0	6.0
Humedad libre (Porcentaje máximo)	3.0	3.0

#### 2.2.4. Uso de las cenizas volantes en concretos

Las cenizas volantes pueden utilizarse en sustitución del cemento Portland en una cantidad del 100 %. Sin embargo, por encima del 80 % de sustitución, suele ser necesario un activador químico [63,108,109]. El nivel de reemplazo, la composición química, la fracción amorfa, la actividad puzolánica o hidráulica, el tamaño de partícula y la morfología de cada material son algunos de las variables a tomar en cuenta al diseñar pastas de cemento compuesto con más de un material de reemplazo [66]. Debido a su forma esférica, las cenizas volantes actúan como cojinetes de bolas y aumentan la trabajabilidad del concreto hasta el punto de reducir la cantidad de áridos finos [54,108]. La adición de partículas finas (1-20  $\mu\text{m}$ ) reduce el volumen de huecos en las mezclas de concreto y disminuye el consumo de agua [66,108]. El tiempo de fraguado depende del tipo y la cantidad de cenizas volantes utilizadas. Las cenizas volantes con bajo contenido en calcio y alto %LOI retardan el fraguado [68]. La adición de cenizas volantes al concreto reduce el aumento exotérmico de la temperatura por la reacción de hidratación del CPO, lo cual es ventajoso en estructuras macizas, donde el aumento de la temperatura puede provocar fisuras debido a las tensiones térmicas inducidas en las partes endurecidas de la masa de concreto. Las reacciones puzolánicas se producen después del inicio de la hidratación del cemento, cuando el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  está disponible [104]. Al sustituir una parte del cemento por cenizas volantes, se retrasa la velocidad de hidratación y las reacciones puzolánicas se manifiestan tarde en el proceso. La formación de compuestos por reacción puzolánica provoca el refinamiento de los poros y reduce la micro fisuración en la zona intersticial. Esto mejora significativamente la resistencia y durabilidad del concreto [54,63,65,66,68,104,108]. A su vez, las cenizas volantes a menudo mejoran la resistencia del concreto a ataques químicos consumiendo progresivamente  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  altamente vulnerable a través de la reacción puzolánica [63]. La actividad puzolánica reduce la permeabilidad, dificultando la penetración de los productos químicos nocivos en el concreto [65,106].

## 2.3. Fibras vegetales

Hoy en día, científicos de todo el mundo se preocupan por la protección de la atmósfera y la biodiversidad, mejorando la sostenibilidad y la calidad de los productos ecológicos [110]. Debido a los actuales problemas económicos y medioambientales a nivel mundial, se ha generado un especial interés en estudiar alternativas comparables a los materiales convencionales, como estrategia para reducir el calentamiento global. En este contexto, el paso de los materiales no renovables (recursos derivados del petróleo) a los renovables (recursos derivados de la biomasa) se está convirtiendo en el centro de interés de la investigación mundial. El hecho de que los recursos petrolíferos son finitos ha hecho subir los precios en sectores esenciales como la energía, los materiales y la medicina. Por lo tanto, uno de los mayores retos del mundo moderno es disminuir la dependencia de estos productos basados en recursos petroquímicos [111].

En este contexto, las fibras naturales son muy prometedoras y tienen un gran potencial como materias primas respetuosas con el medio ambiente, especialmente para la aislación térmica [112]. Los materiales compuestos basados en materiales renovables y respetuosos con el medio ambiente se utilizan cada vez más, para sustituir los materiales convencionales formados a partir de compuestos de materiales sintéticos [113,114].

### 2.3.1. Agroindustria y bioresiduos

La agroindustria es un sector que atiende principalmente a la agricultura para satisfacer la demanda de suministro de alimentos. Recientemente, se ha descubierto que determinadas industrias, tienen un gran potencial para introducir algunos de sus cultivos en la producción de bioenergéticos y como resultado, se han realizado estudios sobre cómo convertir estas plantas en productos industriales y energéticos. Una vez procesados estos materiales, dejan residuos que pueden utilizarse en la industria de la construcción. La problemática de los residuos industriales es el mal manejo de su disposición final [78,89]. Para comprenderlo, primero hay que definir qué es un subproducto, es decir, un producto secundario, bien conocido, generalmente útil, comercializable y, por lo tanto, con valor añadido, que resulta de un proceso industrial. El término «residuo» se aplica a aquellos que pueden tener o no un valor comercial, porque son poco comunes o se generan en bajas cantidades. Sin embargo, algunos de sus constituyentes, aún en baja proporción, le pueden conferir algún interés para su utilización. Desde este punto de vista, los términos «subproducto» y «residuo» podrían utilizarse como sinónimos, no así el término «desecho», que se refiere a aquellos materiales que no tienen ningún valor comercial ni atributos de interés para ser utilizados en algún proceso, por lo que se consideran basura y deben disponerse de ellos [115].

En la agroindustria, existen procesos que generan subproductos, los cuales no se reciclan ni se reutilizan y causan problemas ambientales. Sin embargo, debido a su contenido químico (calcio, magnesio, silicio, alúmina, así como etanol, celulosa, lignina, etc.), son una fuente de recursos viable y atractiva, y pueden utilizarse plenamente cuando son transformados mediante algún tratamiento físico o químico [112]. El uso de estos subproductos, como los desechos agroindustriales, puede traer enormes beneficios para reducir el costo de la mayoría de las industrias del mundo como la alimenticia y la construcción, entre otras [116].

### 2.3.2. Fibras naturales vegetales

Según las fuentes de los materiales, las fibras se clasifican en tres grupos: naturales, semisintéticas y sintéticas. La fibra natural es abundante y más asequible en comparación con la fibra sintética, con menores requisitos de densidad y energía, renovabilidad, mayor relación resistencia-peso, mayor relación longitud-diámetro (de

alrededor de 100), y mayor resistencia y módulo de elasticidad, lo que muestra un gran potencial como sustituto del vidrio, el carbono u otras fibras sintéticas. Las fibras naturales compiten en consistencia, longevidad, color y brillo con la lana, la seda y las fibras sintéticas [110]. Las fibras naturales son materiales respetuosos con el medio ambiente empleados como refuerzo para fabricar compuestos, adecuados para muchas aplicaciones industriales. Las plantas de las que se producen las fibras naturales podrían caracterizarse como primarias y secundarias en función de su aplicación. Las plantas primarias como el yute y, el cáñamo, cultivan sólo por sus fibras, mientras que las plantas secundarias como el plátano y la piña, se cultivan por sus frutos, y las fibras se producen a partir de estas plantas como subproductos [114]. Las fibras vegetales son parte de las fibras naturales como se observa en la Figura 18 y se pueden extraer de diferentes partes de las plantas, como hojas, tallos, semillas o frutos [113,117,118].

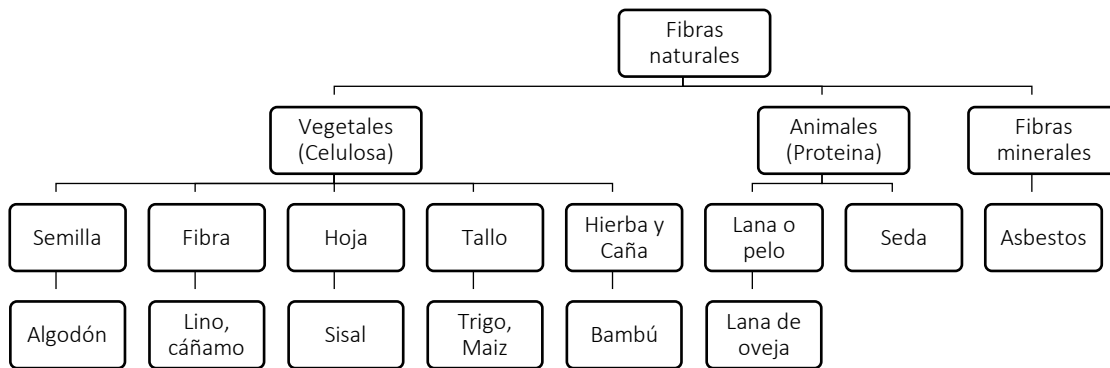


Figura 18 - Clasificación de fibras naturales

### 2.3.3. Propiedades de las fibras vegetales

La contaminación ambiental, el calentamiento global y el futuro de la producción de petróleo son algunas de las principales causas del interés público y privado en los recursos naturales de base biológica [111]. Es por esto por lo que en los últimos años el interés hacia la utilización de los materiales lignocelulósicos ha ido en constante aumento. Su uso y aplicación han mantenido la atención en dos áreas importantes: La obtención de productos químicos y energéticos a partir de fuentes renovables que sustituyan parcial o totalmente la utilización de reservas fósiles como el petróleo, gas o el carbón; y el aprovechamiento de materiales residuales procedentes de los bosques y de los cultivos [119].

Las fibras vegetales se pueden encontrar en una amplia variedad de morfologías, además, su superficie puede modificarse fácilmente para tener un carácter más hidrófilo o hidrófobo. Las principales ventajas y desventajas de la utilización de fibras vegetales en materiales compuestos quedan expuestas en la Tabla 5 [7,113,114,120]. El costo y la disponibilidad de las fibras naturales vegetales dependen en gran medida del lugar, la región, los mercados de importación y las aplicaciones de la competencia. Aunque las fibras agrícolas no madereras y los desechos de fibras agrícolas son abundantes en todo el mundo, su fuente puede ser difusa y la infraestructura de recolección, purificación y entrega a veces es limitada representado una de las principales dificultades en la explotación de este tipo de materiales [119–121]. En comparación con las fibras de acero, debido a su flexibilidad, las fibras vegetales son fáciles de manejar, especialmente cuando se utiliza un gran porcentaje de fibra [24]. Además, las fibras naturales son biodegradables y tienen un bajo impacto medioambiental. En la mayoría de los casos, es probable

que los compuestos de fibras naturales sean superiores a los de fibra de vidrio desde el punto de vista medioambiental por varias razones, como un menor impacto ambiental en comparación con la producción de fibra de vidrio, un mayor contenido de fibra para un rendimiento equivalente y la incineración de las fibras naturales al final de su vida útil, lo que se traduce en energía recuperada y créditos de carbono [13,112,122].

**Tabla 5 - Ventajas y desventajas de las fibras lignocelulósicas**

Ventajas	Desventajas
- Bajo peso específico que resulta en una más alta resistencia y dureza que el vidrio	- Baja resistencia, especialmente resistencia al impacto
- Recurso renovable, su producción requiere poca energía y bajas emisiones de CO <sub>2</sub>	- Calidad de la fibra variable influenciada por el agua
- Producción con baja inversión y costos	- Pobre resistencia a la humedad la cual causa hinchazón de la fibra
- Procesamiento amigable	- Procesamiento restringido por la temperatura
- Alta resistencia eléctrica	- Baja durabilidad
- Buen aislante térmico y acústico	- Baja resistencia al fuego
- Biodegradable	- Baja adhesión entre la fibra y la matriz
- Es posible el reciclaje térmico	- Precio variable por resultados de cosechas y políticas afines

Las fibras naturales poseen una resistencia a la tensión y un módulo de Young elevados. Estas características mecánicas dependen de parámetros como el diámetro de la fibra, la cantidad de regiones cristalinas, el grado de cristalinidad o polimerización, la estructura vacía y si las fibras proceden del tallo, la hoja o la semilla de la planta. Las condiciones climáticas, la edad y el proceso de digestión influyen en la composición química [7,110,118,123]. Además, gracias a la estructura porosa de las plantas e incluso del material en general en algunos casos, los materiales de origen biológico tienen propiedades aislantes e higroscópicas eficaces [57], que contribuyen a mejorar el confort térmico del edificio durante su uso. Los valores reportados para diferentes fibras naturales y de los materiales de construcción aislantes más comunes se expone en el Anexo 2. Estos materiales tienen la capacidad de absorber la humedad del aire, actuando como materiales amortiguadores de la humedad y tienen un efecto amortiguador de las variaciones de la humedad relativa (HR). Evitar valores extremos de humedad ayuda a mantener el confort interior, limita el desarrollo de microorganismos y sus consecuentes problemas de salud, y contribuye a la durabilidad del material [5].

Algunas desventajas de la fibra natural, como la biocompatibilidad y las propiedades hidrófilas, pueden superarse mediante diversas modificaciones de la superficie y métodos de tratamiento de productos químicos para lograr usos suficientes. Se han utilizado con éxito para muchos fines, como materiales compuestos (a pesar de su menor densidad en comparación con la fibra de vidrio) en los campos de la construcción y la ingeniería, el textil, la biomedicina, los biopolímeros, los biosensores y los envases inteligentes. La utilización de fibras naturales ayudaría a mitigar los problemas de contaminación, como las emisiones de residuos, vertederos, tóxicos y GEI [110].

### 2.3.4. Clasificación de fibras vegetales

Las fibras vegetales, en función de su localización en la planta, suelen clasificarse en dos grandes grupos: fibras blandas y fibras duras. Las fibras blandas se encuentran en los tallos de las dicotiledóneas (plantas con dos

cotiledones en la semilla), como el lino, el yute o el cáñamo. Por su parte, las fibras duras se obtienen principalmente a partir de las hojas de las monocotiledóneas (plantas con un único cotiledón en la semilla), donde se disponen en forma de haces que se superponen, lo que las hace más fuertes debido a su mayor grado de lignificación, es decir, que adquieren una mayor consistencia al acumularse más celulosa. Ejemplos de este tipo de fibras son las del esparto, la yuca o el sisal, entre otras. Aunque su localización más frecuente radica en los tejidos vasculares, algunos autores distinguen una tercera categoría, denominada «fibras de superficie», donde se incluyen aquellas fibras que corresponden a los pelos de la epidermis de la semilla, como ocurre, por ejemplo, en el caso del algodón [124].

Según su origen y composición, las fibras se clasifican en no madereras y de madera. Las fibras no madereras se pueden clasificar en cuatro grupos principales en función de la parte de la planta utilizada para extraer las fibras: fibras de líber (cáñamo, yute, kenaf, lino, ramio y otros), fibras de hoja (sisal, henequén, piña, palma aceitera, plátano y otros), fibras de tallo (paja y cañas) y fibras de semilla (algodón, coco y otros). Las fibras madereras se agrupan según su origen en fibras blandas (obtenidas de pinos, abetos, etc.) y fibras duras (de abedul, eucalipto, haya, etc.). Además de su origen, los refuerzos a base de fibras lignocelulósicas se pueden clasificar según su forma. Así, las fibras de celulosa se pueden encontrar en filamentos (fibras largas con longitudes entre 20 y 100 cm), fibras cortadas (fibras cortas que pueden ser hiladas) o pulpa (fibras muy cortas de 1-10 mm de longitud que deben dispersarse en el agua para separarlas). Las propiedades fisicoquímicas de las fibras vegetales a menudo dependen de las fuentes, de los métodos de cultivo y cosecha y de la transformación, así como de su forma [22].

### 2.3.5. Composición de fibras vegetales

La Figura 19 presenta una configuración general de la estructura de una fibra natural y su organización microestructural que abarca los tres componentes estructurales principales, es decir, la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, en una relación aproximada de 4:3:3 variando sensiblemente según las diferentes especies, además de otros componentes minoritarios, como agua, proteínas, péptidos y compuestos inorgánicos [114]. La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, esta biomasa producida por la fotosíntesis es la fuente de carbono renovable más prometedora para solucionar los problemas actuales de energía y materias primas [125]. La holocelulosa puede ser identificada como el resultado de la combinación de celulosa y hemicelulosa como puede observarse en la Figura 19 [119,126]. Todas las plantas vasculares que se encuentran en la naturaleza pueden ser utilizadas como fuentes de fibras celulósicas. Sin embargo, el uso de una planta en particular como fuente de fibra para una aplicación dada dependerá de su disponibilidad y costo de extracción [19].

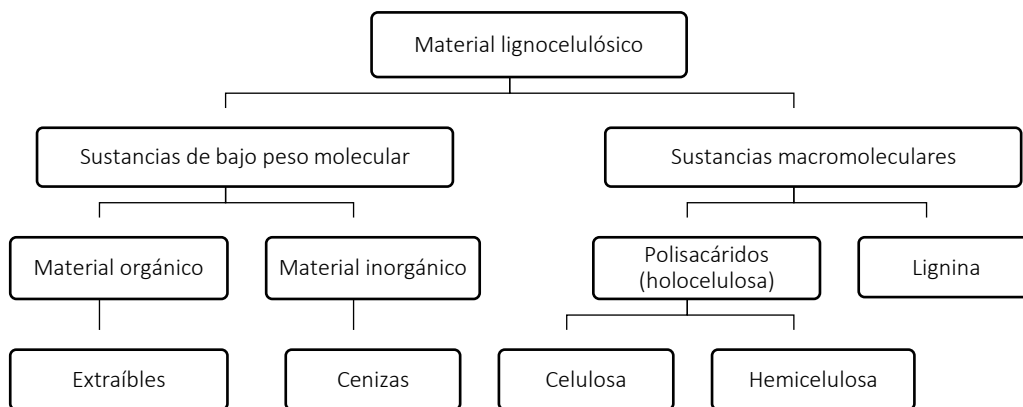


Figura 19 - Principales componentes químicos de los materiales lignocelulósicos.

La celulosa es un polímero de glucosa hidrófilo que contiene una cadena lineal de 1,4-βanidrogucosa unidades, y que contiene grupos hidroxilos alcohólicos. Estos grupos hidroxilos forman enlaces de hidrógeno intermoleculares con la propia macromolécula y también con otras macromoléculas de celulosa o moléculas polares. Por lo tanto, todas las fibras naturales son de naturaleza hidrófila. Aunque la estructura química de la celulosa de diferentes fibras naturales es la misma, el grado de polimerización varía otorgando diferentes propiedades mecánicas asociadas. Durante la síntesis biológica de las paredes celulares de las plantas, se produce la celulosa y la hemicelulosa, y simultáneamente la lignina llena los espacios entre las fibras de estos polisacáridos cementándolas entre sí. Este proceso de lignificación provoca un endurecimiento de las paredes celulares, protegiendo al carbohidrato de daños químicos y físicos. La lignina es un polímero bioquímico que funciona como material de soporte estructural en las plantas, es un compuesto fenólico de alto peso molecular, generalmente resistente a la degradación microbiana [88,120,127]. La fibra vegetal consta de una célula primaria en las paredes periféricas y tres secundarias en el interior y una luz en el centro. La pared celular principal está formada por redes de microfibrillas de cristal de celulosa dispuestas de manera desordenada como puede verse en la Figura 20 [25]. En las paredes secundarias, las microfibrillas cristalinas de celulosa están dispuestas de forma helicoidal, con la dirección principal de la fibra [114,121,128].

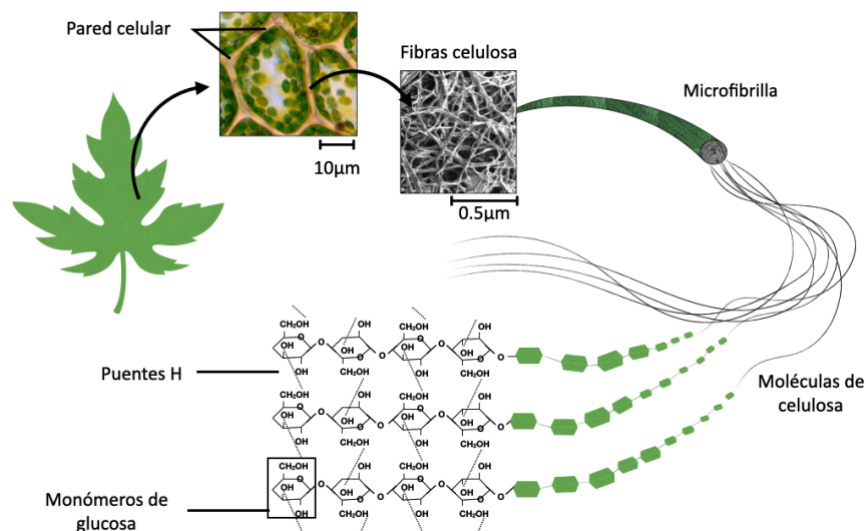


Figura 20 - Diagrama de celulosa con la estructura de las membranas celulares de la planta

Los distintos componentes principales descritos (celulosa, hemicelulosa y lignina) se encuentran de manera variada en cada una de las fibras lignocelulósicas que podemos encontrar en la naturaleza. Esta variabilidad en la composición es la que otorga diferentes características físicas y químicas a las diferentes fibras naturales vegetales lo cual permite una amplia variedad de usos para la fabricación de materiales con distintas aplicaciones. Las fibras más utilizadas que han sido caracterizadas químicamente y quedan descritas en el Anexo 2.

El uso de fibras ha permitido disponer de materiales de construcción baratos, biodegradables y reciclables, a partir de recursos renovables. Sin embargo, una limitante para tener en cuenta cuando se usan fibras naturales en matrices de distintas naturalezas en la industria de la construcción es la tendencia a la degradación por exposición al medio ambiente, para lo cual se recomienda aplicar recubrimientos protectores o funcionalizar las fibras [129].



## 2.4. Energía en edificaciones

### 2.4.1. Conductividad térmica [ $\lambda$ ]

El calor es una forma de energía que se transfiere de manera espontánea entre distintas zonas de un cuerpo o desde un cuerpo hacia otro [130] en un proceso que va acompañado de un cambio de entropía hasta que se alcanza, si es posible, el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas. La termodinámica de los procesos reversibles estudia la transferencia de energía en un proceso de intercambio de calor entre cuerpos a distintas temperaturas, en tanto se mantenga una diferencia finita de temperaturas entre los mismos habrá un flujo irreversible de calor entre dichos cuerpos y no tendremos estados de equilibrio [131]. La transmisión de calor tiene lugar por tres mecanismos básicos:

- **Conducción:** La energía calórica se transmite durante el contacto directo entre cuerpos a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema.
- **Convección:** La energía calórica se transmite por el movimiento físico de moléculas “calientes” de las zonas de alta temperatura a las zonas de baja temperatura y viceversa, equilibrándose las temperaturas.
- **Radiación:** La energía calórica se transmite en forma de radiación electromagnética, emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura determinada, y que puede ser absorbida por los cuerpos, aumentando su temperatura.

Estos mecanismos básicos actuarán de forma combinada con otros elementos como la humedad del aire, para dar el grado de comodidad o confort del ser humano en el espacio considerado [130]. De los tres mecanismos de transferencia de calor, la conducción es el que más fácilmente puede observarse en la cotidianidad dependiendo de cuatro factores básicos: el gradiente de temperatura, la sección transversal de los materiales involucrados, la longitud de su trayectoria y las propiedades de esos materiales. Cuando se trata de conducir el calor, no todas las sustancias trabajan de igual manera. Los metales se consideran buenos conductores ya que pueden transferir rápidamente el calor, mientras que materiales como la madera, el papel, el aire y la tela son pobres conductores de calor [131].

La conductividad térmica corresponde a la cantidad de calor que en condiciones estacionarias se transmite por unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de material homogéneo de extensión infinita, de caras planas y paralelas y de espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. La conductividad térmica de algunos materiales de construcción quedan expuestos en la Tabla 6 [132].

Tabla 6 - Conductividad térmica de algunos materiales de construcción

Material	Conductividad térmica [W/mK]
Aire quieto	0.0024
Concreto armado	1.63
Ladrillo de arcilla	0.6
Mortero de cemento	1.4
Madera de pino insigne	0.104
Poliestireno expandido	0.043



### 2.4.2. Transmitancia térmica [U]

Físicamente, las edificaciones son sistemas termodinámicos abiertos, en situación permanente de no-equilibrio y de paredes diabáticas, capaces de intercambiar masa/energía con el entorno. Su estado termodinámico en cada instante es el resultado de su respuesta a las variaciones externas/internas de su entorno. El comportamiento térmico de la edificación depende de varios parámetros como variables ambientales no controladas y variables de diseño [46].

La resistencia térmica [R] está definida por la oposición al paso del calor que presentan los elementos de construcción. Para una capa material de caras planas y paralelas, de espesor “e”, conformada por un material homogéneo de conductividad térmica “λ”, la resistencia térmica, queda dada por la Ecuación 1 y se expresa en m<sup>2</sup>K/W [132].

Ecuación 1 
$$R = \frac{e}{\lambda}$$
 Donde e es el espesor del material [mm] y λ la conductividad térmica [W/mK]

Un material suele considerarse aislante térmico si su conductividad es inferior a 0.07 W/mK. La transmitancia térmica, también conocida como valor U, es el flujo de calor en estado estacionario que pasa a través de una unidad de superficie inducido por una diferencia de temperatura de 1 K y tiene en cuenta también las transferencias de calor convectivas y radiactivas. Se expresa en W/m<sup>2</sup>K y se mide con el método de la caja caliente aunque también puede estimarse con el método de cálculo ISO 6946 como se muestra en la Ecuación 2, pero varios estudios comparativos han demostrado que los valores U calculados suelen ser inferiores a los medidos [71].

Ecuación 2 
$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}}$$
 En donde  $\frac{e}{\lambda}$  es la resistencia térmica de las capas materiales,  $R_{si}$  es la resistencia superficial interior y  $R_{se}$  es la resistencia superficial exterior [W/mK]

Los valores de resistencia superficial interior y exterior se determinan según el sentido del flujo de calor, la posición y situación del elemento separador y la velocidad del viento como se muestra en la Tabla 7 [132].

Tabla 7 - Resistencia térmica de superficies [m<sup>2</sup>K/W]

Posición del elemento y sentido del flujo de calor	Situación del elemento					
	separación con espacio exterior			separación con otro local		
	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>	R <sub>si</sub> + R <sub>se</sub>	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>	R <sub>si</sub> + R <sub>se</sub>
Flujo horizontal en elementos verticales	0.12	0.05	0.17	0.12	0.12	0.24
Flujo ascendente en elementos horizontales	0.09	0.05	0.14	0.10	0.10	0.20
Flujo descendente en elementos horizontales	0.17	0.05	0.22	0.17	0.17	0.34

El grosor óptimo es un término económico, en el que el coste de adquisición y aplicación del aislamiento térmico se resta de los ahorros de energía acumulado durante la vida útil del aislamiento. Dados los diferentes mecanismos de transferencia de calor que afectan a cubiertas y paredes, los espesores óptimos de aislamiento no son necesariamente los mismos para un edificio determinado [133].

### 2.4.3. Consumo energético de viviendas

El consumo de energía de los edificios se ha convertido en un problema energético internacional importante y, en muchos países, se están debatiendo diferentes medidas políticas para el ahorro de energía. En los hogares, la energía se consume para diferentes fines, pero el uso final de energía predominante es la calefacción de espacios. Además, la tendencia en la demanda de energía, tanto para calefacción como para refrigeración, supone un tema relevante en el desarrollo de los sistemas y las políticas energéticas. En particular, el cambio climático tiene un doble efecto: por un lado, disminuye la demanda global de energía para calefacción en más de un 30 % y, por otro, aumenta la demanda de energía para refrigeración en alrededor de un 70 %. Para lograr un ahorro relevante de energía primaria, se pueden implementar varias medidas de mitigación potenciales que involucran la envolvente del edificio, las condiciones internas, los sistemas de calefacción/refrigeración, etc. [134–137].

Disponer de información sobre el valor medio del consumo energético anual por unidad de área en los edificios de un país o región permite comparar el rendimiento energético de un edificio determinado [137].

Una fuente importante de información, que incluye datos de 25 países, es el informe de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), realizado en colaboración con la Asociación Internacional de Cooperación en Eficiencia Energética (IPEEC) y el Foro de las Grandes Economías sobre Energía y Cambio Climático (MEF). Los países que pertenecen al MEF utilizan aproximadamente tres cuartas partes de la energía total consumida en el mundo, por lo que la AIE ha recopilado algunos datos sobre el consumo energético por unidad de área [kWh/m<sup>2</sup>] y por usuario [kWh/usuario] en edificios de todo el mundo. Según la AIE, hay factores que determinan la energía final consumida en los edificios, como el tamaño de la población, el nivel de desarrollo económico, las políticas de energía en edificios, los precios de la energía y el clima. En este contexto, el consumo de energía anual por usuario en edificios a nivel mundial en 2012 se estimó en 4700 kWh/usuario. El país con mayor consumo de energía por usuario es Canadá, con 20000 kWh/usuario, mientras que el país con menor consumo es India, con 2000 kWh/usuario. México presenta un valor ligeramente superior al de la India, con 2500 kWh/usuario. Dos factores que pueden explicar los diferentes consumos de energía por usuario son el clima y el nivel de desarrollo económico de cada país. Canadá es un país que presenta un clima muy frío durante un invierno largo que requiere un gran consumo de energía para calentamiento. Un indicador del desarrollo económico de un país es el producto interno bruto (PIB) per cápita. En 2012, el promedio mundial del PIB era de 14086 dólares, siendo el de Canadá de 42145 dólares, el de India de 4916 dólares, y el de México de 16457 dólares. Es decir, tanto por su clima como por su nivel de desarrollo económico, se explica que Canadá presente el valor más alto de consumo energético por usuario. Por otro lado, la AIE estima que el promedio de la energía anual por unidad de área en edificios a nivel mundial es de 170 kWh/m<sup>2</sup>, siendo Rusia el país que presenta un mayor consumo, con 425 kWh/m<sup>2</sup>, el de Canadá es de 280 kWh/m<sup>2</sup>, el de India, de 170 kWh/m<sup>2</sup>, y el de México, de 50 kWh/m<sup>2</sup>. Como se observa, el consumo de energía por unidad de área en edificios está más ligado al clima que al nivel de desarrollo económico [138,139]. Sin embargo, no solo está relacionado con el acceso a la energía y los niveles de precios [135,139–141].

México es un país altamente poblado y su población se concentra en gran medida en áreas urbanas (84 %) con una edad media de la población menor de 30 años. Sin embargo, se espera que en las próximas décadas se produzca un proceso de envejecimiento rápido, con una edad media cercana a los 40 años en 2050. Esto puede implicar que los determinantes del ciclo de vida del consumo de energía variarán. Las transformaciones demográficas, la urbanización, la educación y el tamaño de los hogares han experimentado grandes cambios, también gracias al acceso universal a la electricidad, que ha creado un círculo virtuoso entre el acceso a la energía, el aumento de la

renta per cápita y las transformaciones sociodemográficas generales. Esto es crucial para planificar inversiones y políticas adecuadas con el fin de lograr un aumento general del nivel de vida, una disminución de la pobreza energética y de la desigualdad.

Varios programas de eficiencia energética han servido para reducir el consumo de electricidad, sin embargo, el efecto rebote (según el cual los consumidores tienden a usar electrodomésticos eficientes en energía de manera más intensiva para aumentar los niveles de comodidad) puede causar resultados generales adversos en términos de conservación de energía [139].

A nivel nacional, los edificios residenciales representan el 84 % de la edificación total en México y la energía en edificios representa el 18.1 % (266571.324 kWh) de la energía final consumida, comprendida por los sectores residencial, comercial y público [142]. Las investigaciones en materia energética son de suma importancia para comprender y planificar políticas de ahorro energético [139,140]. El clima semifrío seco presenta el menor consumo, 25 kWh/m<sup>2</sup>, y el clima con el mayor consumo es el cálido seco extremoso con 75 kWh/m<sup>2</sup>, tres veces mayor que el primero. Como era de esperarse, el clima que presenta una mayor diferencia en el consumo de energía por unidad de área entre los edificios que cuentan con acondicionador de aire y aquellos que no cuentan con acondicionador de aire es el cálido seco extremoso, 46 kWh/m<sup>2</sup>, y el clima que presentan la menor diferencia es el semifrío húmedo, 6 kWh/m<sup>2</sup>. El promedio del consumo de energía por unidad de área a nivel nacional se ha calculado en 63 kWh/m<sup>2</sup>. Este valor es poco mayor al reportado por la AIE que es de 50 kWh/m<sup>2</sup>. En edificios con acondicionador de aire el consumo de energía por unidad de área se calculó en 73 kWh/m<sup>2</sup> y en aquellos que no cuentan con acondicionador de aire en 41 kWh/m<sup>2</sup>. Esto indica que en promedio el consumo de energía asociado al uso de acondicionador de aire en un edificio es de 32 kWh/m<sup>2</sup>, lo que representa el 44 % del consumo de energía del edificio [133,135,138,142,143].

Para abordar las demandas energéticas y las necesidades de confort de los espacios interiores, las normas internacionales proporcionan valores de referencia para garantizar las condiciones óptimas de hábitat de los edificios. Debido a que no todos los propietarios de viviendas sociales cuentan con las fuentes económicas suficientes para implementar un diseño especializado y la optimización de su proyecto en particular, es crucial que las autoridades establezcan una guía para la construcción basada en estudios adecuados y valores de referencia personalizados. Durante los últimos años, México ha realizado un esfuerzo para crear e implementar los principios de sustentabilidad y ahorro de energía en sus leyes y códigos para la construcción y comercialización de equipos y electrodomésticos. En 2011, el gobierno de México publicó en el “Diario Oficial de la Federación”, la primera norma energética de eficiencia energética para edificios: NOM-020-ENER-2011. La última actualización de la norma fue aprobada en 2013. Las únicas herramientas disponibles para la verificación de la norma son una guía digital para su aplicación y una herramienta digital (hecha en Excel) para cálculos automáticos ingresando los datos numéricos en los espacios correspondientes. Sin embargo, solo considera la superficie total y algunas variables climáticas definidas dentro del documento [74,141,144].

La demanda de calefacción y refrigeración puede contribuir a encontrar la mejor solución para aumentar la eficiencia energética y esta es la razón por la que se han desarrollado varios modelos numéricos para la simulación de edificios a lo largo de los años [134]. Se ha desarrollado una amplia gama de software de modelación y simulación aplicada en diversas disciplinas. En la digitalización de la industria de la construcción de edificaciones se pueden considerar dos vertientes: el modelado de información de edificio (BIM, Building Information Modelling), que es una tecnología que propone una práctica integrada para el diseño de edificios, y la simulación del desempeño de los

edificios (BPS, Building Performance Simulation), que integran la simulación de transferencia de calor en la estructura del edificio, el flujo de aire dentro y a través del edificio, la iluminación natural, la acústica y el funcionamiento de una amplia gama de tipos de sistemas y componentes. La simulación bps sirve no sólo para revelar las interacciones entre el edificio y sus ocupantes, los sistemas HVAC y el clima exterior, sino también para hacer posibles opciones de diseño respetuosas con el medio ambiente. Dentro de las herramientas bps destacan el modelamiento energético en edificios (BEM, Building Energy Modelling). Los modelos BEM son desarrollados a través de software de simulación basado en la física del uso de energía en edificios. Los planteamientos del desempeño energético del edificio a menudo están basados en modelos de transferencia de calor en estado transitorio. BEM es una herramienta versátil y multipropósito que se utiliza en el diseño de nuevos edificios, remodelaciones (rehabilitación energética), cumplimiento de códigos, certificación ecológica, calificación para créditos fiscales e incentivos de servicios públicos y control de edificios en tiempo real. También se utiliza en análisis a gran escala para desarrollar códigos de eficiencia energética de edificios e informar decisiones políticas. Debido a que existe un elevado número de variables que intervienen en el proceso de intercambio térmico entre una vivienda y su entorno y por la naturaleza dinámica del proceso (debida a la continua variación de condiciones climáticas), se requiere la elaboración y/o utilización de programas de cómputo basados en balances energéticos, muy especializados para poder predecir el comportamiento térmico de una edificación. Algunos programas ampliamente utilizados como DesignBuilder, Simergy y Sefaira utilizan EnergyPlus como motor de cálculo. Por otra parte, SketchUp es un software de diseño gráfico y modelado en 3D que puede ser utilizado por trnsys y EnergyPlus, vía OpenStudio, para visualizar, configurar y editar la geometría del edificio en 3D [46].

El método de utilizar el modelado de información de edificios para el proceso de modelado de energía de edificios, denominado modelado de energía de edificios basado en modelado de información de edificios, se ha convertido en un tema predominante y atractivo tanto en la investigación como en la sociedad industrial en los últimos años [75].

## 2.5. Análisis de ciclo de vida

### 2.5.1. Conceptos básicos de la evaluación del ciclo de vida

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología para evaluar el impacto de los productos y servicios en el medio ambiente y la salud humana durante todo su ciclo de vida. Este ciclo de vida incluye procesos como la extracción de materias primas, la producción de materiales de construcción, la distribución, la aplicación del producto de construcción al edificio, el uso y, al final, el tratamiento final como el reciclado, la reutilización, la recuperación de energía o la eliminación [1,4,8,59]. El ACV es una herramienta reconocida internacionalmente que puede utilizarse para cuantificar e interpretar de forma exhaustiva los flujos hacia y desde el medio ambiente (incluidas las emisiones a la atmósfera, el agua y el suelo, así como el consumo de energía y otros recursos materiales), que pueden utilizarse para crear análisis comparativos a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, proceso o servicio [45,64]. Un análisis de ACV se realiza de acuerdo con las normas ISO 14040 y 14044, así como con la norma EN 15804 que ofrece información más detallada sobre el ACV de los productos de construcción [60]. El Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, en 2008, publicó las versiones mexicanas de las normas ISO 14040 (NMX-SAA-14040- IMNC-2008) y 14044 (NMX-SAA-14044- IMNC-2008) [2,145]. El procedimiento requiere la definición del límite del sistema, ya que no se tienen en cuenta todas las cargas medioambientales que no estén incluidas en él. En el análisis ACV, todos los procesos e impactos se normalizan con respecto a una cantidad

denominada unidad funcional. La carga medioambiental se mide utilizando indicadores bien definidos [71]. Según la definición de la Organización Internacional de Normalización (ISO) 14040, un estudio de ACV consta de un marco metodológico de cuatro fases que se exponen en la Figura 21: (1) definición del objetivo y alcance, (2) inventario del ciclo de vida, (3) evaluación del impacto del ciclo de vida e (4) interpretación [45]. Los estudios de ACV pretenden ser comparativos más que absolutos, respecto a un caso de estudio y un caso base funcionalmente equivalente (ISO 14040, 2006). Sin embargo, el principal defecto es la incapacidad para tener en cuenta datos sociales o económicos, que la mayoría de las teorías contemporáneas de sostenibilidad reconocen como de vital importancia para la sostenibilidad a largo plazo [1,55,56,64].

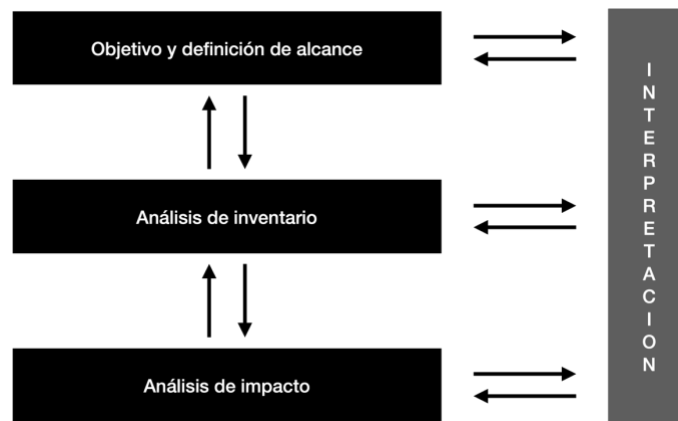


Figura 21 - Marco de ACV para el sector de la construcción

### *Objetivo y límite del sistema*

Según la norma ISO 14044, el límite del sistema determina los procesos que deben incluirse en el ACV y debe ser coherente con el objetivo del estudio. El límite del sistema de ACV consiste en un sistema de la cuna a la tumba, de la cuna a la puerta (para el análisis del producto de construcción) o de la puerta a la puerta (para el análisis del proceso de construcción). En la mayoría de los casos, se utiliza normalmente el enfoque "de la cuna a la tumba", que comienza en la fase previa al uso hasta la fase de fin de vida. La unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas del producto seleccionado para garantizar la comparabilidad. La vida útil de un edificio es muy variada y tiene un impacto significativo en el resultado de la investigación del ACV, especialmente por el consumo total de energía durante la fase de uso. En el caso de los edificios residenciales, la vida útil oscila entre los 40 y los 100 años, pero la mayoría de los investigadores han aplicado 50 años [2,45].

### *Análisis de inventario*

Los datos de los materiales de construcción se obtienen a partir de las cantidades estimadas a partir de los planos del edificio y de los datos medidos sobre el terreno. Si las cantidades estimadas se basan en planos o se utilizan listas de cantidades en el inventario, debe incluirse la asignación de residuos de la instalación. Algunas investigaciones estiman que alrededor del 5 % de los residuos de materiales en la obra durante la construcción se deben a la vulnerabilidad de los productos, a la mala manipulación de los materiales y a los residuos inutilizables debidos a una instalación inexacta. La fase de uso de un edificio consiste en la energía de funcionamiento y trabajos de mantenimiento de un edificio. La electricidad es el principal consumo de energía durante esta fase, seguida del gas natural. Para estimar el consumo anual de electricidad y gas natural se utilizan programas informáticos de simulación energética. Programas como DesignBuilder y OpenStudio utilizan el motor de EnergyPlus con una

interfaz gráfica de usuario para facilitar el uso. El consumo de energía se estima en función del sistema de calefacción, ventilación y refrigeración (HVAC), la iluminación, el agua caliente sanitaria (ACS), los aparatos eléctricos y la cocina [2,45].

### *Evaluación de impacto*

La evaluación de impacto es el siguiente paso del ACV. En esta fase, de los resultados del inventario se evaluarán los posibles impactos ambientales. Al igual que en la fase de inventario, la selección del método y de las categorías de impacto estará ligada a la definición del objetivo y del alcance. La mayoría de los profesionales del ACV prefieren seleccionar las metodologías de evaluación existentes que han sido publicadas en lugar de desarrollarlas desde cero. Hay dos métodos para llevar a cabo la evaluación de impacto: los orientados a los problemas (puntos medios) y los orientados a los daños (puntos finales). Los puntos intermedios se consideran un punto de la cadena causa-efecto de una categoría de impacto concreta después del ACV anterior al punto final [2,45].

### *Interpretación*

El último paso del ACV es la interpretación de los resultados, en la que los valores de la evaluación de impacto se analizarán en cuanto a su solidez y sensibilidad a los insumos y las conclusiones se extraerán con referencia a las metas y objetivos del ACV. La validación de los datos también se llevará a cabo comparándolos con otras investigaciones publicadas y realizando un análisis de sensibilidad para evaluar la fiabilidad de las bases de datos no locales [2,45].

## **2.5.2. Aplicación en la construcción**

El ACV es una herramienta de evaluación holística que ayuda a comparar toda la gama de efectos ambientales asignables a los productos y servicios con el fin de contribuir a mejorar los procesos, apoyar las políticas y proporcionar una base sólida para la toma de decisiones informadas sobre los impactos ambientales de los productos [10,11,56,60,64]. En el sector de la construcción, la mayoría de los estudios de ACV se han centrado en expresar el impacto medioambiental de los materiales de construcción y los edificios mediante indicadores de punto medio en las categorías de calentamiento global, energía primaria o incorporada y potencial de acidificación [59]. Se considera que la evaluación del ciclo de vida es la única base legítima sobre la cual comparar los impactos ambientales de los materiales, componentes y servicios de construcción alternativos [1,55].

La energía incorporada es una metodología contable que pretende hallar la suma total de la energía no renovable necesaria para producir un producto o servicio desde la extracción de la materia prima, el transporte, la fabricación, el montaje, la instalación, las operaciones y, por último, su desmontaje, deconstrucción y/o descomposición. La energía incorporada tiene dos aspectos: la energía incorporada inicial de un material o sistema y la energía incorporada recurrente. La energía incorporada inicial es la energía necesaria para adquirir materias primas y para procesar, fabricar, transportar e instalar estos materiales en un proyecto. La energía incorporada recurrente es la energía necesaria para mantener, reparar, restaurar, renovar o sustituir materiales durante la vida de un proyecto. La elección de los materiales y los principios de diseño influyen considerablemente en la energía necesaria para construir y explotar un edificio. La energía incorporada es un indicador cuantificable y comparativo reconocido del rendimiento sostenible de un proyecto o material [146].

En cuanto a las proyecciones relacionadas a las emisiones de GEI del sector residencial en México (producto directamente de la fase de operación de un edificio), mientras que se espera que la población crezca un 26 % de aquí a 2050, se calcula que las emisiones se multiplicarán casi por nueve hasta ese año (Figura 22). Cabe señalar que, dados los supuestos, la mayor parte del crecimiento de las emisiones procederá de la generación de electricidad para alimentar la refrigeración de espacios y los "otros" usos, a los que se asignaron tasas de crecimiento para que coincidieran con las previsiones oficiales de consumo de electricidad y energía total por parte del sector residencial en 2015 [147].

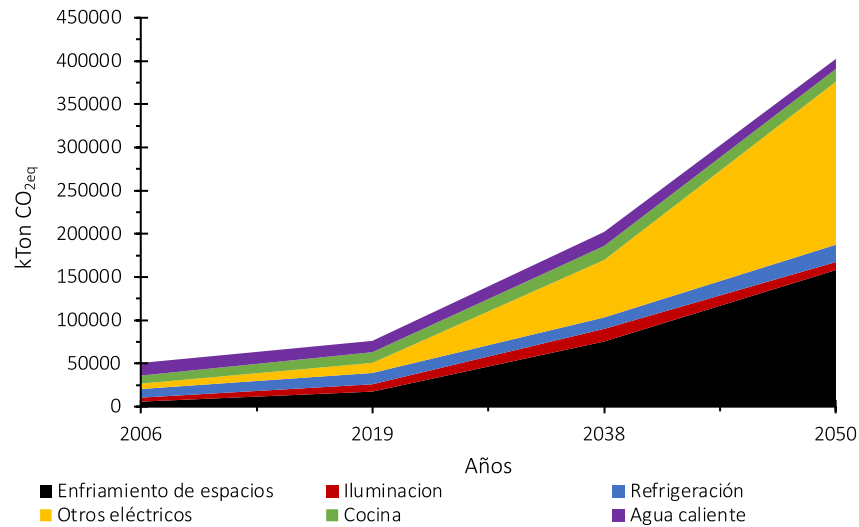


Figura 22 - Proyecciones de las emisiones de CO<sub>2e</sub> del sector residencial en México (2006 - 2050)

La fabricación de cemento provoca una gran cantidad de emisiones de GEI que aportan al calentamiento global y el cambio climático. Los estudios indican que una tonelada de cemento genera la misma cantidad de CO<sub>2e</sub> a la atmósfera y provoca la degradación del medio ambiente. Teniendo esto en cuenta como un serio reto para el sector de la construcción, se está intentando utilizar subproductos de residuos industriales como material sostenible a base de cemento [44]. Hay que prestar atención a los estudios de viabilidad ambiental sobre la sustitución parcial del cemento por materiales alternativos y de sus áridos naturales por residuos reciclados para que el material sea menos nocivo para el medio ambiente, siempre con cuidado de no afectar a las prestaciones técnicas del material [56]. La industria cementera fue una de las primeras en abordar el problema del cambio climático. Desde 1975, ha reducido sus emisiones en un 33 %. Los miembros de la Asociación de Cemento Portland adoptaron un Código de Conducta voluntario para apoyar el Programa de Sostenibilidad de la Fabricación de Cemento. Logrando reducir voluntariamente las emisiones de CO<sub>2e</sub> en un 10 %, el consumo de energía en un 20 % y el polvo de los hornos de cemento en un 60 % con respecto a los valores de referencia de 1990. Las principales opciones para reducir la cantidad de CO<sub>2e</sub> generada durante el proceso de fabricación del cemento son utilizar alternativas a los combustibles fósiles, cambiar las materias primas utilizadas en la fabricación e intercalar materiales adicionales con el cemento Portland [146].



## Capítulo III – Antecedentes

### 3.1. Biocompuestos

#### 3.1.1. Contexto de los materiales de construcción bio basados

Diversos autores definen los materiales de construcción ecológicos como materiales naturales en bruto y procesados que se utilizan en la construcción de edificios. Estos materiales se extraen del ciclo biológico para servir a fines técnicos y, durante su producción y procesamiento, se debería minimizar el impacto ambiental en términos de energía y carbono incorporados, consumo de agua y productos químicos nocivos. Por otro lado, otra definición aceptada en la literatura se refiere a los materiales de base biológica como «materiales derivados total o parcialmente de materiales de origen biológico». Aunque no son las únicas definiciones expuestas, todas apuntan a lo mismo y la mayoría de los autores coinciden en que los materiales de construcción de base biológica son esenciales para la construcción sostenible [39,47,148]. Además de las características técnicas relacionadas con el papel funcional de los materiales, la lista de requisitos se ha ampliado con otros nuevos: la necesidad de mejorar cada segmento de la sostenibilidad, la apuesta por materiales disponibles localmente y la implantación de un reciclaje generalizado en la industria de la construcción para promover la economía circular lo más ampliamente posible [7,47]. Muchos países pueden hacer frente a estos nuevos retos animando a las partes interesadas en las cadenas de valor de la construcción a replantearse su uso e identificar recursos en sus mercados. Dado que la dependencia de los materiales convencionales ya se ha reducido con la aparición de iniciativas de sostenibilidad, los materiales de construcción ecológicos se han convertido en elementos destacados de la construcción sostenible. Los materiales de construcción ecológicos incluyen todos los tipos de materiales de construcción que favorecen la sostenibilidad de los edificios y la construcción [3,7,24,47].

La era de los compuestos de fibras naturales, actualmente conocidos como biocompuestos, se remonta a 1908 con la introducción de los compuestos fenólicos reforzados con fibras de celulosa. A esta innovación le siguieron los compuestos de poliéster reforzados con fibra de vidrio sintética, que obtuvieron el estatus de producto básico en la década de 1940. El uso de polímeros verdes de base biológica para la fabricación de piezas de automóvil comenzó en 1941, cuando Henry Ford fabricó guardabarros y tapas de cubierta con bioplástico a base de proteína de soja. El uso de materiales compuestos, fabricados con recursos renovables y sostenibles, se ha convertido en uno de los componentes vitales de la nueva generación de prácticas industriales. Su uso cada vez más extendido está impulsado por diversos factores, como la necesidad de un crecimiento sostenible, la seguridad energética, la reducción de la huella de carbono y la gestión eficaz de los recursos, al tiempo que se mejoran las propiedades funcionales de los materiales. Los recursos innovadores y sostenibles, como los materiales de origen biológico, así como los residuos, los coproductos y los materiales reciclados, pueden utilizarse como matriz y refuerzo en los materiales compuestos para minimizar el uso de recursos no renovables y aprovechar los flujos de residuos [7].

En cuanto al crecimiento que ha tenido esta área en cuanto a las investigaciones a nivel mundial, con solo dos pequeños retrocesos, el número de publicaciones no ha dejado de aumentar desde 2015 tras la adopción de importantes propuestas políticas de economía circular (Figura 23). El primer estudio que abordó el análisis de los compuestos orgánicos presentes en los materiales de construcción erosionados de los monumentos se remonta a



1991. Al analizar las publicaciones, las disciplinas más frecuentemente relacionadas con los artículos son la ingeniería, las ciencias medioambientales, la ecología, la ciencia de los materiales, la tecnología de la construcción y la ciencia y tecnología de otros temas. Esto sugiere que, además del papel vital de la ingeniería, varias áreas de investigación diferentes influyen significativamente en la introducción y difusión de materiales de construcción sostenibles [47,149].

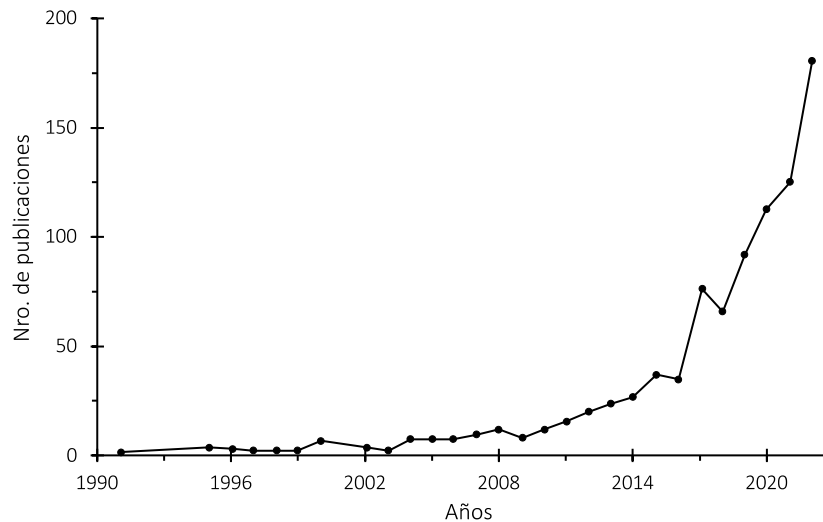


Figura 23 - Progreso anual del número de publicaciones de materiales de construcción bio basados

### 3.1.2. Principales focos de investigación

Las áreas de investigación en las que se centran los materiales de construcción de origen biológico pueden clasificarse de diferentes formas. Una parte importante de la investigación se centra en la utilización de recursos biológicos que difieren de su naturaleza original intentando explotar propiedades específicas (por ejemplo, resistencia a la tracción, absorbencia, porosidad) desarrolladas en la naturaleza a lo largo de miles de años obteniendo nuevos materiales con características similares o incluso mejores que los materiales de construcción existentes [3,24,37,150]. Otro aspecto es la investigación que maneja recursos biológicos como agregados. Al desarrollar materiales de construcción ecológicos, se añaden a los materiales compuestos de base, aditivos y agregados de origen natural con menor impacto medioambiental, sustituyendo así el agregado original, que tiene un mayor impacto ambiental, reduciendo costos de producción y mejorando el rendimiento aislante [37,39,91,148,149]. También, una de las principales líneas de investigación se centra en cómo la adición de materiales vegetales puede mejorar las propiedades específicas del material de construcción. El cemento Portland ordinario (CPO) produce importantes emisiones de CO<sub>2e</sub> durante su fabricación. Por lo tanto, la investigación en la literatura está ampliamente dedicada a compensar los efectos nocivos de la producción de cemento [36]. La investigación sobre materiales de construcción de base biológica suele realizarse a nivel de compuesto, lo que ha dado un nuevo impulso al desarrollo de la química verde. El comportamiento de las fibras procedentes de ingredientes naturales (por ejemplo, coco, lino, cáñamo, etc.) depende principalmente del pretratamiento de las fibras por lo que existe una línea investigativa enfocada en la modificación de las fibras para mejorar la compatibilidad en matrices de diferentes naturalezas. Las estructuras arquitectónicas verdes también son objeto de investigación reciente. En este grupo se incluyen los tejados verdes compuestos por vegetación plantada, medio

de cultivo, capa filtrante, capas de drenaje y almacenamiento, lana protectora y de almacenamiento, y capas impermeables [47].

### 3.1.3. Propiedades aislantes

Los materiales de aislamiento térmico juegan un papel importante en lograr la eficiencia energética de los edificios. Los materiales naturales tienen numerosas ventajas sobre otros materiales y, por lo tanto, son los más prometedores para la construcción, creando un gran interés en todo el mundo sobre las posibles aplicaciones de las fibras naturales como materiales compuestos con propiedades mejoradas en esta directriz [13,23,151,152]. En la planificación con conciencia bio ecológica, debe prestarse especial atención a la utilización de materiales de bajo impacto ambiental, que presenten buenas propiedades termofísicas y un bajo contenido energético. En este sentido, los materiales naturales parecen reunir todas las propiedades mencionadas y probablemente representarán una opción viable a los materiales de construcción utilizados actualmente dentro de unos años, tanto por la posibilidad de encontrarlos cerca de los lugares de utilización como por su mayor compatibilidad medioambiental con respecto a materiales más sofisticados que pueden sufrir alteraciones químicas o procesos de alto consumo energético [23]. El estudio y elaboración de los aislantes térmicos ha avanzado desde su aparición y han surgido diferentes tipos de aplicaciones y de materiales, los cuales cumplen la misma función desde un ámbito más sustentable. El estudio de los bio-aislantes comenzó a partir de la primera publicación en 1974, sin embargo, su desarrollo no fue impulsado hasta el año 1998 cuando comenzaron a surgir más investigaciones [23,33]. De acuerdo con las investigaciones realizadas, la fibra de cáñamo es la materia prima que muestra una mayor tendencia seguida del lino, arroz, hojas de piña y maíz. Si se amplía la búsqueda considerando biocompuestos aislantes, la caña de azúcar, la paja y el maíz son las materias primas que más han sido estudiadas y utilizadas para estas aplicaciones [153,154]. Con respecto a la cantidad de estudios que se han publicado, se observa un incremento de artículos científicos a partir del año 2000 con una fuerte alza a partir del año 2010 como se observa en la Figura 24. Esto se puede atribuir al interés que se generó por la producción y aplicación de materiales naturales en el sector de la construcción [153].

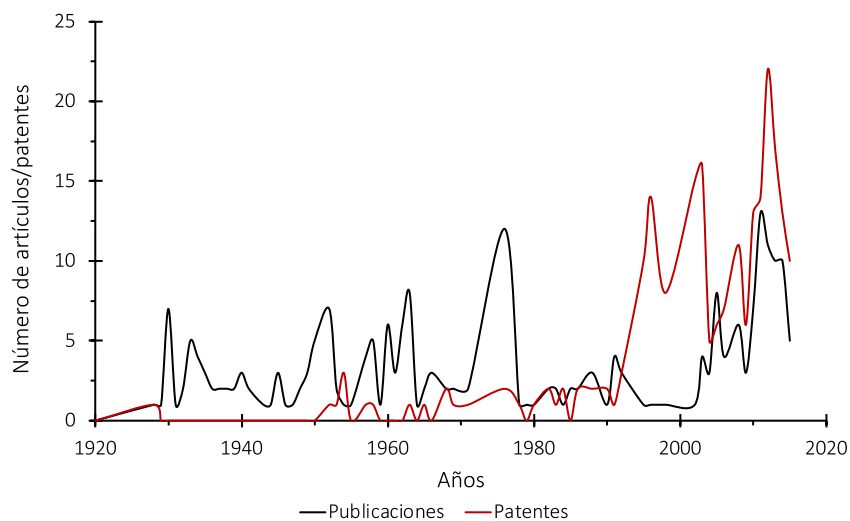


Figura 24 - Publicaciones científicas y patentes sobre aislantes a base de fibras naturales por año

Se han realizado investigaciones de morteros térmicos con diferentes materiales orgánicos tratados, tales como madera, fibras de palma, cascaras de plátano entre otras, las cuales sustentan que el uso de un material orgánico debidamente tratado, es viable como material de sustitución en morteros para mejorar sus propiedades térmicas [148]. Las algas marinas son un material natural puro que ofrece numerosas ventajas, como excelentes características de aislamiento térmico y capacidad calorífica, así como una biodegradabilidad total y una fuerte fijación del dióxido de carbono y por lo tanto podría ser candidato como agregado en matrices cementantes [38,39] con aplicaciones en prefabricados o recubrimientos [33,76,91].

## 3.2. Concretos vegetales

### 3.2.1. Generalidades

El concreto es, con mucho, el material de construcción más importante y su consumo está aumentando en todos los países y regiones de nuestro planeta. Las razones son múltiples: sus componentes están disponibles en todas partes y son relativamente baratos, su producción puede ser relativamente sencilla, su aplicación abarca una gran variedad de obras de construcción e infraestructura civil. Además, desde hace unos 30 años, su desarrollo ha tomado nuevas direcciones [39,94]. Los desechos de otros procesos de producción industrial pueden utilizarse para sustituir los componentes del cemento o añadirse al concreto a fin de reducir su uso [28]. En consecuencia, muchas investigaciones han obtenido valiosos resultados explotando los desechos industriales en diversas formas de producción de concreto [14,21,28,151,155,156].

Un concreto, en el sentido convencional de la palabra consiste en una mezcla heterogénea entre un aglutinante mineral y granulados (también de origen mineral) de dimensiones graduadas. Del mismo modo, lo que definimos como concreto vegetal, consiste en una mezcla entre granulados de materia vegetal lignocelulósica, que constituyen la mayor parte del volumen, y un aglutinante mineral [14,108,155,157]. Estudios científicos de los últimos 30 años han demostrado que la incorporación de material lignocelulósico en matrices cementantes tiene efectos mejorados sobre las propiedades higrotérmicas e impactos ambientales menores a los concretos convencionales [13,21,22,25–27,29,54,113,158–161]. Además, los compuestos a base de fibras naturales presentan bajo costo, peso específico, reducción de contracción plástica del concreto, ligereza, con una abundancia de materias primas, procesamiento sencillo y respetuoso con el medio ambiente, excelente resistencia eléctrica, presentan una imagen de diseño natural estéticamente agradable, resistencia y rigidez específicas comparables a las de los compuestos de fibra tradicionales y menor consumo de energía para la producción asociado a una baja emisión de CO<sub>2e</sub> [24,25,114,151,158,162]. Las propiedades higrotérmicas mejoradas podrían atribuirse principalmente al aumento de la porosidad del compuesto debido a la formación de huecos entre el agregado vegetal y el ligante y a la baja densidad intrínseca de estos [13,14,24]. A medida que aumenta el contenido de masa de los agregados vegetales, aumenta también la proporción de macro poros y, en consecuencia, disminuye la conductividad térmica del compuesto [20]. De hecho, muchos proyectos tienen como objetivo crear materiales de construcción utilizando una o más formas de materia lignocelulósica como refuerzo estructural o con un propósito aislante [22,26,37,163,164]. Recientemente, los proyectos han utilizado diversas fuentes de bioagregados, como la madera, el coco, el sisal, la palma, el bambú y el bagazo entre otros [5,14,28,29,48,69,121,155,157,159,165,166]. Se pueden utilizar varios aglutinantes para fabricar estos materiales de construcción y la elección se realiza fundamentalmente en función de las principales propiedades que dependerán del uso del material, del proceso de fabricación, del lugar de construcción, consideraciones financieras y factores ambientales. Entre los aglutinantes

más utilizados se encuentran los cementos Portland y los cementos hidráulicos o la cal, la mayoría de las veces asociados a aditivos puzolánicos, la escoria de alto horno y el metacaolín [14,22,48,162,167]. Por lo tanto, una forma de transformar el concreto en un material de construcción más sostenible es sustituir los áridos por otros alternativos, logrando un triple propósito: la preservación de las materias primas naturales, la reutilización de los desechos y el ahorro de energía [20,21,121,166,168].

### 3.2.2. Agregados vegetales

La oferta mundial de recursos naturales está disminuyendo y la demanda de materias primas sostenibles y renovables sigue aumentando. En 1997, se produjeron en todo el mundo aproximadamente 25 millones de toneladas métricas de fibras artificiales y alrededor de 20 millones de toneladas de fibras naturales. Los cultivos de fibras y los residuos industriales y agrícolas que producen, pueden utilizarse como sustitutos de los áridos minerales en los concretos, como refuerzo de fibra bruta, refuerzo de fibra de celulosa o en forma de ceniza, actuando como aditivo con reactividad puzolánica [69]. Los subproductos agrícolas proporcionan partículas ligeras que pueden ser incorporados en matrices minerales en sustitución de los agregados convencionales. Los compuestos reforzados con fibras naturales representan una fuente potencial de ingresos no tradicional y de valor agregado para la comunidad agrícola [54,87,88,156,158,166].

El uso de agregados de origen vegetal se considera hoy en día como una forma esencial de fabricar materiales de construcción respetuosos con el medio ambiente [22,48,49,113,166]. Existen muchos agregados de este tipo y se utilizan en la industria de la construcción, ya sea en estructuras nuevas o en la renovación de edificios existentes, por ejemplo, los agregados de girasol y cáñamo, entre otros. A diferencia de los agregados de origen mineral, son materiales renovables y neutrales en cuanto al carbono [89]. También tienen otras ventajas como buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico. Sin embargo, el mayor inconveniente está relacionado con su bajo rendimiento mecánico [69,151,155,161,169].

El uso de fibras vegetales celulósicas como refuerzo de matrices inorgánicas es conocido desde las antiguas civilizaciones china o egipcia, y por razones económicas, sociales y ambientales, su uso ha continuado hasta el presente. Esto surgió en respuesta a dos eventos históricos, ambos asociados con la sustitución del amianto en los fibrocementos. El primer acontecimiento se remonta a la Segunda Guerra Mundial, cuando el amianto fue absorbido por la industria bélica como material aislante en los buques de guerra blindados. El segundo acontecimiento tuvo lugar durante las últimas décadas del siglo pasado, cuando la mayoría de los países desarrollados prohibieron el uso del amianto en los materiales de construcción debido a sus propiedades cancerígenas. Debido a su bajo coste, el uso de fibras vegetales constituye una alternativa muy interesante para la industria de la construcción, principalmente en los países menos desarrollados o que necesitan materiales de construcción de bajo coste [27].

### 3.2.3. Comportamiento mecánico

Para construir viviendas sostenibles y asequibles para el futuro es ventajoso crear vínculos entre la agricultura y la industria de la construcción [4,170]. Las aplicaciones de los compuestos con fibras vegetales se dirigen básicamente a la construcción no estructural de materiales [22,158]. La capacidad mecánica del concreto vegetal depende del aglutinante y de la cantidad de fibra utilizada, de su geometría (relación longitud/espesor), y de su distribución y adhesión a la matriz [22].

La elección del aglutinante es uno de los mayores retos en el diseño de concretos vegetales, ya que desempeña un papel importante en la formulación. Su función es envolver y aglutinar las partículas gruesas y finas del árido [14,69]. Es importante destacar que la variabilidad del comportamiento en función de la formulación nos permite ajustar y optimizar las prestaciones de este material para diversas aplicaciones [21]. El tipo de ligante y la dosificación utilizada pueden afectar a las prestaciones mecánicas, térmicas, higrotérmicas y acústicas del concreto vegetal, algunas de las cuales están correlacionadas con su durabilidad [69]. Dependiendo de la concentración de aglutinante, tres tipos de comportamientos se observan (Figura 25) [14]. Para pequeñas dosis de ligante, disponemos de un material con baja resistencia mecánica y un módulo elástico inferior a 5 MPa. Los niveles de deformación son muy altos (>15 %). Este material se comporta como una muestra de partículas sueltas con puentes de ligante que las conectan. Está predestinado para aplicaciones en las que el aislamiento térmico o acústico es importante. Para dosis intermedias, el nivel de rendimiento aumenta con la cantidad de ligante. El comportamiento del material se va asemejando progresivamente al de los materiales con grandes dosis de ligante [22]. Para grandes dosis de ligante, el material es comparable a una matriz de ligante continua en la que las partículas de la planta están enterradas. Las prestaciones mecánicas aumentan y tienden hacia las del aglutinante puro [14].

La resistencia de los concretos vegetales es muy baja en comparación con los materiales de construcción habituales. Por lo tanto, el mejor resultado en su desarrollo se encuentra entre el valor más bajo posible de conductividad térmica y la mayor resistencia a la compresión (generalmente inferior a 2 MPa) [29,39,48,169,171]. Es obvio que las propiedades mecánicas no tienen comparación con las del concreto estructural con áridos minerales, pero su aplicación es totalmente diferente. Es importante tener en cuenta que los profesionales en la construcción recomiendan garantizar un valor mínimo de 0.2 MPa para la resistencia a la compresión y de 15 MPa para el módulo de Young [22,26,69,165,168]. Es por esto que los principales objetivos por alcanzar para desarrollar compuestos con propiedades mecánicas bien equilibradas son una dispersión homogénea de las fibras en la matriz, una interacción bien balanceada entre la matriz de cemento y las fibras y un porcentaje optimizado de fibras: suficiente para reforzar el material y permitir una continuidad de la matriz [22].

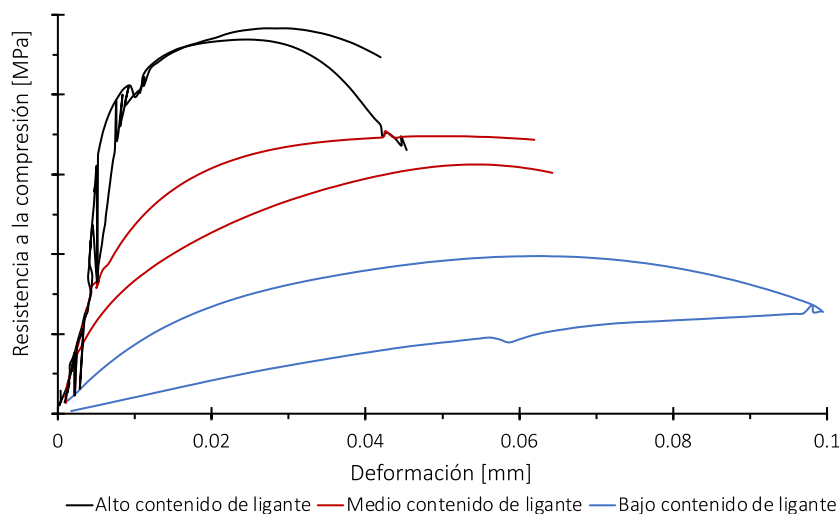


Figura 25 - Influencia de la dosis de aglutinante en la resistencia a la compresión del concreto vegetal

La bibliografía reporta diversos concretos vegetales estudiados que son expuestos en el Anexo 3. En el apartado, como puede observarse, los resultados presentan una gran variación en todos los parámetros de interés de estudio, en donde juega un papel importante la naturaleza de las materias primas, así como las variables del proceso de fabricación que influyen tanto en la conductividad térmica, la resistencia mecánica y la densidad (o peso volumétrico) de los compuestos resultantes. Es por esto por lo que debe estudiarse con especial atención cada uno de los casos ya que es difícil extrapolar resultados entre compuestos a base de diferentes materiales constituyentes.

#### 3.2.4. Comportamiento higrotérmico

El conocimiento exacto de la conductividad térmica y de otras propiedades de transporte térmico de los materiales de construcción que intervienen en el proceso de transferencia de calor es esencial para predecir el perfil de temperatura y el flujo de calor a través del material. La transferencia de calor en el concreto es complicada debido a que no tiene una composición homogénea con burbujas de aire. El tipo de árido, la porosidad y el contenido de humedad influyen al máximo en la conductividad térmica del concreto, a diferencia de los hidratos de cemento, cuya conductividad térmica no está sujeta a grandes variaciones. Como es evidente, los áridos con menor conductividad térmica producen un concreto menos conductor. El tipo de agregado puede causar casi el doble de aumento de la conductividad térmica del concreto [20].

Los compuestos a base de fibras vegetales tienen ventajas en términos de aislamiento térmico y acústico y de capacidad para regular la humedad en el interior de los edificios mediante la absorción y/o desorción de vapor de agua en función de la humedad relativa del aire. La razón particular detrás de este hecho es su alta porosidad (entre el 70 % y el 80 %), lo que resulta en excelentes propiedades aislantes [5]. Por lo tanto, el uso de estos materiales es un excelente medio para regular pasivamente la temperatura interior y reducir así las necesidades energéticas del edificio [13,37,69]. Además, como se mencionó, resultados muestran una regulación de la humedad relativa en la envolvente debido a los constantes intercambios de vapor de agua entre los ambientes interiores y exteriores, modulando los cambios bruscos de temperatura [3,14]. Por lo tanto, estos materiales son capaces de mejorar el confort en verano e invierno, y estabilizar la temperatura interior entre el día y la noche, mientras previenen los fenómenos de condensación y humedad en las paredes [14,26]. Otra ventaja importante es que se pueden eliminar fácilmente al final de su ciclo de vida mediante compostaje o mediante la recuperación de su valor calorífico en un horno, lo que no es posible por ejemplo con la fibra de vidrio [13,14,20].

#### 3.2.5. Problemáticas de los concretos vegetales

##### *Durabilidad de concretos vegetales*

A pesar de todas las ventajas mencionadas anteriormente, la producción de materiales compuestos a base de cemento con fibras vegetales está actualmente limitada por la durabilidad a largo plazo [27]. La durabilidad es la característica de los materiales que mantienen sus propiedades a lo largo del tiempo [60]. El problema de la durabilidad se asocia con un aumento de la fractura de la fibra debido a la debilidad de las fibras frente a medios alcalino. La mineralización de la fibra debido a la migración de los productos de hidratación a los lúmenes, y la variación del espacio y del volumen debido a su alta absorción de agua afecta un enlace interfacial adecuado entre la fibra y la matriz, no asegurando la durabilidad del material [22,39,121,163,172]. Por lo tanto, la degradación se debe principalmente a la absorción de agua y a la inestabilidad de las fibras naturales relacionadas con sus microestructuras, configuraciones moleculares, componentes químicos y contenidos de álcalis [121,151,158,166].

El cemento Portland se endurece por hidratación de compuestos anhidros que dan lugar a silicato de calcio hidratado (gel C-S-H), etringita e hidróxido de calcio (Portlandita). Aunque la relación estequiométrica agua/cemento es de alrededor de 0.23, es necesario añadir más agua para mezclar los componentes. Este exceso de agua se evapora durante la etapa de curado, dando lugar a una red de poros. Esta porosidad es una de las causas de la falta de durabilidad de las pastas de cemento, ya que permite el acceso de agua que puede contener diferentes sustancias disueltas (cloruros, sales de sulfato o ácidos, entre otros) o gases del exterior al interior del material de cemento. Bajo estas condiciones, el agua intersticial disuelve el hidróxido de calcio para formar una solución tamponada de  $\text{pH} > 13$ . Muchos estudios han relacionado la presencia de este hidróxido de calcio con la degradación del agregado vegetal y, por lo tanto, con la pérdida de durabilidad de los compuestos [22,25,173,174]. La adhesión entre las fibras y la matriz en los materiales compuestos desempeña un papel importante en las propiedades mecánicas finales del material, ya que la transferencia de esfuerzos determina la eficacia del refuerzo [123]. En el concreto vegetal se observa una zona interfacial de unas decenas de micrómetros de espesor alrededor de los agregados vegetales (Figura 26). En esta zona, el fraguado del ligante se ve inhibido o retrasado por el agregado o por los correspondientes degradados en un ambiente alcalino. Estas áreas de despegado también pueden estar relacionadas con los cambios dimensionales de las fibras vegetales dependiendo del contenido de humedad del material [14]. La alta porosidad se ha explicado por la absorción inicial de agua de las fibras mientras que la brecha entre la fibra y la matriz puede explicarse por la mayor contracción de desecación de la fibra vegetal [7,13,14,25].

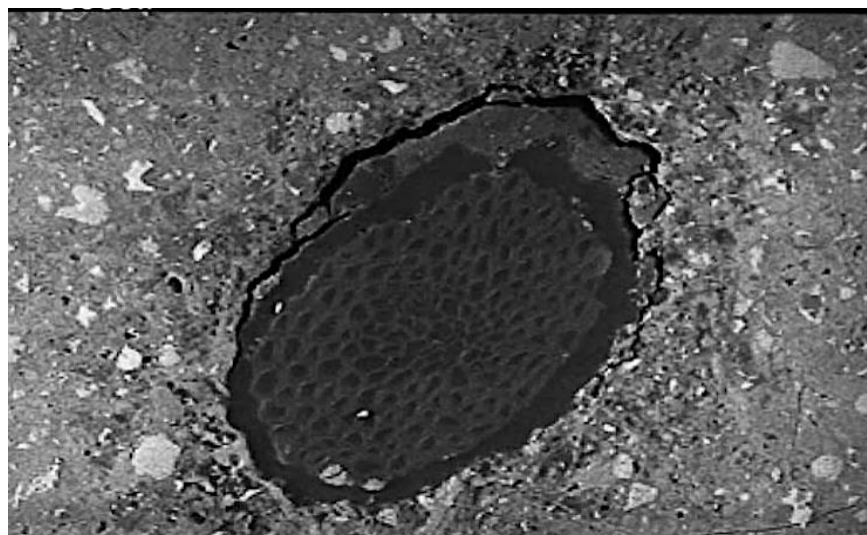


Figura 26 - Despegue en la zona intersticial entre una matriz mineral y fibra de coco

- La degradación de la fibra en matrices alcalinas ocurre por dos mecanismos que son explicados a continuación.
- Degradación alcalina: La lignina funciona como pegamento en la pared celular de la fibra natural, dándole su estructura y protegiendo la degradación microbiana o química de los polisacáridos. Las hemicelulosas unen y fijan las microfibrillas de celulosa para hacer que la fibra sea más estable. La lignina y la hemicelulosa tienen una característica en común: ambas son amorfas y sensibles al entorno alcalino de la matriz de cemento (hidrólisis alcalina). Las cadenas moleculares de la celulosa se ordenan en hebras de  $\sim 40$  microfibrillas de celulosa, que no son homogéneas y constan de regiones cristalinas y amorfas. Las regiones cristalinas son mucho más resistentes a



los álcalis que la región amorfa y proporcionan resistencia a la fibra de celulosa. En general, la degradación de la celulosa puede generalizarse simplemente como la desconexión de nano cristales discretos causada por la descomposición de los extremos reductores (característica original  $C_4-OH$ ) en las regiones amorfas. La Figura 27 muestra lo que es la degradación alcalina de la fibra natural en una matriz de cemento, debido a la alta alcalinidad de la fase sólida del cemento y de la solución de los poros los cuales se describen en 4 pasos. En primer lugar, ocurre la degradación de la lignina y parte de la hemicelulosa, que conduce a la exposición de la holocelulosa a la solución de poros y en la fase sólida del cemento; Posteriormente, la degradación se produce principalmente en la hemicelulosa, lo que provoca la disminución de la integridad y la estabilidad de la pared celular de la fibra natural; después de la degradación de la lignina, la hemicelulosa y el enlace de hidrógeno intramolecular, no queda ningún enlace para las microfibrillas de celulosa y, como resultado, las fibras de celulosa se dispersan en la solución de poros de la matriz, lo que, a su vez, acelera la degradación de la celulosa; por último, ocurre la ruptura de las microfibrillas de celulosa, causada por la hidrólisis alcalina de las regiones amorfas que contienen extremos no reductores, y conduce a la degradación completa de la fibra natural. A medida que avanza la degradación, los productos de hidratación, como C-S-H y portlandita soluble, se infiltran gradualmente en la pared celular, lo que a su vez conduce a la mineralización y fragilización de la fibra natural [22,26,121,159,161]. Por esta razón el cemento debe ser reemplazado por cal hidráulica y/o aditivos puzolánicos [25,26,95,173,175,176].

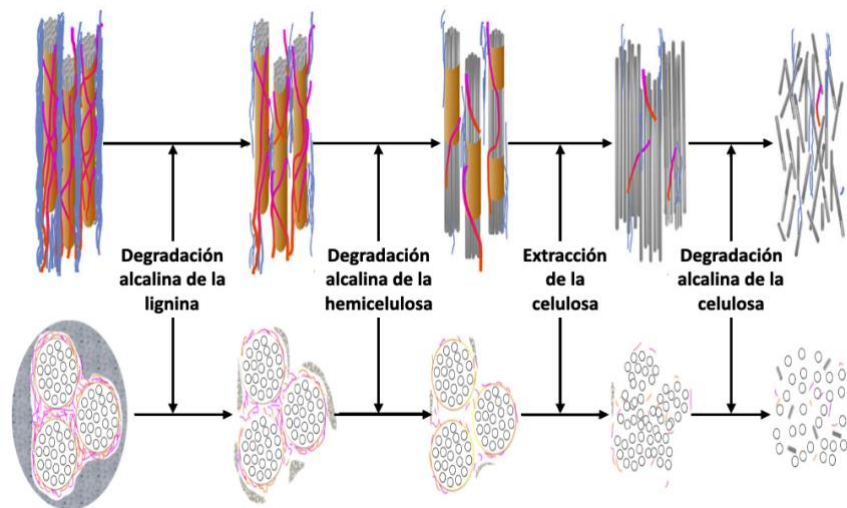


Figura 27 - Diagrama del proceso de degradación alcalina de la fibra natural

- Mineralización: La mineralización de la pared celular es un mecanismo de degradación que conduce a la fragilización de la fibra y a la reducción de su resistencia y capacidad de deformación. Se han propuesto dos mecanismos de mineralización: CH-mineralización y auto-mineralización. La primera es causada por la migración de productos de hidratación (hidróxido de calcio) a los lúmenes transportando una concentración de  $Ca^{2+}$  de la solución de los poros contribuyendo a la degradación de la fibra natural [29]. Por otro lado, la auto-mineralización demuestra la tasa de hidrólisis de los componentes amorfos (lignina y hemicelulosa), por lo que puede determinarse la contribución de la alcalinidad de la matriz a la degradación de la fibra. La precipitación de productos de hidratación, probablemente hidróxido de calcio, dentro de la estructura de la pared celular de la fibra es la principal razón de la mineralización de la pared celular. Para frenar la degradación de la fibra natural en la matriz de cemento, tanto los componentes



amorfos (lignina y hemicelulosa) como la celulosa deben protegerse reduciendo la concentración de OH<sup>-</sup> de la solución de poros en la matriz [7,22,48,161].

### *Compatibilidad de las materias primas*

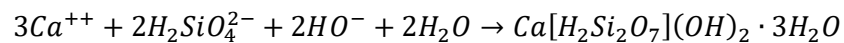
Estudios han demostrado que el uso de cemento Portland presenta problemas de compatibilidad con agregados vegetales debido a que la presencia de carbohidratos polisacáridos interactúa con las reacciones de hidratación del aglutinante retardando formación de hidratos impidiendo o retrasando el fraguado [26,161]. Los azúcares solubles en agua y los ácidos carboxílicos se disuelven, retardando la hidratación del cemento Portland y afectando el progreso de la reacción de hidratación [95,160,164,175,177]. Los carbohidratos (la glucosa y la celulosa) son los que tienen la mayor influencia negativa en el curado del cemento. En los grupos fenólicos, la lignina y los terpenos no presentan un efecto inhibitor, mientras que los taninos, principalmente aquellos que son hidrolizados, tienen una gran influencia en la inhibición de la pasta de cemento [28,151].

### 3.2.6. Estrategias de mejorar las problemáticas de durabilidad y compatibilidad

La parte medular en el desarrollo de este tipo de materiales es mejorar la compatibilidad del material lignocelulósico con las matrices utilizadas [87,125]. Existen básicamente dos estrategias para mejorar la durabilidad de los concretos vegetales y son explicadas a continuación [22,25,69,90,117,166,168,177].

#### *Modificación de la matriz cementante*

Existen básicamente dos tratamientos para eliminar o reducir el contenido de portlandita en la matriz: la adición de compuestos puzolánicos o el proceso de carbonatación [172]. La reacción puzolánica se realiza durante el proceso de hidratación entre el hidróxido de calcio y la sílice amorfa, produciendo silicato de calcio hidratado, una sal muy estable. La reacción es la siguiente:



En el CPO, el contenido de sílice amorfa no es suficiente para transformar toda la portlandita presente en gel C-S-H. Este exceso de portlandita es deseable en el concreto reforzado con acero. Sin embargo, esta alcalinidad es el principal inconveniente para los compuestos de celulosa, que requieren que la portlandita se reduzca o se elimine del medio. Por lo tanto, es necesario añadir compuestos puzolánicos a la pasta de cemento para promover la transformación de la portlandita en gel C-S-H. Existen varias adiciones puzolánicas, como la micro sílice o el humo de sílice, el metacaolín, la escoria de alto horno o las cenizas volantes, entre otras. Dependiendo de la reactividad, modificará la matriz de manera diferente [22].

#### *Modificación de las fibras*

La otra estrategia consiste en la modificación física o química de las fibras con el fin de optimizar la adhesión fibra-matriz y hacerlas menos sensibles a la composición de la matriz y a la humedad ambiental [22,121]. El uso de tratamientos específicos para prevenir la degradación de este tipo de material de construcción resultante de la disolución de los principales constituyentes ha demostrado ser efectivo [89]. Algunas sustancias como las resinas y las grasas pueden migrar a la superficie de las partículas de los agregados formando una capa hidrofóbica que reduce los enlaces de hidrógeno con el cemento, disminuyendo la resistencia interfacial [28]. Además, el uso de tratamientos químicos en las fibras naturales permite reducir sus características hidrofílicas [114].

## Capítulo IV – Hipótesis y objetivos

### 4.1. Hipótesis

En función de los antecedentes expuestos, la siguiente hipótesis es planteada para este trabajo:

La utilización de Sargazo disponible en las costas de México como sustitución total al agregado mineral fino en una matriz a base de cemento Portland y ceniza volante, permitirá obtener un material compuesto con prestaciones mecánicas que permitan su utilización como material de construcción, con un mejor desempeño higrotérmico y un menor impacto ambiental que el de los morteros convencionales para su aplicación en edificaciones sustentables.

### 4.2. Objetivos de la investigación

#### 4.2.1. Objetivo general

Desarrollar un concreto vegetal consistente en una matriz a base de cemento Portland y ceniza volante con bioagregado de *Sargassum fluitans* como sustituto a los agregados finos, mejorando sus propiedades de conductividad térmica, densidad y con una resistencia a la compresión que permita su uso en edificaciones.

#### 4.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física, química, microestructural y mecánicamente las materias primas de Sargazo, ceniza volante y cemento Portland definidas para la elaboración del concreto vegetal.
- Evaluar la compatibilidad de las materias primas con el bioagregado de Sargazo sometido a 4 diferentes tratamientos.
- Evaluar las variables identificadas en el proceso productivo para determinar su influencia en las propiedades del compuesto resultante y obtener un material optimizado.
- Determinar los impactos ambientales asociados a la producción del material mediante un análisis de ciclo de vida para ser comparado con los morteros convencionales, así como también los beneficios energéticos de su potencial uso a través de simulaciones energéticas basadas en softwares específicos.

## Capítulo V – Metodología

El enfoque experimental se centra en la determinación de las condiciones óptimas para el desarrollo y fabricación de un mortero vegetal con agregado de Sargazo, así como también en la optimización de los parámetros involucrados en los resultados de conductividad térmica, densidad y resistencia mecánica a la compresión del compuesto resultante. La metodología se estructuró en 4 etapas como se observa en la Figura 28.

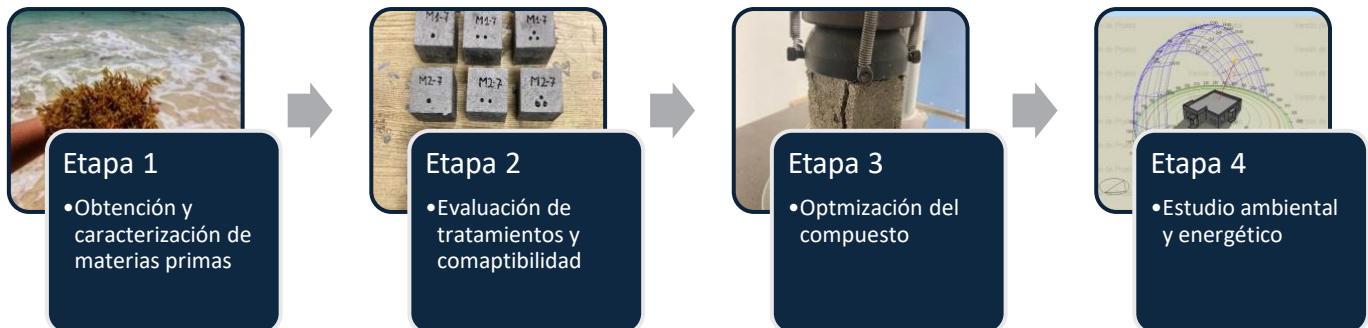


Figura 28 - Esquema de la metodología experimental propuesta

Mediante la metodología propuesta se pretende dar cumplimiento a los objetivos planteados. Cada una de estas etapas y las condiciones experimentales definidas se exponen de manera más detallada a continuación.

### 5.1. Etapa I – Obtención y caracterización de materias primas

#### 5.1.1. Recolección de materias primas

Las materias primas obtenidas para el desarrollo experimental se obtuvieron de tres fuentes principales: El cementante correspondiente a CPO40R fue proporcionado por la empresa Cemex de su planta ubicada en Monterrey; la ceniza volante se obtuvo de la planta termoeléctrica Carbón II ubicada en Nava, Coahuila y el Sargazo se obtuvo de la costa atlántica, en Matamoros, Tamaulipas.

#### 5.1.2. Caracterización de cementantes

##### *Caracterización física*

La distribución del tamaño de partículas del cementante fue medida con un equipo basado en la difracción láser marca MICROTRAC modelo S3500 [104,178]. La densidad se determinó utilizando un equipo Multipicnómetro marca Quantachrome Instruments empleando N<sub>2</sub> como gas de purga [104,179].

##### *Caracterización microestructural*

Ambos cementantes en polvo fueron sometidos a pruebas de caracterización microestructural. Se analizaron con una prueba de DRX con un equipo X PERT Pro MRD en el rango  $2\theta = 10$  a  $70^\circ$  para determinar las fases cristalinas presentes [107,178,180]. La composición química se obtuvo mediante Fluorescencia de Rayos X con un equipo PANalytical-Epsilon 3 [107,178,181]. Se llevó a cabo un análisis de FTIR con un espectrómetro Agilent Cary 630 obteniendo 64 barridos en la región espectral de  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  [182]. Además, ambas muestras se analizaron mediante termogravimetría con un equipo TA Instrument Calorimetry (SDT Q600, United States) en un rango de

temperatura desde temperatura ambiente hasta los 900 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/minuto en una atmósfera de N<sub>2</sub> [180].

### *Caracterización morfológica*

Se realizaron pruebas morfológicas combinando los resultados de la microscopía electrónica de barrido (SEM) y por dispersión de energía de rayos X (EDS) con un equipo JEOL JSM-6510LV.

### *Índice de actividad puzolánica*

Se determinó mediante el método establecido por Bentz el año 2012 [104] modificando el procedimiento establecido en la normativa ASTM C311-09 [183] y efectuando el reemplazo del material cementante en base al volumen. Sobre los especímenes se estudió la resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días de curado. Además, se evaluó el efecto del cribado con los tamices Nro. #50 (M2), #100 (M3) y #200 (M4) como método eliminación del exceso del contenido de carbón de la materia prima. Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron de acuerdo con la normativa ASTM C39/C39M-16b, sobre muestras de 5x5x5 cm con una velocidad de carga de 90 kg/s [184].

### 5.1.3. Caracterización del Sargazo

#### *Caracterización física y morfológica*

El tamaño y morfología de las partículas de Sargazo se realizó con análisis cuantitativo de imágenes [26,29,156]. La densidad aparente se determinó secando el material a 60 ± 5 °C hasta que alcanzó una masa constante (variación inferior al 0.1 % entre dos lecturas a las 24 horas) para lo cual se dejó reposar en una bolsa hermética dentro de un desecador de silica equilibrándose con la temperatura ambiente (23 ± 2 °C). Para la experimentación se utilizó un recipiente cilíndrico, se pesó el recipiente sin contenido para posteriormente agregar el material seco ajustándolo aproximadamente a la mitad del volumen del cilindro. Posteriormente se procedió a volcar el cilindro diez veces y luego se agitó para obtener una superficie horizontal. Se colocó un disco en la superficie del contenido y se midió la altura interior hasta la zona superior del recipiente. Se pesó el cilindro nuevamente con el contenido del agregado vegetal y se calculó su volumen [170,185]. Con los antecedentes se calculó la densidad aparente del agregado vegetal a partir de la masa y el volumen de acuerdo con la Ecuación 3.

Ecuación 3

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{m}{v}$$

Donde  $\rho$  es la densidad aparente [g/cm<sup>3</sup>],  
 $m$  es la masa del agregado vegetal [g] y  
“ $v$ ” es el volumen [cm<sup>3</sup>] de la muestra

La densidad real del bioagregado fue determinada mediante un equipo Multipicnómetro. Se determinó la porosidad del bioagregado mediante la Ecuación 4 [166]. La conductividad térmica se midió con un equipo Tempos, marca Meter Group basado en la técnica del hilo caliente configurando el ensayo en 10 minutos con la sonda KS-3 [15,185].

Ecuación 4

$$\text{Porosidad } [\%] = 100 \times \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}}\right)$$

Donde  $\rho_{ap}$  es la densidad aparente [g/cm<sup>3</sup>],  $\rho_{real}$  es la densidad real [g/cm<sup>3</sup>]

Se midió la conductividad térmica sobre una muestra previamente secada en horno a 60 ± 5 °C y utilizando el método de fuente de calor de línea transitoria “Transient Line Heat Source”, usando el equipo analizador de

propiedades térmicas TEMPOS de la marca Meter Environment que cumple las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334- 08. De acuerdo con la naturaleza de las muestras se empleó el sensor KS-3 definiendo el ciclo de calentamiento y enfriamiento en 10 minutos logrando una precisión de  $\pm 0.01$  W/mK [15,185].

La capacidad absorbente de la fibra natural fue determinada. Previo a la realización del ensayo fue necesario colocar una bolsa permeable sintética con perforaciones de alrededor de  $1 \text{ mm}^2$  en agua y asegurar una completa humectación. Después de este proceso, se colocó la bolsa en una "centrífuga de ensalada" girándola 100 veces a aproximadamente 2 rotaciones por segundo. Se taró la bolsa permeable centrifugada registrando el valor de su masa seca previamente. Por otro lado, se midió la masa inicial de una muestra de Sargazo secada en horno con circulación de aire a  $60 \pm 5$  °C hasta que alcanzó una masa constante (la masa no presentó una variación mayor a un 0.1 % en un plazo de 24 horas). Para la prueba de absorción de agua se tomó una muestra seca de 25 gramos del agregado, se introdujo en la bolsa y se sumergió durante 1 minuto en agua asegurando una completa humectación. Después, se colocó la bolsa con la muestra en la centrífuga girando 100 veces a aproximadamente 2 rotaciones por segundo. Se registró el valor de su masa descontando el peso de la bolsa húmeda utilizada. El procedimiento se repitió con tiempos de sumergimiento de 15, 240, 1440 y 2880 minutos [26,126,185]. La absorción de agua se calculó mediante la Ecuación 5 [158,166,170,185].

Ecuación 5

$$Abs (\%) = \frac{W_{húmedo} - W_{seco}}{W_{seco}} \times 100$$

En donde  $W_{húmedo}$  es el peso después de la inmersión en agua y el secado superficial mediante centrifugado, y  $W_{seco}$  es el peso inicial después del secado en horno

### Caracterización química

La caracterización química se realizó de acuerdo al procedimientos TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) y los métodos experimentales descritos por Wise L.E y Rowell [15], determinando el contenido inicial de humedad de la materia prima [148,166,185], el contenido de ceniza [186], extraíbles con etanol-tolueno [187], contenido de lignina insoluble en ácido [188], el contenido de holocelulosa [189],  $\alpha$ -celulosa y hemicelulosa [27,128,190–192]. Los procedimientos detallados son descritos en Anexo 1.

### Caracterización microestructural

La difracción de rayos X permitió escanear las fibras en un rango  $2\theta$  que varía entre  $10^\circ$  y  $80^\circ$ . Los estudios se llevaron a cabo utilizando un difractómetro X PERT Pro MRD con radiación  $\text{CuK}\alpha \lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ . Los datos fueron obtenidos con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso de  $0.0508714^\circ$   $2\theta$  para determinar la cristalinidad de la fibra siguiendo el método de difracción regular [114,190]. El índice de cristalinidad se determinó con la Ecuación 6 [193].

Ecuación 6

$$IC [\%] = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100$$

En esta ecuación,  $I_{002}$  es la intensidad máxima detectada en el ensayo de DRX y el valor de  $I_{am}$  corresponde al valor detectado en las mismas unidades para  $2\theta = 18^\circ$ .

La composición química se obtuvo mediante un análisis de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva de masa bajo atmósfera de Helio con un equipo PANalytical-Epsilon 3. Se llevó a cabo un análisis de FTIR para una muestra en triplicado. Las muestras finamente molidas se colocaron en el soporte de muestra de un espectrómetro FTIR Agilent Cary 630 con la interfaz de muestra Diamond ATR [15]. La resolución del espectrofotómetro se fijó en  $4\text{ cm}^{-1}$ , y se obtuvieron 140 barridos en la región comprendida entre  $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$  [123]. La muestra fue analizada mediante un equipo TA Instrument Calorimetry (SDT Q600, United States) en un rango de temperatura desde los  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$  [15] en una atmósfera de  $\text{N}_2$  (inerte), que impide la combustión y permite que la degradación de los componentes tenga lugar uno a uno, lo que permite identificar las regiones de degradación de los componentes de las fibras [123,190].

## 5.2. Etapa II – Evaluación de compatibilidad de tratamientos

La incorporación de materias primas lignocelulósicas puede traer diversas consecuencias sobre el concreto vegetal, que va desde efectos sobre la durabilidad hasta disminución severa de las propiedades producto de la migración de compuestos que interfieren con el proceso de hidratación de la pasta de cemento (Ver sección **Error! Reference source not found.**). Los tratamientos efectuados sobre las fibras naturales se basan en dar algún tipo de protección al material realizando modificaciones superficiales para alterar su carácter hidrofílico incrementando su hidrofobicidad evitando la migración de hidrosolubles que puedan alterar la reacción de hidratación del material cementante [22].

### 5.2.1. Preparación de muestras

Teniendo el material recolectado se depositó en bandejas de aluminio para ser secado en horno con recirculación de aire a una temperatura programada de  $60 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta tener una masa constante. El agregado fue triturado y posteriormente tamizado descartando la fracción con un tamaño superior a  $4.75\text{ mm}$  e inferior a  $0.6\text{ mm}$ . El material fue guardado en bolsas herméticas con un adecuado rotulado.

### 5.2.2. Tratamientos sobre el agregado a base de Sargazo

El agregado fue sometido a cuatros distintos tratamientos reportados en la literatura los cuales debido a su naturaleza actúan de manera distinta en presencia de una matriz cementante y es por esto lo importante de evaluar sus propiedades intrínsecas, así como también en la fabricación de un concreto vegetal para poder estudiar sus efectos sobre las propiedades finales del material resultante.

#### *Agregado sin tratamiento [ST]*

Para evaluar la efectividad de los tratamientos y poder determinar las variaciones que se producen sobre el agregado vegetal, es necesario tener una muestra de control a la que no se le aplique ningún tratamiento de los anteriormente descritos y de esta forma realizar un análisis comparativo. El agregado seco se guardó en bolsas herméticas con su respectivo etiquetado.

#### *Tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [TC]*

Este tratamiento consistió en sumergir la fibra natural en una solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en una concentración de  $40\text{ g/l}$  durante 2 horas. Posteriormente, las fibras se extrajeron, se lavaron y se secaron en horno a  $60 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 48 horas [163,177].

### *Tratamiento físico de hornificación [TH]*

El agregado se colocó en un recipiente con agua donde permanecieron durante 3 horas, tiempo suficiente para alcanzar la saturación. Luego, el secado se inició en un horno a 80 °C equipado con control de temperatura y flujo de aire y permaneciendo a esta temperatura durante 16 horas. Después la muestra fue atemperada a 23 °C para evitar un posible choque térmico de las fibras. Todo este procedimiento corresponde a un ciclo y fue repetido diez veces [22,194].

### *Tratamiento químico de NaOH [TN]*

El tratamiento químico a base de NaOH consistió en sumergir el agregado vegetal en una solución al 1 % de hidróxido de sodio la cual se puso a hervir durante una hora bajo campana. Posteriormente, la fibra se retiró y se depositó en un desecador empleando silica durante 30 minutos para lograr su ambientación de manera gradual. El agregado vegetal se lavó con agua destilada, fue centrifugado y puesto a secar en un horno a 60 °C hasta obtener una masa constante (aproximadamente durante 48 horas) [27,114,159].

### *Tratamiento de parafina sólida [TP]*

Para el procedimiento de recubrimiento, la parafina sólida se calentó hasta los 100 °C de manera homogénea, sumergiendo la fibra seca en la sustancia durante 5 min. La fibra impregnada se colocó dentro de un horno a 105 °C durante 15 min con papel absorbente en la base del recipiente que lo contenía para eliminar el exceso, disminuyendo la formación de grumos de parafina y mejorando la disgregación de estas antes y durante el mezclado [159,166].

## 5.2.3. Caracterización del agregado de Sargazo

### *Absorción de agua del agregado después del tratamiento*

Para la prueba de absorción de agua se tomó una muestra seca de 25 gramos del agregado con cada uno de los tratamientos en estudio, se introdujo en la bolsa permeable y se sumergió durante 1 minuto en agua asegurando una completa humectación. Después se colocó la bolsa con la muestra en la centrifuga girando 100 veces a aproximadamente 2 rotaciones por segundo. Se registró el valor de su masa descontando el peso de la bolsa húmeda utilizada. El procedimiento se realizó en triplicado y se repitió con tiempos de sumergimiento de 15, 240, 1440 y 2880 minutos [26,126,158,185].

### *Densidad aparente y conductividad térmica del agregado después del tratamiento*

La densidad aparente del agregado vegetal posterior a los diferentes tratamientos a los que se sometió se determinó mediante el procedimiento estipulado anteriormente. Utilizando el recipiente cilíndrico volcándolo diez veces y agitándolo para obtener una superficie horizontal. Con los antecedentes obtenidos se calculó la densidad aparente del agregado vegetal para cada uno de los tratamientos definidos a partir de la masa y el volumen determinados [170,185].

La conductividad térmica del agregado después de haber sido tratado se midió utilizando el método de fuente de calor de línea transitoria, usando el equipo analizador de propiedades térmicas TEMPOS de la marca Meter Environment. De acuerdo con la naturaleza de las muestras se empleó el sensor KS-3. El ciclo de calentamiento y enfriamiento se definió en 10 minutos logrando una precisión de  $\pm 0.01$  W/(mK) [15,185].

### Morfología del agregado después del tratamiento

Se realizaron microscopías electrónicas de barrido (SEM) para cada agregado (con cada tratamiento) con un equipo JEOL JSM-6510LV con magnificaciones de 25x, 100x y 500x.

#### 5.2.4. Evaluación de los tratamientos en la fabricación del concreto vegetal

##### Dosificación y fabricación de especímenes

Para cada uno de los tratamientos se realizó una matriz experimental expuesta en la Tabla 8, en donde se mantuvo un volumen constante de agregado vegetal (AV) en la muestra equivalente al 75 % ajustado a las densidades de los agregados conforme varió con cada tratamiento y a la densidad de la pasta de cemento. Se estudiaron dos relaciones agua/cementante (a/c) y el uso de ceniza volante (CV) como reemplazo volumétrico del CPO en un 25 %.

Tabla 8 - Dosificación de la matriz experimental

Muestra	a/c	CV	Agua [g]	CPO [g]	CV [g]	Agua <sub>PM</sub> [g]	AV [g]
ST – M1	0.35	0 %	437.5	1250	0	81.6	251.2
ST – M2	0.35	25 %	437.5	937.5	217.2	81.6	251.2
ST – M3	0.45	0 %	495.0	1100	0	71.8	221.1
ST – M4	0.45	25 %	495.0	825.0	191.1	71.8	221.1
TC – M1	0.35	0 %	437.5	1250	0	51.9	324.8
TC – M2	0.35	25 %	437.5	937.5	217.2	51.9	324.8
TC – M3	0.45	0 %	495.0	1100	0	45.7	285.9
TC – M4	0.45	25 %	495.0	825.0	191.1	45.7	285.9
TH – M1	0.35	0 %	437.5	1250	0	106.37	309.4
TH – M2	0.35	25 %	437.5	937.5	217.2	106.37	309.4
TH – M3	0.45	0 %	495.0	1100	0	93.61	272.3
TH – M4	0.45	25 %	495.0	825.0	191.1	93.61	272.3
TN – M1	0.35	0 %	437.5	1250	0	169.7	289.8
TN – M2	0.35	25 %	437.5	937.5	217.2	169.7	289.8
TN – M3	0.45	0 %	495.0	1100	0	149.4	255.0
TN – M4	0.45	25 %	495.0	825.0	191.1	149.4	255.0
TP – M1	0.35	0 %	437.5	1250	0	42.11	420.9
TP – M2	0.35	25 %	437.5	937.5	217.2	42.11	420.9
TP – M3	0.45	0 %	495.0	1100	0	37.1	370.4
TP – M4	0.45	25 %	495.0	825.0	191.1	37.1	370.4

La fabricación de los especímenes se realizó considerando el método para la fabricación de concreto vegetal a base de fibra de cáñamo [43,195] el cual consiste en homogenizar la fibra natural durante 1 minuto, agregar el agua de premezcla y homogenizar, se incorporó en un minuto el material cementante y se homogenizó durante 2 minutos y posteriormente se incorporó el agua de mezcla y se homogenizó durante 4 minutos. Todo el procedimiento tiene una duración de 11 minutos antes de proceder al vaciado en moldes con dimensiones de acuerdo con lo estipulado en la normativa ASTM C109 [196]. Los especímenes cúbicos de 50 milímetros de arista fueron llenados en dos capas procedentes de la misma mezcla. Cada capa fue apisonada 32 veces como lo estipula la normativa asegurando un acabado liso en la superficie. Posteriormente, el molde con la muestra es envuelto en



papel nylon impidiendo la pérdida de humedad por el ambiente durante 24 horas. Después, las muestras fueron desmoldadas, rotuladas y curadas, siendo sumergidas en agua saturada en cal con una concentración de 3 g/l.

### Índice de compatibilidad por calorimetría

Cada uno de los tratamientos aplicados sobre la fibra de Sargazo fue evaluado en la fabricación de un concreto vegetal para lo cual se diseñó la matriz experimental con las muestras M1 de la matriz descrita en la Tabla 8 (considerando el volumen del agregado en un 75 % y una relación A/C de 0.35 como se expone en la Tabla 9).

Tabla 9 - Dosificación de las muestras en estudio

Muestra	CPO [g]	Agua [g]	Agregado vegetal [g]
ST	1250	437.5	251.2
TC	1250	437.5	324.8
TH	1250	437.5	309.4
TN	1250	437.5	289.8
TP	1250	437.5	420.9

La compatibilidad de las muestras para cada uno de los agregados en estudio puede inferirse a partir de la curva de hidratación (evolución de la temperatura en el tiempo). Para este estudio se fabricaron mezclas con volumen constante de árido como se observa en la Tabla 9 (en función de su densidad aparente) y con pasta de cemento constante [27]. Se utilizó un equipo Calmetrix I-CAL 4000 HPC, y se tomaron lecturas de temperatura a intervalos de 1 segundo durante 24 horas. A partir de las curvas de hidratación se pudo determinar la temperatura máxima alcanzada por cada mezcla, el tiempo para alcanzar dicha temperatura y la tasa máxima de cambio de temperatura en el tiempo, lo que permitió determinar el índice de compatibilidad de áridos tratados y no tratados con el ligante. Para calcular el índice de compatibilidad (IH), se utilizó la Ecuación 7, que considera la temperatura máxima para la reacción de hidratación de las mezclas y también la tasa máxima de cambio de temperatura con el tiempo [28,164].

donde:

$t_{max}$ : tiempo para alcanzar la temperatura máxima (muestra de estudio)

$T_{max}$ : temperatura máxima de hidratación (muestra del estudio)

$S$ : tasa máxima de cambio de temperatura en el tiempo (muestra de estudio) °C h<sup>-1</sup>

$t'_{max}$ : tiempo para alcanzar la temperatura máxima (muestra de control)

$T'_{max}$ : temperatura máxima de hidratación (muestra de control)

$S'$ : tasa máxima de cambio de temperatura a lo largo del tiempo (muestra de control) °C h<sup>-1</sup>

$$I_H = \left[ \left( \frac{t_{max} - t'_{max}}{t'_{max}} \right) \left( \frac{T'_{max} - T_{max}}{T'_{max}} \right) \left( \frac{S' - S}{S'} \right) \right] \times 100$$

Ecuación 7

Según los resultados, el índice de inhibición puede clasificarse en bajo, moderado, alto y extremo, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 - Clasificación de acuerdo con el índice de inhibición

Índice de inhibición	Clasificación
$I < 10$	Bajo
$I = 10 - 50$	Moderado
$I = 50 - 100$	Alto
$I > 100$	Extremo

### Evaluación del concreto vegetal

Para evaluar las propiedades mecánicas se realizaron pruebas de resistencia a la compresión sobre muestras cúbicas de 50x50x50 mm a edades de 7, 28, 90 y 180 días como se estipuló anteriormente. Para cada ensayo se prepararon muestras en triplicado y fue realizado mediante una máquina hidráulica de ensayo marca INSTRON 600DX. La resistencia a la compresión se calculó a partir de la Ecuación 8 [13,24].

Ecuación 8

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

Donde  $R_c$  es la resistencia a la compresión (Mpa),  $F_c$  es la carga máxima aplicada en la prueba de compresión (N) y  $A$  es la sección transversal ( $\text{mm}^2$ )

La sección transversal se obtiene del promedio de dos medidas del ancho y largo de cada probeta sobre la cara que es expuesta a la carga en el ensayo. El ensayo de compresión fue realizado en condiciones ambientales de 20 °C y 50 % de humedad relativa con una velocidad de carga de 90 kg por segundo [26].

El peso volumétrico es determinado dividiendo la masa de los especímenes cúbicos en gramos por la media del volumen obtenido de dos medidas con vernier del ancho, alto y largo de las probetas como se estipula en la normativa ASTM C138 [197]. Para las pruebas de conductividad térmica se fabricaron especímenes cilíndricos de 4 cm de diámetro y 10 cm de alto. Los especímenes fueron perforados con una broca de 4 mm de espesor con una profundidad de 60 mm para ajustarse al tamaño de la sonda del equipo de medición. Las mediciones de conductividades realizadas a los prototipos se determinaron usando el método de fuente de calor de línea transitoria "Transient Line Heat Source", usando el equipo analizador de propiedades térmicas TEMPOS de la marca Meter Environment que cumple las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334- 08. El ciclo de calentamiento y enfriamiento se definió en 10 minutos logrando una precisión de  $\pm 0.01\text{W/mK}$ . De acuerdo a la naturaleza de las muestras y a la especificación del fabricante, se utilizó el sensor RK-3 el cual fue introducido con pasta térmica para eliminar el aire que pueda haber entre la sonda y la muestra [13,15]. Los resultados fueron apoyados con micrografía SEM con un equipo JEOL JSM-6510LV sobre las muestras de concreto vegetal de interés con magnificaciones de 25x, 50x y 250x y con análisis EDS sobre el agregado TC (agregado de interés en el estudio) con una magnificación de 500x.

Después de la realización de los ensayos de resistencia mecánica, los fragmentos resultantes fueron sumergidos en un recipiente con alcohol isopropílico durante 48 horas para detener el proceso de hidratación del mortero. Luego se secaron en vacío en un horno a 50 °C durante 24 horas [77,198–200]. Estas muestras se

pulverizaron utilizando un mortero y una maza para proceder al estudio mediante pruebas microestructurales. Las muestras se analizaron a continuación por el método de difracción de rayos X en polvo. El ensayo fue realizado en un difractor X PERT Pro MRD con radiación  $\text{CuK}\alpha \lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ . Los datos fueron obtenidos en el rango  $2\theta = 10$  a  $70^\circ$  con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso de  $0.0508714^\circ 2\theta$ . Se realizó una prueba FTIR mediante un espectrómetro FTIR Agilent Cary 630 con la interfaz de muestra Diamond ATR. La resolución del espectrofotómetro se fijó en  $4 \text{ cm}^{-1}$ , y se obtuvieron 64 barridos en la región espectral de  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  [101]. Además, la muestra fue analizada mediante un ensayo de termogravimetría mediante un equipo TA Instrument Calorimetry (SDT Q600, Estados Unidos) en un rango de temperatura desde los  $30^\circ \text{C}$  hasta los  $900^\circ \text{C}$  a una tasa de calentamiento de  $10^\circ \text{C}/\text{minuto}$  en una atmósfera de  $\text{N}_2$ .

### 5.3. Etapa III – Optimización del material compuesto

#### 5.3.1. Diseño y fabricación de especímenes

Se optimizaron los compuestos mediante una matriz ortogonal Taguchi evaluando 3 variables en 3 niveles las cuales se exponen en la Tabla 11.

Tabla 11 - Variables en estudio para proceso de optimización

Variables	Niveles		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
(a) Relación a/c	0.5	0.6	0.7
(b) Relación AV/CPO	0.1	0.2	0.3
(c) Uso de Ceniza volante	0%	25%	50%

a/c: agua/cementante; AV/CPO: agregado vegetal/cemento

Las variables de respuesta evaluadas fueron la resistencia a la compresión medida a 7, 28 y 90 días de curado mediante una prensa hidráulica marca INSTRON 600DX con velocidad de carga de 90 kg por segundo [13,24,26]; la densidad determinada de acuerdo con la normativa ASTM C138 [197]; y la conductividad térmica determinada con un equipo TEMPOS de la marca Meter Environment cumpliendo con las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334-08 [201], utilizando el sensor RK-3 [13,15]. El objetivo de esta etapa es poder obtener el menor valor de conductividad del compuesto teniendo como margen, la obtención mínima de 2 MPa de resistencia a la compresión.

#### 5.3.2. Análisis de varianza

Para evaluar la importancia de las variables de entrada en la conductividad térmica y la resistencia a la compresión a 28 días para el concreto a base de Sargazo, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando R [202]. En primer lugar, se construyeron cuatro modelos lineales para predecir la conductividad térmica y la resistencia a la compresión, utilizando tres variables de entrada dependientes: la relación agua/cemento, la relación AV/CPO y el uso de cenizas volantes, utilizando la función *lm* del paquete stats. A continuación, se realizó un ANOVA con un 95 % de confianza para cada modelo utilizando la función *anova*. Por último, para determinar la contribución relativa de las variables, se utilizó la función *calc.relimp* del paquete *relaimpo* [203]. El análisis de varianza fue apoyado con el análisis de muestras con microscopía electrónica de barrido SEM sobre probetas embebidas en

resina (barniz policromado) y pulidas. Las imágenes se tomaron a una tensión de aceleración de 15 kV, con aumentos de 25x a 100x.

### 5.3.3. Análisis microestructural

Las muestras seleccionadas del arreglo ortogonal fueron sometidas a análisis de caracterización microestructural y morfológica, utilizando los fragmentos resultantes de la prueba de resistencia [77,198–200]. Las muestras se analizaron por DRX con un difractómetro X PERT Pro MRD en el rango  $2\theta = 10$  a  $70^\circ$  con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso de  $0.0508714^\circ 2\theta$ . Se realizó una prueba de FTIR con un espectrómetro Agilent Cary 630 obteniendo 64 barridos en la región espectral de  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  [101].

## 5.4. Etapa IV – Estudio ambiental y energético

### 5.4.1. Materias primas

Para la obtención de las materias primas se definió la fuente que requiere de una menor distancia de traslado. Como se observa en la Figura 29, se realizó un catastro de las principales plantas cementeras del país vinculadas a un grupo de 6 empresas siendo las más importantes *Cemex*, *Holcim* y *Cruz Azul* [204]. Se establecieron las centrales carboeléctricas de *Carbón II* en el estado de Coahuila y la central *Plutarco Elías Calles* en el estado de Guerrero como fuentes de ceniza volante [205]. Las zonas afectadas por Sargazo se identificaron en la costa atlántica de México en el estado de Tamaulipas y en la zona norte y este de la península de Yucatán [30,32].

La Figura 29 muestra las fuentes de materias primas consideradas para el estudio, identificando las cementeras, las centrales térmicas de carbón que generan cenizas volantes como residuo del proceso de producción de electricidad y las zonas afectadas por el Sargazo [30,32,204,205].



Figura 29 - Disposición de las materias primase en México

Para el estudio se consideró la mezcla optimizada (ver sección 5.3) con el agregado de Sargazo procesado mediante un tratamiento a base de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La dosificación se expone en la Tabla 12 y se ajusta a lo requerido para obtener un volumen de  $0.0044 \text{ m}^3$  de mezcla, para la fabricación de un bloque de construcción.

Tabla 12 - Dosificación de la mezcla de concreto vegetal

Materia prima	Bloque CM [kg]	Bloque FA [kg]	Bloque SBC [kg]
Agregado	8.1510*	8.1510*	0.6904**
Cemento Portland	2.9640	2.2230	1.7260
Agua de mezcla	1.4375	1.3272	2.0712
Ceniza volante	0	0.5136	1.2032
Agua de premezcla	0	0	0.1335

\*Arena; \*\*Agregado a base de Sargazo

Bloque CM: Bloque de mortero convencional; Bloque FA: Bloque que contiene CV como reemplazo parcial del CPO (25% v/v); Bloque SBC: Bloque de concreto vegetal

Se consideró la capital de cada estado en México como lugar de fabricación del bloque determinando el impacto del transporte de las materias primas. El proceso de fabricación de la mezcla siguió los pasos expuestos en 5.2.4 [43].

#### 5.4.2. Objetivo y alcance

El ACV es una herramienta analítica que capta el impacto medioambiental global de un producto, proceso o actividad humana [4,60]. El análisis de ciclo de vida se realizó de acuerdo a lo expuesto en la norma ISO 14040 [206] en donde se define sistemáticamente la metodología del ACV basada en el proceso, explicando cuatro fases implicadas [45]. La primera etapa es la fase objetivo, que define el contexto del estudio, los límites del sistema y la unidad funcional. La segunda fase es el análisis de inventario que define las materias primas y los procesos involucrados. La tercera fase es la de evaluación de impactos que identifica los efectos medioambientales en las diferentes categorías de impacto, y por último la cuarta fase es la de interpretación, en la que se evalúa la información procedente de los resultados [10]. El objetivo de este estudio fue determinar el análisis de ciclo de vida enfocado principalmente en la huella de carbono de un bloque fabricado mediante la mezcla a base de cemento Portland, ceniza volante y agregados lignocelulósicos de Sargazo fabricado en diferentes estados de México. Este bloque es comparado con los resultados obtenidos del análisis de un bloque convencional de mortero a base de cemento Portland y arena bajo las mismas condiciones.

#### *Unidad funcional*

La unidad funcional considerada fue un volumen de mezcla de 0.0044 m<sup>3</sup>, equivalente para la fabricación de un bloque de construcción de 39x19x12 cm con una sección transversal con área neta equivalente al 50 % del área total de acuerdo a lo expuesto en la normativa mexicana NMX-C-404-ONNCC-2012 [207]. Para efectos del estudio, los resultados fueron comparados con los de un bloque de mortero convencional de igual morfología y dimensiones. Se consideró que el peso volumétrico del mortero convencional es de 2.5 g/cm<sup>3</sup> [26,132] y del concreto vegetal es 1.31 g/cm<sup>3</sup> (de acuerdo a los resultados experimentales).

#### *Sistema de productos y límites del sistema*

Los límites del sistema se definieron “de la cuna a la puerta” como se observa en el esquema de la Figura 30 a y b). Se consideraron 2 diferentes procesos unitarios (con unidad funcional de 1 kg para cada uno) consistentes en la producción de la ceniza volante y la producción del bioagregado a base de Sargazo, que son descritos en la Figura

30 c y d). El cemento Portland y la arena, al ser materias primas convencionales, son incorporados en el análisis como un producto de mercado que no requiere procesamiento adicional para su uso en la producción de concreto.

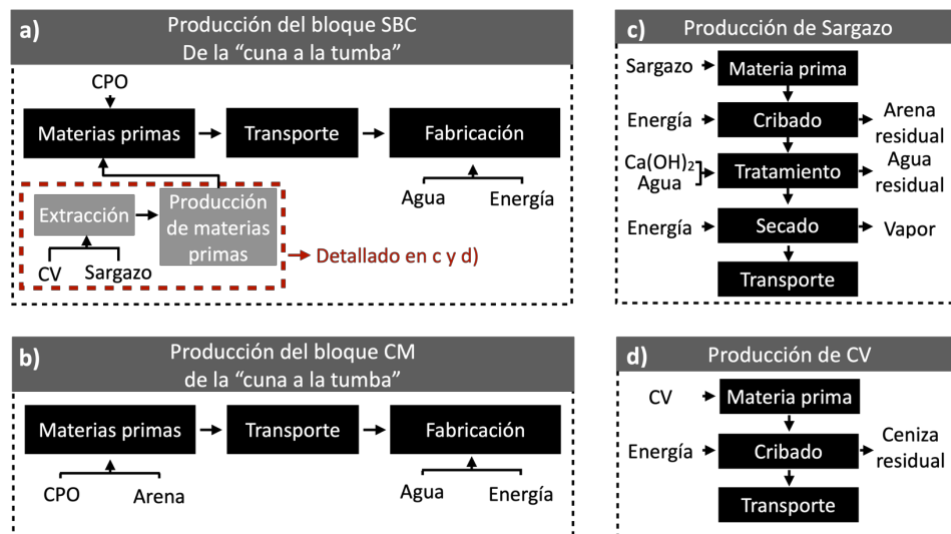


Figura 30 - Límites del sistema para a) concreto vegetal y b) concreto convencional

Como se observa en la Figura 30, el proceso de producción del bioagregado a base de Sargazo consiste en su recolección desde la costa en donde debe ser limpiado y puesto a secar para su almacenamiento. Después, se tritura y se criba para descartar la arena residual que trae y también descartar la fibra que posea un tamaño de partícula inferior al requerido (menor a 0.1 mm). Posteriormente, se aplica el tratamiento consistente en sumergir el Sargazo en una solución de agua con Ca(OH)<sub>2</sub> en una concentración de 40 g/l durante dos horas para después ser secado y transportado. La ceniza volante, se obtiene de las plantas carboeléctricas y solo se requiere su extracción y cribado para ser usada. El proceso de cribado tiene por objetivo descartar la fracción con un tamaño de partícula inferior a 0.36 milímetros, asegurando una reactividad apta de la materia prima para su uso en la fabricación del concreto (se descarta un 8.36 % de la masa de la ceniza volante obtenida de la central de acuerdo con los resultados del análisis del índice de actividad puzolánica).

#### 5.4.3. Análisis de inventario

Se consideró el transporte de las materias primas en camiones con capacidad de carga de 20 toneladas (para el caso de la ceniza volante, la arena y el cemento) y 15 m<sup>3</sup> (para el caso del Sargazo por la baja densidad). Las distancias de transportes para cada materia prima se ajustan a la ubicación de cada lugar (capitales de estados en México) considerando la fuente de obtención más cercana de acuerdo con lo expuesto en la Figura 29. Para el Sargazo, el tratamiento previo consideró el uso de contenedores de 200 litros (que permiten aplicar el tratamiento a 28 kg de Sargazo en cada uno con 180 litros de agua y 7.2 kg de Ca(OH)<sub>2</sub>). Además, en el proceso de cribado eliminó un 5 % de la masa recolectada como arena residual. Para el proceso de secado del bioagregado (posterior a la aplicación del tratamiento) se utilizó un horno con capacidad de 440 litros y una potencia de 3.7 kW. La ceniza volante solo consideró un proceso de cribado que descartó un 8.36 % de la masa. Para el cribado de las materias primas se empleó una máquina estándar de 11 kW de potencia. El proceso productivo de cada bloque de construcción requiere una mezcladora de concreto para el mezclado con capacidad de 140 litros con 375 Watt de

potencia El mezclado para el mortero convencional y el concreto vegetal tiene una duración de 3 y 11 minutos respectivamente. En todos los casos se consideró el uso de energía proveniente de la red eléctrica. En México la producción de energía primaria está constituida por un 86.89 % de combustibles fósiles (56.32 % de petróleo, 2.83 % de carbón, 25.67 % de gas natural y 2.08 % de condensados) un 11.25 % de fuentes renovables y 1.85 % nuclear [208,209]. La Figura 31 muestra un esquema de las principales consideraciones tenidas en cuenta en cuanto al transporte, cribado, pretratamiento del árido a base de Sargazo y mezclado para producir los bloques de estudio.

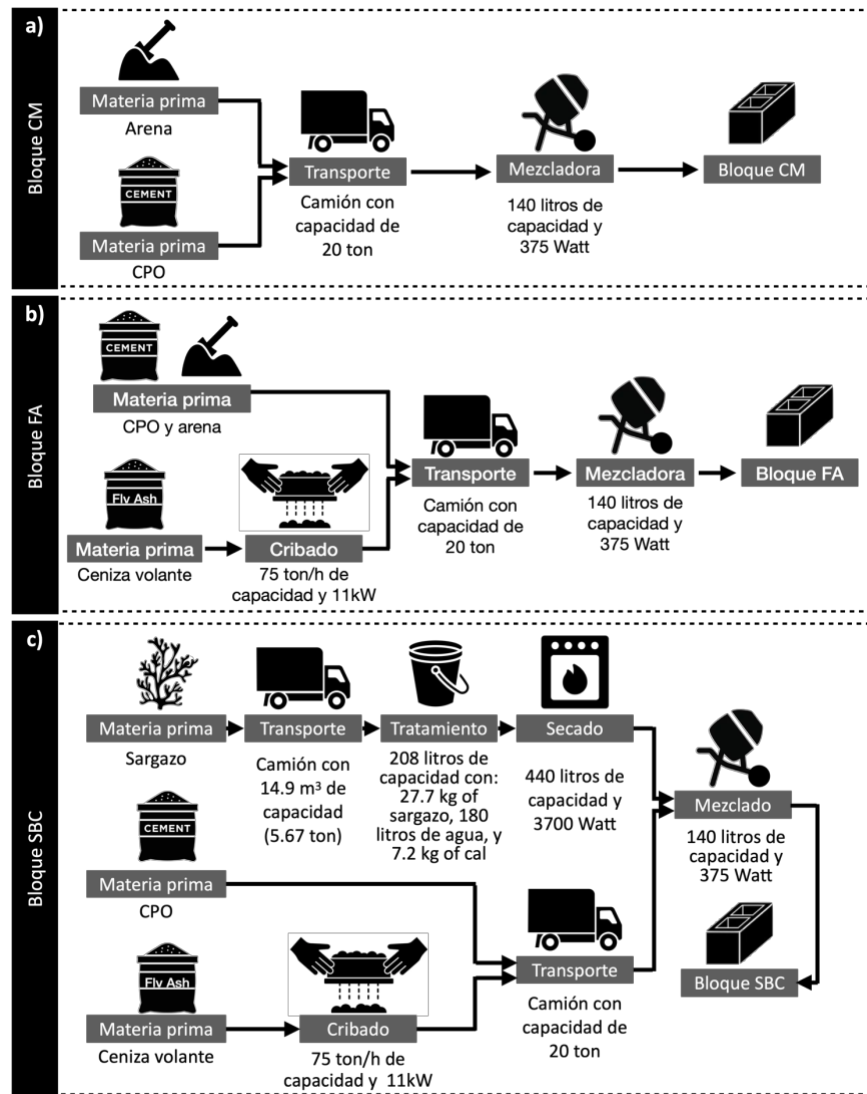
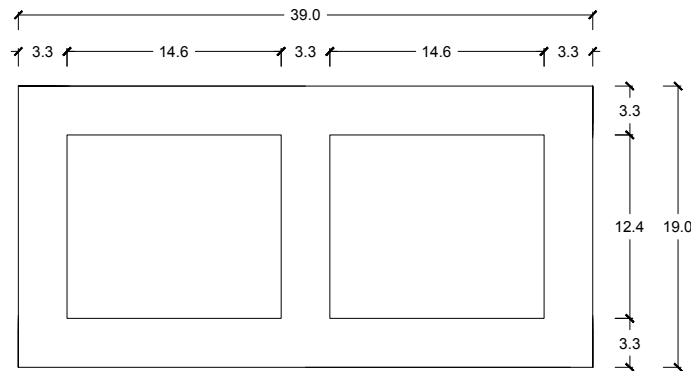


Figura 31 - Análisis de inventario del proceso de producción de: a) bloque CM; b) bloque FA y c) bloque SBC

Como se puede observar en la Figura 31, los equipos fueron estandarizados para que el análisis comparativo sea equitativo y no se vea afectado por la industrialización del mortero convencional con relación al bloque SBC que ha sido estudiado a nivel de laboratorio. La diferencia observada en las consideraciones de transporte está relacionada con la diferencia de densidad entre el Sargazo y el resto de las materias primas (cemento Portland, cenizas volantes y arena) y por tanto su transporte se consideró en volumen y no en masa.

La Figura 32 muestra las dimensiones del bloque estándar considerado para el estudio con base en la norma NMX-C-404 [207]. Se consideró mortero de una pulgada de espesor tanto en juntas horizontales como verticales. El análisis de transmitancia térmica resultó en un valor  $U = 0.5676 \text{ W/m}^2\text{K}$  para el muro construido con bloques SBC y  $1.4644 \text{ W/m}^2\text{K}$  para el muro construido con bloques CM.



**Figura 32 - Dimensiones del bloque de mortero estándar considerado en la evaluación del ACV**

La dosificación se muestra en la Tabla 12 y se ajusta a lo necesario para obtener un volumen de  $0.0044 \text{ m}^3$  de mezcla, para la fabricación de un bloque de construcción.

El proceso de fabricación consiste en colocar el Sargazo en la mezcladora para su homogeneización durante un minuto, después se añade el agua de premezcla durante un minuto, manteniendo la mezcladora siempre en marcha. La homogeneización continúa durante un minuto, después se añade el material cementante durante un minuto y se agita durante dos minutos antes de incorporar el agua de reacción durante un minuto. Por último, se continúa agitando a velocidad media durante 4 minutos. El proceso total dura once minutos [43].

#### 5.4.4. Evaluación de impactos

La evaluación de impactos se realizó utilizando el Software OpenLCA versión 1.11 (<https://www.openlca.org> consultado en marzo de 2023) con las respectivas bases de datos que se encuentran disponible en el sitio web. El software se utilizó para determinar el impacto ambiental durante las etapas de producción de bloques de mortero (a base de agua, cemento Portland y arena) y de concreto vegetal (a base de cemento Portland, ceniza volante, bioagregado de Sargazo tratado con  $\text{Ca(OH)}_2$  y agua). Para el análisis, las entradas y salidas de ambos procesos productivos se evaluaron principalmente en función de la categoría de impacto de calentamiento global medida en  $\text{kg de CO}_{2e}$ . En este estudio se consideró el ACV para la producción de ambos materiales cementantes, así como también para la producción de materias primas (Bioagregado y ceniza volante), insumos, energía y transporte. El ACV se realizó mediante el método de evaluación de impacto ReCiPe 2016 Midpoint (H).

#### 5.4.5. Simulación energética de casas construidas con distintos bloques

Para la demanda de energía, se modeló una casa unifamiliar variando los materiales de las paredes exteriores. El caso base son los bloques de mortero convencionales por ser el material de construcción más utilizado en México ( $\sim 85.16 \%$  de las viviendas) [74], y el caso de estudio son los bloques de concreto a base de Sargazo. La superficie de la casa es de  $90 \text{ m}^2$  (Anexo 3), correspondiente al promedio ponderado de las viviendas en México según el



Censo Nacional de Vivienda 2020 [210]. Las zonas de calefacción/refrigeración se modelaron como un volumen de aire isotérmico (compuesto por 2 recámaras, 2 baños, un comedor y un cuarto de lavado) que interactúa con la capa interna de los muros y con el aire exterior a través de ventanas, ventilación e infiltraciones y recibe calor de las ganancias internas debidas a la ocupación y el equipamiento y por transferencia de calor de la radiación solar directa [134]. La infiltración de aire se define con un valor  $n_{50}$  de 11.8 [211]. La casa tiene un suelo y un techo de concreto reforzado de 20 cm de espesor con un acabado de piso cerámico [74]. Las ventanas son de cristal simple de 3 mm de grosor con marcos de PVC y la puerta principal es de madera maciza de 7 cm de grosor.

La modelización energética se realiza utilizando el software DesignBuilder con EnergyPlus como motor de cálculo [144,212,213] (Figura 33). La temperatura de consigna se fija en 25 °C para refrigeración y 18 °C para calefacción y los valores de humidificación y deshumidificación asignados son del 50 % cada uno, de acuerdo con el confort térmico establecido en la norma ASHRAE 55-2017 [144,214]. El análisis se realiza para cada capital de estado en México utilizando los datos climáticos de fondo obtenidos de la estación meteorológica más cercana del sitio web Climate.One.Building.Org (consultado en septiembre de 2023) [215,216]. El consumo energético (kWh/m<sup>2</sup>-año) se calcula con el coeficiente de rendimiento estacional (SCOP) fijado en 3 [217,218].

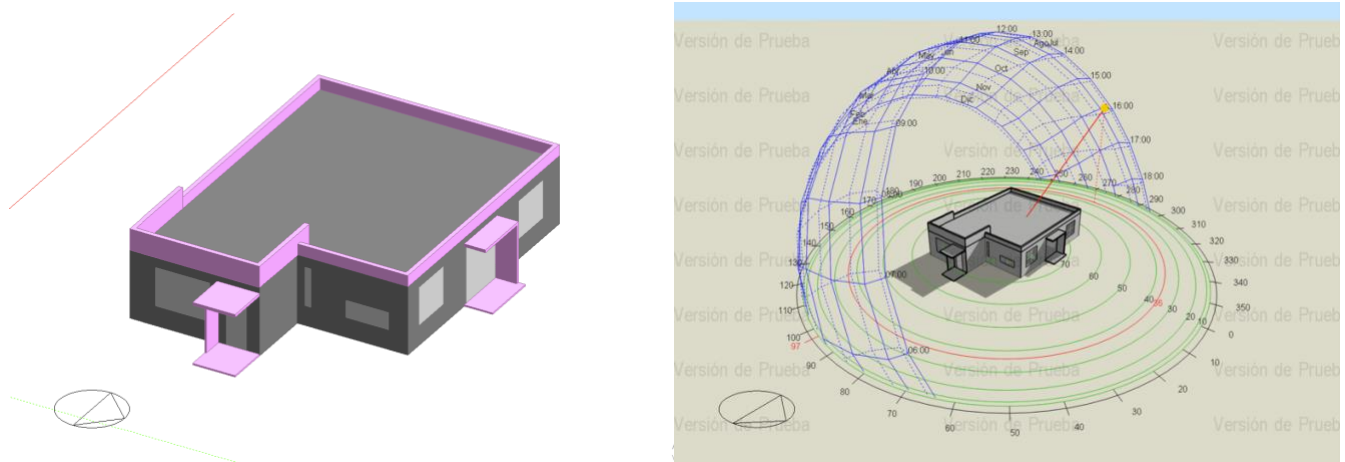


Figura 33 - Imágenes de la simulación energética realizada mediante Design Builder

## Capítulo VI – Resultados y discusión

### 6.1. Resultados etapa I – Obtención y caracterización de materias primas

#### 6.1.1. Recolección de materias primas

Las materias primas fueron obtenidas de acuerdo con lo estipulado en la sección 5.1.1 y tal como se observa en la Figura 34. Las materias primas fueron almacenadas en contenedores herméticos para evitar el contacto con la humedad ambiental, así como con contaminantes.

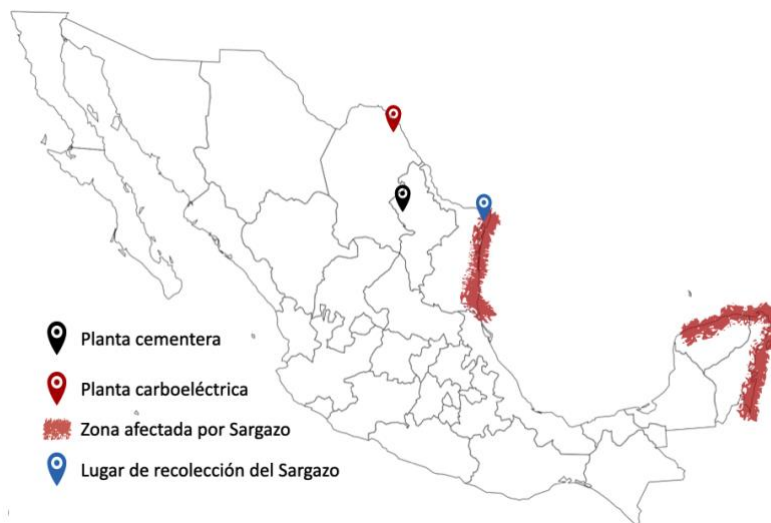


Figura 34 - Fuente de materias primas principales

#### 6.1.2. Caracterización de cementantes

##### *Caracterización física*

Los resultados de la distribución de tamaño de partícula se exponen en la Figura 35. En el caso del CPO el diámetro medio de partícula es de  $23.55 \pm 6.57 \mu\text{m}$  con un área superficial de  $0.7053 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ , y una densidad del orden de los  $3.0354 \text{ g}/\text{cm}^3$ . La ceniza volante posee un tamaño medio de partícula de  $29.73 \mu\text{m}$  y una densidad de  $2.1159 \text{ g}/\text{cm}^3$  la cual es inferior a la registrada para el cemento y que debe considerarse para la determinación del índice de actividad puzolánica mediante el método descrito por Bentz [104].

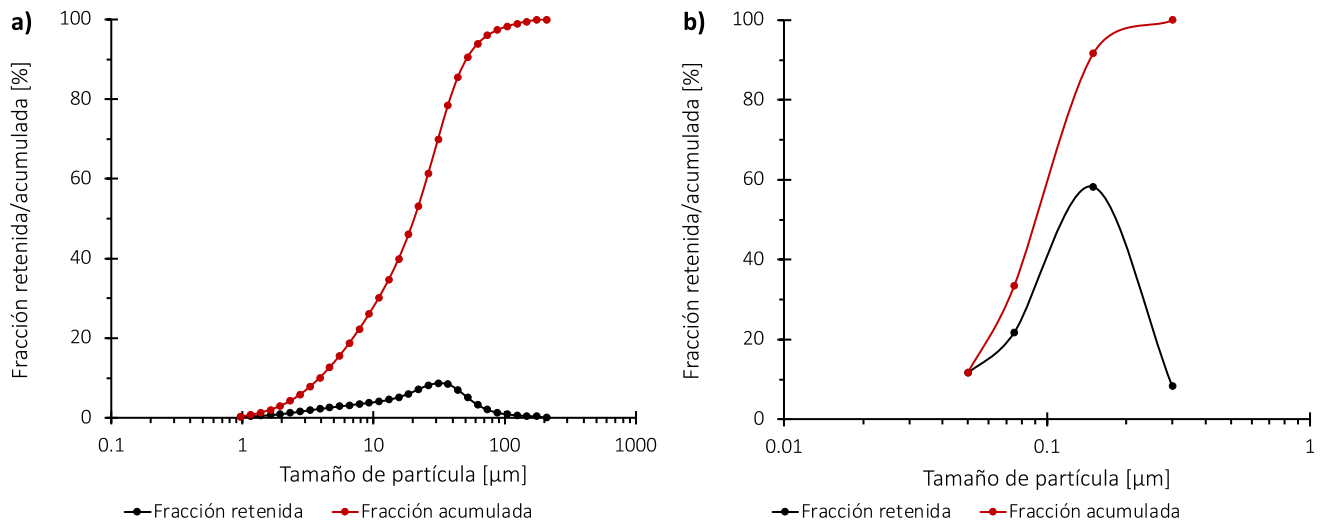


Figura 35 - Curvas de distribución granulométrica de los materiales cementantes. a) CPO; b) CV

### Caracterización microestructural

En la Figura 36 a), muestra los resultados de un ensayo de DRX sobre la muestra de polvo de CPO en que se observa que está compuesto principalmente por tres fases similares: silicato bicálcico ( $C_2S$ ) con las reflexiones más altas entre los ángulos  $32.54^\circ$  y  $38.72^\circ$ . Silicato tricálcico ( $C_3S$ ) con los picos de mayor intensidad entre los ángulos  $32.18^\circ$  y  $34.33^\circ$  y, aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) con los picos de mayor intensidad a los  $39.50^\circ$  [66,68,180]. Para la FA, los resultados se exponen en la Figura 36 b) y muestran la fase amorfa con una curvatura comprendida entre  $2\theta = 15$  y  $35^\circ$  [86,107,219]. Las fases cristalinas identificadas corresponden principalmente a Mulita ( $Al_6Si_2O_{13}$ ), y Cuarzo ( $SiO_2$ ), y en menor proporción Hematita ( $Fe_2O_3$ ), Magnetita ( $Fe_3O_4$ ) y Cristobalita ( $SiO_2$ ); las cuales posibilitan la formación de hidratos de cemento [61,66,68,86,96,103,107].

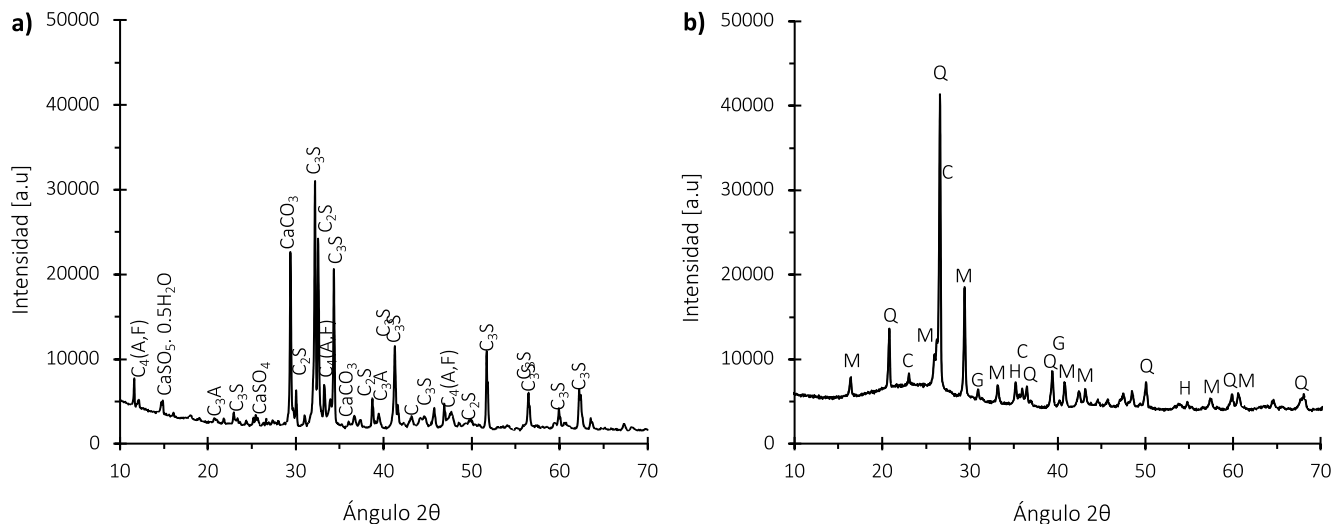


Figura 36 - DRX de las muestras de cementantes. a) CPO; b) CV (M: Mulita; Q: Cuarzo; H: Hematita; G: Magnetita; C: Cristobalita)

La Tabla 13 muestra la composición mineralógica obtenida del ensayo FRX para ambos materiales cementantes, y además se incluyen los resultados de otros estudios y de los rangos normalizados para las cenizas volantes europeas y los valores estandarizados según la normativa NBS 1633B.

**Tabla 13 - Resultado de FRX sobre la CV y el CPO40R**

Compuesto	CPO	CV	CV [96]	CV [219]	CV [86]	CV [86]	CV [86]
SiO <sub>2</sub>	20.7133	80.090	45.69	58.84	59.6	41.1 – 59.6	49.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4260	12.656	24.59	16.72	22.82	17.6 – 35.6	28.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.7788	3.179	11.26	3.52	5.57	2.6 – 16.0	11.1
CaO	66.7828	1.481	12.15	7.35	3.11	0.5 – 11.8	2.1
MgO	0.1755	---	2.87	1.76	0.87	0.8 – 3.8	0.8
SO <sub>3</sub>	6.0898	0.538	1.57	0.13	0.4	0.1 – 8.6	0.5
K <sub>2</sub> O	1.3575	0.86	2.66	0.79	1.28	0.4 – 4.0	2.3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	---	0.429	---	---	0.04	0.1 – 1.7	0.5
TiO <sub>2</sub>	0.2883	0.691	---	---	0.94	0.5 – 2.6	1.3
Fuente	Cemex	Coahuila, Mx	Tailandia	México	Coahuila, Mx	Europea	NBS 1633b certified

De la Tabla 13, se puede observar que en el cemento Portland, el contenido de SO<sub>3</sub> es superior a un 6 % lo cual pudiera considerarse un poco más elevado si se compara con otros cementos de características similares [199]. Además, podemos ver que el principal constituyente del cemento Portland corresponde al CaO con un 66.7828 % lo que es atribuido al contenido de caliza empleado en su fabricación y el SiO<sub>2</sub> con un 20.7133 % [180,199] lo cual podría tener también un efecto sobre la reacción de hidratación y en la activación de la ceniza volante generando efectos positivos en la resistencia mecánica a la compresión. Por otro lado, los principales componentes de la CV son el SiO<sub>2</sub> en un 80.090 %, el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en un 12.656 % y el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en un 3.179 % por lo que de acuerdo con la normativa ASTM C 618 se clasifica como tipo F [105], con una relación Si/Al de 6.33 y con un bajo contenido de elementos como P, K, Ca y Ti. El alto contenido de sílice en comparación con las demás cenizas volante, representa una fuente importante de este compuesto capaz de reaccionar con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contenido (para la formación de aluminosilicatos amorfos) que a su vez reaccionan con el Ca(OH)<sub>2</sub> añadido de manera externa (por uno de los pretratamientos estudiados) o producto de la hidratación del cemento [86,104,107]. La reducción del contenido de Portlandita tiene un efecto directo sobre la interacción de la matriz con el bioagregado, ya que la mineralización de la fibra produce su degradación en la zona interfacial aumentando la porosidad del material modificando sus propiedades intrínsecas [25,26,95,173,175,176].

La Figura 37 muestra los resultados de la prueba FTIR de los materiales cementantes. Al estudiar la gráfica obtenida del CPO, se tienen picos asociados a la vibración del enlace S-O que se encuentran en el rango de 1100-1700 cm<sup>-1</sup>, donde también se observan numerosos picos característicos para las muestras de cemento no hidratado. Se observan picos en el rango de los 1560 y 1654 cm<sup>-1</sup> que, de acuerdo con la literatura, pueden ser atribuido a la presencia de agua absorbida por los sulfatos. Los sulfatos presentes en el cemento Portland originalmente son yeso, sulfato de calcio semihidratado (CaSO<sub>4</sub>•½H<sub>2</sub>O) y sulfato de calcio anhídrido (CaSO<sub>4</sub>) cuyas bandas características se encuentran en el rango entre los 1100-1200 cm<sup>-1</sup> y en donde se destacan los picos presentes en 1124 y 1138 cm<sup>-1</sup> [182]. En el rango entre 3100 y los 3700 cm<sup>-1</sup> aparecen las bandas de H<sub>2</sub>O y de OH- las cuales tienen presencia en

el cemento no hidratado debido a la presencia de compuestos altamente higroscópico generando la posibilidad de que exista humedad residual en la muestra analizada. El pico relacionado a OH- se asocia al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y se destaca en el rango de los  $3651 \text{ cm}^{-1}$  [182].

El espectro de la ceniza original (CV) muestra 3 bandas anchas características de las vibraciones internas de los silicatos. Las bandas observadas a  $3550 \text{ cm}^{-1}$  y  $1650 \text{ cm}^{-1}$  son vibraciones de estiramiento de -OH y vibraciones de flexión de H-O-H respectivamente. La banda que aparece a  $1030 \text{ cm}^{-1}$  se asocia a las vibraciones de tensión asimétricas de los enlaces T-O (T=Si o Al) [103,219]; La banda que aparece hacia  $775 \text{ cm}^{-1}$ , se corresponde con las vibraciones (Si-O-Si) del doblete característico del cuarzo presente en la ceniza original. La banda de  $565 \text{ cm}^{-1}$  corresponde presencia de mullita [219]. El pico a  $\sim 430 \text{ cm}^{-1}$  se asigna a la flexión en el plano de los enlaces Al-O y Si-O [103].

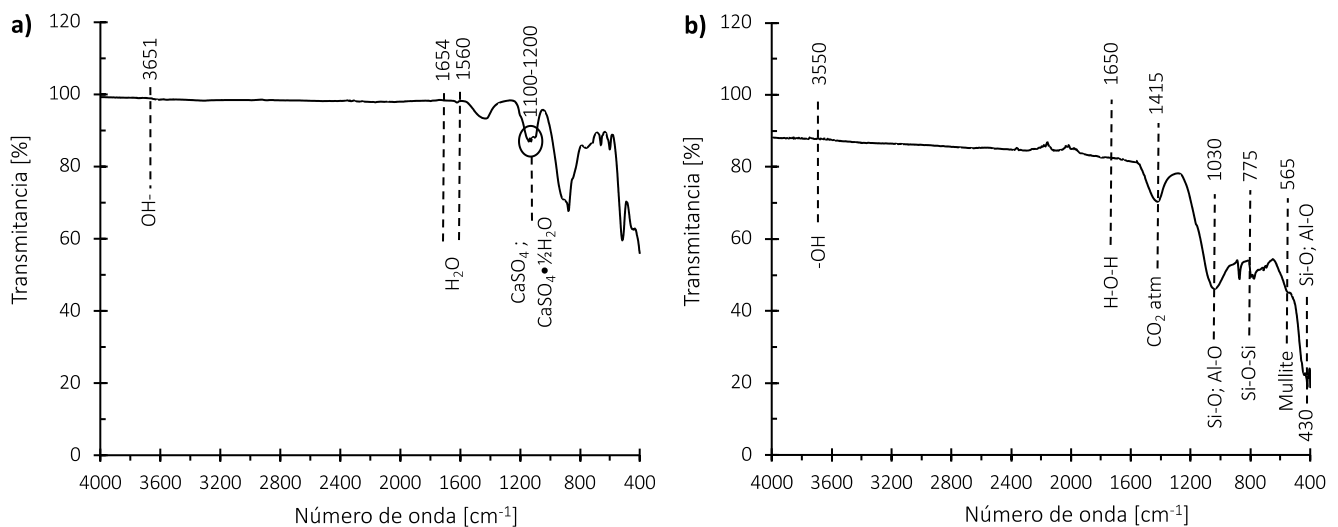


Figura 37 - FTIR de los materiales cementantes. a) CPO; b) Ceniza volante

La Figura 38 muestra los resultados de la prueba de termogravimetría de los materiales cementantes. Los resultados del TGA en la muestra de CPO indican que existe una pérdida menor de masa asociado a la evaporación de agua del sulfato de calcio dihidratado o yeso en el orden de entre los 75 a  $125 \text{ }^\circ\text{C}$  con un 0.37 % lo cual se debe al estado seco de la muestra de cemento Portland que había sido puesta en horno y almacenada cuidadosamente [180]. Un punto importante por considerar es la pérdida de masa que existe entre los 550 y  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  equivalente a un 1.8238 % y que se atribuye a la descomposición de carbonatos como el  $\text{CaCO}_3$  y que es típica de este tipo de materias primas.

Los resultados del análisis TGA sobre la ceniza volante muestra tres pendientes importantes en la variación de masa. EL primer salto importante ocurre hasta los  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  con una pérdida de masa de 2.69 % que se asocia a la pérdida de humedad. Luego entre los 100 y  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  ocurre una disminución con una pendiente un poco menos acelerada a la anterior que se asocia a la pérdida de agua de hidratación (ligada a la materia prima) y por último, el tercer salto de pérdida de masa ocurre entre los 450 y  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  y está asociada a la descarbonatación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en  $\text{CO}_2$  y  $\text{CaO}$  y además a la combustión del carbón residual de la ceniza volante [86,155].

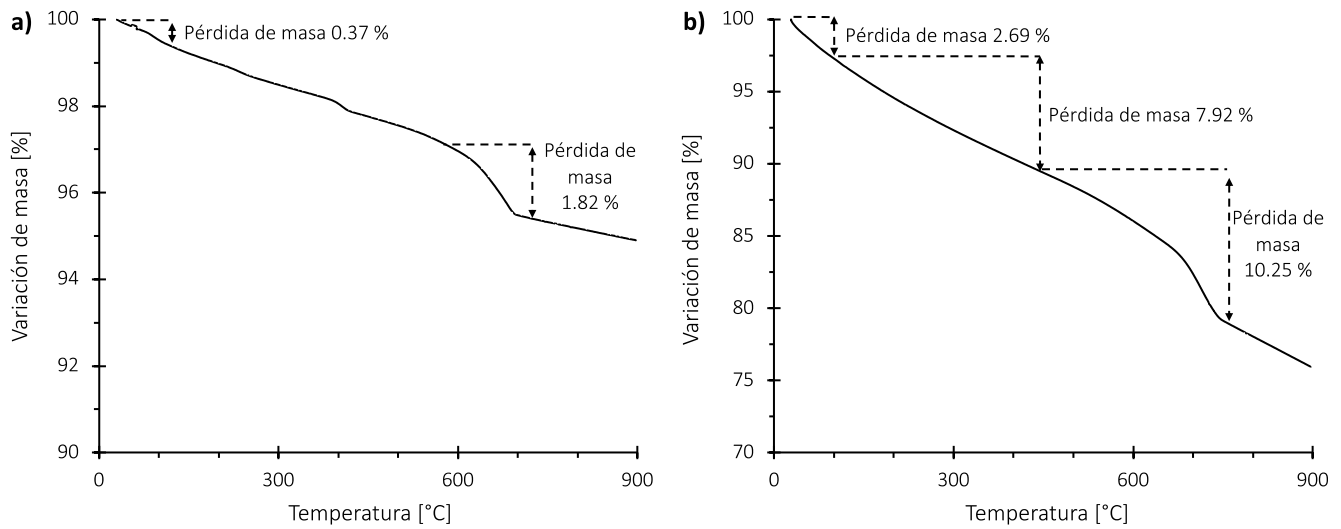


Figura 38 - Análisis TGA de los materiales cementantes. a) cemento Portland; b) Ceniza volante

### Caracterización morfológica

Los valores obtenidos del análisis de distribución de tamaño de partícula, así como la forma y la composición cualitativa de los cementantes fueron estudiados por micrografías (Figura 39) y análisis EDS (Figura 40).

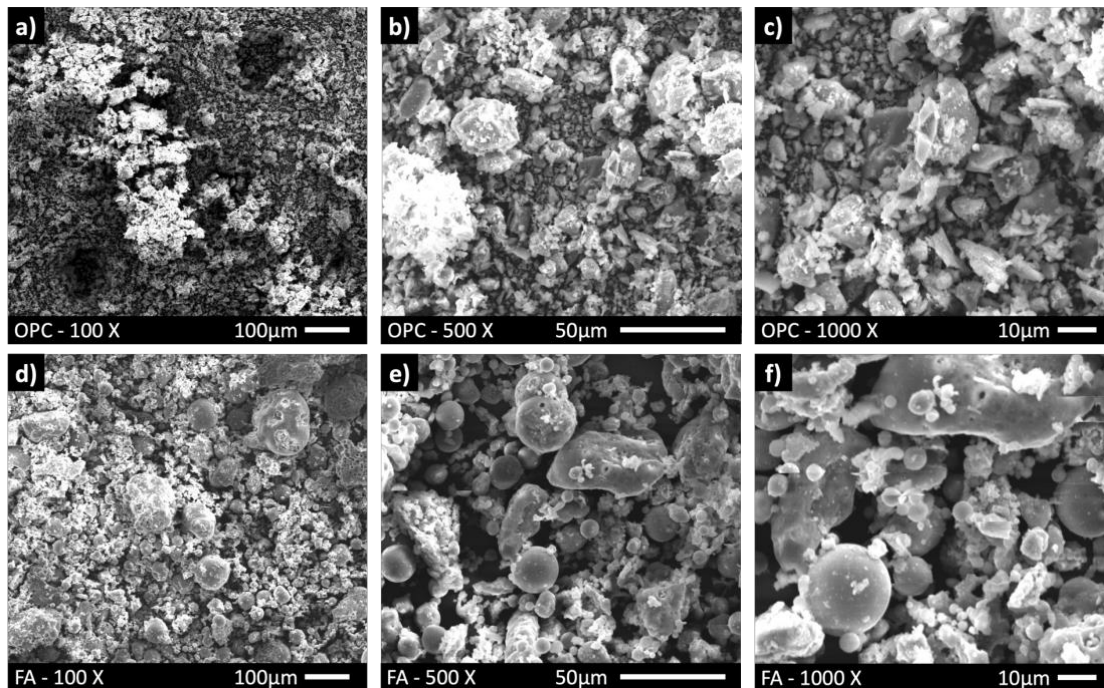


Figura 39 - Micrografía sobre los materiales cementantes. a, b, c) cemento Portland; c, d, e) Ceniza volante

Para el cemento Portland expuesto en Figura 39 a, b, c) y en Figura 40 a, b, c) se observan grandes cristales poligonales que corresponden a silicato tricálcico y redondos estridados asociados a la presencia de silicato bicálcico. Esto explica la alta presencia de Ca y Si en el análisis EDS en donde además se observa una importante presencia



de Al y Fe las cuales se encargan de ligar los cristales de grano grueso de silicatos [62,220]. Por otro lado, se observa que la ceniza volante expuesta en la Figura 39 d, e, f) y en Figura 40 d, e, f) posee una forma esférica semiamorfa muy definida siendo el silicio y el aluminio los principales elementos identificados [61]. Además, se observa que existe una mayor irregularidad en la distribución de los tamaños de partícula habiendo esferas de entre  $\sim 5$  a  $50 \mu\text{m}$  [68,86,107].

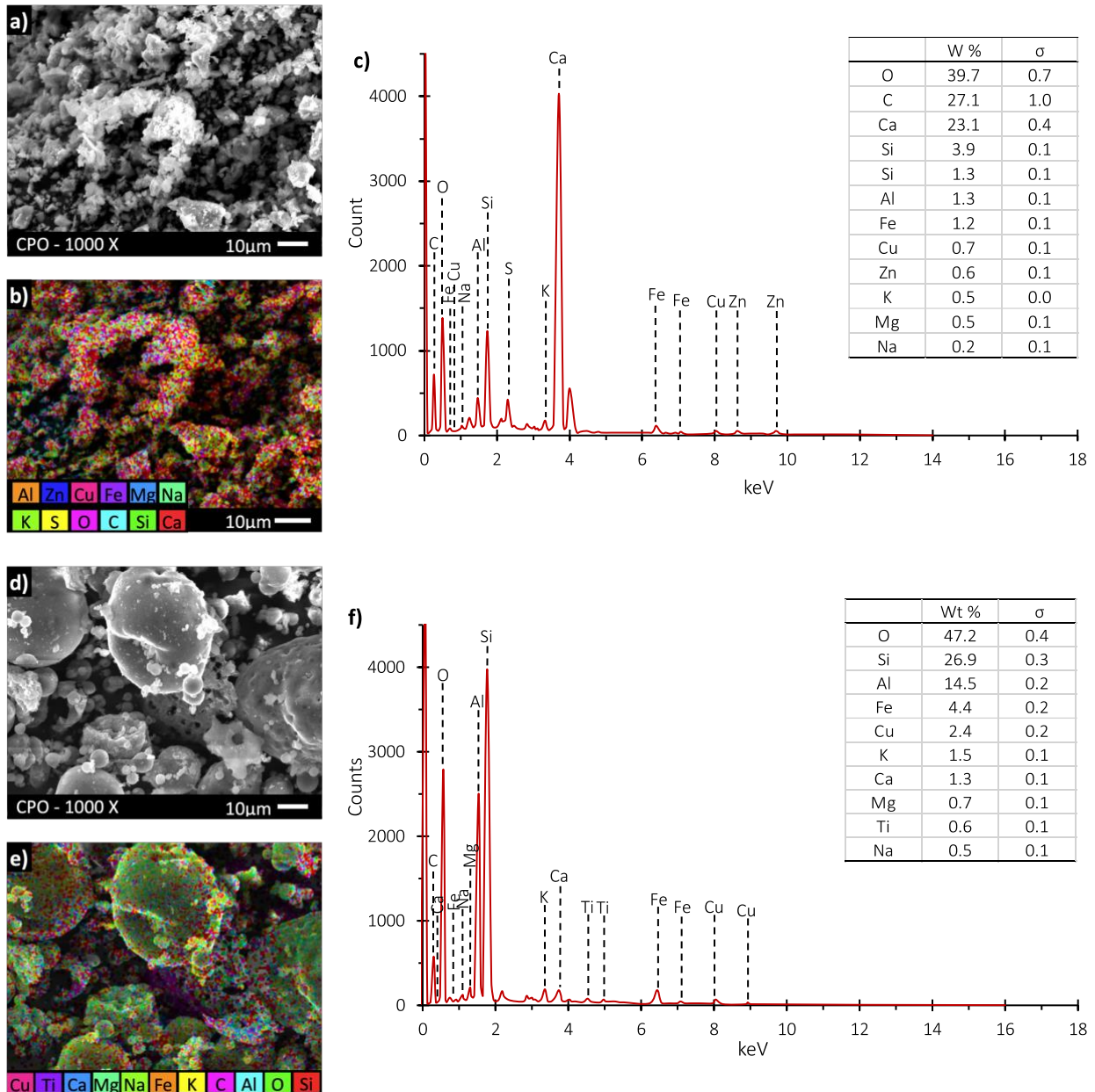


Figura 40 - Análisis EDS de los materiales cementantes. a, b, c) cemento Portland; d, e, f) Ceniza volante

### Índice de actividad puzolánica

El índice de actividad puzolánico (IAP) fue determinado mediante el método de Bentz [104] y la normativa ASTM C311 [183], cuyo reemplazo del material cementante se hace en función volumétrica debido a la diferencia de densidades entre el CPO y la ceniza volante. Los resultados son expuestos en la Tabla 14.

Tabla 14 - Resultados del IAP de la Ceniza Volante

Muestra	7 días	IAP – 7 [%]	28 días	IAP – 28 [%]	90 días	IAP – 90 [%]
MC	25.5426	100.0000 %	38.9571	100.0000 %	46.8294	100.0000 %
M2	23.7999	93.1774 %	35.1787	90.3011 %	35.9554	76.7795 %
M3	26.0245	101.8865 %	36.0480	92.5326 %	47.7242	101.9107 %
M4	28.4345	111.3218 %	37.0311	95.0559 %	50.3424	107.5017 %

Como puede observarse, el IAP establece que la ceniza volante es apta para poder ser empleada como sustituto al CPO incluso a edades de curado de 90 días logrando resistencias por sobre el 75 % respecto a la muestra de control (MC). Otro aspecto importante es el aumento de la resistencia conforme la ceniza volante posee un tamaño de partícula menor debido a la mayor área superficial, y, además, porque con el proceso de cribado se elimina carbón residual variando los porcentajes de la composición mineralógica en donde destaca un alza en el contenido relativo de SiO<sub>2</sub> de 78 a 80.254 % y por lo tanto aumenta la capacidad de reacción de la puzolana. [178]. Lo importante de este resultado tiene relación con un mayor aprovechamiento de la ceniza permitiendo descartar solo la fracción retenida por el tamiz Nro. 50 equivalente al 8.36 % y con el alto nivel de reemplazo del CPO debido a los valores de resistencia obtenidos principalmente a 28 días (respecto a la muestra MC).

### 6.1.3. Caracterización del Sargazo

#### Caracterización física y morfológica

El tamaño de partícula del Sargazo se muestra en la Figura 41, donde se observa fibras tubulares de tamaño regular, de aproximadamente ~ 5 mm de largo con espesor de 1 mm correspondientes al tallo de la planta y con pequeñas esferas de ~ 1 mm de diámetro correspondientes a los aerocistos [221].

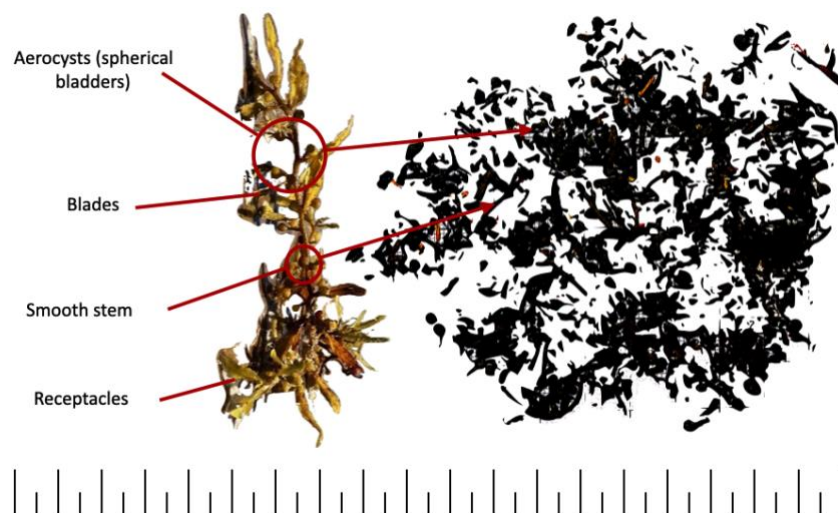


Figura 41 - Tamaño de partícula del Sargazo como agregado



Los resultados muestran que el Sargazo tiene una densidad real de  $0.9779 \text{ g/cm}^3$  y una densidad aparente de  $0.3801 \text{ g/cm}^3$ , el cual es alto si se compara con el cáñamo ( $0.103 \text{ g/cm}^3$ ) o el tallo de girasol ( $0.105 \text{ g/cm}^3$ ) [29], sin embargo sigue considerándose un valor característico de este tipo de materia prima. Este valor de densidad está asociado a una estructura altamente porosa la cual fue determinada mediante la Ecuación 4 [166].

$$P_{inter} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} = 1 - \frac{0.3801 \text{ g/cm}^3}{0.9779 \text{ g/cm}^3} = 61.13\%$$

La alta porosidad del Sargazo, le permite contener una gran cantidad de aire inmóvil lo cual resulta en una conductividad térmica de  $0.041 \text{ W/mK}$  [166] que se expone en la Figura 42. Este valor es similar al de fibras que son empleadas en el desarrollo de materiales aislantes como el papel reciclado ( $0.041 \text{ W/mK}$ ) [71], el corcho ( $0.045 \text{ W/mK}$ ) [23], y el cáñamo ( $0.04\text{-}0.12 \text{ W/mK}$ ) [24,26,120], entre otros, y por lo tanto, se determina su idoneidad como potencial agregado en el desarrollo del concreto vegetal para potenciar las propiedades aislantes del compuesto [152]. La Figura 43 expone la absorción de agua del Sargazo donde se muestra una cinética de absorción acelerada, ya que logra un grado de saturación de un 98.88 % con respecto a la masa seca después de un minuto de sumergimiento. Este valor es similar a la capacidad absorbente del cáñamo (80.86 %) [29,156,158,166] y la fibra de palma (84.84 %) [24], sin embargo, a mayor tiempo de sumergimiento, posee una capacidad de absorción cercana al 250 % [24,156,185], superior a lo reportado para fibras como el Yute [222–224], el Sisal [159,223,225], la fibra de coco [223], o el Girasol [26,29,166]. Las diferencias reportadas en la capacidad absorbente de las fibras dependen de la morfología de la estructura física. La forma y distribución de los poros de cada especie facilita en diferentes medidas la capacidad absorbente de agua por capilaridad [3,14]. Este parámetro dificulta la dosificación debido a la competencia que se genera entre la fibra y el aglutinante por el agua involucrada en el proceso [29,156].

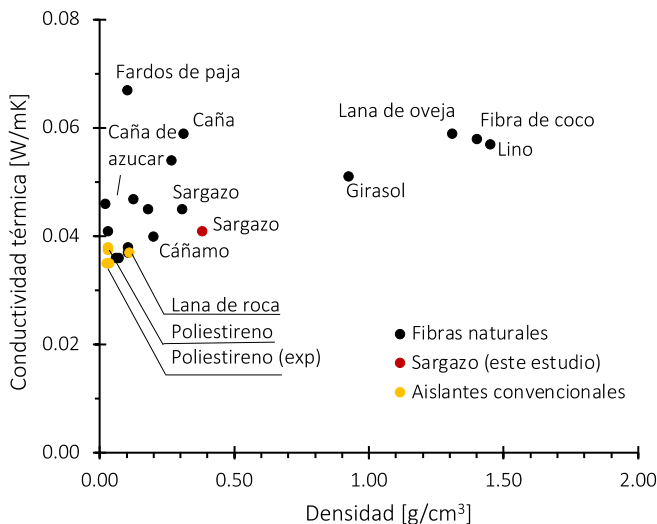


Figura 42 - Conductividad térmica y densidad del Sargazo

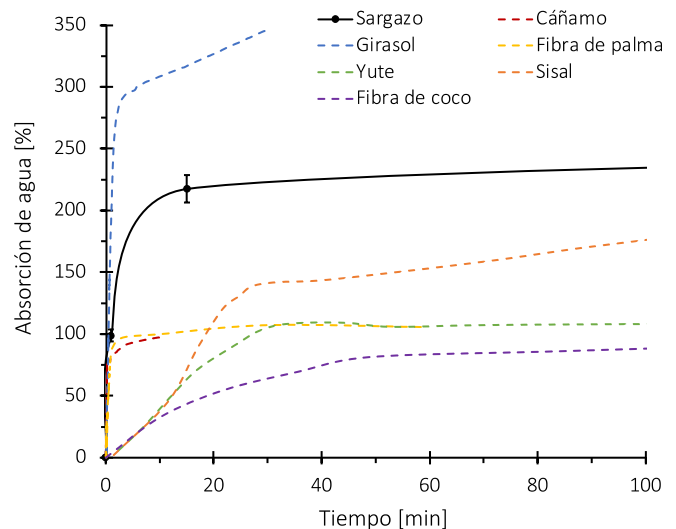


Figura 43 - Curva de absorción de agua del Sargazo

### Caracterización química

Los resultados de la caracterización química se exponen en la Tabla 15, donde se observa que el Sargazo está constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina ya que estos polímeros son constituyentes principales de las paredes celulares vegetales [110].

Tabla 15 - Resultados caracterización química del Sargazo

Prueba	Valor	S
Análisis de humedad	16.3668 %	0.8847 %
Análisis de ceniza	17.5600 %	0.1381 %
Extraíbles con Etanol-Tolueno	3.6271 %	1.6703 %
Lignina insoluble en ácido	28.5475 %	3.5315 %
Contenido de holocelulosa	46.1737 %	2.6385 %
Contenido de celulosa	56.6477 %	1.4482 %

La cantidad de celulosa del Sargazo es similar a la reportada para la fibra de cáñamo (56.1 %) [118] y la caña de azúcar (57 %) [127] pero inferior a la del girasol (~ 45 %) [14,154,163]. La humedad de equilibrio se determinó en un 16.37 % [33,41]. Después del proceso de extracción en sustancias polares, la muestra perdió un 3.62 % de su masa (similar a los resultados obtenidos para el bambú [28]) lo que está asociado a compuestos no estructurales como pectinas, grasas, proteínas entre otros.

#### Caracterización microestructural

El ensayo de DRX expuesto en la Figura 44 muestra la presencia de precipitados en el Sargazo principalmente de Cuarzo (Q), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) [27,38]. Además, se identificaron otros compuestos que han sido reportados en investigaciones previas como carbonato cálcico y dolomita (carbonato cálcico-magnésico) los cuales se encuentran en toda la anatomía de la materia prima (tallo y hojas) [41]. Además, el índice de cristalinidad (IC) se determinó en 80.06 % [193], lo cual es un valor elevado si se compara con otras fibras naturales como la fibra de coco (68 %) o el yute (58.9 %) pero cercano al valor reportado por el cáñamo (87.9 %) [113]. Esto está relacionado con los valores de la composición química en particular al contenido de  $\alpha$ -celulosa [113,160] y a su vez se asocia a las propiedades intrínsecas de la fibra y por lo tanto con las propiedades finales del compuesto desarrollado ya que la estructura cristalina de sus componentes permite un empaquetamiento adecuado que evita una interacción por disolución con el agua de mezcla en la fabricación de concretos vegetales.

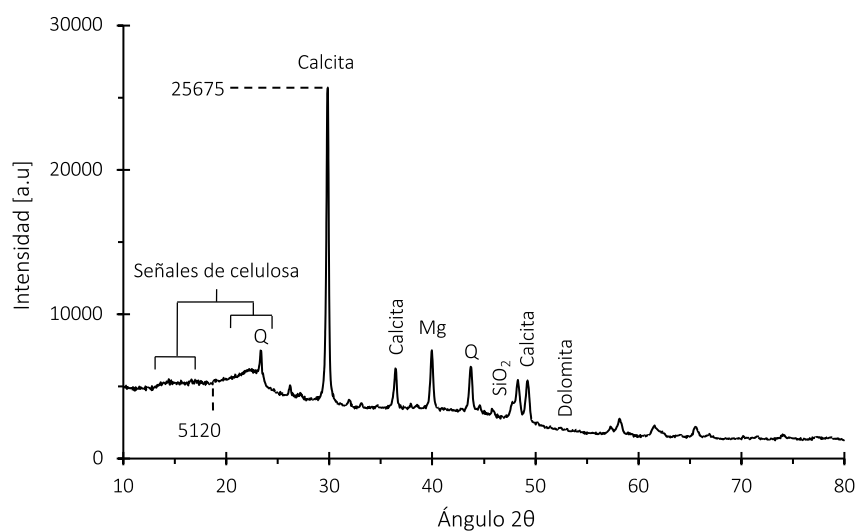


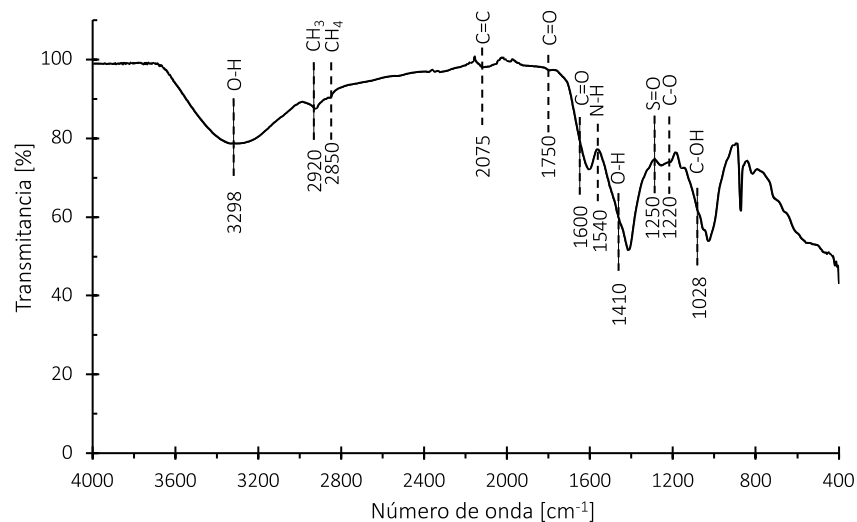
Figura 44 - DRX de la fibra de Sargazo. (Q: Cuarzo, Ca: Calcio; Mg: Magnesio)

Los resultados de la prueba de FRX quedan descritos en la **Error! Not a valid bookmark self-reference.**, en donde los principales compuestos detectados son CaO en un 61.484 %, y en menor medida SiO<sub>2</sub> en un 14.005 %. Esto demuestra de manera empírica la composición del Sargazo utilizado en el estudio, y, además, debido a la alta presencia de compuestos de calcio y sílice, permite establecer algunas aplicaciones futuras en áreas industriales, y farmacéuticas entre otras.

**Tabla 16 - Resultado de FRX sobre muestra de Sargazo**

Compuesto	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl
Concentración [%]	3.105	0.150	8.906	14.005	6.093	61.484	1.117	2.851

En la Figura 45, se observa la gráfica del espectro FTIR del Sargazo. El pico encontrados a los 3298 cm<sup>-1</sup> corresponde a vibraciones de estiramiento del grupo funcional O-H asociados a la presencia de agua y alginatos [41,112,152,225]. La señal que aparece entre los 1920 y 1850 cm<sup>-1</sup> es característica de las fibras lignocelulósicas y corresponde a grupos metil y metileno respectivamente (-CH<sub>3</sub> y -CH<sub>2</sub>) [192]. La vibración del grupo en 2075 cm<sup>-1</sup> está asociada a un enlace C=C, de compuestos de acetileno. Alrededor de 1600 y 1410 cm<sup>-1</sup> se observa la vibración antisimétrica y simétrica respectivamente, del grupo carboxilato de las hemicelulosas. A los 1750 cm<sup>-1</sup> se asignó la señal del grupo C=O característica de la presencia de lípidos, y, a los 1540 cm<sup>-1</sup> se observa una banda atribuida a la vibración de estiramiento de grupo amida (N-H), atribuida a la presencia de proteínas [80]. A los 1250 cm<sup>-1</sup> se observa una banda de la vibración de estiramiento del grupo S=O, característico de éteres de sulfato [41,80]. El pico a 1220 cm<sup>-1</sup> se asigna a la vibración de estiramiento C-O presente en la lignina [225], y finalmente a los 1028 cm<sup>-1</sup> la banda corresponde a vibraciones de C-OH y C-OR, de alcoholes y éteres [152].



**Figura 45 - Espectro FTIR del Sargazo**

La Figura 46 muestra el análisis TGA del Sargazo que muestra tres saltos importantes de pérdida de masa. En primer lugar, se tiene que entre los 25 y 150 °C se pierde un 10.15 % de la masa correspondiente a la evaporación de agua y sustancias volátiles [15,41]. Posterior a esta temperatura, comienza la degradación de la fibra [190], donde entre los 200 y 450 °C hay un salto equivalente a un 38.117 %, asociada a la descomposición de biopolímeros

importantes en la estructura como la hemicelulosa y la  $\alpha$ -celulosa de la fibra [41,152,161]. Por último, se observa una tercera pérdida significativa entre los 450 y 800 °C asociada a la degradación de material inorgánico como la transformación de algunos carbonatos, pérdidas de carbono fijo y la eliminación de metales [15,41]. El análisis permite concluir que la fibra de *Sargassum fluitans* es estable hasta los 150 - 200 °C debido a su alto valor de cristalinidad [190], por lo que la acción de cualquier pretratamiento, procesamiento o uso debe ser restringida a ese rango para evitar la degradación térmica del material [15,152].

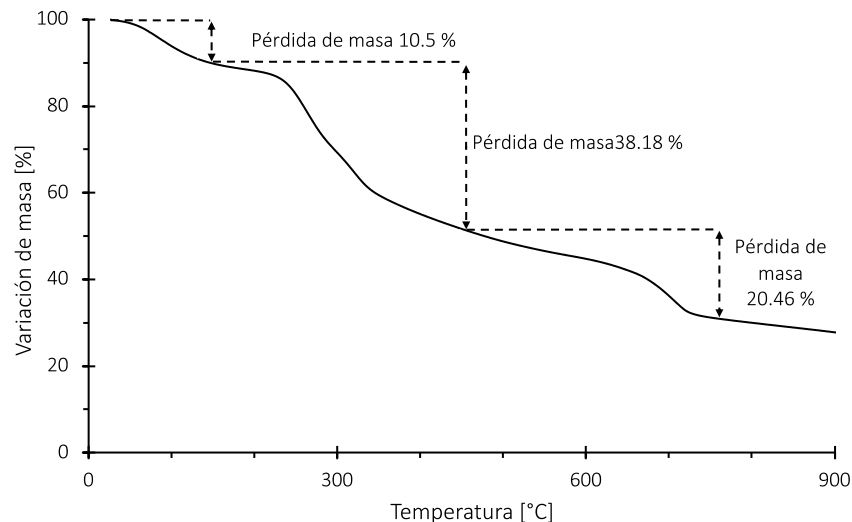


Figura 46 - Gráfica TGA del Sargazo

## 6.2. Resultados etapa II – Evaluación de compatibilidad de tratamientos

### 6.2.1. Caracterización del agregado de Sargazo

#### *Absorción de agua del agregado después del tratamiento*

Los 4 tratamientos estudiados permitieron la modificación de las propiedades físicas del bioagregado debido principalmente a la variación en la abertura de las paredes celulares y la porosidad de la fibra [163]. La Figura 47 muestra las curvas de absorción de agua y como se observa, la acción de los tratamientos afecta tanto la capacidad de absorción, así como la cinética del proceso, siendo el tratamiento de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y de parafina capaces de ralentizarlo en los primeros minutos. El tratamiento con parafina permite un recubrimiento superficial completo [159] y la inmersión en una solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  crea una superficie rugosa libre de impurezas, con una deposición homogénea de nódulos de calcio relleno de poros de la fibra [118,177]. En ambos casos por lo tanto se reduce la absorción de agua debido a que la porosidad bloqueada es la entrada principal de agua por capilaridad [159,163]. El tratamiento de hornificación, a 1 minuto de sumergimiento, también permite una reducción en la capacidad de absorción de agua [22], y se puede explicar por la rigidez de la estructura polimérica de las fibras que se produce durante el proceso de humectación-secado, en donde las cadenas de celulosa se ordenan de manera compacta con la eliminación de agua, uniéndose las microfibrillas y reduciendo los huecos capilares [171,226]. Por otro lado, el tratamiento de NaOH permiten una mayor capacidad de absorción debido a que elimina las impurezas presentes en la superficie que bloquean la porosidad abierta [159,163,177]. Los resultados de absorción de agua tienen

implicancias directas sobre la dosificación del mortero considerando mayores o menores volúmenes de agua de premezcla, así como un efecto directo sobre las propiedades higrotérmicas del compuesto [166].

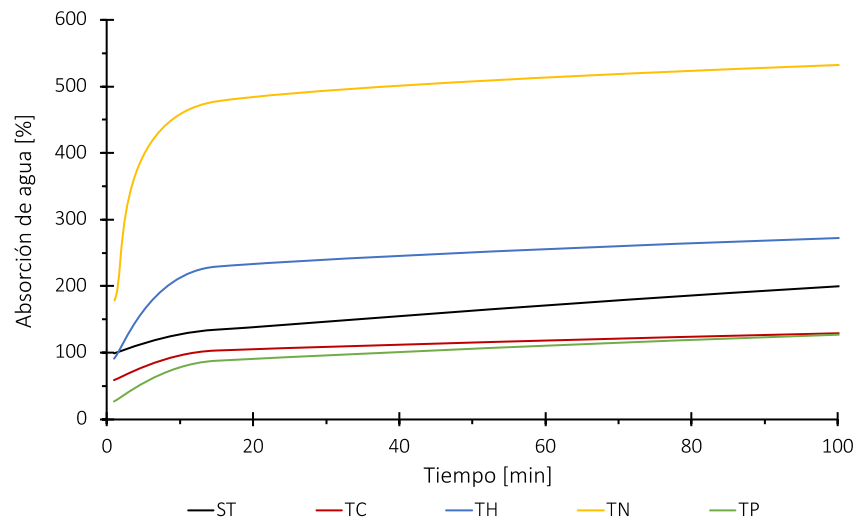


Figura 47 - Gráficas de absorción de agua

#### *Densidad aparente y conductividad térmica del agregado después del tratamiento*

La Figura 48, muestra la conductividad térmica y la densidad de las fibras. No existe correlación entre ambas porque las sustancias externas modifican la composición del bioagregado. Cada bioagregado se comporta de forma diferente, lo que afecta a la porosidad y a la conductividad térmica. El rango oscila entre 0.03 y 0.06 W/mK, por debajo de 0.07 W/mK (valor estipulado para considerar a un material como aislante [71]) y, por lo tanto, este criterio no discrimina a los tratamientos estudiados. Además, la densidad de los agregados es similar a la reportada para en la literatura [33,41], pero superior al del poliestireno expandido ( $0.015 - 0.035 \text{ g/cm}^3$ ) que usualmente se utiliza como aislante térmico en edificaciones [71]. Las partículas con baja conductividad térmica permiten reducir el flujo de calor por conducción a través del compuesto y, por tanto, reducir la conductividad efectiva del material, lo que resultaría ventajoso para el ahorro energético en viviendas y en otras aplicaciones de construcción [57].

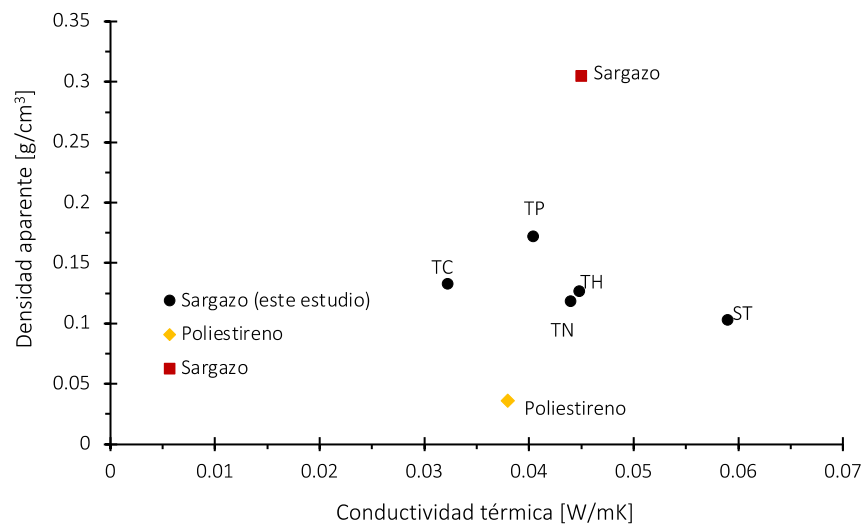
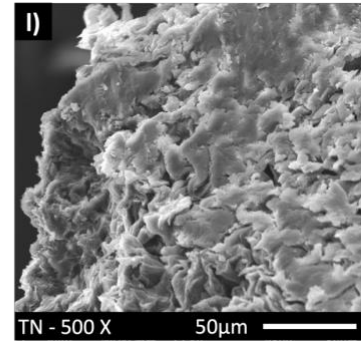
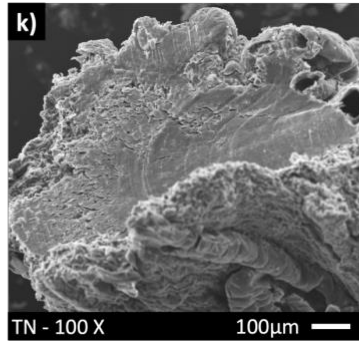
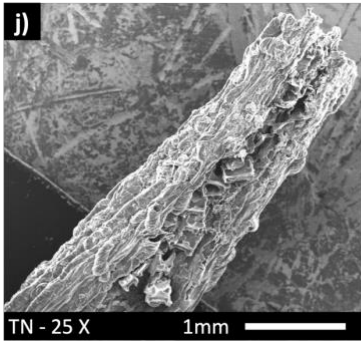
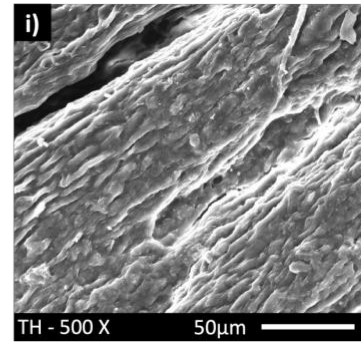
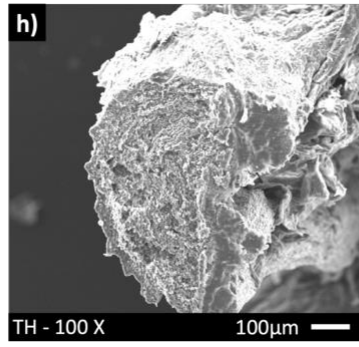
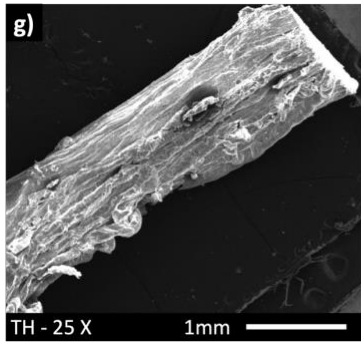
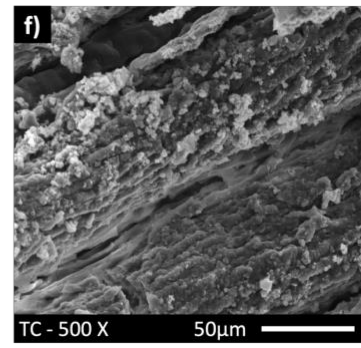
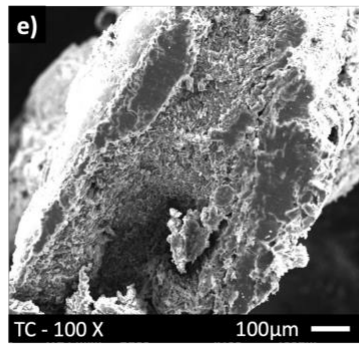
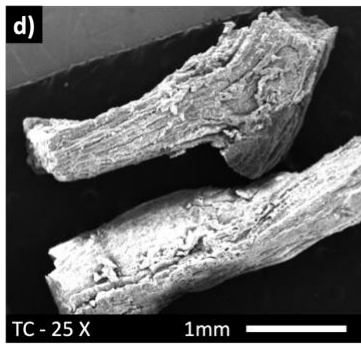
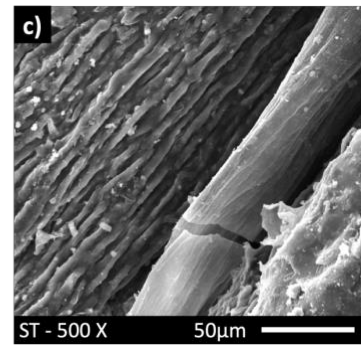
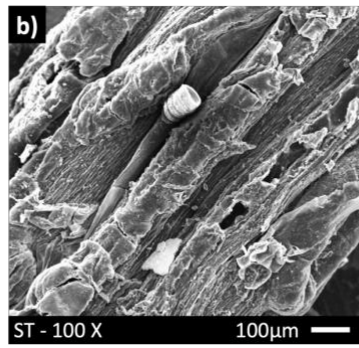
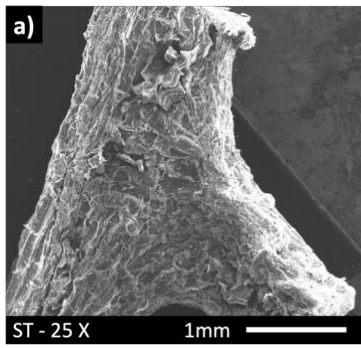


Figura 48 - Correlación entre densidad y conductividad térmica del agregado

### Morfología del agregado después del tratamiento

La Figura 49 muestra la microscopía electrónica de barrido sobre muestras sin tratamientos (Figura 49 a y b) y posterior a los tratamientos en estudio (Figura 49 c-j). Se observa que las fibras de Sargazo tienen un espesor aproximado de entre 900 y 1200  $\mu\text{m}$ , con zonas un poco mayores en donde salen ramificaciones de la fibra principal. Para las fibras sin tratamiento se pueden observar una superficie rugosa con numerosas impurezas como ceras, pectinas y lignina [177]. Las fibras sometidas al tratamiento con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Figura 49 c y d) muestran una superficie más lisa, con una menor cantidad de impurezas y con deposiciones de nódulos de Calcio repartidos de manera homogénea en la parte superficial [122,158,177]. Con el tratamiento de hornificación (Figura 49 e y f) se observa que la fibra presenta un mayor empaquetamiento y también que el procedimiento fue efectivo en la eliminación de impurezas por el constante lavado de la fibra resultando en una superficie más lisa [171,226]. El tratamiento con la solución alcalina de NaOH (Figura 49 h y i) permitió la eliminación de ceras, pectinas, ligninas y otros contaminantes obteniendo una fibra más rugosa [121,122]. Por último, el tratamiento con parafina (Figura 49 j y k) muestra una superficie con una textura suavizada por la acción del recubrimiento que además logró penetrar por acción capilar en los poros de la fibra bloqueándolos, reduciendo su capacidad de absorción de agua y aumentando su densidad aparente [43,117]. La diferencia en la adherencia de la fibra después de cada tratamiento tiene relación con la estabilidad morfológica del agregado que permite oponerse al hinchamiento y contracción producto de la absorción de agua, y, por otro lado, los tratamientos permiten bloquear la porosidad impidiendo la migración de compuestos alcalinos al interior del bioagregado resistiendo la degradación y separación de la zona interfacial.





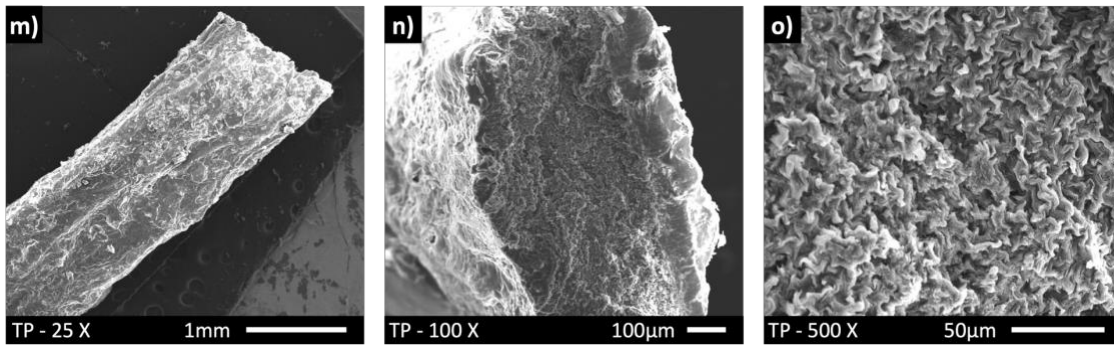


Figura 49 - SEM de la fibra con los tratamientos en estudio. a, b, c) ST; d, e, f) TC; g, h, i) TH; j, k, l) TNaOH; y m, n, o) TP

### 6.2.2. Evaluación de los tratamientos en la fabricación del concreto vegetal

#### *Índice de compatibilidad por calorimetría*

El proceso de hidratación del cemento Portland corresponde a una reacción exotérmica y la cantidad de calor liberado depende de su composición y de las condiciones que propician en este proceso. Cuando los compuestos que conforman el cemento entran en contacto con el agua producen diferentes reacciones. En primer lugar, reaccionan los aluminatos seguido de los silicatos que producen calor adicional. En la Figura 50, se observa las curvas de evolución de calor de la pasta de cemento y el bio agregado de Sargazo con los diferentes tratamientos que se evaluaron.

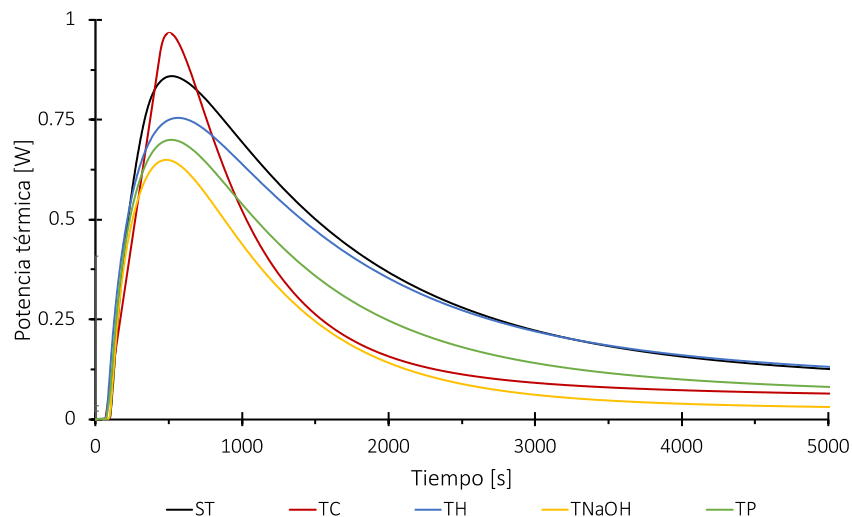


Figura 50 - Curvas de la prueba de calorimetría sobre las muestras con tratamientos

En todas las curvas se observa un amplio pico exotérmico atribuido al solapamiento en la reacción de hidratación del  $C_3A$ , la  $C_2S$  y  $C_3S$ . Sin embargo, se observan diferencias en el máximo en función del tratamiento que se está evaluando. El máximo calor de hidratación se produjo con el Sargazo con tratamiento TC, y con el tratamiento TP, resultando en un índice de inhibición bajo respecto a la muestra de referencia sin tratamiento, y por el contrario, el tratamiento con NaOH incrementó la incompatibilidad entre el aglutinante y el agregado [28]. Esto puede explicarse por las diferentes interacciones que se producen entre ambos, y, por lo tanto, las fibras naturales modifican calor liberado durante la reacción del cemento Portland pudiendo también potenciarla [27].



### Evaluación del concreto vegetal

Se estableció la dosificación adecuada ajustando el agua de premezcla en función de la capacidad de absorción en 1 minuto para cada tratamiento. Se fabricaron los especímenes y se dejaron curando en agua saturada en cal durante 7, 28, 90 y 180 días, siendo las mediciones a 28 días las determinantes para la selección de criterios. Los resultados de la resistencia a la compresión son expuestos en la a Figura 51 para cada diseño de mezcla.

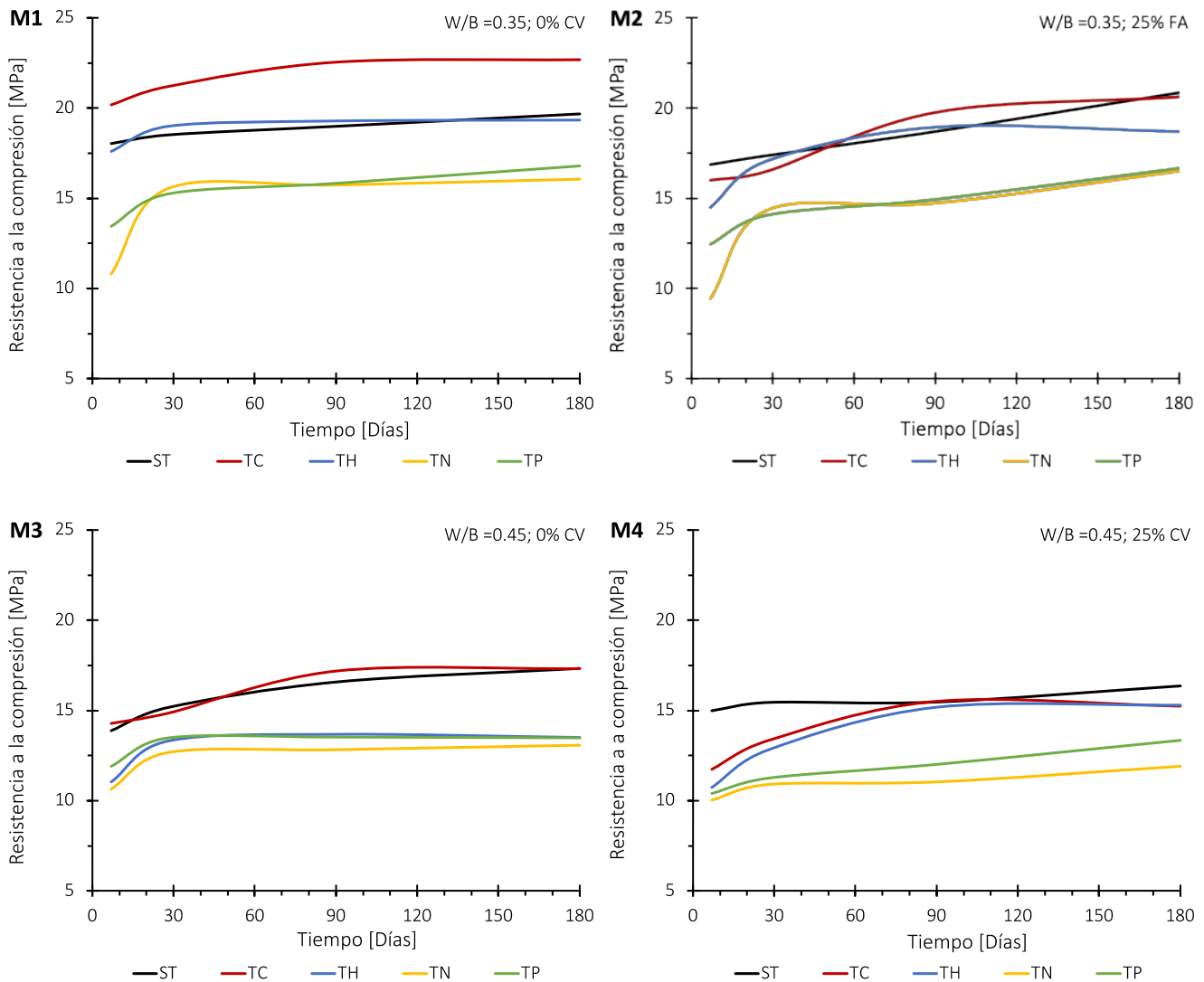


Figura 51 - Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para las muestras con cada tratamiento. (ST: Sin tratamiento; TC: Tratamiento con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; TH: Tratamiento de hornificación; TN: Tratamiento de NaOH; TP: Tratamiento de parafina)

Al comparar las muestras M1 con M2 y M3 con M4, se puede observar que las muestras reducen su capacidad resistente al incorporar la ceniza volante (reemplazo volumétrico de 25 %) [49,61,65,85]. Se observa que en promedio las muestras con relación agua/cemento de 0.35 (muestras M2) a la edad de 7 días obtienen una resistencia del 87.04 % respecto a las muestras de control, sin embargo, esta diferencia se reduce a mayores edades de curado logrando un 89.2 % a 28 días, un 94.4 % a 90 días y un 99.1 % a 180 días, lo que coincide con lo reportado

sobre el mecanismo y los tiempos de reacción de la puzolana [63,106]. Además, se observa que hay muestras que alcanzan valores superiores de resistencia a la compresión después de 180 días de curado como en el caso ST-M2 (5.9 % superior) y TN-M2 (2.8 % superior), aunque los resultados de las muestras TC (20.6 MPa), TH (18.7 MPa) y TP (16.7 MPa) logran un 90.9, 86.7 y un 99.2 % de la resistencia de la muestra de control (sin ceniza volante). Por otro lado, un comportamiento similar se observa al comparar las muestras con ceniza volante, pero con una mayor relación agua/cemento (0.45) (muestras M4). En este caso, la ceniza volante a edades tempranas logró en promedio una reducción menor respecto a la muestra de control logrando un 93.9 % de la resistencia a 7 días de curado lo cual se mantiene hasta los 90 días de curado pero que a 180 días logra solo un 2.9 % menos de resistencia respecto a su similar sin ceniza volante. En este contexto, la incorporación de ceniza volante es una opción viable ya que permite obtener resistencias superiores al 75 % respecto a la muestra de control [33]. Además, esta puzolana podría reducir los índices de impacto ambiental del material por el uso de un residuo industrial y por la disminución del uso de cemento [65]. Es importante realizar estudios que puedan determinar el carácter de sustentabilidad de los materiales que incorporen cementantes suplementarios como reemplazo parcial o total del cemento y materias primas alternativas como en este caso (por el uso de Sargazo), ya que se requiere considerar otras variables como las distancias de transporte por las fuentes puntuales de extracción de estos recursos o los procesos involucrados en el procesamiento requerido de estas materias primas [44,59,104,107].

Al estudiar la influencia de la relación agua/cemento (comparando las muestras M1 con M3 y M2 con M4) se obtuvo que una mayor inclusión de agua reduce la resistencia final a todas las edades de curado estudiadas [62,100], sin embargo, esta diferencia es constante en el tiempo siendo en promedio de  $79.29 \pm 0.7$  % cuando el cementante no incluye ceniza volante y de  $80.47 \pm 3.4$  % cuando se incluye el reemplazo volumétrico. Si evaluamos el efecto de los tratamientos en la resistencia de la muestra, el tratamiento con  $\text{Ca(OH)}_2$  al ser comparado con las muestras ST no presenta una reducción significativa en la resistencia a la compresión.

La Figura 52 muestra los resultados de la resistencia a la compresión y la conductividad térmica de las muestras a 28 días de curado. Como se observa la muestra sin tratamiento y con el tratamiento a base de  $\text{Ca(OH)}_2$  obtuvieron los mejores resultados de resistencia a la compresión, sin embargo, el tratamiento con cal permite valores más bajos de conductividad térmica, por lo tanto, podría considerarse como el más prometedor para obtener un compuesto final con buenas prestaciones de aislación térmica para su uso en construcción. Los demás tratamientos, si bien tienen buenas capacidades de aislación respecto a un mortero convencional, los valores de resistencia permitirían una menor inclusión de bioagregado para efectos de escalamiento del material, lo cual sería desventajoso en el intento de reducir la conductividad térmica final.

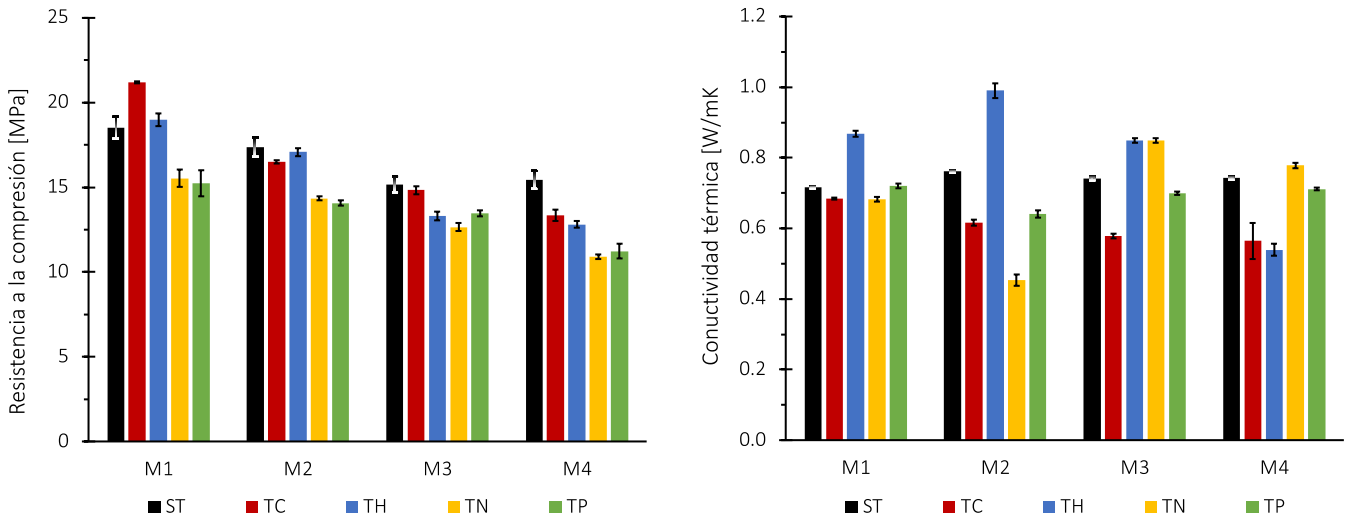


Figura 52 - Resultados de la evaluación de tratamientos a 28 días de curado

La Figura 53 muestra el análisis EDS sobre la superficie de una muestra del agregado de Sargazo TC. En este caso, se observan nódulos asentados en la superficie de la fibra, los cuales son ricos en calcio [118,163]. Estos residuos tienen una doble consecuencia en el material compuesto. Por un lado, bloquean la porosidad del agregado reduciendo la capacidad de absorción de agua como se observa en la Figura 47, y por otro lado sirve como recurso para adelantar la reacción de activación de la ceniza volante a edades tempranas de curado en comparación a cuando es activada solo con la portlandita resultante de la reacción de hidratación del CPO. Se ha reportado que las pectinas son capaces de fijar cationes metálicos divalentes en su estructura molecular, y, por lo tanto, con los iones de calcio forman estructuras estables que al momento de ingresar a la mezcla y en presencia de la ceniza volante mejoran los resultados de resistencia del concreto vegetal, explicando los resultados obtenidos [29,69].

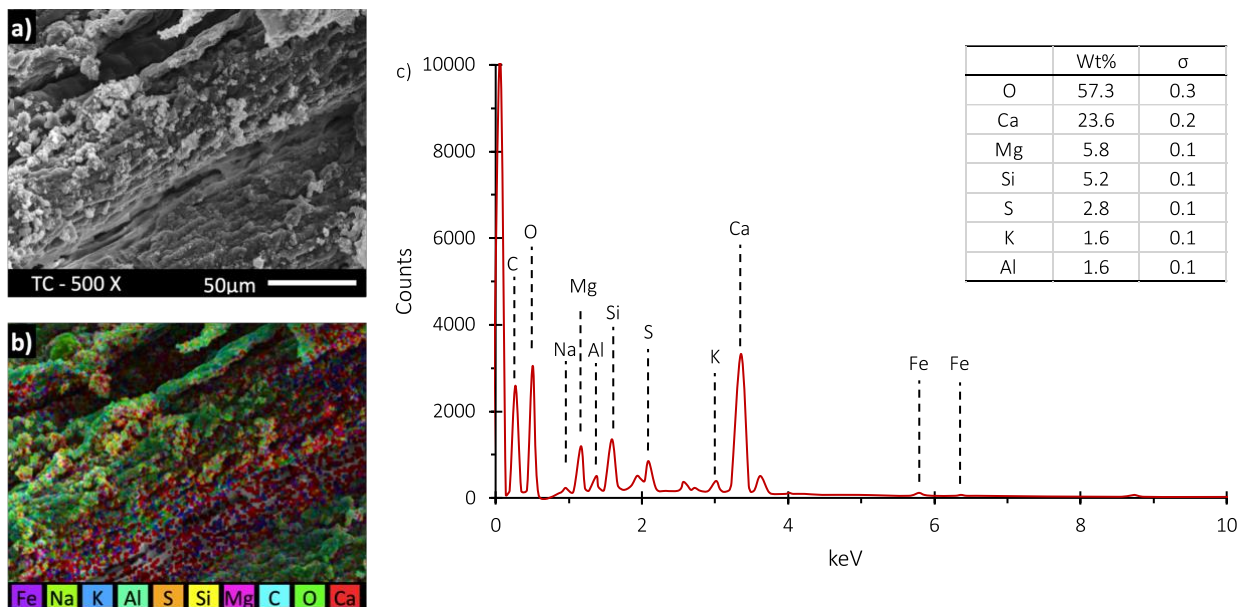


Figura 53 - EDS sobre la fibra de Sargazo posterior al tratamiento TC

Los resultados de conductividad térmica del concreto vegetal TC, oscilan entre 0.685 W/mK a 7 días y 0.565 W/mK a 180 días de curado, siendo una reducción de hasta un 23.9 % respecto a las muestras ST. Esta diferencia se puede atribuir a que éste posee una menor adhesión de la fibra con la matriz debido a la mineralización y posterior degradación del agregado lo que se muestra en la Figura 54 (c y f), donde se observa un desprendimiento en la zona interfacial de entre 40 y 60  $\mu\text{m}$  que aumenta el contenido de aire del compuesto.

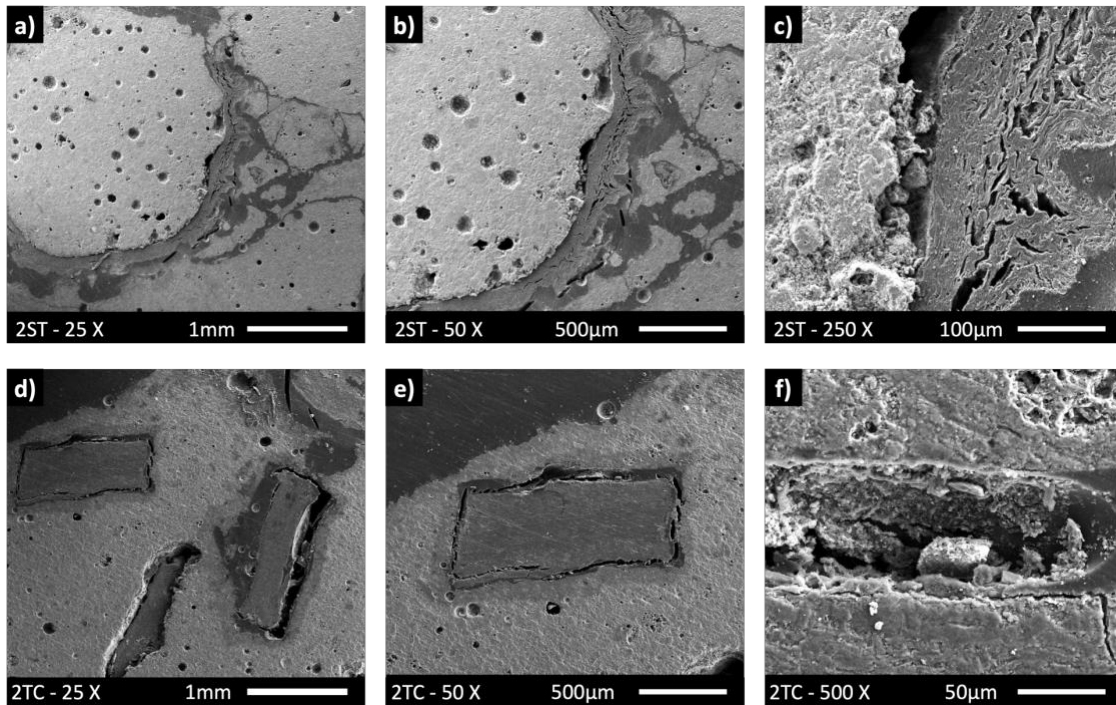
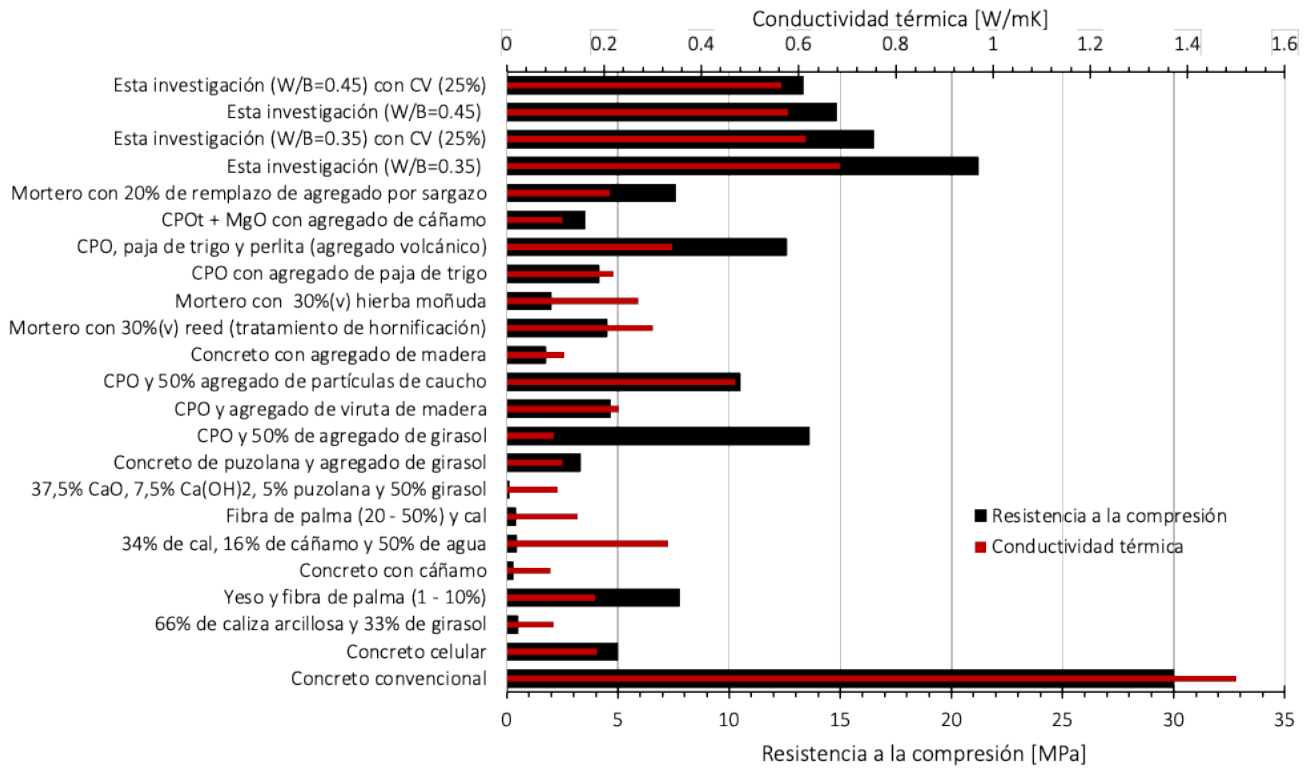


Figura 54 - Micrografía del concreto vegetal estudiado. a y b) Concreto vegetal ST; c y d) Concreto vegetal TC

Al comparar los resultados obtenidos de la muestra TC (M1-4) a 28 días de curado, vemos que los resultados de conductividad térmica son superiores a los reportados en la literatura para otros concretos vegetales expuestos en la Figura 55 (con diferentes agregados y cementantes) [5,13,20,24,26,33,69,89,91,149,155,156,166,168,227], y lo mismo sucede con la resistencia a la compresión. A pesar que la capacidad aislante del material en las 4 dosificaciones permite una reducción de entre un 54.3 % (0.685 W/mK) y un 62.3 % (0.565 W/mK) respecto a la conductividad reportada para un concreto convencional (1.5 W/mK [20,26,165]), se observa que el valor de resistencia es aún muy superior a los 2 MPa recomendados [26], lo que sugiere que la incorporación de un mayor volumen de agregado permitiría reducir aún más su conductividad térmica sin comprometer la resistencia.



**Figura 55 - Resultados de conductividad térmica y resistencia a la compresión de concretos vegetales**

La Figura 56 muestra los patrones de DRX de la muestra TC-M2 a 7, 28 y 90 días (escogida por los buenos resultados de resistencia a la compresión, Figura 52). Los patrones muestran a la Portlandita como el principal producto de hidratación con una intensidad similar a 7 y 28 días en  $2\theta = 17.9^\circ, 28.2^\circ, 34.1^\circ, 47.02^\circ$  y  $50.8^\circ$ , lo cual se puede explicar con qué a edades tempranas se ve reflejado el calcio introducido de manera directa por el tratamiento respectivo, sin embargo, a medida que avanza el tiempo de curado, este compuesto comienza a ser consumido por la reacción de la ceniza volante pero al mismo tiempo se comienza a producir portlandita como subproducto de la hidratación del cemento Portland [63,96]. A edades más avanzadas se sigue consumiendo este compuesto disminuyendo la intensidad de los picos a 90 días. Por otro lado se observan los picos asociados a silicatos de calcio en  $2\theta = 32.1^\circ, 33.2^\circ, 37.5^\circ$  y  $41.3^\circ$ , presentes en el patrón a 7 días con una baja intensidad y que van disminuyendo hasta desaparecer conforme aumenta el tiempo de curado [220,228].

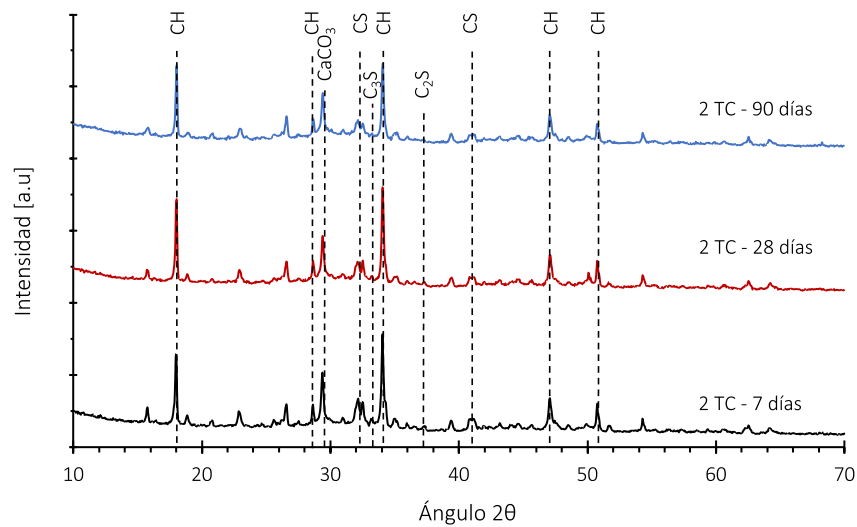


Figura 56 - DRX en la pasta de cemento (CH: Portlandita; CS: Silicatos de calcio;  $\text{C}_3\text{S}$ : Alita;  $\text{C}_2\text{S}$ : Belita)

La Figura 57 muestra el resultado de la prueba de FTIR sobre las muestras TC-M2 a 7, 28 y 90 días de curado. En primer lugar, se observa un pico a los  $\sim 450 \text{ cm}^{-1}$  característico del  $\text{C}_3\text{S}$  en el Clinker el cual se debilita gradualmente con la extensión del tiempo de curado lo que indica que la reacción de hidratación se llevó a cabo generando C-S-H. Se observa a los  $650 \text{ cm}^{-1}$  un leve pico característico de  $\text{C}_4\text{AF}$  que permite inferir la baja existencia de sulfoaluminatos de calcio hidratado en el tiempo [95]. El fuerte pico a  $\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$  está asociado a vibraciones de estiramiento asimétrico Al-O y Si-O y es la huella de la geopolimerización [103]. El pico de la banda  $1150 \text{ cm}^{-1}$  es característico del yeso y se observa que va desapareciendo, siendo un indicio de la reacción del CPO [95]. Se observa una vibración de flexión de H-O-H a los  $1600 \text{ cm}^{-1}$ . Por último se observa que la banda a los  $3640 \text{ cm}^{-1}$  corresponde a la vibración del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que se mantiene a los 7 y 28 días de curado (asociado a la cal que se introdujo por la impregnación de la pared celular del Sargazo, y por la reacción de hidratación del CPO); que se reduce a 90 días debido a que reacciona con la CV [95,103,182].

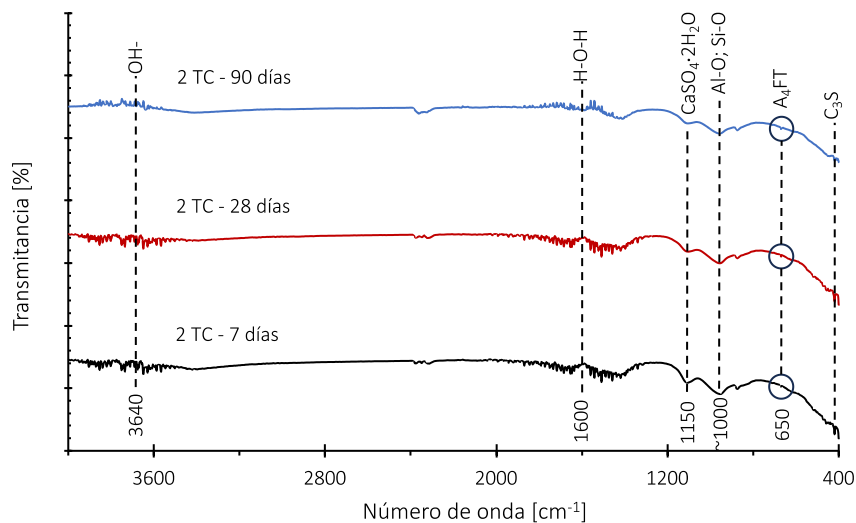


Figura 57 - Resultados del análisis FTIR sobre la muestra 2TC a 7, 28 y 90 días de curado



La Figura 58 muestra las curvas de análisis TGA de las muestras TC-M2 a 7, 28 y 90 días. Se observa tres caídas importantes de la masa siendo la primera comprendida entre los 50 y 250 °C asociada a la deshidratación de hidratos y aluminatos. En este caso se puede identificar un primer proceso que ocurre entre la temperatura ambiente y los 110 °C asociada al agua libre o evaporable y el segundo proceso asociado a la pérdida de agua laminar (adsorbida) y combinada que afecta al mono sulfato cálcico hidratado, tri sulfato cálcico hidratado y al aluminato cálcico hidratado [229]. Posteriormente se observa un segundo salto importante de masa entre los 400 y 500 °C asociada a la presencia de Portlandita, donde se expone que la variación de masa a 7 y 28 días es similar, sin embargo, a los 90 días no se observa una variación importante debido al agotamiento gradual de este compuesto por la reacción con la ceniza volante. Esto coincide con los resultados de la prueba de DRX y FTIR. Por último, se tiene un tercer salto de menor intensidad posterior a los 700 °C que se asocia a la descarbonatación del carbonato de calcio, desprendiendo a CO<sub>2</sub> en forma de gas [63,68].

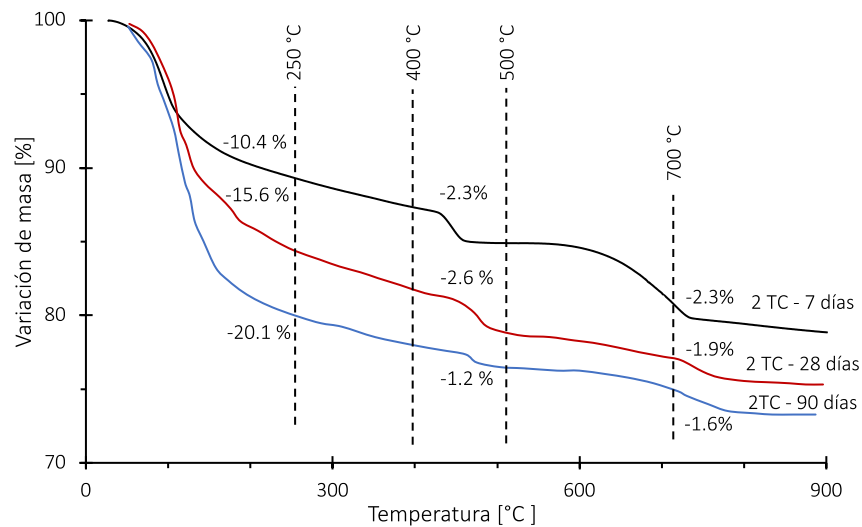


Figura 58 - Resultados de la prueba TGA sobre la muestra 2TC a 7, 28 y 90 días de curado

### 6.3. Resultados etapa III – Optimización del material compuesto

#### 6.3.1. Resultados del arreglo ortogonal

La Figura 59 muestra los resultados de las muestras hechas con bioagregado a base de Sargazo donde se identifican dos tipos de comportamiento respecto al uso de bioagregado. El primer comportamiento responde a un aumento continuo de la resistencia conforme aumenta el tiempo de curado, lo cual se asocia a una densificación de la matriz debido a una mayor formación de productos de hidratación del cementante (cemento Portland y ceniza volante). Este comportamiento se observa en las muestras M1, M2, M5 y M8. Por otro lado, se tienen las muestras M3, M6 y M9 que experimentan un decrecimiento de las propiedades mecánicas después de los 7 días de curado asociado al agrietamiento interno que sufre el compuesto producto de la reacción de los sulfatos que contiene el bioagregado con los subproductos de hidratación del cemento Portland formando etringita responsable de generar tensiones internas y agrietamientos que a largo plazo reducen la capacidad resistente del compuesto.

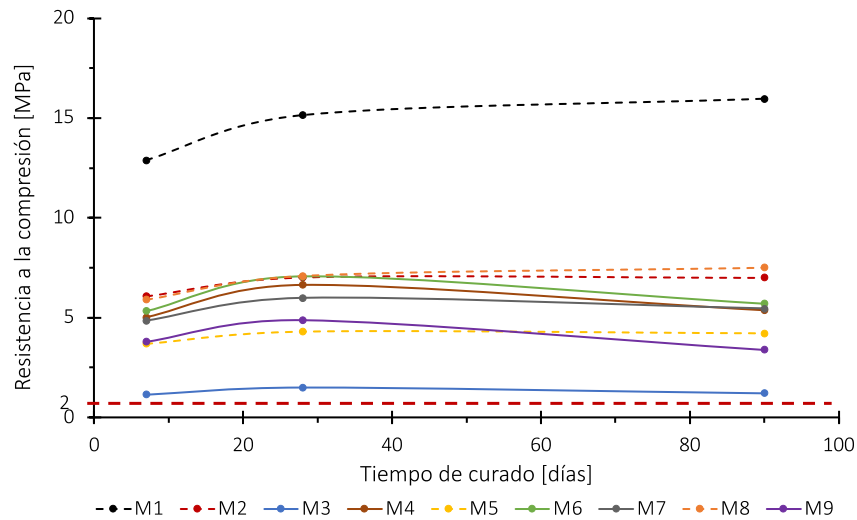


Figura 59 - Resultados del concreto vegetal con Sargazo

Además, se observa una correlación directa ( $R^2=0.642$ ) entre la densidad aparente y la conductividad térmica, lo cual muestra una dependencia entre las variables que es común entre los materiales de esta naturaleza [13,23,24,89,91,166]. Este mismo fenómeno se observa con la relación entre la densidad aparente y las propiedades mecánicas del compuesto donde se observa una correlación directa entre las variables y esto se produce por la porosidad de la pasta que permite una mayor o menor continuidad, y, por lo tanto, mejores prestaciones mecánicas [149,166].

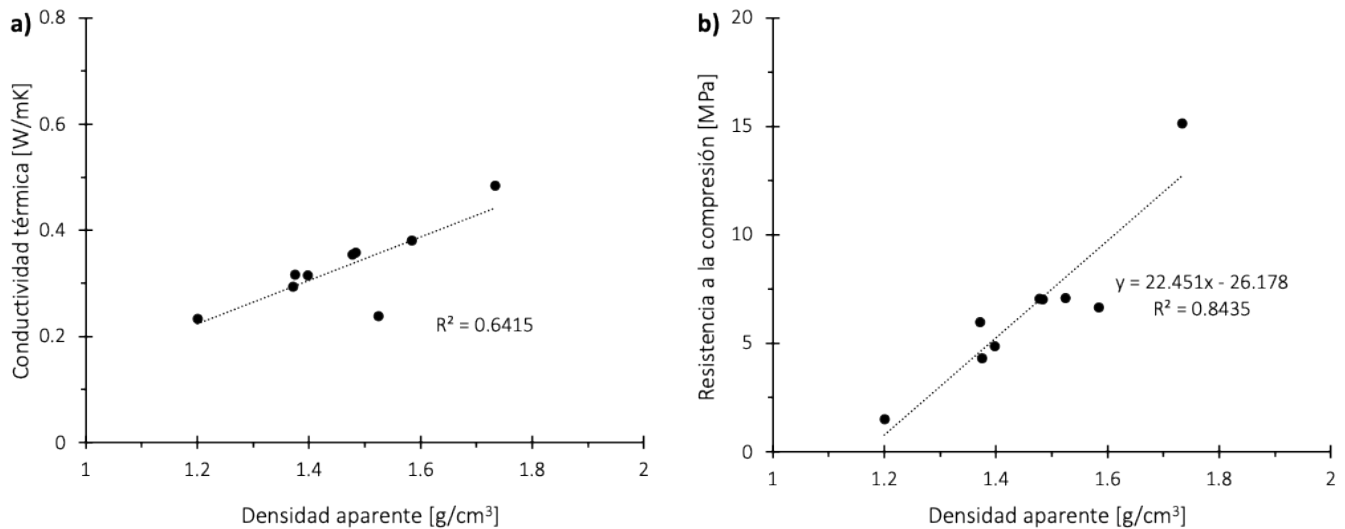
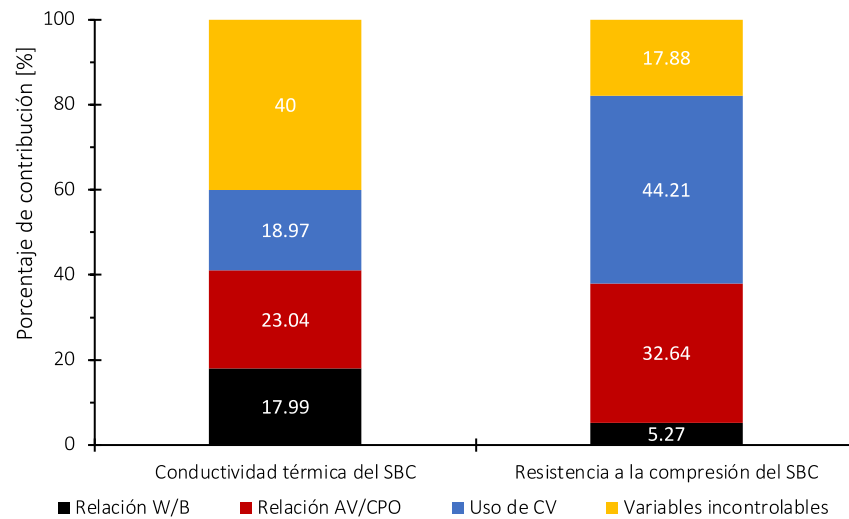


Figura 60 - Correlación entre a) densidad y conductividad térmica; b) densidad y resistencia a la compresión

### 6.3.2. Análisis de varianza

La Figura 61 muestra la contribución porcentual de las variables de entrada sobre la conductividad térmica y la resistencia a la compresión del concreto vegetal en estudio.





**Figura 61 - Porcentaje de contribución de cada variable a los resultados**

Los resultados demostraron que las tres variables de entrada contribuyen significativamente a predecir la conductividad térmica y a la resistencia a la compresión del concreto vegetal. La variabilidad de la conductividad térmica podía explicarse por las variables de entrada en un 60 % ( $F(3,23) = 11.51, p < 0.001$ ). En particular, la relación AV/CPO mostró la mayor contribución del 23.04 % ( $t = -3.64, \beta = -0.43, p < 0.01, 95\% \text{ CI}[-0.67, -0.18]$ ), seguida de las cenizas volantes, que contribuyeron en un 18.97 % ( $t = -3.30, \beta = -0.001, p < 0.01, 95\% \text{ CI}[-0.002, -0.0005]$ ), y la relación agua/cemento, que contribuyó en un 17.99 % ( $t = -3.22, \beta = -0.38, p < 0.01, 95\% \text{ CI}[-0.67, -0.18]$ ; ver Tabla 17 a). La resistencia a la compresión pudo ser explicada por las variables de entrada en un 82.12 % ( $F(3,23) = 35.24, p < 0.001$ ). En concreto, las cenizas volantes tuvieron la mayor contribución, representando el 44.21 % ( $t = -7.54, \beta = -0.11, p < 0.001, 95\% \text{ CI}[-0.14, -0.08]$ ), mientras que la relación AV/CPO representó el 32.64 % ( $t = -6.48, \beta = -25.03, p < 0.001, 95\% \text{ CI}[-33.02, -17.04]$ ) y el A/C a pesar de ser un predictor significativo contribuyó únicamente con el 5.27 % ( $t = -2.60, \beta = -10.06, p < 0.05, 95\% \text{ CI}[-18.04, -2.07]$ ; ver Tabla 17 b).

**Tabla 17 - Análisis de varianza**

**a) Conductividad térmica del concreto vegetal a base de Sargazo**

Variable	Sum Sq	Mean Sq	F valor	Pr(>F)	Contribución [%]
Relación agua/cemento	0.03	0.03	10.35	0.003815 **	17.99
Relación AV/CPO	0.03	0.03	13.25	0.001367 **	23.04
Uso de Ceniza volante	0.03	0.03	10.91	0.003105 **	18.97

**b) Resistencia a la compresión del concreto vegetal a base de Sargazo**

Variable	Sum Sq	Mean Sq	F valor	Pr(>F)	Contribución [%]
Relación agua/cemento	18.22	18.22	6.79	0.01583 *	5.27
Relación AV/CPO	112.82	112.82	42.02	.293e-06 ***	32.64
Uso de Ceniza volante	152.78	152.78	56.91	.157e-07 ***	44.21

Signif. códigos: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

Los resultados del análisis estadístico muestran que las variables y rangos estudiados son significativos y validan el método utilizado. Esto significa que la relación agua/cemento, la relación AV/CPO y el uso de cenizas volantes en la mezcla afectan directamente a los resultados de las variables de respuesta (conductividad térmica y resistencia a la compresión). El análisis estadístico es importante a la hora de desarrollar hormigones vegetales. Nos permite adaptar el material a diferentes usos. Si es necesario, se puede optar por hacerlo más resistente, pero nosotros decidimos hacerlo más débil para mejorar su aislamiento térmico en muros. Esto puede aplicarse a todos los hormigones vegetales que se desarrollen, sean cuales sean sus materias primas, siempre que cumplan los requisitos mínimos.

Observando los resultados, se opta por la muestra M5 como la que cumple con los mejores estándares ya que cuenta con una resistencia a la compresión de 4.22 MPa (Figura 62). A los 28 días, la conductividad térmica era de 0.3163 W/mK, que disminuyó a 0.1727 W/mK a los 90 días. Esto se debe a la contracción de las fibras naturales y a la alcalinidad de la matriz.

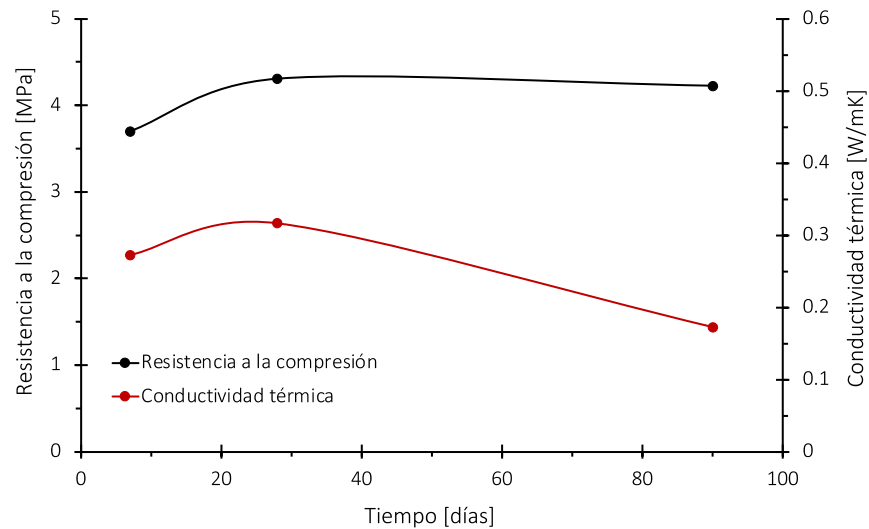


Figura 62 - Resultados de muestra M5 del concreto con Sargazo optimizado

Esto depende del tipo de fibra y de su tratamiento. La separación matriz-fibra en la zona interfacial entre 18 y 70  $\mu\text{m}$  (Figura 63) mejora la conductividad del composite al aumentar el contenido de aire y disminuir la densidad. [25,89].

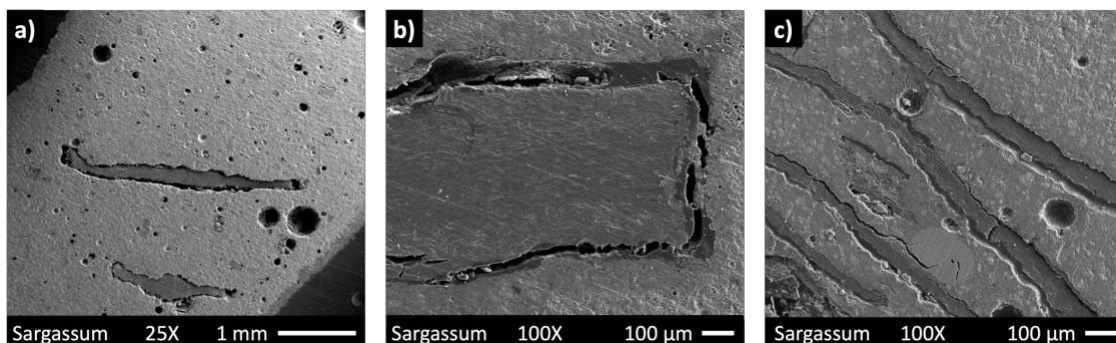


Figura 63 - Microscopía de muestras de concreto vegetal

### 6.3.3. Análisis microestructural

La Figura 64 muestra los espectros de DRX del concreto vegetal (pasta de cemento) analizados a 28 días de curado. Se identificaron tres compuestos principales correspondientes a silicato cálcico hidratado (CSH) y portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) como resultado de la hidratación del cemento Portland y silicato de calcio y aluminio (CAS) correspondiente a la reacción de la ceniza volante que en presencia de la portlandita como sub producto de la hidratación del CPO o por su inclusión directa por el tratamiento sobre el Sargazo [68,230].

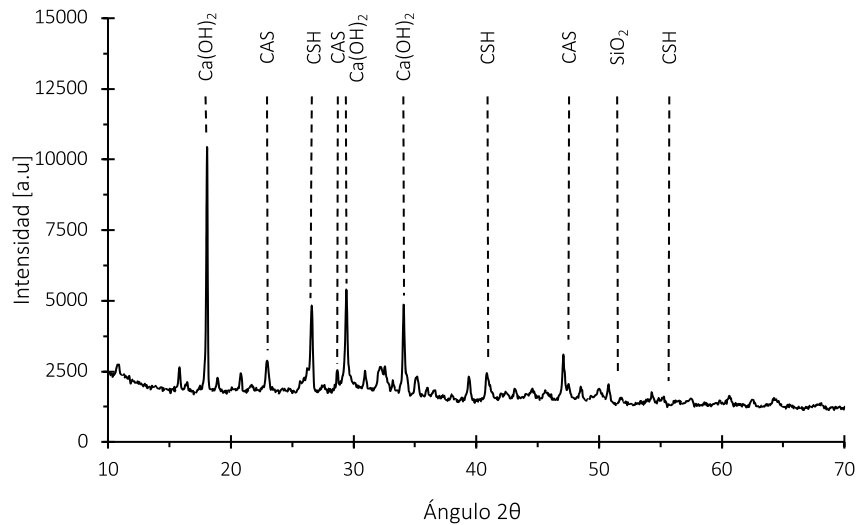


Figura 64 - Espectro DRX de la pasta de cemento

La Figura 65 muestra el análisis de FTIR de la muestra. Se identifican picos por encima de  $3400\text{ cm}^{-1}$ , correspondientes a bandas OH- asociadas con  $\text{Ca(OH)}_2$  y agua. A  $947\text{ cm}^{-1}$ , se observan picos debidos a la reacción  $\text{SiO}_4^{2-}$  durante la formación del gel CSH y la geopolimerización [103]. También se identificaron modos vibracionales a los  $2355$  y  $1420\text{ cm}^{-1}$  relacionados con la presencia de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CO}_3$  respectivamente, que deberían ir decreciendo en el tiempo por el progreso de la reacción [95,182].

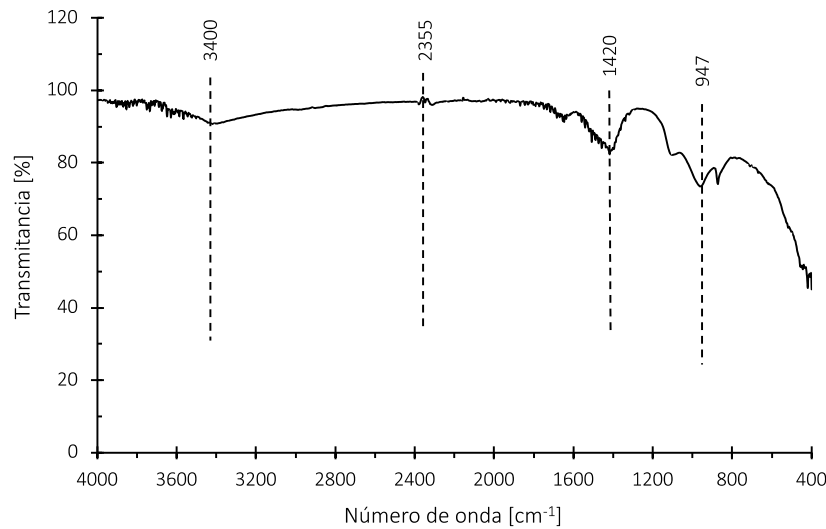


Figura 65 - FTIR de la pasta de cemento

## 6.4. Resultados etapa IV – Estudio ambiental y energético

Los dos bloques evaluados en este proyecto fueron estudiados en términos de impacto ambiental, donde se hizo énfasis en la categoría de impacto "calentamiento global" relacionada con la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La Figura 66 muestra la contribución porcentual a la producción de los dos bloques en estudio considerando la distancia promedio de transporte de las materias primas consideradas para el análisis en cada uno de los estados de la República Mexicana.

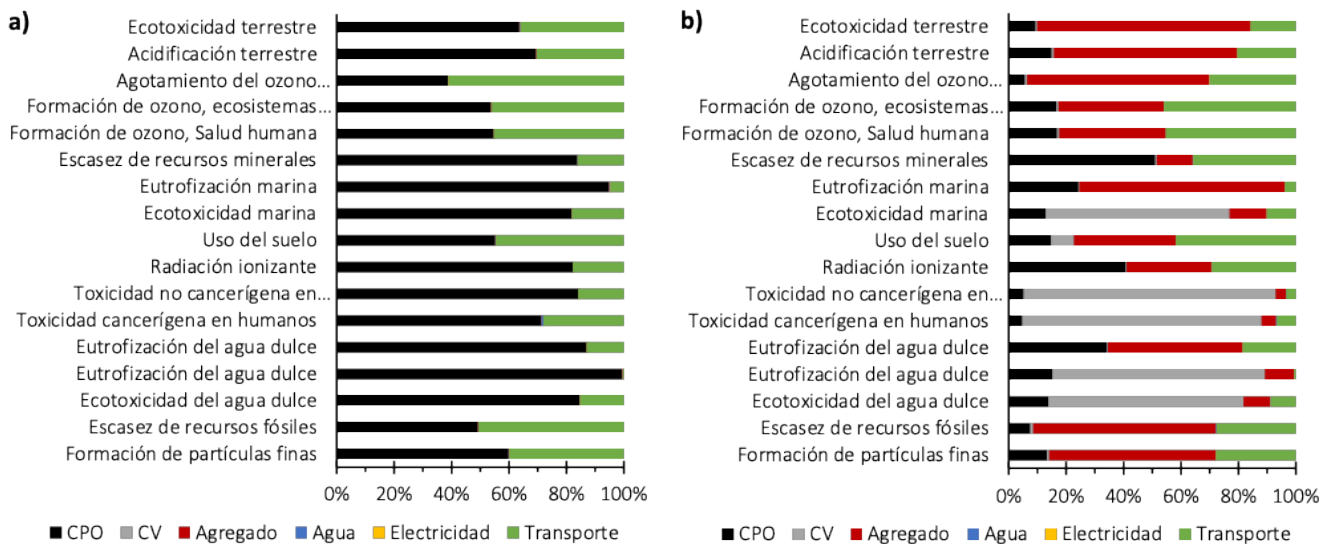


Figura 66 - Contribución relativa de las materias primas en las categorías de impacto. a) Bloque de CM. b) Bloque SBC

Se observa que en el caso de los bloques fabricados con mortero convencional (Figura 66 a), el transporte de materias primas tiene un impacto considerable, aunque la mayor contribución en casi todas las categorías está asociada al uso de cemento Portland debido al alto nivel de emisiones, así como al elevado requerimiento

energético en su proceso de producción. En cuanto a las contribuciones de los bloques de concreto a base de Sargazo (Figura 66 b), los resultados muestran que existe una mayor distribución de los impactos debido a que la diversificación de las materias primas es variable en función de la categoría. En este caso, el CPO utilizado tiene un papel menos importante porque se utiliza una cantidad menor por bloque, y el transporte (principalmente de Sargazo y cenizas volantes) y la producción de áridos a base de Sargazo es lo más relevante. Esto puede explicarse por el hecho de que las fuentes de extracción de Sargazo y cenizas volantes se encuentran en los extremos del país y no permiten un acceso fácil a todos los estados.

Utilizando el método de laboratorio empleado en el desarrollo del material, la producción de concreto a base de Sargazo (SBC) tiene una huella de carbono de 3.7 kg CO<sub>2e</sub>/bloque, aproximadamente un 50 % superior a la del mortero convencional (CM) (Figura 67). El principal responsable de este mayor impacto es el consumo de electricidad en el proceso de secado en horno, un proceso necesario para mejorar la compatibilidad de las materias primas y obtener los mejores resultados de resistencia a la compresión y conductividad térmica [69], pero responsable de 1.76 kg CO<sub>2e</sub>/bloque (equivalente al 47 %).

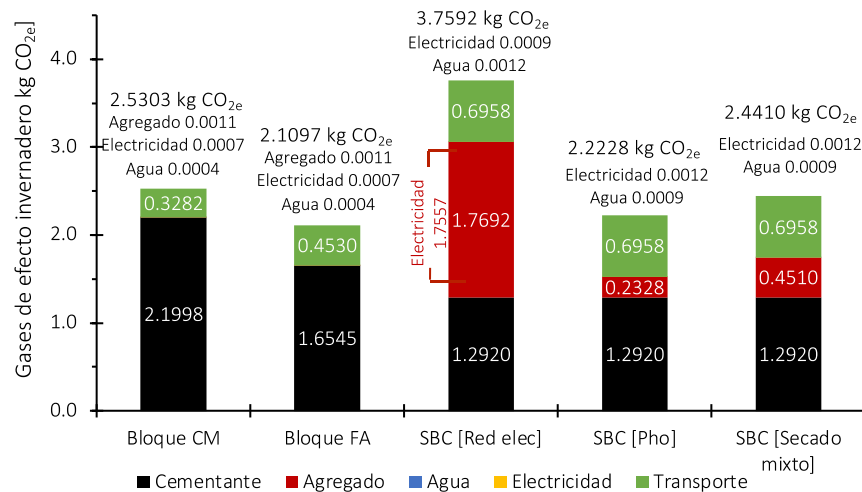


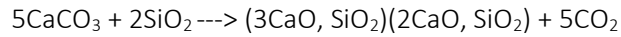
Figura 67 - Contribuciones a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en bloque de mortero convencional (CM), bloque de ceniza volante (FA), bloque de concreto a base de Sargazo utilizando el método de laboratorio reportado (SBC [Power grid]), bloque de concreto a base de Sargazo utilizando electricidad fotovoltaica (SBC[pho]), y bloque de concreto a base de Sargazo utilizando métodos de secado mixto (SBC [Mix dry]).

Nuestra estimación de las emisiones de GEI por bloque de CM es de 2.53 kg CO<sub>2e</sub>, cerca del límite superior de los informes de la literatura (1.41 – 2.56 kg CO<sub>2e</sub>) y superior a los puntos de referencia comerciales de la base de datos Ecoinvent (0.737 – 1.705 kg CO<sub>2e</sub>) [64,231,232]. Consideramos que la diferencia es razonable debido a las dosificaciones específicas de cada material especialmente influenciadas por el contenido de cemento (responsable de entre 0.8 y 0.85 kg CO<sub>2e</sub>/kg [233]) y algunas condiciones específicas en México, como mayores distancias de transporte de materias primas y mayores emisiones de GEI para la producción de CPO debido a la matriz energética de la red mexicana [234].

La producción de cemento Portland contribuye a las emisiones de CO<sub>2e</sub> de dos maneras: a través del proceso de fabricación y a través de la reacción para obtener los subproductos que producen el cemento. La fabricación del cemento Portland requiere la combinación de materiales minerales: 60 % de calcio obtenido de la piedra caliza

(CaCO<sub>3</sub>), 20 % de silicio, 10 % de aluminio, 10 % de hierro y pequeñas cantidades de otros minerales, que se calientan en un horno rotatorio a más de 1500 °C para convertirse en Clinker. Debido a la alta temperatura requerida, el horno es el mayor consumidor de energía en el proceso de fabricación del cemento [62,77]. Una de las fuentes corresponde al uso de electricidad debido a que gran parte de la matriz energética de México se obtiene de la quema de combustibles fósiles [208]. Se estima que, del total de emisiones, la mitad están asociadas al uso de energía y la otra mitad a la calcinación de la piedra caliza y sílice donde tiene lugar la Ecuación 9.

Ecuación 9



Esta reacción produce aproximadamente 597 kg de CO<sub>2e</sub> por cada tonelada de cemento producida. Además, se producen 0.4 toneladas de CO<sub>2e</sub> debido a la quema de combustible para la producción de energía. En otras palabras, se estima que por cada tonelada de cemento se libera al medio ambiente 1 tonelada de CO<sub>2e</sub>, por lo que su uso se asocia a indicadores de alto impacto ambiental [6]. La huella de carbono del SBC puede reducirse significativamente mediante la adopción de procesos de secado energéticamente eficientes, por ejemplo, energías renovables (por ejemplo, fotovoltaica), y secado al aire libre, lo que reducirá las emisiones de GEI por bloque de SBC a 2.22 kg CO<sub>2e</sub> y 2.44 kg CO<sub>2e</sub> respectivamente (Figura 67). Estas optimizaciones harían al SBC más eficiente en carbono que el CM, pero seguiría siendo superior al bloque de cemento de ceniza de mosca Portland (FA), una alternativa ampliamente reportada al CM [6,68,104,107,109] con una huella de carbono de 2.11 kg CO<sub>2e</sub>. La diferencia clave entre el SBC optimizado y el FA es el transporte, que contribuye con 0.69 y 0.45 kg CO<sub>2e</sub> respectivamente (Figura 67). Esto se debe a que las fuentes de *Sargassum fluitans* se encuentran a lo largo de la costa este de México y no permiten un fácil acceso a todos los estados. La Figura 67, muestra la distancia transportada utilizando las ubicaciones reales de las fuentes de Sargazo y cenizas volantes en México. En promedio, el Sargazo, que está disponible a lo largo de la costa atlántica, necesita ser transportado un promedio de 731.6 km, variando de 43.2 km en Yucatán a 2325 km en Baja California. Las cenizas volantes, que tienen dos lugares de extracción en Coahuila y el estado de Guerrero, necesitan ser transportadas una media de 890 km, variando entre 305 y 1920 km. Las demás materias primas, cemento Portland, arena y agua, están disponibles en todo México.

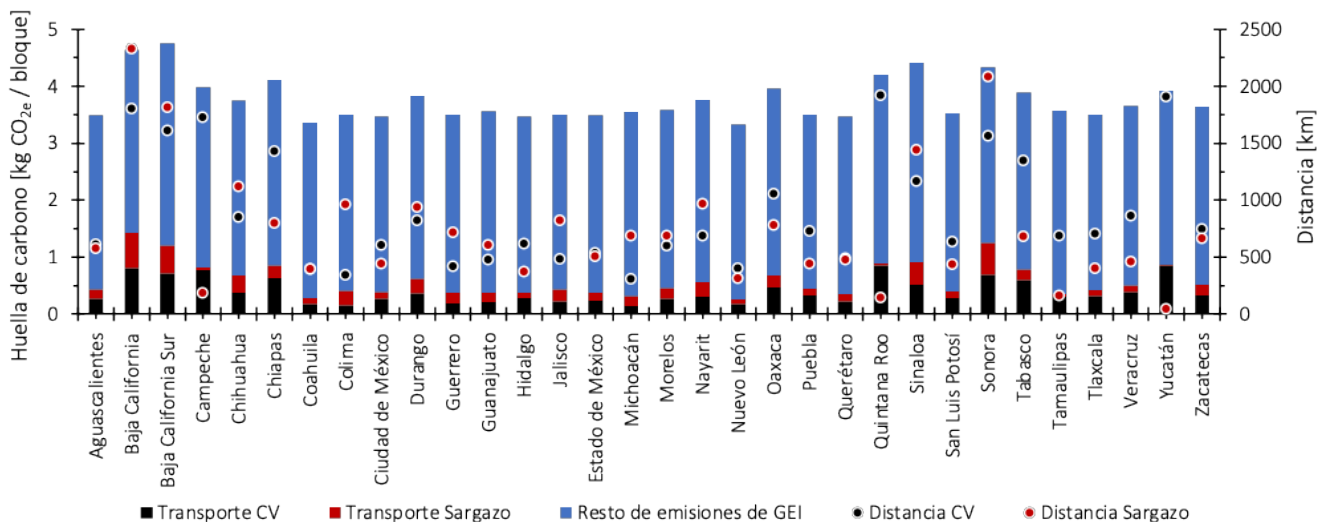
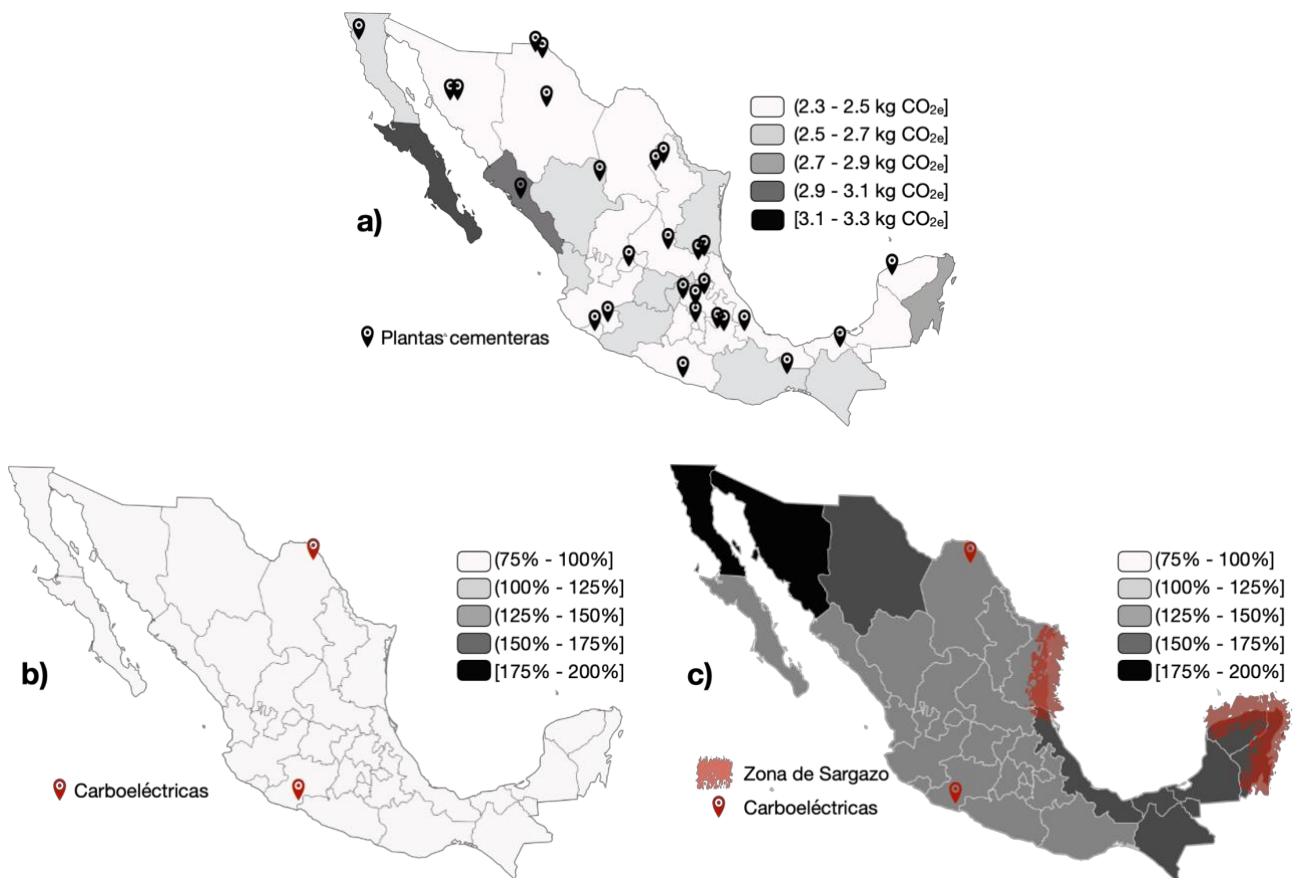


Figura 68 - Emisiones de GEI por bloque en cada estado con base en la distancia de transporte del Sargazo y la CV

La delimitación espacial (Figure 69) muestra que la producción de bloques FA tiene sistemáticamente menores emisiones de GEI que la de bloques CM en todo México, mientras que la producción de bloques SBC tiene menores emisiones de GEI en el centro de México sólo si se utiliza el proceso de secado de mezcla energéticamente eficiente. El principal impulsor de la variabilidad regional es el impacto del transporte, principalmente el transporte de cemento Portland. Con bloques CM, los estados de Baja California Sur y Sinaloa tienen impactos ~ 25 % más altos que el promedio nacional de 2.53 kg CO<sub>2e</sub> (Figure 69 b). Con bloques SBC, la Península de Yucatán (sureste) y los estados del noroeste podrían tener impactos 88 % más altos que el promedio nacional usando los métodos de secado actuales (Figure 69 c), y la diferencia porcentual persiste con un secado mejorado (Figure 69 d-e).





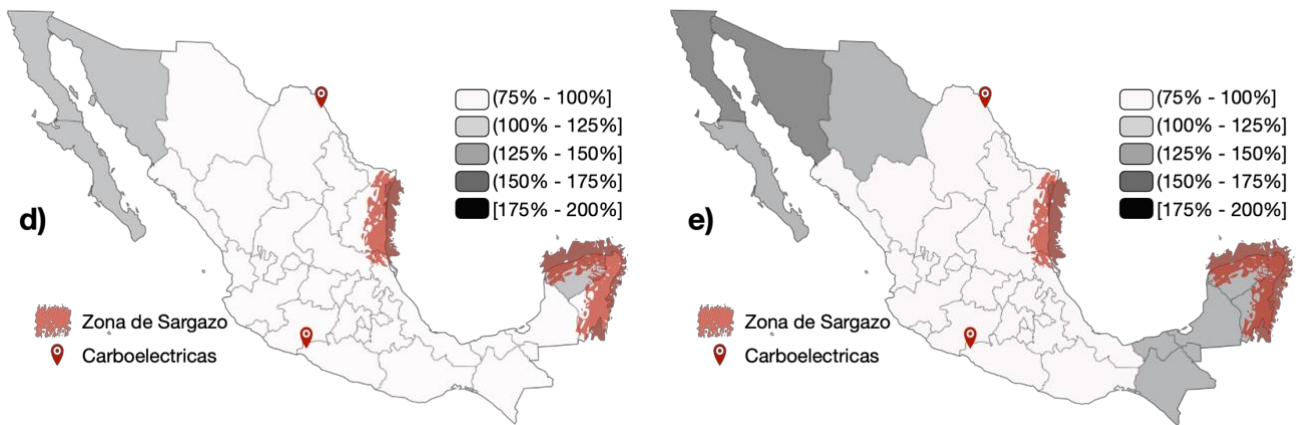


Figure 69 - a) Emisiones de GEI por bloque de CM para cada estado de México (kg CO<sub>2e</sub>); b) Emisiones de GEI usando AF como reemplazo parcial de OPC (25% v/v) como porcentaje del bloque de CM; Emisiones de GEI por bloque de SBC como porcentaje del bloque de CM usando c) la red eléctrica actual, d) energía fotovoltaica, y e) un proceso de secado mixto más eficiente energéticamente

La Figura 70, muestra los resultados de emisiones de un bloque fabricado con mortero convencional (CM) comparado con el bloque FA y los bloques fabricados con árido a base de Sargazo (SBC) en tres escenarios que se han estudiado para el proceso de secado (variando la fuente de energía), pero también variando el lugar de fabricación y por tanto la distancia de transporte de las materias primas.

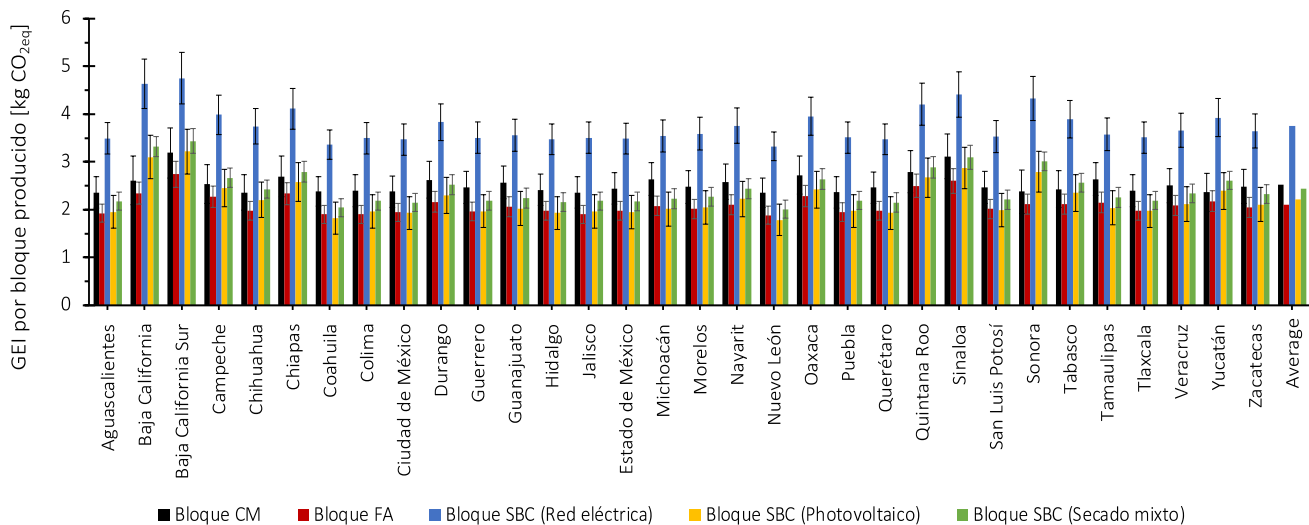


Figura 70 - Resultados por bloque para cada estado

Aunque la producción de bloques de SBC puede tener emisiones de GEI más elevadas en determinados estados, las casas hechas con bloques de SBC producen sistemáticamente ahorros de GEI en la fase de uso de 50 años. Una casa residencial típica hecha con bloques CM tiene una demanda energética entre 47.6 y 211.3 kWh/m<sup>2</sup>/año correspondiente a los estados de Guerrero y México respectivamente (Figura 71 a). El uso de bloques SBC reduce la demanda energética en más de un 5 % en el 62.5 % de los estados de México (20 de 32 estados) afectando potencialmente a casi 80 millones de personas, obteniéndose los mayores beneficios en Campeche



(15.83 % menos), Quintana Roo (17.44 % menos) y Tabasco (15.74 % menos) (Figura 71 b). La variable depende de la ubicación, estableciendo una correlación directa con el clima [73,74,212]. En la Figura 71 c, se muestran los resultados de la demanda de energía HVAC para cada estado de la República Mexicana considerando los diferentes materiales de muros de la vivienda en estudio (bloques CM y bloques SBC).

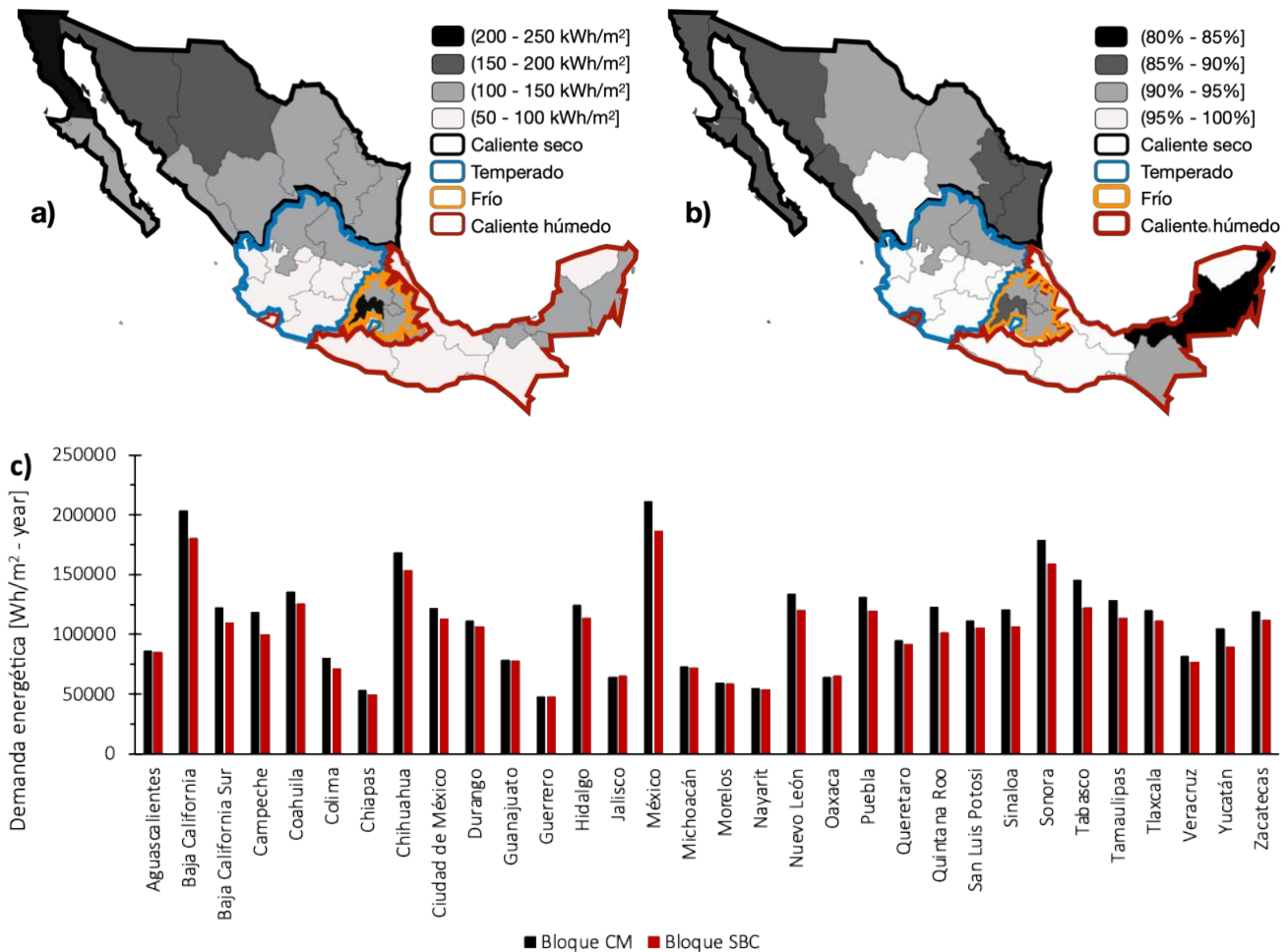


Figura 71 - a) Demanda anual de energía para una vivienda residencial típica en cada estado de México construida con bloques CM [kWh/m<sup>2</sup>-año]; b) Emisiones de GEI de edificios construidos con SBC como porcentaje de edificios construidos con bloques CM; c) Demanda energética de climatización para los materiales en estudio

A pesar de tener mayores emisiones de GEI en la fase de producción, las casas hechas con bloques de SBC pueden lograr menores emisiones de GEI en el ciclo de vida en 47 % de los estados de México, con años de equilibrio entre 2.15 y 8.18 años en comparación con las casas hechas con bloques de CM (Figura 71 c). Es importante notar que en nuestra estimación, la producción de bloques contribuye con un promedio de 4.09 % de las emisiones totales en el ciclo de vida de la construcción, confirmando hallazgos previos de que la fase de uso es el impulsor de las emisiones de GEI de la construcción [14].

El clima frío presenta los mejores resultados de ahorro de emisiones de GEI con una media de 11.74 toneladas, grupo en el que el Estado de México obtiene los mejores resultados con un ahorro de 25.89 toneladas de CO<sub>2e</sub> y un

punto de equilibrio de 2.15 años. La relevancia de los resultados radica en que las temperaturas en esta zona del país son inferiores a 21 °C durante el 75 % del año, siendo dependientes de la energía de calefacción.

Para los climas cálido seco y cálido húmedo, el ahorro en emisiones de GEI es de una media de 7.8 y 6.26 toneladas de CO<sub>2e</sub> respectivamente. Sin embargo, en ambos casos, existe una mayor variabilidad de los resultados con algunos estados donde los mejores resultados se observaron en Quintana Roo (21.52 toneladas menos), Baja California (22.3 toneladas menos) y Campeche (18.59 toneladas menos). Por otro lado, los estados de Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Oaxaca, Tabasco, Guerrero, Yucatán y Veracruz muestran resultados no significativos (menos de 2.5 toneladas de CO<sub>2e</sub>) con puntos de equilibrio después de 50 años de vida útil. Para estas zonas climáticas de México, los impactos están asociados a que en el norte del país existe un clima cálido árido con temperaturas entre 27 y 38 °C durante el 50 % del año y superiores a 39 °C entre el 10 y el 20 % del tiempo, por lo que la mejora en el aislamiento térmico de los muros produce un ahorro medio en la demanda energética del 9.8 %. La península de Yucatán tiene un clima cálido húmedo con temperaturas entre 21 y 27 °C el 40 % del tiempo y por encima de 38 °C el 40 % del año, lo que se refleja en una mejora media de la demanda de energía para HVAC del 10.21 %.

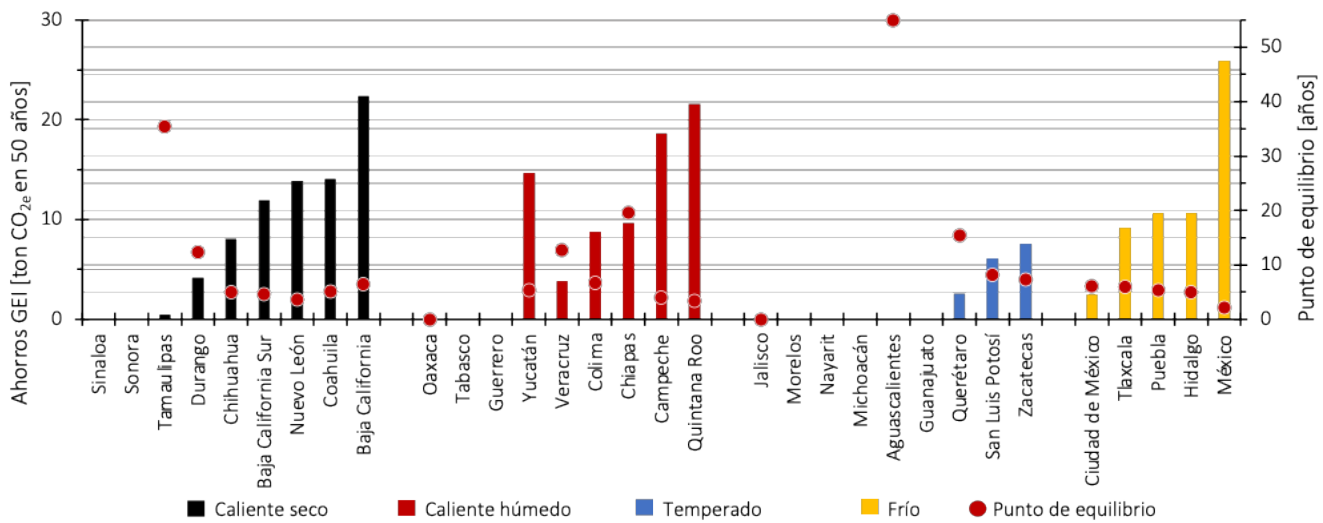
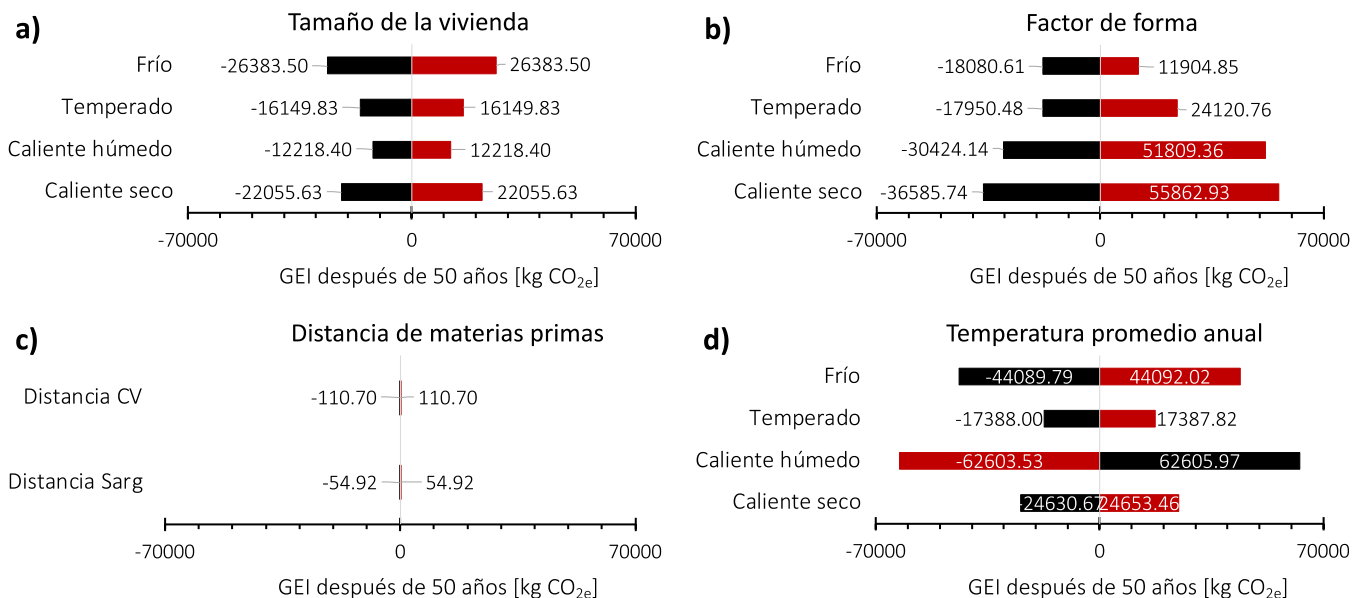
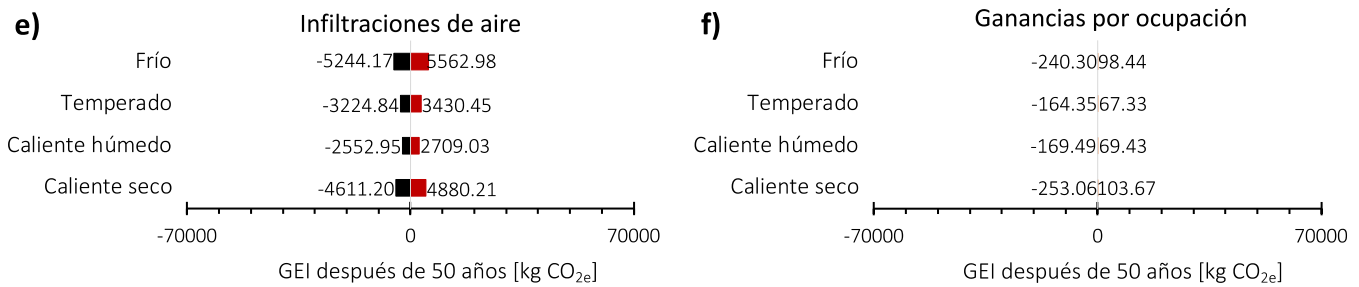


Figura 72 - Ahorros de GEI a lo largo del ciclo de vida del edificio (50 años incluyendo la producción de bloques) y años de equilibrio entre el caso base (CM) y el caso de estudio (red eléctrica SBC)

Figura 73 presenta los resultados del análisis de sensibilidad, que examinó aspectos relacionados con el diseño del edificio (Figura 73 a y b), la ubicación (Figura 73 c y d) y los parámetros de modelización (Figura 73 e y f). El análisis reveló que los aspectos relacionados con el diseño afectan en gran medida a las emisiones de GEI a lo largo del ciclo de vida del edificio, incluidas las fases de pre-uso y uso. El tamaño del edificio en las condiciones de estudio (Figura 73 a) afecta a la demanda energética entre un 15 y un 23 %, observándose una relación lineal en el rango de superficies estudiado. Por el contrario, el factor de forma (Figura 73 b) tiene un mayor impacto en los resultados, observándose más implicaciones en climas cálidos secos, y cálidos húmedos. Se observa que, para estos climas, un aumento del factor de forma (es decir, un aumento de la superficie expuesta del edificio en relación con el volumen) se traduce en un aumento de las emisiones del 45.3 % y del 64.2 %, respectivamente, en comparación con un aumento del 29.7 % y del 37.7 % cuando se reduce esta variable. En consecuencia, este fenómeno es análogo al crecimiento exponencial y debe considerarse como una vía potencial de ahorro energético en climatización, una

reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y una reducción de los costes de construcción (debido a una menor superficie de envolvente) sin afectar a la superficie útil de la vivienda. En cuanto a la ubicación del proyecto, la Figura 73 c) demuestra que la distancia de las materias primas tiene un impacto insignificante en los resultados de las emisiones de GEI, con una variación de entre el 0.05 y el 0.11 %. En consecuencia, la principal limitación en su uso son los aspectos económicos (costes de transporte). La temperatura media anual (Figura 73 d) es el parámetro que ejerce una mayor influencia en los resultados, sobre todo en el contexto de los climas más extremos (cálido, húmedo y frío). En el caso del clima cálido húmedo, existe una relación lineal positiva entre la temperatura y la demanda de energía para refrigeración. En cambio, para el resto de los climas, la relación es negativa, ya que un aumento de la temperatura se traduce en una reducción de la demanda energética debido a una aproximación al rango de confort térmico en la vivienda. Por último, los parámetros relacionados con las consideraciones del modelo tienen efectos que pueden ser considerables, sobre todo en el caso de las infiltraciones (Figura 73 e). Aunque los resultados muestran que la variación en las emisiones de GEI es de  $\sim 4\%$ , hay que tener en cuenta que el valor estipulado para este parámetro en el modelo base es  $n_{50} 11.8$  y se evaluó entre 8.85 y 14.75 ( $\pm 25\%$ ), lo cual es muy amplio si se compara con estándares como Passivhaus donde el límite máximo debe ser  $n_{50} 0.6$  o la normativa alemana que permite un valor máximo de 1.5 [235]. Por lo tanto, es imperativo aplicar medidas sobre este parámetro, dado que está supeditado a la finalización satisfactoria de las obras de construcción de la vivienda y al sellado de las juntas de construcción. Aunque esto representa un coste relativamente modesto en el contexto del presupuesto global de construcción, puede tener implicaciones significativas en términos de demanda energética, con incrementos potenciales de hasta el 35-35 % [236]. La carga ocupacional (Figura 73 f) de las viviendas de la gama estudiada no presenta un impacto considerable.





**Figura 73 - Gráfico de tornado que ilustra la sensibilidad de los resultados de las emisiones de GEI a tres factores clave: a y b) diseño del edificio (incertidumbre en el tamaño y el factor de forma); c y d) ubicación (incertidumbre climática y distancia de las materias primas); y e y f) parámetros de modelización (incertidumbre en la carga ocupacional y la infiltración)**

El afloramiento periódico de Sargazo en las costas del Atlántico mexicano ha sido un problema no resuelto que afecta a diversos sectores económicos (principalmente turismo y pesca), además de tener implicaciones para el ecosistema y la salud humana [30,31,41,82]. En 2018 se estimó que su peso vivo superaba los 20 millones de toneladas [31,32], cifra 10 veces superior al total de la pesca y maricultura nacional juntas [31,32]. Su uso como materia prima para producir áridos para la construcción podría contribuir a la gestión de este peligro medioambiental. Si se aumenta su escala, se podrían utilizar 586000 m<sup>3</sup> de Sargazo con base en el tamaño de mercado estimado de 323 millones de bloques de construcción anuales en México [237], equivalente al requerido para construir ~289000 viviendas al año. Actualmente, hay 35.2 millones de viviendas en México, con aproximadamente 300.000 nuevas viviendas construidas anualmente. El impacto potencial a largo plazo de la CTF podría permitir al país satisfacer su demanda de vivienda. Sin embargo, es importante considerar que el transporte es una limitante debido a los costos asociados. En consecuencia, la opción más factible es su uso en estados costeros con fácil acceso a las materias primas [210]. Cabe destacar que si se utilizara Sargazo para abastecer la producción anual de bloques en México, se aprovecharía una fracción del volumen total, que equivale a aproximadamente 248.7 km de playa de un total de 8850 km [31]. En consecuencia, es imperativo priorizar iniciativas de investigación que busquen diversificar la utilización de este recurso en grandes volúmenes para aplicaciones en la industria de la construcción, alimenticia y farmacéutica, entre otras [31].

La transición a materiales de construcción bajos en carbono es un tema crítico y oportuno en México. Dado que los edificios se construyen con una vida útil prevista de al menos 50 años, los efectos de la captura de carbono no son triviales, y el consumo de energía en el sector residencial mexicano se caracteriza actualmente por una alta dependencia de un consumo intensivo de combustibles fósiles [46]. El uso de Sargazo como material de construcción tiene el doble beneficio del secuestro biogénico de CO<sub>2e</sub> y del ahorro energético en el ciclo de vida de los edificios. Se calcula que cada tonelada de Sargazo absorbe 120 kg de CO<sub>2e</sub> [238], lo que equivaldría a 2.4 millones de toneladas secuestradas si se recogiera todo el Sargazo. Las casas residenciales construidas con bloques de SBC pueden aliviar el pico de consumo eléctrico de agosto, que se calcula que es ~ 5 TWh (~ 30 %) superior a la media de diciembre a marzo y representa un gasto anual de unos 1850 millones de dólares [18].

Si bien nuestro trabajo identifica la idoneidad del Sargazo como agregado alternativo, su ubicación podría limitar su adopción a los estados costeros debido a la escasa rentabilidad del transporte de larga distancia. Por lo tanto, se propone que el uso de Sargazo como agregado en la fabricación de bloques es una propuesta viable en estados susceptibles a la llegada periódica de este recurso, como Tamaulipas, Yucatán y Quintana Roo. Sin embargo, es necesario seguir investigando para determinar la distancia óptima de transporte dentro de un rango que no

comprometa la viabilidad económica de la industria y que al mismo tiempo garantice que la recolección y procesamiento de Sargazo a escala industrial no tenga efectos adversos sobre el turismo o el medio ambiente. Al mismo tiempo, otros residuos de biomasa, como el rastrojo de maíz (25.1 toneladas/año), el sorgo (7.3 toneladas/año) o el trigo (4.4 toneladas/año) [79], están ampliamente disponibles en México y podría merecer la pena investigarlos como alternativas. Es necesario prestar atención a la conductividad térmica del producto [154,239] para lograr los mayores beneficios de reducción de emisiones en el ciclo de vida, como se demostró en este estudio. Dada la amplia disponibilidad de biomasa, que ha demostrado la viabilidad de su uso en la industria de la construcción debido a la mejora de las propiedades de aislamiento térmico que imparte a los materiales compuestos, los estudios futuros deben seguir investigando materiales sostenibles, en particular los basados en fibras lignocelulósicas. Un ejemplo de la experiencia internacional es el desarrollo de materiales a base de girasol [26,29,166,168], cáñamo [5,23,29,69,156,169] o fibra de madera [20], entre otros, los cuales han generado un vínculo ciencia-industria, que a su vez ha sido apoyado por regulaciones de las dependencias gubernamentales correspondientes que les han permitido posicionarse como una solución real y viable en el mercado europeo en particular, y lo que se espera para los materiales que utilizan recursos locales en México. Los retos técnicos asociados a la utilización de diversas biomásas como agregados alternativos deben evaluarse caso por caso. Por ejemplo, cada fibra presenta una compatibilidad distinta en presencia de agentes cementantes minerales (matrices alcalinas), lo que influye en la durabilidad, la resistencia mecánica y el comportamiento higrotérmico del compuesto [173]. Los compuestos hidrosolubles de las fibras naturales pueden interactuar con el agua y ralentizar el proceso de hidratación del cemento, perjudicando sus propiedades de resistencia a la compresión [25,26,28,29,95,161,163,164,175,176]. Por este motivo, es importante investigar tratamientos que permitan obtener materiales compuestos con propiedades físicas equilibradas, es decir, con la menor conductividad térmica posible pero garantizando una resistencia de al menos 2 MPa [26].

## Capítulo VII – Conclusiones

El presente trabajo se enfocó en el desarrollo de un material compuesto a base de cemento Portland y ceniza volante con agregados vegetales a base de *Sargassum fluitans* disponibles en la costa atlántica de México. Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones para cada una de las etapas definidas en la metodología:

### Etapa I

De acuerdo con los resultados de caracterización de las materias primas se establece que la ceniza volante posee un grado de actividad puzolánica que permite su uso como material cementante suplementario como reemplazo parcial o total (requiriendo activación alcalina) del cemento Portland. En este estudio se requirió del cribado para descartar ~ 8 % de la materia prima para reducir el tamaño de partícula y eliminar carbón residual. El *Sargassum fluitans* corresponde a biomasa con una conductividad térmica de 0.041 W/mK, similar a las fibras naturales y convencionales usadas con aplicaciones de aislación en materiales de construcción, por lo tanto, este recurso tiene el potencial de ser considerado en el desarrollo de materiales de construcción que en su aplicación reduzcan la transmitancia térmica de elementos constructivos.

### Etapa II

El estudio de los tratamientos sobre el bioagregado permite establecer las mejores prestaciones de resistencia mecánica y de conductividad térmica del concreto vegetal. Se determinó que el tratamiento a base de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  obtuvo una resistencia mecánica de 21.19 MPa ( $a/c = 0.35$ ) y 14.84 ( $a/c = 0.45$ ) MPa sin el uso de ceniza volante y de 16.51 MPa ( $a/c = 0.35$ ) y 13.35 MPa ( $a/c = 0.45$ ) cuando se incorporó un reemplazo volumétrico del 25 % de CPO por ceniza volante. En este aspecto, el tratamiento es ventajoso debido a que se relaciona a una menor interacción del bioagregado en la reacción de hidratación del cemento Portland debido a la eliminación de extractos y a una aceleración en la reacción de la ceniza volante debido a la impregnación de la pared celular del Sargazo con calcio como consecuencia del tratamiento.

Los buenos resultados obtenidos de este tratamiento permiten la incorporación de un mayor volumen de bioagregado en el compuesto, lo cual podría resultar en una reducción aun mayor de la densidad y conductividad térmica del mortero desarrollado, para lo cual es necesario que se estudie una optimización de la dosificación para lograr las propiedades físico-mecánicas óptimas. Es importante destacar que las aplicaciones de este material no están pensadas en el soporte de cargas en la estructura, sino que en el mejoramiento de la envolvente térmica para reducir el consumo energético de climatización en viviendas.

### Etapa III

Los resultados demuestran que el concreto a base de Sargazo exhibió una conductividad térmica de 0.3163 W/mK. Cabe destacar que los valores mostraron una disminución de la conductividad térmica a mayor tiempo de curado, lo que puede atribuirse a la separación que se produce en la zona interfacial árido-matriz. El rango de valores obtenidos a partir del arreglo ortogonal y los resultados del análisis estadístico validan la metodología

empleada. La dosificación optimizada alcanzó una resistencia a la compresión a 28 días adecuada para su uso como material de construcción (superior a 2 MPa), manteniendo al mismo tiempo la conductividad térmica más baja posible. Este material puede utilizarse en aplicaciones no estructurales en el contexto de la vivienda, facilitando así la mejora de la envolvente térmica. Esto puede lograr reducir la transferencia de energía a través de las paredes, lo que a su vez se traduciría en un ahorro en aire acondicionado durante la fase operativa.

Las materias primas consideradas tienen fuentes de extracción específicas dentro del territorio, por lo que se recomienda que futuras investigaciones faciliten el desarrollo de materiales no convencionales que aprovechen los recursos locales de cada estado de México. Este enfoque es esencial para evitar cualquier aumento en los impactos ambientales debido al transporte, al tiempo que proporciona un uso para los residuos agroindustriales.

## Etapa IV

Se ha demostrado que el ACV corresponde a una herramienta adecuada para poder evaluar desde un punto de vista medioambiental los impactos asociados a la producción de materiales de construcción. En este caso, se ha identificado que la producción del bioagregado a base de Sargazo es de los principales contribuyentes al indicador de emisiones de gases de efecto invernadero debido al requerimiento energético para el proceso de secado. Frente a esto surge como opción la explotación de fuentes de energía no convencionales como la fotovoltaica o solar que permiten reducir el impacto ambiental de la producción del bioagregado de 1.7692 a 0.1316 o 0.2549 kg de CO<sub>2e</sub> respectivamente equivalente a menos de un 26 % del impacto generado al utilizar energía de la red eléctrica.

El transporte de las materias primas, principalmente el Sargazo y la ceniza volante, también representan a un aspecto importante que debe ser considerado, ya que, al ser materias primas con fuentes de extracción puntuales, el acceso de éstas a todos los estados del país se dificulta generando impactos excesivos. Esto puede revertirse si se diversifican las materias primas dando valor agregado a más recursos naturales distribuidos en todo el país y reduciendo las distancias que deben ser transportadas. A su vez, el cemento Portland puede ser reemplazado de manera total o parcial por aglutinantes minerales como el metacaolín, la ceniza volante, la ceniza de cáscara de arroz entre otras. El uso de geopolímeros para aplicaciones en construcción ha demostrado ser eficaz y menos contaminante que el cemento, sin embargo, aún es necesario ampliar la investigación en el área para reducir la incertidumbre que existe en cuanto a su uso y poder generar políticas públicas normativas locales que fomenten su uso en la construcción de viviendas.

De acuerdo con los resultados del estudio, se infiere que el aprovechamiento de recursos no valorizados en México permite la obtención de materiales de construcción más ecológicos que los convencionales, reduciendo la huella de carbono asociada a su producción y por lo tanto los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de una edificación. México cuenta con una amplia gama de residuos agroindustriales que pueden ser aprovechados como bioagregados para la fabricación de concretos vegetales que además otorgan propiedades físicas mejoradas relacionadas con el comportamiento ambiental, y por lo tanto, la importancia de la investigación en el área de los materiales alternativos minimiza la incertidumbre y fomenta la incorporación de aspectos de sustentabilidad y eficiencia energética en el rubro de la construcción en el país.



## Capítulo VIII – Referencias bibliográficas

- [1] H. Acevedo, A. Alejandro, V. Hernández, D. Alejandro, R. Cardona, Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia, *Gestión y Ambient.* 15 (2012) 105–118.
- [2] A.. Arena, C. de Rosa, Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza—Argentina, *Build. Environ.* 38 (2003) 359–368. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00056-2).
- [3] N. Chennouf, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, F. Bouras, Hygrothermal characterization of a new bio-based construction material: Concrete reinforced with date palm fibers, *Constr. Build. Mater.* 192 (2018) 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.089>.
- [4] M. Uceda-Rodríguez, J.M. Moreno-Maroto, C.J. Cobo-Ceacero, A.B. López-García, T. Cotes-Palomino, C. Martínez-García, Comparative Life Cycle Assessment of Lightweight Aggregates Made from Waste—Applying the Circular Economy, *Appl. Sci.* 12 (2022) 1917. <https://doi.org/10.3390/app12041917>.
- [5] B. Seng, C. Magniont, S. Lorente, Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties, *J. Build. Eng.* 24 (2019) 100540. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.016>.
- [6] N.M. Altwair, S. Kabir, Green concrete structures by replacing cement with pozzolanic materials to reduce greenhouse gas emissions for sustainable environment, *6th Int. Eng. Constr. Conf.* 1 (2010) 269–279. [https://www.academia.edu/download/41767953/GREEN\\_CONCRETE\\_STRUCTURES\\_BY\\_REPLACING\\_C20160130-30347-1kud6m3.pdf](https://www.academia.edu/download/41767953/GREEN_CONCRETE_STRUCTURES_BY_REPLACING_C20160130-30347-1kud6m3.pdf).
- [7] A.K. Mohanty, S. Vivekanandhan, J.-M. Pin, M. Misra, Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations, *Science* (80-. ). 362 (2018) 536–542. <https://doi.org/10.1126/science.aat9072>.
- [8] E. Hoxha, G. Habert, S. Lasvaux, J. Chevalier, R. Le Roy, Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability, *J. Clean. Prod.* 144 (2017) 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.068>.
- [9] J.P. Cárdenas, F. Fuentes, Energía contenida y ocupacional en tres viviendas mediante un Análisis de ciclo de vida simplificado, VI Encuentro Nac. e IV Encuentro Latino-Americano Sobre Edif. e Comunidades Sustentáveis. (2011).
- [10] F. Colangelo, A. Forcina, I. Farina, A. Petrillo, Life Cycle Assessment (LCA) of Different Kinds of Concrete Containing Waste for Sustainable Construction, *Buildings.* 8 (2018) 70. <https://doi.org/10.3390/buildings8050070>.
- [11] A.A. Al-Gheethi, Z.A. Memon, A.T. Balasbaneh, W.A. Al-Kutti, N. Mokhtar, N. Othman, M.I. Juki, E.A. Noman, H.A. Algaifi, Critical Analysis for Life Cycle Assessment of Bio-Cementitious Materials Production and Sustainable Solutions, *Sustainability.* 14 (2022) 1920. <https://doi.org/10.3390/su14031920>.
- [12] L.A. Vásquez Coraspe, Situación actual de la síntesis y utilización de geopolímeros, *Rev. Gac. Técnica.* 22 (2021) 23–38.
- [13] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, A. Gherabli, Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation, *Energy Build.* 66 (2013) 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.019>.
- [14] S. Amziane, M. Sonebi, Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate, *RILEM Tech. Lett.* 1 (2016) 31–38. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.9>.
- [15] C. Rojas Herrera, M. Cea Lemus, F.E. Rosas Diaz, J.P. Cardenas Ramirez, Physical, Chemical and Mechanical Characterization of a Prototype Insulating Material Based on Eucalyptus Bark Fiber, *IEEE Lat. Am. Trans.* 16 (2018) 2441–2446. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8789566>.
- [16] L. Liu, H. Li, A. Lazzaretto, G. Manente, C. Tong, Q. Liu, N. Li, The development history and prospects of



- biomass-based insulation materials for buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69 (2017) 912–932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>.
- [17] La climatización en el consumo nacional de energía, *Rev. Especificar.* (2016). <https://www.especificarmag.com.mx/la-climatizaci-n-en-el-consumo-de-energ-a--p1-.html> (accessed February 24, 2023).
- [18] M. McNeil, S. Castellanos, D. Ponce De Leon Barrido, P.A. Sánchez Pérez, Mexico space cooling electricity impacts and mitigation strategies, First Edit, United States Agency for International Development, Berkeley, USA, 2018.
- [19] J.P. Cárdenas, E. Muñoz, C. Riquelme, F. Hidalgo, Análisis de ciclo de vida simplificado aplicado a viviendas de paneles SIP (structural insulated panels), *Rev. Ing. Construcción.* 30 (2015) 33–38. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732015000100003>.
- [20] C. Becchio, S.P. Corgnati, A. Kindinis, S. Pagliolico, Improving environmental sustainability of concrete products: Investigation on MWC thermal and mechanical properties, *Energy Build.* 41 (2009) 1127–1134. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.013>.
- [21] N.K. Krishna, M. Prasanth, R. Gowtham, S. Karthic, K.M. Mini, Enhancement of properties of concrete using natural fibers, *Mater. Today Proc.* 5 (2018) 23816–23823. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.173>.
- [22] M. Ardanuy, J. Claramunt, R.D. Toledo Filho, Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research, *Constr. Build. Mater.* 79 (2015) 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>.
- [23] S. Benfratello, C. Capitano, G. Peri, G. Rizzo, G. Scaccianoce, G. Sorrentino, Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 745–754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>.
- [24] R. Belakroum, A. Gherfi, M. Kadja, C. Maalouf, M. Lachi, N. El Wakil, T.H. Mai, Design and properties of a new sustainable construction material based on date palm fibers and lime, *Constr. Build. Mater.* 184 (2018) 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.196>.
- [25] V. Agopyan, H. Savastano, V.M. John, M.A. Cincotto, Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview, *Cem. Concr. Compos.* 27 (2005) 527–536. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004>.
- [26] M. Chabannes, V. Nozahic, S. Amziane, Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders, *Mater. Struct.* 48 (2015) 1815–1829. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0276-9>.
- [27] M. Ardanuy, J. Claramunt, J.A. García-Hortal, M. Barra, Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers, *Cellulose.* 18 (2011) 281–289. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3>.
- [28] L. Cechin, A. Matoski, A. Miranda de Lima, A. Monique, R. Basso, Effect of treatments on high initial strength Portland cement and mosso bamboo compatibility, *Rev. Ing. Construcción.* 33 (2018) 127–136. [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732018000200127&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.cl/pdf/ric/v33n2/0718-5073-ric-33-02-00127.pdf](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732018000200127&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.cl/pdf/ric/v33n2/0718-5073-ric-33-02-00127.pdf).
- [29] V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, K. Saïdi, H. De Baynast, Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>.
- [30] I.A. Nava Jiménez, H. Sánchez Hernández, El sargazo del mar Caribe mexicano, *Ciencia.* 71 (2020) 58–61.
- [31] A. Aguirre, El Sargazo En El Caribe Mexicano: De La Negación Y El Voluntarismo a La Realidad, *Sustentabilidad, Gac. Digit. Del Cent. Interdiscip. Biodivers. y Ambient. A.C. CeIBA.* 2 (2019) 1–12. <https://marfund.org/es/sargazo-en-el-caribe-mexico/>.
- [32] D. Aldana-Aranda, México ante el sargazo, *Rev. La Acad. Mexicana Ciencias.* 71 (2020) 6–7.
- [33] A. Zavala-Arceo, J.C. Cruz-Argüello, M.Z. Figueroa-Torres, A. Yeladaqui-Tello, Determinación de las

- propiedades térmicas de un mortero modificado con sargazo como material alternativo en construcción, *Rev. Ing. Civ.* 3 (2019) 1–9. <https://doi.org/10.35429/IJCE.2019.10.3.1.9>.
- [34] R. Ramasubramani, S. V, S.M. Prabhu, G. Ramasamy, The Influence of Marine Algae on the Mechanical Properties of Concrete., *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 8 (2019) 536–543. <https://doi.org/10.35940/ijtee.K1568.0881119>.
- [35] R. Ramasubramani, R. Praveen, K.S. Sathyanarayanan, Study on the strength properties of marine algae concrete, *Rasayan J. Chem.* 9 (2016) 706–715.
- [36] R. Ramasubramani, P. G, M.B. Sridhar, S. Prakashchandar, Durability Properties on Marine Algae Concrete, *Int. J. Eng. Adv. Technol.* 9 (2019) 1261–1268. <https://doi.org/10.35940/ijeat.B2837.129219>.
- [37] R. Praveena, A. Muthadhi, A Review on Application of Seaweed in Construction Industry, *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 6 (2016) 6–8.
- [38] C. Niveditha, K. Sarayu, A. Ramachandra Murthy, V. Ramesh Kumar, N.R. Iyer, Marine Algae for Cement Mortar Strengthening, *J. Civ. Eng. Res.* 2014 (2018) 23–25. <https://doi.org/10.5923/c.jce.201401.05>.
- [39] P. Kulkarni, A. Muthadhi, Seaweed as an internal curing agent & Strengthening in concrete –A Review, *Int. J. Civ. Eng.* 4 (2017) 95–98. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V4I6P115>.
- [40] E. Rammou, A. Mitani, G. Ntalos, D. Koutsianitis, H.R. Taghiyari, A.N. Papadopoulos, The Potential Use of Seaweed (*Posidonia oceanica*) as an Alternative Lignocellulosic Raw Material for Wood Composites Manufacture, *Coatings.* 11 (2021) 69. <https://doi.org/10.3390/coatings11010069>.
- [41] L.B. López-Sosa, J.J. Alvarado-Flores, J.C. Corral-Huacuz, A. Aguilera-Mandujano, R.E. Rodríguez-Martínez, S.J. Guevara-Martínez, J.V. Alcaraz-Vera, J.G. Rutiaga-Quiñones, J. Zárate-Medina, M.L. Ávalos-Rodríguez, M. Morales-Máximo, A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic Sargassum spp. as a Solid Biofuel Energy Source, *Appl. Sci.* 10 (2020) 8706. <https://doi.org/10.3390/app10238706>.
- [42] L.B. López-Sosa, M. Morales-Máximo, R. Anastacio-Paulino, A. Custodio-Hernández, J.C. Corral-Huacuz, A. Aguilera-Mandujano, Electron Microscopy Characterization of Sargassum Spp. from the Mexican Caribbean for Application as a Bioconstruction Material, *Microsc. Microanal.* 27 (2021) 3140–3143. <https://doi.org/10.1017/s1431927621010874>.
- [43] F. Rosas-Díaz, D.G. García-Hernández, J.M. Mendoza-Rangel, B.T. Terán-Torres, S.A. Galindo-Rodríguez, C.A. Juárez-Alvarado, Development of a Portland Cement-Based Material with Agave salmiana Leaves Bioaggregate, *Materials (Basel).* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15176000>.
- [44] M. Manjunatha, S. Preethi, Malingaraya, H.G. Mounika, K.N. Niveditha, Ravi, Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials, *Mater. Today Proc.* 47 (2021) 3637–3644. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.248>.
- [45] A.F. Abd Rashid, S. Yusoff, A review of life cycle assessment method for building industry, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45 (2015) 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>.
- [46] G. Alvarez García, Energía en Edificaciones, *Rev. Mex. Física.* 59 (2013) 44–51. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57030971006>.
- [47] A. Boros, D. Tózsér, The Emerging Role of Plant-Based Building Materials in the Construction Industry—A Bibliometric Analysis, *Resources.* 12 (2023) 124. <https://doi.org/10.3390/resources12100124>.
- [48] F. de A. Silva, B. Mobasher, R.D.T. Filho, Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>.
- [49] P. Turgut, H. Murat Algin, Limestone dust and wood sawdust as brick material, *Build. Environ.* 42 (2007) 3399–3403. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.012>.
- [50] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W. Behrens III, *The limits to growth*, Universe Books, New York, USA, 1973. [https://doi.org/10.1016/0007-6813\(73\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0007-6813(73)90029-3).
- [51] R. Calderón, J.A. Arredondo, R. Gallegos, F. Mayagoitia, Electrical consumption and co2 reduction using saving systems and thermal insulation applied to dwellings in arid lands of Mexico, *Inf. Technol.* 22 (2011) 69–

78. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000200008>.
- [52] SEMARNAT, Emisión nacional de gases de efecto invernadero, (2014).
- [53] Informe de situación sobre la acción por el clima, incluidos el informe sobre el funcionamiento del mercado europeo del carbono y el informe sobre la revisión de la Directiva 2009/31/CE, relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono, Parlam. Eur. (2015).
- [54] Y.C. Coronel Sánchez, L.F. Altamirano Tocto, S.P. Muñoz Pérez, Cenizas y fibras utilizadas en la elaboración de concreto ecológico: una revisión de la literatura, *Rev. Del Inst. Investig. La Fac. Minas, Metal. y Ciencias Geográficas*. 25 (2022) 321–329. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.20814>.
- [55] G.J. Treloar, P.E.D. Love, O.O. Faniran, U. Iyer-Raniga, A hybrid life cycle assessment method for construction, *Constr. Manag. Econ*. 18 (2000) 5–9. <https://doi.org/10.1080/014461900370898>.
- [56] D.R. Vieira, J.L. Calmon, F.Z. Coelho, Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review, *Constr. Build. Mater*. 124 (2016) 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>.
- [57] X. Lian, L. Tian, Z. Li, X. Zhao, Thermal conductivity analysis of natural fiber-derived porous thermal insulation materials, *Int. J. Heat Mass Transf.* 220 (2024) 124941. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124941>.
- [58] I. Florea, D.L. Manea, Analysis of Thermal Insulation Building Materials Based on Natural Fibers, *Procedia Manuf.* 32 (2019) 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.207>.
- [59] A. Ešťoková, M. Wolfová Fabiánová, M. Ondová, Concrete Structures and Their Impacts on Climate Change and Water and Raw Material Resource Depletion, *Int. J. Civ. Eng.* 20 (2022) 735–747. <https://doi.org/10.1007/s40999-022-00701-8>.
- [60] E. Peris Mora, Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials, *Build. Environ.* 42 (2007) 1329–1334. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.004>.
- [61] M. Rendón Belmonte, D. Sanchez Topete, Mi. Martinez Madrid, A. López Miguel, Caracterización fisicoquímica de concretos con contenidos del 30% de ceniza volante, 2021.
- [62] C.R. Gagg, Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis, *Eng. Fail. Anal.* 40 (2014) 114–140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>.
- [63] C. Herath, C. Gunasekara, D.W. Law, S. Setunge, Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review, *Constr. Build. Mater.* 258 (2020) 120606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120606>.
- [64] J. Dahmen, J. Kim, C.M. Ouellet-Plamondon, Life cycle assessment of emergent masonry blocks, *J. Clean. Prod.* 171 (2018) 1622–1637. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.044>.
- [65] M. Rendón Belmonte, M. Martínez Madrid, A. López Miguel, J. Terán Guillén, J.T. Pérez Quiroz, A. Torres Acosta, Caracterización física de pastas de cementos híbridos a partir de ceniza volante tipo F y su efecto en las propiedades electroquímicas del acero, *Publicación Técnica IMT*. 486 (2016) 1–47.
- [66] L.Y. Gómez-Zamorano, G. Garcia-Guillén, J.L. Acevedo-Dávila, Estudio de la hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas con escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolín: efecto del empleo de dos aditivos superplastificantes, *Alconpat*. 5 (2013) 203–218. [http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista/documentos/Revista\\_ALCONPAT\\_Volumen\\_1\\_Numero\\_1\\_Enero-Abril\\_2011/Revista\\_ALCONPAT\\_Volumen\\_1\\_Numero\\_1\\_Enero-Abril\\_2011.pdf](http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista/documentos/Revista_ALCONPAT_Volumen_1_Numero_1_Enero-Abril_2011/Revista_ALCONPAT_Volumen_1_Numero_1_Enero-Abril_2011.pdf).
- [67] I.H. Shah, S.A. Miller, D. Jiang, R.J. Myers, Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO<sub>2</sub> emissions by up to 1.3 gigatons, *Nat. Commun.* 13 (2022) 5758. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33289-7>.
- [68] M. Harilal, V.R. Rathish, B. Anandkumar, R.P. George, M.S.H.S. Mohammed, J. Philip, G. Amarendra, High performance green concrete (HPGC) with improved strength and chloride ion penetration resistance by synergistic action of fly ash, nanoparticles and corrosion inhibitor, *Constr. Build. Mater.* 198 (2019) 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.266>.

- [69] M.P. Sáez-Pérez, M. Brümmer, J.A. Durán-Suárez, A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes, *J. Build. Eng.* 31 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101323>.
- [70] Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio Climático, *Cambio Climático*, 2009. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>.
- [71] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S. Schiavoni, A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustain. Mater. Technol.* 4 (2015) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>.
- [72] La climatización en el consumo de energía (P1) / 2, (n.d.).
- [73] D.M.P. Chatellier Lorentzen, M.A. McNeil, Electricity demand of non-residential buildings in Mexico, *Sustain. Cities Soc.* 59 (2020) 102165. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102165>.
- [74] A.J. Guízar Dena, M.Á. Pascual, C. Fernández Bandera, Building Energy Model for Mexican Energy Standard Verification Using Physics-Based Open Studio SGSAVE Software Simulation, *Sustainability*. 13 (2021) 1521. <https://doi.org/10.3390/su13031521>.
- [75] J. Lucero, N. Hernández, J. Estrada, Aplicaciones de la modelación energética de edificaciones: revisión y casos de estudio en México Autores/as, *Vivienda y Comunidades Sustentables*. (2022) 55–80. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.213>.
- [76] A. Arrigoni, R. Pelosato, P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini, G. Dotelli, Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 1051–1061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>.
- [77] J.F. Ramos Lara, *Activación de sistemas binarios y ternarios base cemento Portland con residuos agroindustriales*, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015.
- [78] K. Cury R, Y. Aguas M, A. Martinez M, R. Olivero V, L. Chams Ch, Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento, *Rev. Colomb. Cienc. Anim. - RECIA*. 9 (2017) 122–132. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>.
- [79] SAGARPA, *Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: diagnóstico nacional*, 2015.
- [80] Y. Ore B., E.R. Pichilingue L, A.C. Valderrama Negrón, Extracción y caracterización del alginato de sodio de la macroalga *Macrocystis pyrifera*, *Rev. La Soc. Química Del Perú*. 86 (2020) 276–287. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v86i3.300>.
- [81] A.M. López-Contreras, P. Núñez Valenzuela, B. Celis García, J. Driegen, E. Huerta Lwanga, P. Domin, M. Polett Gurrola, R. Rosas-Luis, Y. Verde Gómez, T. de Vrije, *Sargassum in Mexico: from environmental problem to valuable resource*, 2022. <https://doi.org/10.18174/574423>.
- [82] F. Amador-Castro, T. García-Cayuela, H.S. Alper, V. Rodriguez-Martinez, D. Carrillo-Nieves, Valorization of pelagic sargassum biomass into sustainable applications: Current trends and challenges, *J. Environ. Manage.* 283 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112013>.
- [83] G. Martínez-González, *Sargassum: the atypical irruption of an ancient ecosystem*, *Salud Publica Mex.* 61 (2019) 698. <https://doi.org/10.21149/10838>.
- [84] S.G. Castro Angulo, *Desempeño de un geopolímero a base de ceniza volante clase F con aditivos superplastificantes*, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2021.
- [85] M. Rendón Belmonte, B.R. Ver, M. Mart, M. Publicaci, *Concretos Híbridos Durables Y De Ceniza Volante Activada Y Cemento Portland Tipo Cpc 40*, 2020.
- [86] A. Medina, P. Gamero, X. Querol, N. Moreno, B. De León, M. Almanza, G. Vargas, M. Izquierdo, O. Font, Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization, *J. Hazard. Mater.* 181 (2010) 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.096>.
- [87] D.O. Justo dos Santos, C.M.A. Fontes, P.R.L. Lima, *Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal*, *Matéria (Rio Janeiro)*. 22 (2017) 1694–1709. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0133>.

- [88] A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal, S.E. Selke, B.R. Harte, G. Hinrichsen, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, First Edit, CRC Press, Guelph, Canada, 2005. <https://doi.org/10.1201/9780203508206.ch1>.
- [89] A. Petrella, S. De Gisi, M.E. Di Clemente, F. Todaro, U. Ayr, S. Liuzzi, M. Dobiszewska, M. Notarnicola, *Experimental Investigation on Environmentally Sustainable Cement Composites Based on Wheat Straw and Perlite*, *Materials (Basel)*. 15 (2022) 453. <https://doi.org/10.3390/ma15020453>.
- [90] F. Mohammadkazemi, K. Doosthoseini, E. Ganjian, M. Azin, *Manufacturing of bacterial nano-cellulose reinforced fiber-cement composites*, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 958–964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.093>.
- [91] A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Quéneudec, *Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling*, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 573–579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.011>.
- [92] P.-C. Aïtcin, *Binders for durable and sustainable concrete*, Taylor & Francis, 2008.
- [93] American Society of Testing and Materials, *C150/C150M-15 Standard specification for portland cement*, West Conshohocken, PA, UAS, 2015.
- [94] A.M. Brandt, *Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering*, *Compos. Struct.* 86 (2008) 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>.
- [95] Y. Yang, X. Li, *Study on compatibility of poplar wood and Portland cement*, *Constr. Build. Mater.* 314 (2022) 125586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125586>.
- [96] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, T. Sinsiri, *Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste*, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1534–1541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.024>.
- [97] S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, J. Tanesi, *Diseño y control de mezclas de concreto*, Primera Ed, Portland Cement Association, Illinois, USA, 2004. [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/54593011/Diseno\\_y\\_control\\_de\\_mezclas\\_de\\_concreto\\_-\\_PCA.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DPortland\\_Cement\\_Association.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/54593011/Diseno_y_control_de_mezclas_de_concreto_-_PCA.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DPortland_Cement_Association.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53).
- [98] J.W. Bullard, H.M. Jennings, R.A. Livingston, A. Nonat, G.W. Scherer, J.S. Schweitzer, K.L. Scrivener, J.J. Thomas, *Mechanisms of cement hydration*, *Cem. Concr. Res.* 41 (2010) 1208–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>.
- [99] K.L. Scrivener, A. Nonat, *Hydration of cementitious materials, present and future*, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 651–665. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>.
- [100] G. Guevara Fallas, C. Hidalgo Madrigal, M. Pizarro García, I. Rodríguez Valenciano, L.D. Rojas Vega, G. Segura Guzmán, *Efecto de la variación agua/cemento en el concreto*, *Rev. Tecnol. En Marcha*. 25 (2012) 80. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.1632>.
- [101] T. Piqué, A. Vasquez, *Uso De Espectroscopía Infrarroja Con Transformada De Fourier (Ftir) En El Estudio De La Hidratación Del Cemento*, *Concreto y Cem. Investig. y Desarro.* 3 (2012) 62–71.
- [102] K.L. Scrivener, *Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification*, *Cem. Concr. Compos.* 26 (2004) 935–945. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.029>.
- [103] E. Arioiz, O. Arioiz, O.M. Kockar, *Leaching of F-type fly Ash Based Geopolymers*, *Procedia Eng.* 42 (2012) 1114–1120. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.503>.
- [104] D.P. Bentz, A. Durán-Herrera, D. Galvez-Moreno, *Comparison of ASTM C311 Strength Activity Index Testing versus Testing Based on Constant Volumetric Proportions*, *J. ASTM Int.* 9 (2012) 1–7. <https://doi.org/10.1520/JAI104138>.
- [105] American Society for Testing and Materials, *C618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, West Conshohocken, PA, UAS, 2010.



- [106] G.K. Hoffman, Uses of fly ash from New Mexico coals, *New Mex. Geol.* 22 (2000).
- [107] W.A. Bautista-Ruiz, M. Díaz-Lagos, S.A. Martínez-Ovalle, Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento, *Rev. Investig. Desarro. e Innovación.* 8 (2017) 135–146. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n1.2017.7374>.
- [108] B. Udayasree, G.S. Kumar, Study And Analysis of Green Concrete by Using Industrial Waste Materials as Sustainable Construction, *Int. J. Membr. Sci. Technol.* 10 (2023) 1113–1118. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i1.2755>.
- [109] D. Bentz, M. Peltz, A. Durán-Herrera, P. Valdez, C. Juárez, Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes, *J. Build. Phys.* 34 (2011) 263–275. <https://doi.org/10.1177/1744259110376613>.
- [110] A. Karimah, M.R. Ridho, S.S. Munawar, D.S. Adi, Ismadi, R. Damayanti, B. Subiyanto, W. Fatriasari, A. Fudholi, A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations, *J. Mater. Res. Technol.* 13 (2021) 2442–2458. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>.
- [111] A. Arevalo-Gallegos, Z. Ahmad, M. Asgher, R. Parra-Saldivar, H.M.N. Iqbal, Lignocellulose: A sustainable material to produce value-added products with a zero waste approach—A review, *Int. J. Biol. Macromol.* 99 (2017) 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.097>.
- [112] M.E. Ali, A. Alabdulkarem, On thermal characteristics and microstructure of a new insulation material extracted from date palm trees surface fibers, *Constr. Build. Mater.* 138 (2017) 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.012>.
- [113] M.R. Sanjay, P. Madhu, M. Jawaid, P. Senthamaraiannan, S. Senthil, S. Pradeep, Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review, *J. Clean. Prod.* 172 (2018) 566–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>.
- [114] S. M.R., S. Siengchin, J. Parameswaranpillai, M. Jawaid, C.I. Pruncu, A. Khan, A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization, *Carbohydr. Polym.* 207 (2019) 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.083>.
- [115] S. Saval, Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales : Pasado , Presente y Futuro, *BioTecnología.* 16 (2012) 14–46.
- [116] R. Mythili, P. Venkatachalam, P. Subramanian, D. Uma, Characterization of bioresidues for biooil production through pyrolysis, *Bioresour. Technol.* 138 (2013) 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.161>.
- [117] C.A. Juárez Alvarado, *Concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (Agave lechuguilla), como materiales para construcción en México*, Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2002.
- [118] D. Sedan, C. Pagnoux, T. Chotard, A. Smith, D. Lejolly, V. Gloaguen, P. Krausz, Effect of calcium rich and alkaline solutions on the chemical behaviour of hemp fibres, *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 9336–9342. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1903-4>.
- [119] J.J. Locane, Fundamentos: Material lignocelulosico, in: *Miradas Locales En Tiempos Glob.*, 2019: pp. 23–96. <https://doi.org/10.31819/9783954878840-003>.
- [120] C.M. Clemons, Natural Fibers, in: M. Xanthos (Ed.), *Funct. Fill. Plast.*, WILEY-VCH, Weinheim, 2010: pp. 213–223.
- [121] M. Sood, G. Dwivedi, Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review, *Egypt. J. Pet.* 27 (2018) 775–783. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.11.005>.
- [122] G. Moradkhani, J. Profili, M. Robert, G. Laroche, S. Elkoun, Effects of Wet and Dry Treatments on Surface Functional Groups and Mechanical Properties of Flax Fiber Composites, *Coatings.* 13 (2023) 1036. <https://doi.org/10.3390/coatings13061036>.
- [123] A. Alawar, A.M. Hamed, K. Al-Kaabi, Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement, *Compos. Part B Eng.* 40 (2009) 601–606. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.018>.
- [124] G. Vidal, S. Hormazabal, *Las fibras naturales y sus aplicaciones*, 2016.
- [125] A. Castillo, A.A. Castillo, R.S. Delgado, E.G. Hernández, M.M. Domínguez, J.M.G. Baeza, A.A. Cruz, R.C. García,

- A. Morales, P.J.H. Franco, A.L. Claverie, A.M.M. Martínez, Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulósicos, *Mater. Lignocelulósicos*. 13 (2012) 140–150. [https://aulasvirtuales.udla.edu.ec/udlapresencial/pluginfile.php/926443/mod\\_resource/content/1/PAPER\\_APROVECHAMIENTO\\_DE\\_MATERIAL\\_LIGNOCELULÓSICO.pdf](https://aulasvirtuales.udla.edu.ec/udlapresencial/pluginfile.php/926443/mod_resource/content/1/PAPER_APROVECHAMIENTO_DE_MATERIAL_LIGNOCELULÓSICO.pdf).
- [126] S. Amziane, F. Collet, S. Report, R.T. Committee, *Bio-aggregates Based Building Materials*, Springer Dordrecht, Paris, France, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1031-0>.
- [127] Y. Piñeros-Castro, *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia*, 2016.
- [128] R.E. Ely, L.A. Moore, The Composition of Holocellulose Prepared from Various Forages and the Corresponding Feces, *J. Dairy Sci.* 39 (1956) 1706–1711. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(56\)94912-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(56)94912-8).
- [129] S.M. Velásquez Restrepo, G.J. Pelaéz Arroyave, D.H. Giraldo Vásquez, *Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica : una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos Use of vegetable fibers in polymer matrix composites : a review*, *Inf. Técnico*. 80 (2016) 77–86.
- [130] M.E. Raffino, *Calor*, (2021).
- [131] A. Martín Domingo, *Apuntes de transferencia del calor*, Primera Ed, Madrid, España, 2013. <https://doi.org/10.2307/j.ctt20fw80h.6>.
- [132] Instituto Nacional de Normalización, NCh853:2021 - Componentes y elementos para edificación - Resistencia térmica y transmitancia térmica - Métodos de cálculo, Santiago, Chile, 2021.
- [133] J. Lucero-álvarez, N.A. Rodríguez-Muñoz, I.R. Martín-Domínguez, The effects of roof and wall insulation on the energy costs of low income housing in Mexico, *Sustain.* 8 (2016). <https://doi.org/10.3390/su8070590>.
- [134] M. De Rosa, V. Bianco, F. Scarpa, L.A. Tagliafico, Heating and cooling building energy demand evaluation; A simplified model and a modified degree days approach, *Appl. Energy*. 128 (2014) 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.067>.
- [135] F.A. Castellanos-Sosa, R. Cabral, A.V. Mollick, Energy reform and energy consumption convergence in Mexico: A spatial approach, *Struct. Chang. Econ. Dyn.* 61 (2022) 336–350. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2022.03.007>.
- [136] P. Hancevic, F. Navajas, Consumo residencial de electricidad y eficiencia energética: Un enfoque de regresión cuantílica, *Trimest. Econ.* 82 (2015) 897–927. <https://doi.org/10.20430/ete.v82i328.188>.
- [137] D. Agdas, R.S. Srinivasan, Building energy simulation and parallel computing: Opportunities and challenges, *Proc. WinterSimulation Conf.* (2014).
- [138] V.I. Calixto-Aguirre, G. Huelz-Lesbros, Consumo de energía en edificios en México Energy consumption in buildings in Mexico, *Legado Arquít. y Diseño*. 24 (2018) 40–47. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/mx/>.
- [139] R. Bardazzi, M.G. Pazienza, M.E. Sanin, Energy practices and population cohorts: the case of Mexico, *SN Bus. Econ.* 2 (2022) 161. <https://doi.org/10.1007/s43546-022-00332-0>.
- [140] C. Filippín, S. Flores Larsen, Analysis of energy consumption patterns in multi-family housing in a moderate cold climate, *Energy Policy*. 37 (2009) 3489–3501. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.065>.
- [141] G.K. Grande-Acosta, J.M. Islas-Samperio, Boosting Energy Efficiency and Solar Energy inside the Residential, Commercial, and Public Services Sectors in Mexico, *Energies*. 13 (2020) 5601. <https://doi.org/10.3390/en13215601>.
- [142] Copenhagen centre on energy efficiency, *Energy efficiency in buildings: México*, 2019.
- [143] A. Tejeda-Martínez, I.R. Méndez-Pérez, D.A. Cruz-Pastrana, Domestic electricity consumption in Mexican metropolitan areas under climate change scenarios, *Atmosfera*. 35 (2022) 449–465. <https://doi.org/10.20937/ATM.52902>.
- [144] A.P. Vargas, L. Hamui, Thermal Energy Performance Simulation of a Residential Building Retrofitted with Passive Design Strategies: A Case Study in Mexico, *Sustainability*. 13 (2021) 8064.



<https://doi.org/10.3390/su13148064>.

- [145] L.P. Güereca, R.O. Sosa, H.E. Gilbert, N.S. Reynaga, Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation, *Int. J. Life Cycle Assess.* 20 (2015) 311–317. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0844-9>.
- [146] E. Ashley, L. Lemay, Concrete’s contribution to sustainable development, *J. Green Buildong.* 3 (2008) 37–50.
- [147] O. De Buen R, Greenhouse gas emission baselines and reduction potentials from buildings in México, 2009.
- [148] P.B. de Bruijn, K.-H. Jeppsson, K. Sandin, C. Nilsson, Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres, *Biosyst. Eng.* 103 (2009) 474–479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>.
- [149] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, L. Goudet, Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 2116–2123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>.
- [150] E. Ricardo, S. Landeo, H. Enrique, G. Mora, A. Joao, C. Oscanoa, J. Jorge, G. Campusano, Efectos del intemperismo acelerado en la propiedades físico-mecánicas de compuestos plástico-bambú, *Rev. Xilema.* 29 (2019) 64–76.
- [151] F. Tian, Y. Pan, Z. Zhong, A long-term mechanical degradation model of unidirectional natural fiber reinforced composites under hydrothermal ageing, *Compos. Sci. Technol.* 142 (2017) 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.01.021>.
- [152] M. Soto, M. Vera, K. Parra, C. Rojas, J.P. Cárdenas, Potential of the Residual Fibers of Pisum Sativum (PS), for use in a Development of a Thermal Insulator Material, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 503 (2020) 012084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012084>.
- [153] G.V. Fincheira Aravena, C.A. Ormazábal Cartes, Estado del desarrollo de los materiales aislantes, en base a fibras naturales, Universidad de La Frontera, 2015.
- [154] N. Mati-Baouche, H. De Baynast, A. Lebert, S. Sun, C.J.S. Lopez-Mingo, P. Leclaire, P. Michaud, Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan, *Ind. Crops Prod.* 58 (2014) 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.022>.
- [155] D. Badagliacco, C. Sanfilippo, B. Megna, T. La Mantia, A. Valenza, Mechanical and Thermal Properties of Insulating Sustainable Mortars with *Ampelodesmos mauritanicus* and *Pennisetum setaceum* Plants as Aggregates, *Appl. Sci.* 11 (2021) 5910. <https://doi.org/10.3390/app11135910>.
- [156] L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>.
- [157] J.A. Abdalla, B.S. Thomas, R.A. Hawileh, Use of hemp, kenaf and bamboo natural fiber in cement-based concrete, *Mater. Today Proc.* 65 (2022) 2070–2072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.428>.
- [158] V. Sabathier, C. Magniont, G. Escadeillas, C.A. Juárez, Flax and hemp fibre reinforced pozzolanic matrix: evaluation of impact of time and natural weathering, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 21 (2017) 1403–1417. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1175973>.
- [159] C. Juárez, P. Rodríguez López, R. Rivera Villarreal, M. de los Á. Rechy de Von Roth, Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto, *Ingenierías.* VII (2004) 7–19. <https://core.ac.uk/reader/76600596>.
- [160] J. Claramunt, M. Ardanuy, J.A. García-Hortal, R.D.T. Filho, The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 586–595. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003>.
- [161] J. Wei, C. Meyer, Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites, *Cem. Concr. Res.* 73 (2015) 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.019>.
- [162] M. Ridzuan Mansor, S. Mohd Sapuan, Concurrent conceptual design and materials selection of natural fiber composite products, First Edit, Springer International Publishing, Malaysia, 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-6591-0>.
- [163] V. Nozahic, S. Amziane, Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 43 (2012) 1837–1849.

- <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.07.011>.
- [164] M.L. Marques, F.H.M. Luzardo, F.G. Velasco, L.N. González, E.J. da Silva, W.G. de Lima, Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties, *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 20 (2016) 466–472. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p466-472>.
- [165] H. Savastano, P. Warden, R.S. Coutts, Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites, *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 379–384. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00034-2).
- [166] C. Magniont, G. Escadeillas, M. Coutand, C. Oms-Multon, Use of plant aggregates in building ecomaterials, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 16 (2012) s17–s33. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452>.
- [167] M. Ali, A. Liu, H. Sou, N. Chouw, Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 30 (2012) 814–825. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.068>.
- [168] C.M. Helepciuc (Gradinaru), M. Barbuta, A.A. Serbanoiu, Characterization of a lightweight concrete with sunflower aggregates, *Procedia Manuf.* 22 (2018) 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.024>.
- [169] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateaneuf, L. Arnaud, L. Bessette, F. Collet, C. Lanos, G. Escadeillas, M. Lawrence, C. Magniont, S. Marceau, S. Pavia, U. Peter, V. Picandet, M. Sonebi, P. Walker, Variability of the mechanical properties of hemp concrete, *Mater. Today Commun.* 7 (2016) 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>.
- [170] B. de B. Paulien, J. Knut-Hakan, S. Kenneth, N. Christer, Mechanical properties of lime – hemp concrete containing shives and fibres, *Biosyst. Eng.* 103 (2009) 474–479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>.
- [171] S.R. Ferreira, P.R.L. Lima, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland, *Matéria (Rio Janeiro)*. 17 (2012) 1024–1034. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>.
- [172] R.D. Tolêdo Filho, K. Ghavami, G.L. England, K. Scrivener, Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 185–196. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5).
- [173] V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, K. Saïdi, H. De Baynast, Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>.
- [174] A. Poursaee, C.M. Hansson, Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1127–1133. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.005>.
- [175] A. Peschard, A. Govin, J. Pourchez, E. Fredon, L. Bertrand, S. Maximilien, B. Guilhot, Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension, *J. Eur. Ceram. Soc.* 26 (2006) 1439–1445. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.02.005>.
- [176] J.S. Laskowski, Q. Liu, C.T. O’Connor, Current understanding of the mechanism of polysaccharide adsorption at the mineral/aqueous solution interface, *Int. J. Miner. Process.* 84 (2007) 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.03.006>.
- [177] M. Le Troëdec, C.S. Peyratout, A. Smith, T. Chotard, Influence of various chemical treatments on the interactions between hemp fibres and a lime matrix, *J. Eur. Ceram. Soc.* 29 (2009) 1861–1868. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.11.016>.
- [178] D. Galvez Moreno, Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la región de Monterrey, Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015.
- [179] Quantachrome Instruments, Density - Multipicnometer, Quantachrome Instruments Web Page. (2018). [https://www.quantachrome.com/product\\_listing/density\\_analyzers.html](https://www.quantachrome.com/product_listing/density_analyzers.html).
- [180] A. Flores Ledesma, F. Barcelo Santana, L. Bucio Galindo, J.A.J.Á. Arenas Alatorre, J.L.J.L. Ruvalcaba Sil, F.H. Barceló Santana, L. Bucio Galindo, J.A.J.Á. Arenas Alatorre, J.L.J.L. Ruvalcaba Sil, Análisis químico elemental y de fases por medio de PIXE, DSC, TGA y DRX en MTA Angelus y un cemento Portland blanco, *Rev. Odontológica Mex.* 20 (2016) 187–192. <http://www.medigraphic.com/facultadodontologiaunam>.

- [181] M. Albitar, M.S. Mohamed Ali, P. Visintin, M. Drechsler, Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes, *Constr. Build. Mater.* 136 (2017) 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056>.
- [182] T.M. Piqué, A. Vázquez, Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento, *Concreto y Cem. Investig. y Desarro.* 3 (2012) 62–71. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-30112012000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000100004&lng=es&tlng=es).
- [183] American Society for Testing and Materials, C311-07 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, West Conshohocken, PA, UAS, 2005. <https://doi.org/10.1520/C0311-07.2>.
- [184] American Society for Testing and Materials, C39/C39M-99 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA, UAS, 2018.
- [185] S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, M. Sonebi, Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity, *Mater. Struct.* 50 (2017) 167. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>.
- [186] Technical Association of Pulp and Paper Industry, T 211 om-02 Ash in wood , pulp , paper and paperboard : combustion at 525°C, Atlanta, GA USA, United States of America, 2007.
- [187] Technical Association of Pulp and Paper Industry, T 204 cm-97 - Solvent extractives of wood and pulp, Atlanta, GA USA, 2007.
- [188] Technical Association of Pulp and Paper Industry, T 222 om-02 - Acid-insoluble lignin in wood and pulp, Atlanta, GA USA, 2011.
- [189] L. Wise, M. Murphy, A. D'Addieco, Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses, *Pap. Trade.* 122 (1946) 35–43.
- [190] S. Kestur G., T.H.S. Flores-Sahagun, L.P. Dos Santos, J. Dos Santos, I. Mazzaro, A. Mikowski, Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 45 (2013) 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.001>.
- [191] R. Rowell, The chemistry of solid wood, in: *Handb. Wood Chem. Wood Compos.*, 1983: pp. 17–18. <https://doi.org/10.1007/bf00354749>.
- [192] J.E. Carmona, T.K. Morales-Martínez, S.I. Mussatto, D. Castillo-Quiroz, L.J. Ríos-González, Propiedades químicas, estructurales y funcionales de la lechuguilla (Agave lechuguilla Torr.), *Rev. Mex. Ciencias For.* 8 (2017) 100–122. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.21>.
- [193] L. Segal, J.J. Creely, A.E. Martin, C.M. Conrad, An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer, *Text. Res. J.* 29 (1959) 786–794. <https://doi.org/10.1177/004051755902901003>.
- [194] S.S.R. Ferreira, P.R.L. Lima, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices, *Rev. Mater.* 17 (2012) 1024–1034. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>.
- [195] V. Cérézo, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [196] American Society for Testing and Materials, C109/C 109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, 2002.
- [197] American Society for Testing and Materials, C138-92 Standard Test Method for Density ( Unit Weight ), Yield , and Air Content (Gravimetric), West Conshohocken, PA, UAS, 2000.
- [198] A. Khaloo, M.H. Mobini, P. Hosseini, Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 113 (2016) 188–201.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.041>.

- [199] L.Y. Gómez-Zamorano, C.E. Castillo-Linton, Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de partículas de nanosílice, *Rev. ALCONPAT*. 6 (2016) 101–115. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i2.132>.
- [200] J. Zhang, G.W. Scherer, Comparison of methods for arresting hydration of cement, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 1024–1036. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.003>.
- [201] American Society for Testing and Materials, D5334-00 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, West Conshohocken, PA, UAS, 2000.
- [202] R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2023. <https://www.r-project.org/>.
- [203] U. Groemping, Relative Importance for Linear Regression in R: The Package relaimpo, *J. Stat. Softw.* 17 (2006) 1–27.
- [204] B. Vásquez, S. Corrales, INDUSTRIA DEL CEMENTO EN MÉXICO: ANÁLISIS DE SUS DETERMINANTES, *Probl. Desarro.* 48 (2017) 113–138. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2017.01.006>.
- [205] R. Sosa Echeverría, H. Bravo Álvarez, G. Fuentes García, S. Rosas de Alva, E. Granados Hernández, P. Sánchez Álvarez, Estimación de la emisiones de mercurio en las plantas carboeléctricas de México, *Rev. Int. Contam. Ambient.* 33 (2017) 325–336. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.02.13>.
- [206] International Organization for Standardization, ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, 2006. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11367-011-0297-3>.
- [207] S.. N. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, NMX-C-404-ONNCCCE-2012: Industria de la construcción – Mampostería – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo, 2012.
- [208] N. Fulghum, Global Electricity Review 2021 - México, 2021. <https://ember-climate.org/wp-content/uploads/2021/03/Global-Electricity-Review-2021-Mexico-Translated.pdf>.
- [209] SENER, Balance nacional de energía 2020, 2020.
- [210] INEGI, Encuesta de vivienda, INEGI. (2020). <https://www.inegi.org.mx/temas/vivienda/> (accessed May 22, 2023).
- [211] CITEC - UBB, DECON - UC, Manual de hermeticidad al aire de edificaciones, 2014. [www.cdt.cl](http://www.cdt.cl).
- [212] S. Mousavi, M. Gijón-Rivera, C.I. Rivera-Solorio, C. Godoy Rangel, Energy, comfort, and environmental assessment of passive techniques integrated into low-energy residential buildings in semi-arid climate, *Energy Build.* 263 (2022) 112053. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112053>.
- [213] C.E. Vázquez-Torres, D. Bienvenido-Huertas, A. Beizae, A. Bassam, M.J. Torres, Thermal performance of historic buildings in Mexico: An analysis of passive systems under the influence of climate change, *Energy Sustain. Dev.* 72 (2023) 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.002>.
- [214] ASHRAE, ASHRAE Standard 55-2017 Thermal environmental conditions for human occupancy, 2017.
- [215] Climate.OneBuilding.Org, (n.d.). <https://climate.onebuilding.org/default.html> (accessed September 15, 2023).
- [216] ASHRAE CLIMATIC DESIGN CONDITIONS 2009/2013/2017/2021, (n.d.).
- [217] L. Sambataro, A. Laveglia, N. Ukrainczyk, E. Koenders, A performance-based approach for coupling cradle-to-use LCA with operational energy simulation for Calcium Silicate and Clay Bricks in masonry buildings, *Energy Build.* 295 (2023) 113287. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113287>.
- [218] U. Persson, S. Werner, Quantifying the Heating and Cooling Demand in Europe Work Package 2 Background Report 4 The STRATEGO project IEE/13/650, 2015. [www.hh.se/english%0Ahttp://www.heatroadmap.eu%0Ahttp://maps.heatroadmap.eu](http://www.hh.se/english%0Ahttp://www.heatroadmap.eu%0Ahttp://maps.heatroadmap.eu).
- [219] A.D. Perez Portillo, S.P. Arredondo Rea, R. Corral Higuera, J.M. Gomez Soberón, V.M. Orozco Carmona, J.. Almaral Sánchez, Caracterización de cenizas volantes activadas alcalinamente como material alternativo al

- cemento, V Congr. Nac. Alconpat. (2012) 77–84. [https://207.249.117.35/jspui/bitstream/1004/1701/1/Caracterización de Cenizas Volantes Activadas Alcalinamente como Material Alternativo al Cemento.pdf](https://207.249.117.35/jspui/bitstream/1004/1701/1/Caracterización%20de%20Cenizas%20Volantes%20Activadas%20Alcalinamente%20como%20Material%20Alternativo%20al%20Cemento.pdf).
- [220] P.-C. Aitcin, *Binders for Durable and Sustainable Concrete*, First Edit, CRC Press, London, England, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781482265767>.
- [221] F. Fernández, C.J. Boluda, J. Olivera, L.A. Guillermo, B. Gómez, E. Echavarría, A. Mendis Gómez, Prospective elemental analysis of algal biomass accumulated at the Dominican Republic shores during 2015, *Cent. Azúcar*. 44 (2017) 11–22. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612017000100002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612017000100002).
- [222] S.K. Saw, K. Akhtar, N. Yadav, A.K. Singh, Hybrid Composites Made from Jute/Coir Fibers: Water Absorption, Thickness Swelling, Density, Morphology, and Mechanical Properties, *J. Nat. Fibers*. 11 (2014) 39–53. <https://doi.org/10.1080/15440478.2013.825067>.
- [223] A. Vincenzini, C.E. Augarde, M. Gioffrè, Experimental characterization of natural fibre–soil interaction: lessons for earthen construction, *Mater. Struct. Constr.* 54 (2021). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01703-z>.
- [224] A. Jahan, M.M. Rahman, H. Kabir, A. Kabir, F. Ahmed, A. Hossain, A. Gafur, Comparative Study of Physical And Elastic Properties of Jute And Glass Fiber Reinforced LDPE Composites, *Int. J. Sci. Technol. Res.* 1 (2012) 68–72.
- [225] P.R.L. Lima, H.M. Santos, G.P. Camilloto, R.S. Cruz, Effect of surface biopolymeric treatment on sisal fiber properties and fiber-cement bond, *J. Eng. Fiber. Fabr.* 12 (2017) 59–71. <https://doi.org/10.1177/155892501701200207>.
- [226] S.R. Ferreira, P.R.L. Lima, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Effect of Sisal Fiber Hornification on the Fiber-Matrix Bonding Characteristics and Bending Behavior of Cement Based Composites, *Key Eng. Mater.* 600 (2014) 421–432. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.421>.
- [227] M.P. Sáez-Pérez, J.A. Durán-Suárez, J. Castro-Gomes, Improving the Behaviour of Green Concrete Geopolymers Using Different HEMP Preservation Conditions (Fresh and Wet), *Minerals*. 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/min12121530>.
- [228] M.K. Rao, C.N.S. Kumar, Influence of fly ash on hydration compounds of high-volume fly ash concrete, *AIMS Mater. Sci.* 8 (2021) 301–320. <https://doi.org/10.3934/matserci.2021020>.
- [229] L.P. Traversa, F.H. Iloro, D. Benito, Determinación mediante ensayos térmicos del CO<sub>2</sub> absorbido por morteros de cemento, *Cienc. y Tecnol. Los Mater.* 3 (2013) 33–41. <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/009b4b6d-eb15-41b1-9c5f-de7e01e47c0c/content>.
- [230] M.L. Nehdi, A.R. Suleiman, A.M. Soliman, Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack, *Cem. Concr. Res.* 64 (2014) 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.002>.
- [231] Z. Guo, X. Kong, J. Zhang, Y. Sun, A. Tu, T. Jiang, Life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates—A case study in China, *Adv. Constr. Demolition Waste Recycl. Manag. Process. Environ. Assess.* (2020) 515–535. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-5.00025-5>.
- [232] V.A. Arvizu-Piña, J.F. Armendáriz López, A.A. García González, I.G. Barrera Alarcón, An open access online tool for LCA in building’s early design stage in the Latin American context. A screening LCA case study for a bioclimatic building, *Energy Build.* 295 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113269>.
- [233] B. Lu, C. Shi, G. Hou, Strength and microstructure of CO<sub>2</sub> cured low-calcium clinker, *Constr. Build. Mater.* 188 (2018) 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.134>.
- [234] L. Reichart, J. Cassiani, S. Kessler, Comparative Life Cycle Assessment of Concrete with Coarse Natural and Recycled Concrete Aggregates for Household Construction, Case Study in the Hamburg Area, in: Springer International Publishing, 2023: pp. 205–213. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7_23).
- [235] S. Guillén-Lambea, B. Rodríguez-Soria, J.M. Marín, Air infiltrations and energy demand for residential low



- energy buildings in warm climates, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 116 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109469>.
- [236] K. Choi, S. Park, J. Joe, S.I. Kim, J.H. Jo, E.J. Kim, Y.H. Cho, Review of infiltration and airflow models in building energy simulations for providing guidelines to building energy modelers, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 181 (2023) 113327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113327>.
- [237] L.L. Romero Mireles, Fabrican bloques o ladrillos con residuos de construcción, *Gac. UNAM.* (2023). <https://www.gaceta.unam.mx/fabrican-bloques-o-ladrillos-con-residuos-de-construccion/#:~:text=Adem%C3%A1s%2C los 323 millones de,con altos %C3%ADndices de contaminaci%C3%B3n.> (accessed March 5, 2024).
- [238] The Seaweed company, (n.d.). <https://www.theseaweedcompany.com/our-impact#:~:text=Every ton of seaweed has,and 0.2 kg of phosphorus.> (accessed April 29, 2024).
- [239] International Organization for Standardization, ISO 6946:2015 Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method, 2015.
- [240] Technical Association of Pulp and Paper Industry, T 257 cm-02 Sampling and preparing wood for analysis, Atlanta, GA USA, 2012.
- [241] J.E. Carmona, S.I. Mussatto, D. Castillo-Quiroz, T.K. Morales-Martínez, L.J. Ríos-González, Propiedades químicas, estructurales y funcionales de la lechuguilla (*Agave lechuguilla Torr.*), *Rev. Mex. Ciencias For.* 8 (2018) 100–122. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.21>.
- [242] Technical Association of Pulp and Paper Industry, Tappi test methods - Chemical characterization of agro-industrial waste, Atlanta, GA USA, 2007.
- [243] Tappi Standards, T 264 cm-97 - Preparation of wood for chemical analysis, 2007.
- [244] R.H. Carlos Javier, R.N. Karin, C.-R. Juan Pablo, Valorization of Wheat Crop Waste in Araucanía, Chile: Development of Prototype of Thermal Insulation Material for Blowing Technique and Geographical Analysis, *Buildings.* 13 (2023) 1152. <https://doi.org/10.3390/buildings13051152>.
- [245] A. D'Alessandro, C. Fabiani, A.L. Pisello, F. Ubertini, A. Luigi Materazzi, F. Cotana, Innovative concretes for low-carbon constructions: A review, *Int. J. Low-Carbon Technol.* 12 (2017) 289–309. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctw013>.
- [246] V. Anggraini, A. Asadi, B.B.K. Huat, H. Nahazanan, Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil, *Measurement.* 59 (2015) 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.059>.
- [247] D. Castillo Quiroz, J.T. Sáenz Reyes, M. Narcia Velasco, J.A. Vázquez Ramos, Propiedades físico mecánicas de la fibra de *Agave lechuguilla Torr.* de cinco presedencias bajo plantaciones, *Rev. Mex. Ciencias For.* 4 (2013) 78–91. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v4n19/v4n19a7.pdf>.
- [248] H.V. Scheller, P. Ulvskov, Hemicelluloses, in: *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2010: pp. 263–289. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315>.

## Anexo 1

### Proceso de caracterización química de la fibra

El método experimental empleado en la caracterización química de la biomasa se llevó a cabo conforme a lo estipulado en las normativas Tappi y procedimientos experimentales que se describen a continuación en detalle:

#### *Toma y preparación de muestras para análisis*

La normativa Tappi T 257 cm-85 [240] define el procedimiento a seguir para la realización de una toma de muestra significativa de la materia prima y su posterior preparación para ser sometida a los diferentes análisis químicos. De acuerdo con lo indicado en la norma, la materia en estudio se divide en grupos homogéneos por tamaño y características, tomando al menos dos muestras de cada subdivisión. La materia prima se sometió a molienda en una licuadora, el material obtenido se tamizó seleccionando la fracción comprendida entre 0.40 y 0.25 mm. Las muestras fueron almacenadas en bolsas herméticas con su respectivo rotulado [27,241,242].

#### *Análisis de la humedad*

La humedad de las muestras corresponde a la humedad de equilibrio y es tenida en cuenta en posteriores análisis. La humedad de las muestras preparadas según la norma TAPPI 257 cm-85 [240] se determinó de acuerdo a la normativa Tappi T264 cm-97 [243], pesando  $2.00 \pm 0.01$  g de muestra ( $m_o$ ) en un crisol tarado libre de humedad, luego, el conjunto se colocó en horno a  $105 \pm 5$  °C durante 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo de secado, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente dentro de un desecador, utilizando como agente desecante silica gel. Una vez atemperadas las muestras se pesaron, registrando la masa final ( $m_f$ ) y se determinó la humedad de acuerdo con la siguiente formula [241][27]:

$$\% \text{ humedad} = \left[ \frac{(m_o - m_f)}{m_o} \times 100 \right]$$

#### *Análisis de ceniza*

El ensayo se llevó a cabo de acuerdo con lo estipulado en la normativa Tappi T211 om-93 [186], sobre  $1.00 \pm 0.01$  g de materia prima a la humedad de equilibrio ( $m_o$ ), puesta en un crisol de porcelana tarado libre de humedad, preparada según la norma TAPPI 257 cm-85 [240], que fue sometido a calcinación en mufla marca Terlab modelo MA12D a 525 °C durante 3 horas. El crisol debió ser atemperado dentro de un desecador utilizando como agente desecante silica gel. Una vez atemperado se pesó el conjunto ( $m_f$ ) y se calculó el porcentaje de cenizas de acuerdo con la siguiente ecuación [27,114,190,241]:

$$\% \text{ ceniza} = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

#### *Extraíbles con etanol-tolueno*

El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con la normativa Tappi T204 cm-97 [187]. Mediante este método se determinó la cantidad de compuestos no volátiles extraíbles con disolventes orgánicos que presenta la materia prima, como ceras, grasas, algunas resinas, hidrocarburos no volátiles, carbohidratos de bajo peso molecular y



algunas sales. Para su determinación, se utilizaron  $4.0 \pm 0.1$  g de muestra ( $m_o$ ) a la humedad de equilibrio, preparada según la norma TAPPI 257 cm-85 [240]. La materia prima se dispuso en un cartucho de papel filtro, previamente pesado. El conjunto se colocó en un Soxhlet y se añadieron 150 ml de mezcla etanol-tolueno (1:2 v/v). El Soxhlet se acopló a un matraz y un condensador calentándose a reflujo en campana, llevando la mezcla a ebullición. El procedimiento se llevó a cabo hasta agotar la extracción. Posteriormente, se desacopló el Soxhlet y se dejó evaporar parcialmente el disolvente del matraz bola en un vaso de precipitado a temperatura ambiente.

Posteriormente, el cartucho con la muestra se recogió para posteriores análisis, secándolo en estufa a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 horas hasta que el extracto estaba seco. Finalmente, se pesó y se obtuvo la masa extraída ( $m_f$ ). El resultado del análisis se expresa en base a la muestra seca y el porcentaje de extraíbles se obtiene mediante la siguiente ecuación [190][241][27]:

$$\% \text{ extraíbles } E - T = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

#### *Contenido en lignina insoluble en ácido*

El procedimiento se lleva a cabo mediante lo estipulado en la normativa Tappi T222 om-98 [188]. Mediante la aplicación de este método los carbohidratos de la materia prima fueron hidrolizados y solubilizados con ácido sulfúrico, de forma que la lignina insoluble en ácido quedó aislada. El procedimiento consistió en pesar  $1.0 \pm 0.1$  g de la muestra libre de extraíbles preparada según la norma TAPPI T204 cm-97 [187]. Luego, se adicionaron 15 ml de ácido sulfúrico al 72%, agitando de vez en cuando durante 2 horas a temperatura ambiente. Después se trasvasó el contenido a un matraz de 1000 ml y se añadieron 560 ml de agua destilada llevándolo a ebullición con reflujo durante 4 horas. La disolución se filtró en un filtro Whatman número 3 previamente pesado y se lavó con agua caliente hasta pH neutro. Para terminar, el filtro se secó en estufa a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, el filtro se colocó en un desecador de vidrio utilizando silica gel como agente desecante para evitar la absorción de humedad. Una vez frío, se pesó y se determinó el porcentaje de lignina mediante la siguiente ecuación [27,190,241]:

$$\% \text{ lignina} = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

#### *Contenido en holocelulosa*

La holocelulosa se define como la fracción de carbohidratos insoluble en agua presentes en las materias primas vegetales. Incluye, por lo tanto, la celulosa y hemicelulosas presentes en los sustratos. El método de Wise y col [189] por el cual se determinó este parámetro en la presente investigación se basa en que el dióxido de cloro que se desprende en los sucesivos tratamientos con clorito sódico disuelve la lignina mientras los hidratos de carbono permanecen inalterados. Para llevar a cabo dicho método se parte de  $2.5 \pm 0.1$  g de muestras libres de extractos preparada según la norma TAPPI T204 cm-97 [187] y secas que se dispusieron en un matraz Erlenmeyer, donde se añadieron 80 ml de agua destilada caliente ( $70\text{--}80^\circ\text{C}$ ) sumergiendo la mezcla en un baño termostatzado a  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , agitando periódicamente con una varilla a fin de homogenizarla. A continuación, se añadieron cada 60 minutos 0.5 ml de ácido acético glacial y 2.6 ml de clorito sódico al 25 %, hasta cubrir un total de 7 horas. Después de transcurrido ese tiempo la mezcla se mantuvo en el baño durante 12 horas sin nuevas adiciones. La figura 38 muestra fotografías del procedimiento descrito. Para finalizar, el residuo sólido (holocelulosa) se filtró en un filtro

Whatman número 2, se secó durante 24 horas en una estufa a 105 °C, se atemperó en un desecador y se determinó su cantidad mediante la masa con la siguiente ecuación [27,128,190,241]:

$$\% \text{ holocelulosa} = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

#### *Determinación de $\alpha$ -celulosa y hemicelulosas*

Dado que la norma TAPPI T203 om-93 (Determinación de  $\alpha$ -,  $\beta$ - y  $\gamma$ -celulosa en pastas) está definida únicamente para pastas de papel, y hace especial énfasis sobre ello, se optó por utilizar el protocolo propuesto por Rowell [191] para determinar el contenido en  $\alpha$ -celulosa y hemicelulosas en muestras de madera. El término hemicelulosas se define en este método como los componentes de la pared celular vegetal que son solubilizados mediante el tratamiento con hidróxido de sodio y ácido acético que se expone a continuación, mientras que la  $\alpha$ -celulosa corresponde a la fracción de holocelulosa que permanece insoluble tras dicho tratamiento. Según indica el método empleado, se pesaron  $2.00 \pm 0.01$  g de muestra de holocelulosa seca y libre de extractos, extraída del sustrato según el método de Wise y col [189]. Se añadieron 10 ml de NaOH al 17.5% agitando hasta lograr una correcta dispersión. Posteriormente, se añadieron 5ml de NaOH al 17.5 % cada 5 minutos hasta completar un total de 25ml (3 adiciones de 5 ml). Tras la última adición se dejó reposar 30 min a 20 °C (tiempo total de reacción de 45 minutos). Después, se añadieron 33ml de agua destilada a 20 °C agitando bien toda la dispersión y se dejó reposar 1 hora antes de proceder a su filtrado en un filtro de porosidad media número 2. Posteriormente se lavó el residuo sólido con 100 ml de disolución de NaOH al 8.3% tras lo cual se lavó con agua destilada dos veces más. Se añadieron 15 ml de ácido acético al 10%, dejándolo reaccionar 3 minutos antes de conectar el vacío. Finalmente, se lavó con agua destilada hasta que el filtrado quedó libre de ácido (pH neutro). Se secó a 105 °C, se atemperó en desecador y se determinó la  $\alpha$ -celulosa gravimétricamente, correspondiente a la fracción que permanece insoluble a lo largo de todo el tratamiento. Las hemicelulosas se calculan por diferencia con la muestra inicial. Las cantidades se obtienen de las siguientes ecuaciones [15,27,190,241]:

$$\% \text{ celulosa} = \frac{m_f}{m_o} \times 100$$

$$\% \text{ hemicelulosas} = \% \text{ holocelulosa} - \% \text{ celulosa}$$

## Anexo 2

### Propiedades y composición química de fibras naturales

#### 1. Propiedades físicas de las fibras naturales

Tabla 18 - Valores de conductividad térmica de las principales fibras naturales estudiadas

Fibra	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Conductividad térmica [W/mK]	Fuente
Fibra de vidrio	2.49	ND	[120]
Kevlar	1.44	ND	[120]
Caucho	0.2	0.19	[91]
Poliestireno	10 - 30	0.038	[244]
Lana de roca	20 - 200	0.033 - 0.04	[71]
Poliestireno expandido	15 - 35	0.031 - 0.038	[71]
Poliestireno extruido	32 - 40	0.032 - 0.037	[71]
Lana mineral	0.03	0.03 - 0.045	[26]
Lino	1.4 - 1.5	0.038 - 0.075	[23,26,120,123,158,245]
Cáñamo	0.2 - 1.58	0.04 - 0.12	[23,24,26,120,158,166]
Yute	1.3 - 1.5	ND	[120,123]
Yute	1.45	ND	[222]
Palma	ND	0.062	[24,123]
Maderas blandas	1.4	ND	[120]
Maderas duras	1.4	ND	[120]
Coco	0.085 - 1.4	0.058	[23,25,123,245,246]
Sisal	1.104 - 1.37	ND	[25,123]
Eucaliptus	1.609	ND	[25]
Girasol	0.925	0.051 - 0.055	[26,166]
Corcho	0.12-0.18	0.045	[23,245]
Caña de azúcar	0.1 - 0.125	0.0469 - 0.0496	[23,245]
Papel reciclado	0.03	0.041	[245]
Fardos de paja	0.1026	0.067	[245]
Agave azul	0.88	ND	[190]
Carrizo	0.312	0.059	[155]
Hierba penacho	0.267	0.054	[155]
Cáscara de arvejas	0.104	0.033 - 0.040	[152]
Sargazo	0.136	ND	[41,42]
Sargazo	0.305	0.045	[33]
Pelillo	60 - 80	0.036	[244]
Lamilla	50 - 70	0.036	[244]
Lana de oveja	1.31	0.036 - 0.081	[58]
Lana de oveja	10 - 25	0.038 - 0.054	[71]
Cáñamo	1.48 - 1.49	ND	[58]
Fibra de coco	1.2	ND	[222]

\* ND: No determinado

## 2. Composición química de fibras naturales

Tabla 19 - Valores de la composición química de fibras naturales estudiadas en la literatura

Especie	Celulosa [%]	Hemicelulosa [%]	Lignina [%]	Fuente
Bagazo de caña de azúcar	57	20	19	[127]
Cáscara de banano	13.2	14.8	14	[127]
Fibra de plátano	60 - 65	19	5-10	[110]
Zoca de café	33.5	24.97	17.8	[127]
Cascarilla de arroz	34.4	18.9	23	[127]
Arroz	28 - 57	23 - 33	12 - 19	[110]
Pino	84.9	15.3	ND	[127]
Cáscara eucaliptus	79 - 89	21	0.5	[25,127]
Cáscara eucaliptus	47.61	24.52	17.41	[15]
Cáñamo	35 - 52	9 - 27	17 - 28	[126,173]
Cáñamo	56.1	10.9	6	[118]
Cáñamo	58.7	14.2	6	[177]
Cáñamo	55 - 77	9 - 16	3 - 14	[69]
Cáñamo	57 - 77	14 - 22.4	3.7 - 13	[110]
Cáñamo	67 - 78	16 - 18	3.5 - 5.5	[58]
Fibra de lino	71	18.6 - 20.6	2.2	[110]
Fibra de lino	43 - 47	24 - 26	21 - 23	[126]
Fibra de lino	64.1 - 71.9	16.7 - 20.6	2 - 2.2	[122]
Girasol	42.1	29.7	13.4	[126,173]
Médula de girasol	31.5	ND	2.5	[154]
Corteza de girasol	45	ND	14	[154]
Paja de trigo	44.5	33.2	22.3	[126]
Paja de trigo	33-38	26-32	17-19	[89]
Paja de trigo	29 - 51	15 - 32	16 - 21	[110]
Avena	31 - 37	27 - 38	16 - 19	[119]
Fibra de coco	35 - 60	15 - 28	20 - 48	[25]
Fibra de coco	32 - 43	0.15 - 0.25	40 - 45	[110]
Sisal	43 - 88	9 - 27	3.8 - 9.9	[25,119]
Sisal	47 - 78	10 - 24	7 - 11	[110]
Sisal	68.2	13.7	12.3	[161]
Agave azul	73.6	ND	21.1	[190]
Abacá	60.8	15 - 17	8.8	[119]
Agave lechuguilla Torr	17.72	17.15	7.32	[241,247]

Bambú	ND	ND	46.63	[28]
Bambú	26 - 73.83	12.49 - 31	10.1 - 36.88	[110]
Cáscara de arvejas	28.77	28.17	17.33	[152]
Henequén	77.6	8 - 20	77.8	[119]
Henequén	77.6	4 - 8	13.1	[110]
Sargazo	9.2 - 13.1	7.7 - 8.7	8.7 - 10.5	[41]
Cebada	31 - 45	24 - 29	14 - 15	[110]
Kenaf	31 - 57	20.3 - 33.9	9 - 21.2	[110]
Bagazo	52.5	16.8	25.3	[110]
Kenaf	37 - 49	18 - 24	15 - 21	[110]
Jute	41 - 48	18 - 24	21 - 24	[110]
Jute	45 - 71.6	13.6 - 21	21 - 26	[110]
Jute	65	20	12	[222]
Fibra de piña	81	ND	12.7	[110]
Algodón	82.7 - 90	5.7	ND	[110]
Fibra de coco	33.28	12.67	46.84	[222]

### 3. Descripción de los componentes principales de las fibras naturales

#### *Celulosa*

La celulosa de fórmula química  $(C_6H_{10}O_5)_n$  es un polímero glucano hidrófilo que consiste en una cadena lineal de 1,4- $\beta$  unidades de anhidro glucosa, cada una de las cuales contiene tres grupos hidroxilos alcohólicos [126]. El número de unidades de glucosa en una molécula de celulosa se denomina grado de polimerización, cuyo promedio para la celulosa en fibras naturales es de alrededor de 10000 y puede variar desde 15000 para algunas plantas de algodón hasta valores cercanos a 50 para ciertas celulosas microcristalinas. Esta característica puede afectar significativamente a la capacidad mecánica de las fibras [119]. Las cadenas lineales de celulosa se asocian en subunidades de aproximadamente 3x4 nm, que a su vez se unen por enlaces de hidrógeno intermoleculares formando microfibrillas con un espesor aproximado a los 25 nm. Estas microfibrillas se agrupan en haces mayores denominados fibrillas que representan las unidades básicas de las fibras de celulosa en la pared celular. Las fibrillas contienen secuencias alternadas de zonas con estructura cristalina y zonas amorfas. También se puede distinguir entre celulosa accesible y no accesible. En cuanto a la celulosa cristalina, sólo la parte superficial es accesible, mientras que la mayor parte de la celulosa amorfa es accesible. La mayor parte de la celulosa derivada de la madera contiene más del 65 % de las regiones cristalinas [126], mientras que para el agave azul se determinó que la cristalinidad corresponde a un 70 % de la fibra [190]. Los núcleos cristalinos denominados cristalitas, presentan una elevada resistencia química a las reacciones de hidrólisis por lo que éstas se desarrollan con diferente velocidad según sea la zona donde se produzca el ataque. Se conocen en la actualidad diferentes estructuras cristalinas adoptadas por la celulosa en función de los tratamientos que ha experimentado a lo largo de su aislamiento y purificación, así como en su proceso de derivación.

### *Hemicelulosa*

La hemicelulosa combina muchos polisacáridos diferentes, compuestos de 5 y 6 azúcares del anillo de carbono más ácidos glucurónico y galacturónico. Las hemicelulosas tienen un menor grado de polimerización que la celulosa y presentan una estructura heterogénea, amorfa y ramificada. Constituyen la matriz de soporte de las microfibrillas de celulosa. Las hemicelulosas son altamente hidrófilas, fácilmente hidrolizadas por ácidos y solubles en soluciones alcalinas diluidas. Esta propiedad podría afectar notablemente a la durabilidad de los áridos vegetales de una matriz mineral alcalina (cemento, cal, etc.) y a los mecanismos de unión en la interface de estos materiales compuestos [119,126]. El papel biológico más importante de las hemicelulosas es su contribución al fortalecimiento de la pared celular mediante la interacción con la celulosa y, en algunas paredes, con la lignina [248].

### *Lignina*

Aunque la naturaleza química exacta de la lignina sigue siendo desconocida, se han identificado grupos y unidades funcionales. Las ligninas pueden describirse como polímeros amorfos, altamente complejos, tridimensionales y principalmente aromáticos de unidades de fenilpropano. Durante la síntesis de las paredes celulares de las plantas, la producción de celulosa y hemicelulosa se acompaña del relleno de los espacios entre estos dos polisacáridos con ligninas, uniéndolos entre sí. Esto se denomina proceso de lignificación y conduce al endurecimiento de las paredes celulares. El papel principal de la lignina en las plantas es, por lo tanto, apoyarlas y protegerlas de la degradación química y física. Además, la lignina es generalmente resistente al ataque microbiano. La naturaleza y la cantidad de lignina afectan la durabilidad y la biodegradabilidad de los diferentes materiales vegetales. La lignina también juega un papel importante en el transporte de agua, proporcionando la superficie hidrofóbica que permite la circulación del agua dentro de las plantas. La lignina se encuentra principalmente en la lámina media del haz de fibras, y también en el núcleo leñoso y en las células epidérmicas y corticales del tallo de la planta [119,126].

### *Pectinas*

Pectina es un nombre colectivo para diferentes formas de polisacáridos compuestos de unidades repetidoras de ácido galacturónico ligado a  $\alpha$ -1,4. Las pectinas están contenidas en la pared celular primaria de la mayoría de las plantas, pero también son un componente importante de la lámina media. Las pectinas aseguran una variedad de funciones incluyendo propiedades mecánicas, adhesión célula-célula, porosidad de la pared y unión de iones. Pueden hidrolizarse fácilmente a altas temperaturas y son degradados por las bacterias y el moho durante el proceso de enriamiento que se aplica a las plantas fibrosas (incluido el cáñamo y el lino) para separar las fibras de la parte no fibrosa. Las pectinas pueden crear geles cuando los cationes divalentes, como el calcio o el magnesio, forman enlaces cruzados entre polímeros adyacentes. Esta afinidad con los cationes podría interactuar con los mecanismos de fraguado de ligantes minerales como el cemento Portland o la cal utilizada en los compuestos a base de bioagregados [126].

### *Extraíbles*

Esta categoría reúne diferentes componentes químicos no estructurales que pueden ser fácilmente extraídos utilizando disolventes polares o no polares (generalmente agua, etanol, tolueno y éter). Los extractos incluyen algunos carbohidratos, lípidos, proteínas, hidrocarburos, compuestos fenólicos y materiales inorgánicos. Su concentración en las plantas es relativamente baja (<10 %) pero puede ser localmente mayor. En el caso de

bioagregados incorporados a una matriz mineral, estos extractivos pueden interactuar con las especies minerales del ligante y degradar sus propiedades [119,126].

### *Ceniza*

La ceniza se define como la materia inorgánica de la biomasa. Estos componentes pueden ser estructurales, es decir, ligados a la estructura física de la biomasa, o extraíbles, si pueden eliminarse mediante lavado o extracción. El contenido de ceniza suele ser bajo, aunque este parámetro puede variar considerablemente entre especies, ya que depende de factores genéticos y ambientales, así como de las características fisiológicas y morfológicas de los cultivos [119]. El contenido de este mineral puede ser significativamente mayor en plantas con alto contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), especialmente en arroz o paja de trigo. Para la mayoría de las fibras vegetales, el contenido de minerales estructurales se mantiene por debajo del 2 %. Algunas plantas (lino, cáñamo y algodón) también pueden acumular metales pesados como plomo, cobre, zinc y cadmio. No obstante, este punto podría suscitar algunas preocupaciones en materia de salud para su uso como bioagregados en aplicaciones de construcción [126].

### *Agua*

En los materiales vegetales, el contenido de humedad consiste en agua con iones libres disueltos. Su contenido varía normalmente entre el 10 y el 60 %, pero en algunas especies de biomasa cruda puede llegar hasta el 80 y el 90 %. El agua está ampliamente presente en las paredes celulares y puede influir en algunas de sus propiedades. Las paredes hidratadas son más flexibles y extensibles que las paredes no hidratadas. El contenido de humedad de los agregados vegetales podría afectar significativamente sus propiedades macroscópicas, especialmente su capacidad de compresión. Esta característica puede modificar en gran medida el rendimiento fresco y endurecido de los materiales compuestos [126].



## Anexo 3

# Resultados de concretos vegetales expuestos en la literatura

Tabla 20 - Propiedades físicas y mecánicas de diferentes compuestos con agregado vegetal lignocelulósico

Tipo de concreto	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f'_{cr}$ [MPa]	$\lambda$ [W/mK]	Fuente
Concreto convencional con relación agua cemento de 0.42	2000 - 2500	12 - 80	1.5	[20,26,165]
Concreto celular curado en autoclave	450 - 1250	5.00	0.14 - 0.23	[26]
Mortero a base de 66 % caliza y 33 % de agregado de Girasol de hasta 4 mm de diámetro con relación a/c de 0.5	284 - 469	0.50	0.096	[26]
Mortero a base de CPO y agregados de cáñamo (60 % del volumen) con relación agua cemento de 1	800	0.30	0.06 - 0.12	[5,26,156,166]
Mortero a base de cal (34 %), partículas de cáñamo (16 %) y agua (50 %) (relación en masa)	291 - 485	0.225 - 0.675	0.179 - 0.485	[149]
Mortero a base de Fibra de palma de 2 mm de diámetro (50 % del volumen) y cal, con relación a/c de 0.6, 0.8 y 1	950 - 680	0.6 - 0.2	0.201 - 0.091	[24]
Mortero a base de 37.5 % CaO, 7.5 % de Ca(OH) <sub>2</sub> , 5 % puzolana y 50 % Girasol (relación volumétrica) y relación a/c de 0.6	297 - 473	0.10	0.105	[26]
Mortero a base de cemento puzolánico (50 % de cal hidratada y 50 % de metacaolín) y girasol entre 10 y 32 % en masa y relación a/c entre 0.6 y 1	600	1.1 - 5.5	0.115	[166]
Mortero a base de cal hidratada, piedra pómez (en relación de 80:20 en masa) y cáñamo con tratamiento de parafina de entre 1 a 5 mm de diámetro	1184 - 1266	2.77	ND	[29,163]
Mortero a base de cal hidratada, piedra pómez (en relación de 80:20 en masa) y girasol con tratamiento de parafina de entre 1 a 5 mm de diámetro	1084 - 1204	2.52	ND	[29,163]
Mortero a base de cal y cáñamo con relación cementante/agregado de 0.3 y relación a/c de 1.2	587 - 733	0.15 - 0.83	ND	[148]
Mortero a base de CPO y 50 % de agregado de girasol (en volumen) con relación agua/cemento de 0.43	1850	13.61	0.096	[168]
Mortero a base de CPO y agregado de viruta de madera con relación de 0.81 y con relación a/c de 1.0	ND	3.7-5.6	0.2-0.24	[20]
Mortero a base de CPO y 50 % de partículas de caucho (en volumen) de menos de 1 mm de diámetro	1150	10.50	0.47	[91]
Mortero a base de CPO con reemplazo de cemento de 10 y 20 % por alga molida	ND	41.8 - 41.6	ND	[38]

Mortero a base de agregado de carrizo (30 % del volumen, con tratamiento de cocción) con relación a/c de 0.4	1.45	4.50	0.3	[155]
Mortero a base de hierba penacho (30 % del volumen, con tratamiento de Polietilenglicol) con relación a/c de 0.4	1.45	2.00	0.27	[155]
Mortero a base de bambú con relación de 1:13:0.4 entre el CPO, agregado y agua respectivamente	ND	11.65 - 19.49	ND	[28]
Mortero a base de cáñamo entre 20, 30 y 40 % en volumen y cal con relación de agregado y agua de 5:1	0.377 - 0.611		0.0899 - 0.1408	[23]
Mortero a base de CPO (450 g) y paja de trigo (400 ml) con relación a/c de 0.5	900 - 1215	1.9 - 6.4	0.18 - 0.26	[89]
Mortero a base de CPO (450 g), paja de trigo (200 ml) y perlita (200 ml) (agregado de origen volcánico) con relación a/c de 0.5	1100 - 1250	5.5 - 19.7	0.34	[89]

## Anexo 4

### Información complementaria del análisis energético

La Figura 74 muestra el plano arquitectónico de la vivienda unifamiliar considerada para el estudio, con las dimensiones correspondientes para la simulación energética realizada. La vivienda tiene una superficie de 90 m<sup>2</sup>, según datos del último censo nacional. La superficie total de las paredes se ha calculado en 96.72 m<sup>2</sup> y tras deducir la superficie de las ventanas la superficie neta es de 84.72 m<sup>2</sup>, por lo que se han calculado un total de 1118 bloques de construcción para las paredes de la vivienda.

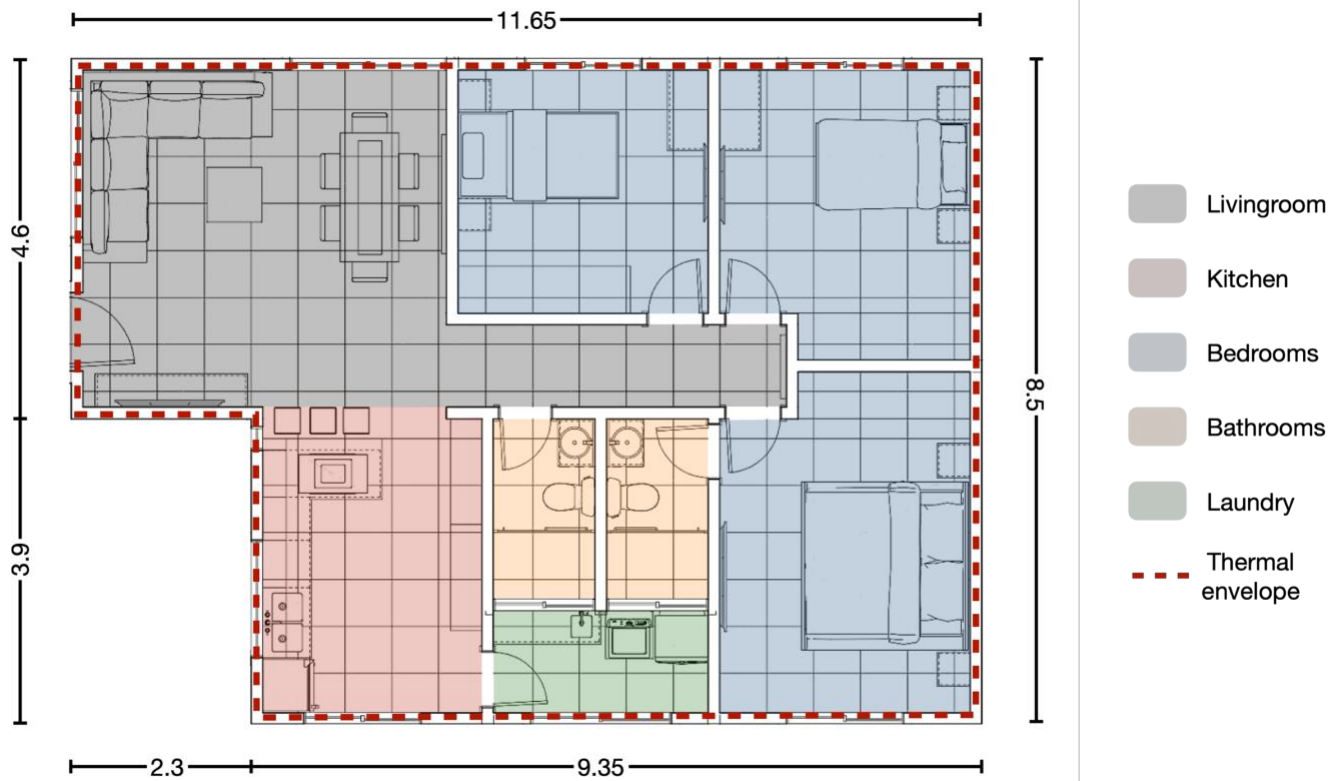


Figura 74 - Diseño arquitectónico de la vivienda unifamiliar (Dimensiones en metros)

## Anexo 5

### Resultados suplementarios del análisis ambiental y energético

#### 1. Consideraciones del análisis de inventario

Tabla 21 - Fuente de cementantes considerados en el estudio

Cementante	Lugar de obtención	Latitud	Longitud
Planta carboeléctrica	Plutarco Elías Calles	17.978132°	-102.113247°
	Carbón II	28.455928°	-100.689359°
Planta cementera	Cementos Fortaleza - Planta El Palmar	20.414614°	-99.022500°
	Cementos Fortaleza - Planta Tula	20.013384°	-99.181839°
	Cementos Fortaleza - Planta Vito	19.991729°	-99.195077°
	Cemex - Planta Atotonilco	20.000364°	-99.213900°
	Cemex - Planta Barrientos	19.578752°	-99.200950°
	Cemex - Planta Ciudad Valles	21.985156°	-98.957867°
	Cemex - Planta Ensenada	31.846834°	-116.584366°
	Cemex - Planta Guadalajara	20.605413°	-103.341389°
	Cemex - Planta Hermosillo Yaqui	28.928085°	-110.827693°
	Cemex - Planta Hidalgo	25.975039°	-100.454176°
	Cemex - Planta Huichapan	20.383565°	-99.687364°
	Cemex - Planta Mérida	20.954268°	-89.657756°
	Cemex - Planta Monterrey	25.700447°	-100.298515°
	Cemex - Planta Temuin	22.046644°	-98.870742°
	Cemex - Planta Tepeaca	18.967644°	-97.962363°
	Cemex - Planta Torreón	25.489118°	-103.399191°
	Cemex - Planta Zapotiltic	19.671286°	-103.376110°
	Cruz Azul - Planta Lagunas Oaxaca	16.804383°	-95.069611°
	Cycna - Planta Aguas Calientes	21.886737°	-102.317038°
	Cycna - Planta Puebla	19.060103°	-98.264489°
	GCC - Planta Chihuahua	28.688235°	-106.086848°
	GCC - Planta Ciudad Juárez	31.657319°	-106.478610°
	GCC - Planta Samalayuca	31.414166°	-106.449766°
	Holcim - Planta Acapulco	16.885631°	-99.831818°
	Holcim - Planta Apaxco	19.974790°	-99.181373°
	Holcim - Planta Hermosillo	29.044459°	-110.711137°
Holcim - Planta Macuspana	17.654039°	-92.442019°	
Holcim - Planta Orizabal	18.860551°	-97.052170°	
Holcim - Planta Ramos Arizpe	25.609736°	-100.863306°	
Holcim - Planta Tocoman	18.981888°	-103.869108°	
Moctezuma - Planta Cerritos	22.469199°	-100.380721°	

**Tabla 22 - Capital de cada estado y distancia de transporte del cemento**

<b>Lugar de manufacturación</b>	<b>Fuente</b>	<b>Distancia [km]</b>
Aguascalientes	Cycna - Planta Aguas Calientes	4.8
Mexicali	Cemex - Planta Ensenada	238
La Paz	Cemex - Planta Hermosillo Yaqui	765
San Francisco de Campeche	Cemex - Planta Mérida	170
Chihuahua	GCC - Planta Chihuahua	7.5
Tuxtla Gutiérrez	Holcim - Planta Macuspana	312
Saltillo	Holcim - Planta Ramos Arizpe	26
Colima	Holcim - Planta Tocoman	42.4
Ciudad de México	Cemex - Planta Barrientos	26
Victoria de Durango	Cemex - Planta Torreón	248
Chilpancingo de los Bravo	Holcim - Planta Acapulco	102
Guanajuato	Cycna - Planta Aguas Calientes	198
Pachuca de Soto	Cementos Fortaleza - Planta El Palmar	56.5
Guadalajara	Cemex - Planta Guadalajara	7.9
Toluca de Lerdo	Cemex - Planta Barrientos	83.3
Morelia	Cemex - Planta Atotonilco	263
Cuernavaca	Cemex - Planta Barrientos	113
Tepic	Cemex - Planta Guadalajara	208
Monterrey	Cemex - Planta Monterrey	3.1
Oaxaca de Juárez	Cruz Azul - Planta Lagunas Oaxaca	337
Puebla de Zaragoza	Cycna - Planta Puebla	9.2
Santiago de Querétaro	Cemex - Planta Huichapan	98.5
Chetumal	Cemex - Planta Mérida	400
Culiacán Rosales	Cemex - Planta Torreón	698
San Luis Potosí	Moctezuma - Planta Cerritos	106
Hermosillo	Cemex - Planta Hermosillo Yaqui	23.4
Villahermosa	Holcim - Planta Macuspana	72.8
Ciudad Victoria	Moctezuma - Planta Cerritos	260
Tlaxcala de Xicohténcatl	Cycna - Planta Puebla	39.8
Xalapa-Enríquez	Holcim - Planta Orizabal	142
Mérida	Cemex - Planta Mérida	10.3
Zacatecas	Cycna - Planta Aguas Calientes	120

**Tabla 23 - Capital de cada estado y distancia de transporte de la ceniza volante**

<b>Lugar de manufacturación</b>	<b>Fuente</b>	<b>Distancia [km]</b>
Aguascalientes	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	612.4
Mexicali	Carboeléctrica Carbón II	1801.5
La Paz	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	1610.2
San Francisco de Campeche	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	1727.1
Chihuahua	Carboeléctrica Carbón II	849.5
Tuxtla Gutiérrez	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	1427.6

Saltillo	Carboeléctrica Carbón II	396.5
Colima	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	341.5
Ciudad de México	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	606.7
Victoria de Durango	Carboeléctrica Carbón II	818.7
Chilpancingo de los Bravo	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	415.4
Guanajuato	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	476.3
Pachuca de Soto	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	617.2
Guadalajara	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	484.2
Toluca de Lerdo	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	532.4
Morelia	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	304.9
Cuernavaca	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	601.3
Tepic	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	688.8
Monterrey	Carboeléctrica Carbón II	397.8
Oaxaca de Juárez	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	1055.8
Puebla de Zaragoza	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	728.7
Santiago de Querétaro	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	488.7
Chetumal	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	1918.6
Culiacán Rosales	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	1167
San Luis Potosí	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	633.4
Hermosillo	Carboeléctrica Carbón II	1560.1
Villahermosa	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	1343.8
Ciudad Victoria	Carboeléctrica Carbón II	685.1
Tlaxcala de Xicohténcatl	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	705.7
Xalapa-Enríquez	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	858.9
Mérida	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	1904.9
Zacatecas	Carboeléctrica Plutarco Elías Calles	745.1

Tabla 24 - Capital de cada estado y distancia de transporte del Sargazo y la Arena

Lugar de manufacturación	Fuente de Sargazo	Distancia (Sargazo) [km]	Distancia (Arena) [km]
Aguascalientes	Tampico	574	50
Mexicali	Matamoros	2325.6	50
La Paz	Matamoros	1814.9	50
San Francisco de Campeche	Celestún	181.6	50
Chihuahua	Matamoros	1117.2	50
Tuxtla Gutiérrez	Mahahual	799.7	50
Saltillo	Matamoros	395	50
Colima	Tampico	960.4	50
Ciudad de México	Tampico	442	50
Victoria de Durango	La pesca	937	50
Chilpancingo de los Bravo	Tampico	718	50
Guanajuato	Tampico	602	50
Pachuca de Soto	Tampico	370.8	50
Guadalajara	Tampico	823	50

Toluca de Lerdo	Tampico	503.6	50
Morelia	Tampico	687	50
Cuernavaca	Tampico	687.3	50
Tepic	Tampico	965	50
Monterrey	Matamoros	311	50
Oaxaca de Juárez	Tampico	779.2	50
Puebla de Zaragoza	Tampico	440.3	50
Santiago de Querétaro	Tampico	474	50
Chetumal	Mahahual	142.1	50
Culiacán Rosales	El Porvenir	1441.4	50
San Luis Potosí	Tampico	435	50
Hermosillo	Matamoros	2081	50
Villahermosa	Celestún	678.6	50
Ciudad Victoria	La pesca	159	50
Tlaxcala de Xicohténcatl	Tampico	402.6	50
Xalapa-Enríquez	Tampico	460.7	50
Mérida	Progreso	43.2	50
Zacatecas	Tampico	660	50

## 2. Resultados globales del Análisis de Ciclo de Vida

Tabla 25 - Resultados del ACV en la producción del bloque CM

Ubicación	Materias primas		Transporte		Proceso	
	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]
Aguascalientes	2.2014	93.36%	0.15582	6.61%	0.0007	0.03%
Baja California	2.2014	84.24%	0.41117	15.73%	0.0007	0.03%
Baja California Sur	2.2014	69.00%	0.98823	30.98%	0.0007	0.02%
Campeche	2.2014	86.71%	0.33671	13.26%	0.0007	0.03%
Chihuahua	2.2014	93.25%	0.15877	6.73%	0.0007	0.03%
Chiapas	2.2014	81.71%	0.49220	18.27%	0.0007	0.02%
Coahuila	2.2014	92.45%	0.17903	7.52%	0.0007	0.03%
Colima	2.2014	91.76%	0.19699	8.21%	0.0007	0.03%
Ciudad de México	2.2014	92.45%	0.17903	7.52%	0.0007	0.03%
Durango	2.2014	83.89%	0.42212	16.09%	0.0007	0.03%
Guerrero	2.2014	89.33%	0.26225	10.64%	0.0007	0.03%
Guanajuato	2.2014	85.68%	0.36737	14.30%	0.0007	0.03%
Hidalgo	2.2014	91.17%	0.21243	8.80%	0.0007	0.03%
Jalisco	2.2014	93.23%	0.15921	6.74%	0.0007	0.03%
Estado de México	2.2014	90.08%	0.24177	9.89%	0.0007	0.03%
Michoacán	2.2014	83.37%	0.43854	16.61%	0.0007	0.03%
Morelos	2.2014	88.90%	0.27430	11.08%	0.0007	0.03%
Nayarit	2.2014	85.31%	0.37832	14.66%	0.0007	0.03%
Nuevo León	2.2014	93.44%	0.15396	6.53%	0.0007	0.03%
Oaxaca	2.2014	80.89%	0.51957	19.09%	0.0007	0.02%



Puebla	2.2014	93.17%	0.16064	6.80%	0.0007	0.03%
Querétaro	2.2014	89.47%	0.25842	10.50%	0.0007	0.03%
Quintana Roo	2.2014	78.89%	0.58856	21.09%	0.0007	0.02%
Sinaloa	2.2014	70.63%	0.91487	29.35%	0.0007	0.02%
San Luis Potosí	2.2014	89.17%	0.26663	10.80%	0.0007	0.03%
Sonora	2.2014	92.56%	0.17618	7.41%	0.0007	0.03%
Tabasco	2.2014	90.51%	0.23028	9.47%	0.0007	0.03%
Tamaulipas	2.2014	83.47%	0.43526	16.50%	0.0007	0.03%
Tlaxcala	2.2014	91.87%	0.19414	8.10%	0.0007	0.03%
Veracruz	2.2014	87.77%	0.30605	12.20%	0.0007	0.03%
Yucatán	2.2014	93.13%	0.16184	6.85%	0.0007	0.03%
Zacatecas	2.2014	88.62%	0.28196	11.35%	0.0007	0.03%

Tabla 26 - Resultados del ACV en la producción del bloque FA

Ubicación	Materias primas		Transporte		Proceso	
	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]
Aguascalientes	1.65608346	85.92%	0.2708134	14.05%	0.00057	0.03%
Baja California	1.65608346	70.63%	0.6881670	29.35%	0.00057	0.02%
Baja California Sur	1.65608346	60.41%	1.0846307	39.57%	0.00057	0.02%
Campeche	1.65608346	72.80%	0.6181920	27.18%	0.00057	0.03%
Chihuahua	1.65608346	83.86%	0.3180619	16.11%	0.00057	0.03%
Chiapas	1.65608346	70.94%	0.6779264	29.04%	0.00057	0.02%
Coahuila	1.65608346	86.98%	0.2472191	12.99%	0.00057	0.03%
Colima	1.65608346	86.85%	0.2502417	13.12%	0.00057	0.03%
Ciudad de México	1.65608346	85.20%	0.2871412	14.77%	0.00057	0.03%
Durango	1.65608346	76.44%	0.5097217	23.53%	0.00057	0.03%
Guerrero	1.65608346	84.07%	0.3132233	15.90%	0.00057	0.03%
Guanajuato	1.65608346	80.38%	0.4036292	19.59%	0.00057	0.03%
Hidalgo	1.65608346	84.03%	0.3141834	15.94%	0.00057	0.03%
Jalisco	1.65608346	86.90%	0.2490109	13.07%	0.00057	0.03%
Estado de México	1.65608346	83.78%	0.3200872	16.19%	0.00057	0.03%
Michoacán	1.65608346	79.58%	0.4244571	20.40%	0.00057	0.03%
Morelos	1.65608346	82.22%	0.3575640	17.75%	0.00057	0.03%
Nayarit	1.65608346	78.53%	0.4522007	21.44%	0.00057	0.03%
Nuevo León	1.65608346	87.84%	0.2286595	12.13%	0.00057	0.03%
Oaxaca	1.65608346	72.49%	0.6278436	27.48%	0.00057	0.02%
Puebla	1.65608346	84.79%	0.2965151	15.18%	0.00057	0.03%
Querétaro	1.65608346	83.60%	0.3242704	16.37%	0.00057	0.03%
Quintana Roo	1.65608346	66.24%	0.8434489	33.74%	0.00057	0.02%
Sinaloa	1.65608346	63.64%	0.9454328	36.33%	0.00057	0.02%
San Luis Potosí	1.65608346	82.21%	0.3579118	17.77%	0.00057	0.03%
Sonora	1.65608346	78.02%	0.4660800	21.96%	0.00057	0.03%
Tabasco	1.65608346	78.04%	0.4655689	21.94%	0.00057	0.03%

Tamaulipas	1.65608346	77.00%	0.4942027	22.98%	0.00057	0.03%
Tlaxcala	1.65608346	83.90%	0.3172769	16.07%	0.00057	0.03%
Veracruz	1.65608346	79.35%	0.4303046	20.62%	0.00057	0.03%
Yucatán	1.65608346	76.06%	0.5208077	23.92%	0.00057	0.03%
Zacatecas	1.65608346	80.89%	0.3906238	19.08%	0.00057	0.03%

Tabla 27 - Resultados del ACV en la producción del bloque SBC (Red eléctrica)

Ubicación	Materias primas		Transporte		Proceso	
	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]
Aguascalientes	3.0621	87.67%	0.42937918	12.29%	0.0012	0.04%
Baja California	3.0621	65.99%	1.57689878	33.98%	0.0012	0.03%
Baja California Sur	3.0621	64.41%	1.69078897	35.56%	0.0012	0.03%
Campeche	3.0621	76.78%	0.92484932	23.19%	0.0012	0.03%
Chihuahua	3.0621	81.75%	0.6823295	18.22%	0.0012	0.03%
Chiapas	3.0621	74.48%	1.0482133	25.49%	0.0012	0.03%
Coahuila	3.0621	91.07%	0.2988719	8.89%	0.0012	0.04%
Colima	3.0621	87.49%	0.4366798	12.48%	0.0012	0.04%
Ciudad de México	3.0621	88.29%	0.40492421	11.68%	0.0012	0.04%
Durango	3.0621	79.81%	0.77361092	20.16%	0.0012	0.03%
Guerrero	3.0621	87.34%	0.4424522	12.62%	0.0012	0.03%
Guanajuato	3.0621	85.94%	0.49959188	14.02%	0.0012	0.03%
Hidalgo	3.0621	88.16%	0.40992369	11.80%	0.0012	0.04%
Jalisco	3.0621	87.38%	0.44122233	12.59%	0.0012	0.03%
Estado de México	3.0621	87.78%	0.42497287	12.18%	0.0012	0.04%
Michoacán	3.0621	86.23%	0.48767187	13.73%	0.0012	0.03%
Morelos	3.0621	85.36%	0.52385636	14.60%	0.0012	0.03%
Nayarit	3.0621	81.41%	0.69788233	18.55%	0.0012	0.03%
Nuevo León	3.0621	92.08%	0.26229559	7.89%	0.0012	0.04%
Oaxaca	3.0621	77.39%	0.89338552	22.58%	0.0012	0.03%
Puebla	3.0621	87.21%	0.44798441	12.76%	0.0012	0.03%
Querétaro	3.0621	88.23%	0.40729336	11.74%	0.0012	0.04%
Quintana Roo	3.0621	72.75%	1.14602279	27.23%	0.0012	0.03%
Sinaloa	3.0621	69.37%	1.35078809	30.60%	0.0012	0.03%
San Luis Potosí	3.0621	86.76%	0.46592403	13.20%	0.0012	0.03%
Sonora	3.0621	70.71%	1.26708948	29.26%	0.0012	0.03%
Tabasco	3.0621	78.73%	0.8259284	21.24%	0.0012	0.03%
Tamaulipas	3.0621	85.62%	0.51300066	14.34%	0.0012	0.03%
Tlaxcala	3.0621	87.23%	0.44715098	12.74%	0.0012	0.03%
Veracruz	3.0621	83.68%	0.59601355	16.29%	0.0012	0.03%
Yucatán	3.0621	77.95%	0.86489302	22.02%	0.0012	0.03%
Zacatecas	3.0621	83.93%	0.58490936	16.03%	0.0012	0.03%

**Tabla 28 - Resultados del ACV en la producción del bloque SBC (Fotovoltaico)**

Ubicación	Materias primas		Transporte		Proceso	
	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]
Aguascalientes	1.5254	78.03%	0.42937918	21.96%	0.0002	0.01%
Baja California	1.5254	49.17%	1.57689878	50.83%	0.0002	0.00%
Baja California Sur	1.5254	47.43%	1.69078897	52.57%	0.0002	0.00%
Campeche	1.5254	62.25%	0.92484932	37.74%	0.0002	0.01%
Chihuahua	1.5254	69.09%	0.6823295	30.90%	0.0002	0.01%
Chiapas	1.5254	59.27%	1.0482133	40.73%	0.0002	0.01%
Coahuila	1.5254	83.61%	0.2988719	16.38%	0.0002	0.01%
Colima	1.5254	77.74%	0.4366798	22.25%	0.0002	0.01%
Ciudad de México	1.5254	79.02%	0.40492421	20.98%	0.0002	0.01%
Durango	1.5254	66.35%	0.77361092	33.65%	0.0002	0.01%
Guerrero	1.5254	77.51%	0.4424522	22.48%	0.0002	0.01%
Guanajuato	1.5254	75.32%	0.49959188	24.67%	0.0002	0.01%
Hidalgo	1.5254	78.81%	0.40992369	21.18%	0.0002	0.01%
Jalisco	1.5254	77.56%	0.44122233	22.43%	0.0002	0.01%
Estado de México	1.5254	78.20%	0.42497287	21.79%	0.0002	0.01%
Michoacán	1.5254	75.77%	0.48767187	24.22%	0.0002	0.01%
Morelos	1.5254	74.43%	0.52385636	25.56%	0.0002	0.01%
Nayarit	1.5254	68.61%	0.69788233	31.39%	0.0002	0.01%
Nuevo León	1.5254	85.32%	0.26229559	14.67%	0.0002	0.01%
Oaxaca	1.5254	63.06%	0.89338552	36.93%	0.0002	0.01%
Puebla	1.5254	77.29%	0.44798441	22.70%	0.0002	0.01%
Querétaro	1.5254	78.92%	0.40729336	21.07%	0.0002	0.01%
Quintana Roo	1.5254	57.10%	1.14602279	42.90%	0.0002	0.01%
Sinaloa	1.5254	53.03%	1.35078809	46.96%	0.0002	0.01%
San Luis Potosí	1.5254	76.60%	0.46592403	23.40%	0.0002	0.01%
Sonora	1.5254	54.62%	1.26708948	45.37%	0.0002	0.01%
Tabasco	1.5254	64.87%	0.8259284	35.12%	0.0002	0.01%
Tamaulipas	1.5254	74.83%	0.51300066	25.16%	0.0002	0.01%
Tlaxcala	1.5254	77.33%	0.44715098	22.67%	0.0002	0.01%
Veracruz	1.5254	71.90%	0.59601355	28.09%	0.0002	0.01%
Yucatán	1.5254	63.81%	0.86489302	36.18%	0.0002	0.01%
Zacatecas	1.5254	72.28%	0.58490936	27.71%	0.0002	0.01%

**Tabla 29 - Resultados del ACV en la producción del bloque SBC (Secado mixto)**

Ubicación	Materias primas		Transporte		Proceso	
	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]	kg CO <sub>2e</sub>	[%]
Aguascalientes	1.7436	80.19%	0.42937918	19.75%	0.0012	0.06%
Baja California	1.7436	52.49%	1.57689878	47.47%	0.0012	0.04%
Baja California Sur	1.7436	50.75%	1.69078897	49.21%	0.0012	0.04%
Campeche	1.7436	65.31%	0.92484932	34.64%	0.0012	0.05%

Chihuahua	1.7436	71.84%	0.6823295	28.11%	0.0012	0.05%
Chiapas	1.7436	62.43%	1.0482133	37.53%	0.0012	0.04%
Coahuila	1.7436	85.32%	0.2988719	14.62%	0.0012	0.06%
Colima	1.7436	79.93%	0.4366798	20.02%	0.0012	0.06%
Ciudad de México	1.7436	81.11%	0.40492421	18.84%	0.0012	0.06%
Durango	1.7436	69.23%	0.77361092	30.72%	0.0012	0.05%
Guerrero	1.7436	79.72%	0.4424522	20.23%	0.0012	0.06%
Guanajuato	1.7436	77.69%	0.49959188	22.26%	0.0012	0.05%
Hidalgo	1.7436	80.92%	0.40992369	19.02%	0.0012	0.06%
Jalisco	1.7436	79.76%	0.44122233	20.18%	0.0012	0.06%
Estado de México	1.7436	80.36%	0.42497287	19.59%	0.0012	0.06%
Michoacán	1.7436	78.10%	0.48767187	21.84%	0.0012	0.05%
Morelos	1.7436	76.86%	0.52385636	23.09%	0.0012	0.05%
Nayarit	1.7436	71.38%	0.69788233	28.57%	0.0012	0.05%
Nuevo León	1.7436	86.87%	0.26229559	13.07%	0.0012	0.06%
Oaxaca	1.7436	66.09%	0.89338552	33.86%	0.0012	0.05%
Puebla	1.7436	79.51%	0.44798441	20.43%	0.0012	0.06%
Querétaro	1.7436	81.02%	0.40729336	18.93%	0.0012	0.06%
Quintana Roo	1.7436	60.31%	1.14602279	39.64%	0.0012	0.04%
Sinaloa	1.7436	56.32%	1.35078809	43.64%	0.0012	0.04%
San Luis Potosí	1.7436	78.87%	0.46592403	21.08%	0.0012	0.06%
Sonora	1.7436	57.89%	1.26708948	42.07%	0.0012	0.04%
Tabasco	1.7436	67.82%	0.8259284	32.13%	0.0012	0.05%
Tamaulipas	1.7436	77.22%	0.51300066	22.72%	0.0012	0.05%
Tlaxcala	1.7436	79.54%	0.44715098	20.40%	0.0012	0.06%
Veracruz	1.7436	74.49%	0.59601355	25.46%	0.0012	0.05%
Yucatán	1.7436	66.81%	0.86489302	33.14%	0.0012	0.05%
Zacatecas	1.7436	74.84%	0.58490936	25.11%	0.0012	0.05%

### 3. Resultados de la simulación energética

Tabla 30 - Demanda energética normalizada por estado

Estado	Casa fabricada con bloques CM			Casa fabricada con bloques SBC		
	Calefacción	Refrigeración	Total	Calefacción	Refrigeración	Total
Aguascalientes	60723.27	25260.08	85983.35	59354.09	25557.47	84911.56
Baja California	70348.07	133142.19	203490.26	67013.81	113666.52	180680.33
Baja California Sur	17572.58	105040.6	122613.18	19308.01	90641.75	109949.76
Campeche	1637.48	116880.59	118518.07	2262.68	97495.23	99757.91
Coahuila	122014.08	13657.13	135671.21	112007.2	13706.31	125713.51
Colima	2725.82	77337.09	80062.91	4230.49	67253.41	71483.9
Chiapas	14061.65	39062.92	53124.57	14634.48	34741.13	49375.61
Chihuahua	114276.64	53977.75	168254.39	105638.37	48167.22	153805.59
Ciudad de México	119743.05	2322.16	122065.21	109931.5	2896.38	112827.88

Durango	91332.14	19996.92	111329.06	86193.49	20050.6	106244.09
Guanajuato	59040.86	19685.75	78726.61	57762.68	20037.93	77800.61
Guerrero	13530.2	34048.81	47579.01	16086.54	31651.95	47738.49
Hidalgo	122591.52	1785.97	124377.49	110984.88	2425.27	113410.15
Jalisco	31196.59	33174.67	64371.26	32943.87	32206.05	65149.92
México	211020.61	330.5	211351.11	185677.87	559.11	186236.98
Michoacán	63031.25	9940.05	72971.3	61530.81	10605.74	72136.55
Morelos	18166.64	40888.81	59055.45	20734.72	38022.59	58757.31
Nayarit	12032.2	42628.55	54660.75	14807.26	39045.66	53852.92
Nuevo León	58988.08	74889.06	133877.14	55635.22	64411.9	120047.12
Oaxaca	50596.46	13603.13	64199.59	50805.36	14718.18	65523.54
Puebla	128683.23	2183.72	130866.95	117019.59	2793.12	119812.71
Querétaro	85556.1	9389.44	94945.54	81136.2	10412.09	91548.29
Quintana Roo	193.44	122821.03	123014.47	348.35	101216.08	101564.43
San Luis Potosí	99170.9	12312.28	111483.18	92439.79	12312.28	105519.12
Sinaloa	11664.27	109162.18	120826.45	13509.13	109162.18	106498.99
Sonora	46518.11	132145.11	178663.22	45358.26	132145.11	158861.54
Tabasco	1130.41	144332.07	145462.48	1540.21	144332.07	122572.56
Tamaulipas	36085.32	92290.57	128375.89	34712.1	92290.57	113587.19
Tlaxcala	118056.13	2352.99	120409.12	108439.33	2352.99	111620.59
Veracruz	67877.50	13838.44	81715.94	63677.98	13347.82	77025.80
Yucatán	4971.26	99904.13	104875.39	5227.19	84454.53	89681.72
Zacatecas	109165.89	9944.2	119110.09	100951.3	9944.2	112009.96