



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**“LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL Y SU
IMPACTO EN LA HUELLA DE CARBONO EN EL SALVADOR”:
“UNA PERSPECTIVA HISTÓRICA”**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

Br. Ismael Roberto Alvarez Guardado

Br. José Humberto Hernández Carranza

SANTA TECLA, SEPTIEMBRE DE 2025



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

ING. ROSENDO MAURICIO SERMEÑO PALACIOS
RECTOR

DR. FRANCISCO ALFREDO CARRILLO LAREYNAGA
VICE-RECTOR

ING. ROOSELVET ADOLFO OSORIO
SECRETARIO GENERAL

LIC. CARLOS ALBERTO COCA MUÑOZ
FISCAL

ING. MAURICIO ANTONIO AGUIRRE ORELLANA
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

ING. MAURICIO ANTONIO AGUIRRE ORELLANA
DIRECTOR DE ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

SANTA TECLA, SEPTIEMBRE DE 2025



ASESOR

Ing. Antonio Estrada Hernández

JURADO EVALUADOR

Inga. Carolina Maribel Angulo Martínez

Ing. Miguel Ángel Rubio Franco

Ing. Mauricio Antonio Aguirre Orellana

SANTA TECLA, SEPTIEMBRE DE 2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA LATINOAMERICANA

ACTA DE CALIFICACIÓN DE
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

No. TRES MIL QUINIENTOS VEINTISEIS

A las diecisiete horas del viernes doce de septiembre de dos mil veinticinco. Reunidos los Miembros del Tribunal Examinador del Trabajo de Graduación presentado por ISMAEL ROBERTO ALVAREZ GUARDADO en el salón de sesiones de la UNIVERSIDAD TÉCNICA LATINOAMERICANA. Se procedió:

PRIMERO: Que habiendo analizado el Trabajo de Graduación titulado:

"IMPACTO DE LA CONSTRUCCION DE VIVIENDA DE INTERES SOCIAL, EN LA HUELLA DE CARBONO EN EL SALVADOR: UNA PERSPECTIVA HISTORICA."

Se dio por aprobada, la parte escrita.

SEGUNDO: Que, con base a dicha aprobación de la parte escrita, se procedió a instalar la respectiva defensa oral del trabajo.

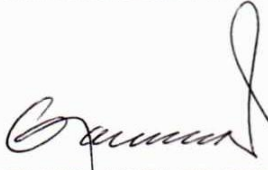
De conformidad a los resultados en dicha defensa, este Tribunal Examinador acuerda dar por APROBADA, con una calificación de OCHO PUNTO CERO (8.0), el Trabajo de Graduación presentado por el alumno arriba detallado obteniendo a partir de esta fecha su calidad de: INGENIERO CIVIL

No habiendo más que hacer constar, damos por terminada el acta que firmamos.


INGA. CAROLINA MARIBEL ANGULO MARTINEZ


ING. MIGUEL ÁNGEL RUBIO FRANCO


ING. MAURICIO ANTONIO AGUIRRE ORELLANA


ING. ROOSELVEY ADOLFO OSORIO
SECRETARIO GENERAL



UNIVERSIDAD TÉCNICA LATINOAMERICANA

ACTA DE CALIFICACIÓN DE
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

No. TRES MIL QUINIENTOS VEINTISIETE

A las diecisiete horas del viernes doce de septiembre de dos mil veinticinco. Reunidos los Miembros del Tribunal Examinador del Trabajo de Graduación presentado por JOSE HUMBERTO HERNANDEZ CARRANZA en el salón de sesiones de la UNIVERSIDAD TÉCNICA LATINOAMERICANA. Se procedió:

PRIMERO: Que habiendo analizado el Trabajo de Graduación titulado:

"IMPACTO DE LA CONSTRUCCION DE VIVIENDA DE INTERES SOCIAL, EN LA HUELLA DE CARBONO EN EL SALVADOR: UNA PERSPECTIVA HISTORICA."

Se dio por aprobada, la parte escrita.

SEGUNDO: Que, con base a dicha aprobación de la parte escrita, se procedió a instalar la respectiva defensa oral del trabajo.

De conformidad a los resultados en dicha defensa, este Tribunal Examinador acuerda dar por APROBADA, con una calificación de OCHO PUNTO CERO (8.0), el Trabajo de Graduación presentado por el alumno arriba detallado obteniendo a partir de esta fecha su calidad de: INGENIERO CIVIL

No habiendo más que hacer constar, damos por terminada el acta que firmamos.


INGA. CAROLINA MARIBEL ANGULO MARTINEZ


ING. MIGUEL ANGEL RUBIO FRANCO


ING. MAURICIO ANTONIO AGUIRRE ORELLANA


ING. ROOSELVE ADOLFO OSORIO
SECRETARIO GENERAL



Dedicatoria

A DIOS

Cuyo amparo y dirección han sido la piedra angular de este logro. Su providencia ha sido una fuente constante de inspiración y fortaleza en este camino.

A MIS AMADOS PADRES

Dedico este trabajo de graduación, cuyas vidas han sido un ejemplo de amor, dedicación y esfuerzo.

José Humberto Hernández Carranza

Dedicatoria

A DIOS

Por la vida, la salud, la sabiduría que me dio para que mi camino en la vida no se desviara de llegar hasta este momento tan importante para mi vida profesional.

A MIS AMADOS PADRES

El agradecimiento ya que pesar de todas las limitantes siempre pusieron como prioridad continuar estudiando, su amor y cariño, me sirvieron de inspiración para cumplir mis metas y objetivos en lo que me propongo siempre.

A MI PROMETIDA

Por su motivación para no rendirme, que me enseñó que la edad solo es un número y que los límites están en nuestra mente.

A MIS HERMANOS

Por su apoyo en todo momento cuando más lo necesite, en momentos en que pensaba que todo estaba perdido.

Ismael Roberto Álvarez Guardado

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

HdeC	Huella de Carbono
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
AFOLU	Agricultura, Silvicultura y Uso del Suelo
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
GHG	Protocolo de Gases de Efecto Invernadero
ICE	Inventario de Carbono y Energía
BSI	Institución Británica de Normas
ISO	Organización Internacional de Normalización
PAS	Especificación Disponible Públicamente
DEFRA	Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales
WRI	Instituto de Recursos Mundiales
WBCSD	Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
IVU	Instituto de Vivienda Urbana
FONAVIPO	Fondo Nacional de Vivienda Popular
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
ACOVICHSS	Asociación Cooperativa de Vivienda por Ayuda Mutua del Centro Histórico de San Salvador

AECID	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CASALCO	Cámara Salvadoreña de la Industria de la Construcción
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
UF	Unidad Funcional
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
MOP	Ministerio de Obras Públicas
NTS	Normas Técnicas Salvadoreñas
FSV	Fondo Social para la Vivienda
UAM	Unidades Ambientales Municipales
OPAMSS	Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I GENERALIDADES	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	4
1.2 JUSTIFICACIÓN.	5
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	6
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.5 TIPO DE INVESTIGACIÓN	9
1.6 MAPA CONCEPTUAL	9
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	11
2.1 MARCO TEORICO CONCEPTUAL	12
2.2 CONCEPTOS CLAVES.	12
2.3 MARCOS NORMATIVOS INTERNACIONALES PARA LA MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO.....	16
2.4 MEDICIÓN Y ENFOQUES.	18
2.5 ALCANCES DE LAS EMISIONES	21
2.6 APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LA HUELLA DE CARBONO EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL	21
2.7 PRINCIPIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS.....	24

2.8	INDICADORES AMBIENTALES APLICADOS A LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE.....	25
2.9	ANTECEDENTES HISTÓRICOS EN EL SALVADOR.....	28
2.10	EVOLUCIÓN Y TRANSICIÓN HACIA LA SOSTENIBILIDAD EN LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL.....	32
2.11	IMPACTO AMBIENTAL DE LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA SOCIAL...	34
2.12	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV).....	40
2.13	LA UNIDAD FUNCIONAL.....	44
2.14	FICHA TÉCNICA: BASE DE DATOS ICE V3.0.....	46
2.15	NORMATIVA Y POLÍTICAS AMBIENTALES APLICABLES EN EL SALVADOR PARA VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL.....	47
2.16	FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL PARA LA METODOLOGÍA	52
2.17	CONTEXTO INVESTIGATIVO, LIMITACIONES Y REPLICABILIDAD	53
	CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO.....	54
3.1	CASO DE ESTUDIO “A”: VILLAS DE SAN PEDRO	55
3.2	CASO DE ESTUDIO B: CIUDAD MARSELLA.....	94
	CAPÍTULO IV ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	126
4.1	COMPARACIÓN DE EMISIONES TOTALES Y ESPECÍFICAS POR UNIDAD FUNCIONAL	127
4.2	MATERIALES DOMINANTES Y PARTIDAS CON MAYOR IMPACTO	130

4.3	RELACIÓN ENTRE CONTEXTO TERRITORIAL Y CARGA AMBIENTAL...	134
4.4	DISCUSIÓN CRÍTICA Y TÉCNICA DE LOS RESULTADOS.....	135
4.5	APORTE TÉCNICO-ACADÉMICO	141
4.6	APORTE PRÁCTICO PARA LA INGENIERÍA Y LA GESTIÓN DE PROYECTOS... ..	142
4.7	APORTE AL DESARROLLO SOSTENIBLE Y LA POLÍTICA PÚBLICA	143
4.8	APORTE INSTITUCIONAL Y EDUCATIVO	144
4.9	MODELO APLICATIVO DE LA METODOLOGÍA EN UNA PARTIDA CONSTRUCTIVA	145
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		148
5.1	CONCLUSIONES.	149
5.2	RECOMENDACIONES.....	151
ANEXOS		153

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 FICHA TÉCNICA DE LA BASE DE DATOS ICE V3.0.....	20
TABLA 2 MATERIALES MÁS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN EL SALVADOR.	38
TABLA 3 UNIDADES FUNCIONADES EN ACV PARA VIVIENDA.....	45
TABLA 4 COMPARACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS INTERNACIONALES PARA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE Y SU APLICACIÓN EN EL SALVADOR.....	51
TABLA 5 DISTRIBUCION DE FACTOR POR EMISION DE KG CO2E/KG SEGUN MATERIAL.	61
TABLA 6 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: ESTRUCTURA Y CUBIERTA DE TECHO DE LAMINA DE ALUMINIO	69
TABLA 7 PESOS DE MATERIALES CASO A (VILLAS DE SAN PEDRO)	70
TABLA 8 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PILOTE 30 CMS DIAMETRO	75
TABLA 9 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: VIGA DE FUNDACION VF-1.....	76
TABLA 10 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PARED DE CONCRETO DE 10 CM.....	77
TABLA 11 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA INTERMEDIA Y CARGADERO, BLOQUE DE 15 CM.....	78
TABLA 12 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA DE CORONAMIENTO SC (BLOQUE SOLERA DE 15 CM)	79

TABLA 13 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PISO DE MORTERO F'C 125 KG/CM2	80
TABLA 14 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: REPELLO Y AFINADO 1:1 DE PAREDES DE DUCHA H=1.90 MTS	81
TABLA 15 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: POLIN C DE 4" CH 14 CON CELOSIA DE HO CORRUGADO DE 3/8 @ 60	82
TABLA 16 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: CUBIERTA DE TECHO DE LAMINA GALVANIZADA	82
TABLA 17 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PUERTAS Y VENTANAS DE LAMINA TROQUELADA.....	83
TABLA 18 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: DIVISION DE FIBROCEMENTO DE 8 MM.	83
TABLA 19 RESUMEN DE EMISIONES DE GEI POR MATERIAL EN PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A).....	85
TABLA 20 RESUMEN EMISIONES DE GEI POR PARTIDA EN PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A).	86
TABLA 21 PESOS DE MATERIALES CASO B (CIUDAD MARSELLA).....	103
TABLA 22 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: FIRME DE CONCRETO, ESPESOR 10 CMS.....	108
TABLA 23 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA DE FUNDACIÓN (VIGA DE AMARRE)	109
TABLA 24. ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA INTERMEDIA	110

TABLA 25. ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA DE CORONAMIENTO.....	111
TABLA 26 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: CARGADEROS SOBRE VANOS.....	112
TABLA 27 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: NERVIOS (ESQUINAS Y REFUERZOS).....	113
TABLA 28 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: MUROS DE BLOQUE 10 CM (ALTURA 2.40 MT).....	114
TABLA 29 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: REPELLO 2 CM Y AFINADO INTERIOR Y EXTERIOR.....	115
TABLA 30 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PISO CERAMICO 32X32	116
TABLA 31 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: CUBIERTA DE LAMINA ZINC-ALUM CAL 26.....	117
TABLA 32 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: POLIN Z PARA ESTRUCTURA DE TECHO.....	117
TABLA 33 RESUMEN DE EMISIONES DE (GEI) POR MATERIAL EN EL PROYECTO CIUDAD MARSELLA (CASO B).....	119
TABLA 34 RESUMEN DE EMISIONES GEI ESTIMADA POR PARTIDA EN PROYECTO CIUDAD MARSELLA (CASO B).....	121
TABLA 35 COMPATARIO DE MATERIALES QUE MAS CONTRIBUYEN A LA GENERACION DE HUELLA DE CARBONO ENTRE AMBOS PROYECTOS EN ESTUDIO.....	130

TABLA 36 METODOLOGÍA DE ASIGNACIÓN DE PUNTAJES CUALITATIVOS PARA EL GRÁFICO RADAR	137
TABLA 37 RESUMEN DE RESPUESTAS A ENCUESTAS CASO A.....	158
TABLA 38 RESUMEN DE RESPUESTAS A ENCUESTAS CASO B.....	162
TABLA 39 VALORES DE CARBONO INCORPORADO (KG CO₂E/KG) DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LOS CASOS DE ESTUDIO VILLAS DE SAN PEDRO Y CIUDAD MARSELLA	167
TABLA 40 FACTORES DE EMISIÓN CRADLE-TO-SITE (HUELLA DE CARBONO INCORPORADA).....	169
TABLA 41 TABLA DE EQUIVALENCIAS DE CALIBRES Y ESPESORES DE METALES.....	172

INDICE DE GRAFICOS

GRÁFICO 1 RESUMEN EMISIONES DE GEI POR MATERIAL EN PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A)	85
GRÁFICO 2 RESUMEN EMISIONES DE GEI POR PARTIDA EN PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A).....	87
GRÁFICO 3 RESUMEN EMISIONES DE GEI POR MATERIAL EN PROYECTO CIUDAD MARSELLA	119
GRÁFICO 4 RESUMEN DE EMISIONES GEI ESTIMADA POR PARTIDA EN PROYECTO CIUDAD MARSELLA (CASO B)	122
GRÁFICO 5 COMPARACION DE EMISIONES ABSOLUTAS Y ESPECIFICAS POR CASO DE ESTUDIO	129
GRÁFICO 6 DIAGRAMA DE PARETO, EMISIONES POR PARTIDA (CASO A)	132
GRÁFICO 7 DIAGRAMA DE PARETO - EMISIONES POR PARTIDA (CASO B)	133
GRÁFICO 8 COMPARACIÓN CUALITATIVA ENTRE AMBOS PROYECTOS EN ESTUDIO.....	138

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 MAPA CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN: COMPONENTES Y ESTRUCTURA.....	10
FIGURA 2 LÍMITES DEL SISTEMA TÍPICAMENTE UTILIZADOS EN UN ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	56
FIGURA 3 APLICACION PRACTICA DEL ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO.....	147

INTRODUCCIÓN

La vivienda es un derecho humano fundamental y una prioridad histórica en las políticas públicas de desarrollo social. En El Salvador, los programas de construcción de viviendas de interés social han buscado responder al déficit habitacional mediante soluciones accesibles para los sectores de menores ingresos. Sin embargo, el crecimiento del parque habitacional no ha estado exento de impactos ambientales, especialmente en lo que respecta a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al ciclo de vida de los materiales y procesos constructivos utilizados.

La presente investigación analiza el impacto de la construcción de viviendas de interés social sobre la huella de carbono en El Salvador, desde una perspectiva histórica, técnica y contextualizada. Para ello, se parte de la evolución de los sistemas constructivos empleados en el país, con énfasis en los materiales predominantes en proyectos habitacionales impulsados por instituciones como el Fondo Nacional de Vivienda Popular (FONAVIPO), el Viceministerio de Vivienda y organizaciones no gubernamentales.

El trabajo adopta una metodología mixta de tipo histórico-descriptiva y cuantitativa aplicada, que permite articular una revisión documental con el análisis de casos reales construidos en los últimos años. Se estudian dos tipos viviendas representativas: una ubicada en la zona de San Pedro Masahuat (Villas de San Pedro) y otra en un entorno urbano en San Juan Opico (Ciudad Marsella). Ambas han sido sometidas a un análisis de huella de carbono incorporado, utilizando la base de datos ICE v3.0, así como factores de emisión nacionales ajustados al contexto salvadoreño.

La investigación identifica los materiales y procesos que más contribuyen a las emisiones de carbono, con el fin de proponer estrategias de mitigación viables y contextualizadas, sin

comprometer la funcionalidad, la asequibilidad ni la calidad habitacional. Asimismo, se incorporan elementos de validación contextual mediante encuestas a residentes, observación directa y evaluación de condiciones térmicas, energéticas y constructivas.

Este estudio pretende aportar conocimiento técnico útil para la toma de decisiones en materia de vivienda sostenible, contribuyendo al cumplimiento de compromisos climáticos nacionales como la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), así como a la integración del enfoque ambiental en la política habitacional de El Salvador.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La construcción de viviendas de interés social en El Salvador ha sido una estrategia clave para atender la necesidad habitacional de la población de bajos ingresos. No obstante, la construcción masiva de estas viviendas, en muchos casos, no incorpora criterios de sostenibilidad ambiental ni tecnologías de bajo impacto, lo que contribuye significativamente a la generación de gases de efecto invernadero (GEI). Pese a los avances en políticas de vivienda y en la cobertura habitacional en las últimas décadas, no se dispone en el país de estudios técnicos, cuantitativos ni históricos que permitan evaluar el impacto ambiental de estas construcciones, en particular su huella de carbono. Esto representa una limitación crítica, ya que impide determinar en qué medida las decisiones constructivas, los materiales utilizados y las normativas adoptadas han contribuido —o no— a mitigar los efectos del cambio climático.

La ausencia de esta evaluación estructurada genera una brecha técnica y política: por un lado, se desconoce el costo ambiental real de las viviendas de interés social; por el otro, se dificulta el diseño de políticas públicas integradas con criterios de sostenibilidad.

Esta problemática se traduce en las siguientes preguntas orientadoras de la investigación:

1. ¿Cuál ha sido el impacto histórico en la huella de carbono debido a la construcción de viviendas de interés social en El Salvador?
2. ¿Qué materiales y métodos constructivos se han empleado en distintas etapas históricas?
3. ¿En qué medida han contribuido estas viviendas a mitigar o agravar los efectos del cambio climático?

4. ¿Qué relación existe entre las políticas públicas habitacionales y las decisiones constructivas adoptadas?

En consecuencia, este trabajo busca subsanar la falta de documentación técnica y científica sobre el impacto ambiental de las viviendas de interés social en El Salvador, desde una perspectiva histórica, cuantitativa y contextualizada, con énfasis en su huella de carbono.

Este panorama plantea una disyuntiva entre la necesidad urgente de garantizar el acceso a una vivienda digna y asequible, y el compromiso global de reducir las emisiones que aceleran el cambio climático. ¿Cómo es posible entonces promover la construcción de viviendas de interés social que, además de ser económicas y accesibles, sean sostenibles y reduzcan su impacto ambiental?

1.2 JUSTIFICACIÓN.

La construcción de viviendas de interés social ha sido una constante en el desarrollo urbano y rural de El Salvador. Sin embargo, su impacto ambiental —particularmente en lo relativo a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante los procesos constructivos— ha sido poco abordado desde una perspectiva técnica e histórica.

En investigaciones de huella de carbono con enfoque cuantitativo, es común utilizar herramientas especializadas como estaciones de monitoreo de CO₂, analizadores portátiles de gases, sensores de consumo energético y software de modelado ambiental para realizar mediciones directas en campo. No obstante, esta investigación no contempla la recolección de datos empíricos mediante equipos de medición ambiental, dado que su enfoque es de carácter documental y descriptivo.

El presente estudio se apoya en fuentes documentales verificadas, tales como publicaciones técnicas, bases de datos de factores de emisión (como ICE v3.0), estudios de caso consolidados y registros históricos sobre técnicas constructivas aplicadas en viviendas de interés social. La investigación se enfoca en el análisis de los procesos constructivos asociados a estas viviendas, considerando su incidencia en la generación de emisiones de carbono. A partir de este análisis, se busca identificar patrones en el uso de materiales, métodos constructivos y decisiones de diseño, evaluando su relación con la huella de carbono en distintas etapas históricas del país.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.

1.3.1 Alcances

Esta investigación tiene como alcance principal el análisis del impacto de la construcción de viviendas de interés social en la huella de carbono en El Salvador, desde una perspectiva histórica y bajo un enfoque documental-descriptivo.

A continuación, se detallan los alcances específicos:

- a) Alcance temático: Se aborda la relación entre las prácticas constructivas en viviendas de interés social y las emisiones de GEI, estimadas mediante el concepto de huella de carbono y herramientas como el ACV.
- b) Alcance espacial: El estudio se limita al territorio salvadoreño, y se profundiza en dos casos representativos: una vivienda subsidiada en el proyecto Villas de San Pedro (San Pedro Masahuat, La Paz) y una vivienda formal privada en Ciudad Marsella (San Juan Opico, La Libertad).
- c) Alcance temporal: El análisis histórico comprende desde la implementación de políticas habitacionales tras la firma de los Acuerdos de Paz (1992) hasta el año 2024.

- d) Alcance metodológico: La investigación es de tipo documental-descriptiva con elementos de análisis cuantitativo. Se utilizaron entrevistas, revisión normativa, estudios académicos previos y la base de datos ICE v3.0 para estimar emisiones de carbono incorporado.
- e) Alcance técnico: El estudio se enfoca únicamente en las emisiones de carbono incorporado en la construcción, mantenimiento y uso de las viviendas, sin incluir emisiones indirectas como transporte o cambios de uso del suelo.
- f) Alcance analítico: El estudio no pretende realizar una evaluación representativa estadística nacional, sino ofrecer un análisis comparativo y cualitativo que sirva de base para recomendaciones orientadas a políticas públicas y prácticas sostenibles.

1.3.2 Limitaciones

La investigación presenta las siguientes limitaciones:

- a) Carencia de datos nacionales actualizados sobre huella de carbono de materiales en El Salvador.
- b) Escasez de registros históricos oficiales sobre los proyectos habitacionales de interés social, lo cual obliga a reconstruir información mediante entrevistas y revisión documental.
- c) Restricciones económicas que impidieron el uso de equipos especializados para medición directa de emisiones.
- d) Dependencia parcial de fuentes internacionales (Costa Rica, Colombia, México) para establecer equivalencias en análisis de ciclo de vida, ante la falta de bases de datos locales específicas.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.4.1 Objetivo General

Analizar el impacto de la construcción de viviendas de interés social en la huella de carbono en El Salvador, desde una perspectiva histórica, con el fin de generar información relevante que permita promover prácticas constructivas sostenibles y mitigar el impacto ambiental asociado.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Investigar la evolución de las políticas habitacionales y prácticas constructivas aplicadas en viviendas de interés social desde 1992 hasta 2024.
- b) Estimar el impacto ambiental de las viviendas de interés social mediante el cálculo teórico de emisiones de carbono incorporado en sus procesos constructivos, uso y mantenimiento, utilizando fuentes bibliográficas, bases de datos y metodologías reconocidas.
- c) Comparar dos casos de estudio (en Villas de San Pedro y en Ciudad Marsella) para identificar diferencias en la huella de carbono según contexto, materiales y enfoque constructivo.
- d) Analizar el vínculo entre vivienda social, pobreza energética y sostenibilidad ambiental.
- e) Formular recomendaciones técnicas y estratégicas que contribuyan a la reducción de la huella de carbono en futuras construcciones de interés social.

1.5 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo documental, descriptiva e histórica, por lo que podemos enunciar lo siguiente:

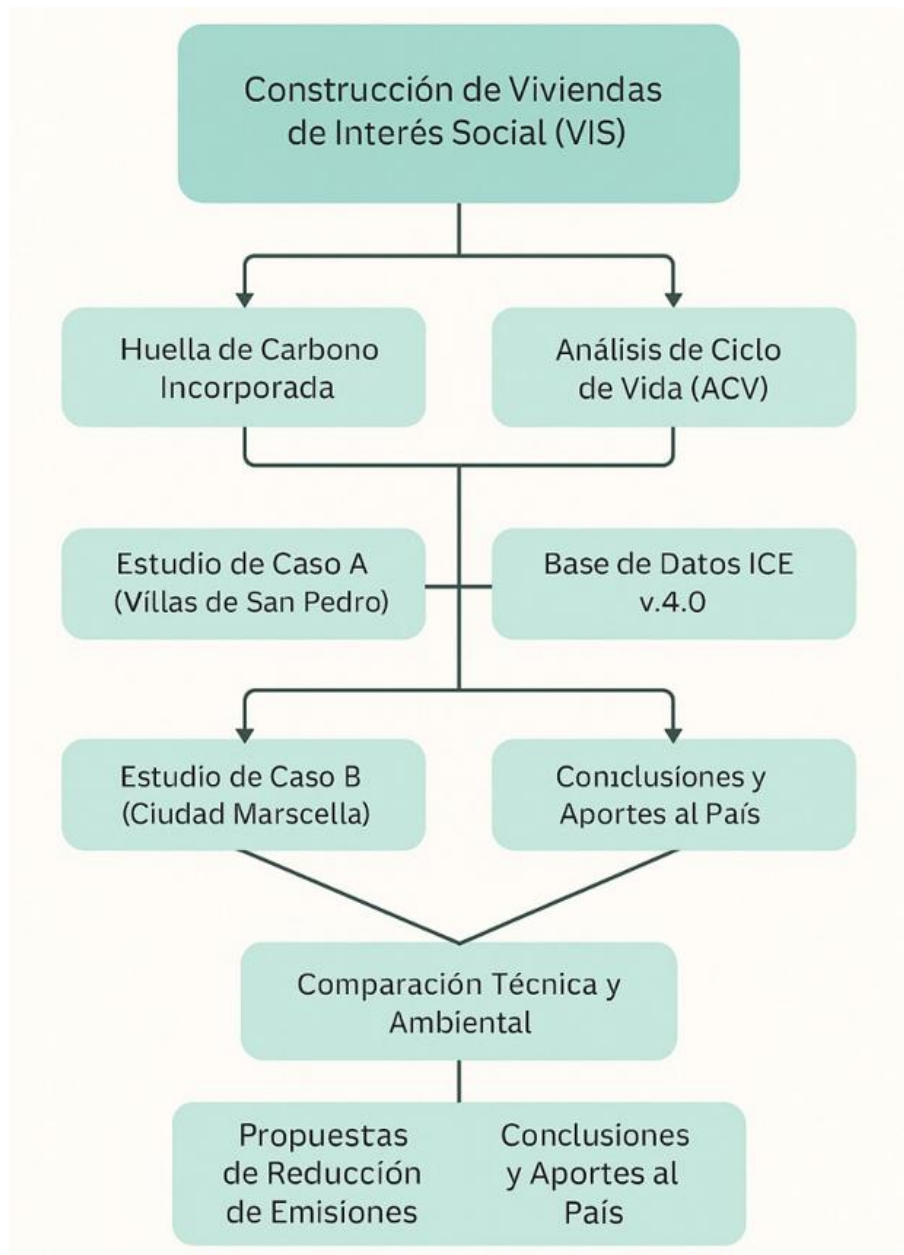
- Es documental, ya que se basa en el análisis y recopilación de fuentes primarias y secundarias, incluyendo leyes, políticas públicas, publicaciones académicas y normativas técnicas.
- Es descriptiva, pues busca caracterizar el impacto ambiental de la construcción de viviendas de interés social mediante la estimación de la huella de carbono y el análisis de sus prácticas constructivas.
- Es histórica, dado que considera la evolución de estas construcciones a lo largo del tiempo, contextualizando los cambios en función de políticas, materiales, tecnologías y condiciones socioeconómicas.
- El enfoque metodológico integra técnicas cualitativas (revisión normativa, entrevistas, análisis histórico) y cuantitativas (estimaciones con ACV e ICE v3.0), permitiendo un análisis comparativo entre dos casos representativos en Villas de San Pedro y Ciudad Marsella.

1.6 MAPA CONCEPTUAL

Antes de abordar el marco teórico y metodológico, se presenta a continuación un mapa conceptual que sintetiza visualmente los principales componentes de esta investigación. Este esquema permite comprender de un vistazo la relación jerárquica y lógica entre los elementos claves del estudio, desde la problemática central hasta los estudios de caso, análisis comparativo y

propuestas finales. Su propósito es facilitar la lectura del documento, destacando la coherencia interna de la investigación y sus componentes metodológicos y técnicos.

**FIGURA 1 MAPA CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN:
COMPONENTES Y ESTRUCTURA**



Nota: Fuente (Elaboración propia)

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 MARCO TEORICO CONCEPTUAL

Habiendo planteado en el Capítulo 1 la problemática ambiental asociada a la construcción de viviendas de interés social en El Salvador, así como los objetivos y alcances de esta investigación, el presente capítulo desarrolla los fundamentos teóricos, históricos y normativos que sustentan el estudio.

El presente marco teórico conceptual establece los fundamentos para comprender la relación entre la construcción de viviendas de interés social y su impacto en la huella de carbono en El Salvador. Se abordan definiciones clave, marcos normativos, antecedentes históricos y las metodologías utilizadas para evaluar la huella de carbono en este contexto.

Este capítulo se construye a partir de una revisión documental, basada en fuentes académicas, normativas y técnicas, que permite contextualizar el fenómeno desde una perspectiva investigativa de tipo histórico y descriptivo. En ese sentido, el análisis se centra en la comprensión de los procesos y decisiones técnicas a partir de datos ya disponibles, sin recurrir a mediciones instrumentales en campo, pero aplicando herramientas reconocidas de estimación indirecta que fortalecen el sustento técnico de la investigación.

2.2 CONCEPTOS CLAVES.

Para comprender el impacto de la construcción de viviendas de interés social en la huella de carbono en El Salvador, es necesario delimitar con precisión los conceptos técnicos fundamentales que sustentan esta investigación. Este subcapítulo presenta las definiciones operativas de los principales términos utilizados en el análisis, incluyendo aquellos relacionados

con la sostenibilidad, las metodologías de evaluación ambiental, las bases normativas y los materiales de construcción. La claridad conceptual es esencial para asegurar la coherencia terminológica en el desarrollo del estudio y para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, es por ello por lo que se tienen los siguientes términos y su significado.

2.2.1 Vivienda de Interés Social:

La vivienda de interés social se define como aquella destinada a sectores de bajos ingresos y financiada total o parcialmente por el Estado o por instituciones privadas con subsidios gubernamentales. En El Salvador, estas viviendas se caracterizan por su diseño compacto y materiales de bajo costo, lo que incide en su impacto ambiental.

2.2.2 Huella de Carbono.

La huella de carbono es el indicador que mide la cantidad total de emisiones de GEI, expresadas en toneladas de CO₂ equivalente, generadas directa o indirectamente por una actividad, producto o servicio. En el caso de la construcción, esta huella proviene de la extracción y producción de materiales, el transporte, la fase constructiva y el ciclo de vida de la edificación.

2.2.3 Análisis de Ciclo de Vida

Metodología estandarizada para evaluar los impactos ambientales de un producto o sistema durante todas sus etapas: desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

2.2.4 Unidad Funcional (UF)

Medida de referencia que define el servicio que presta un sistema o producto en estudios de ACV, permitiendo comparar ambientalmente distintas soluciones bajo un mismo criterio funcional.

2.2.5 Norma PAS 2050

La norma PAS 2050:2008 Verificación de la Huella de Carbono, es una especificación publicada por British Standards Institution (Instituto Británico de Normalización) en 2008, Esta especificación sirve para calcular la huella de carbono de productos y servicios a lo largo de su ciclo de vida, centrada exclusivamente en emisiones de GEI.

2.2.6 Ghg Protocol

El Protocolo de GEI (Greenhouse Gas Protocol) (Protocolo de Gases de Efecto Invernadero) es un marco metodológico internacional para cuantificar y reportar emisiones de gases de efecto invernadero. Establece tres alcances: emisiones directas, indirectas por energía y por cadena de suministro.

2.2.7 ICE V3.0-V4 (Inventario de Carbono y Energía) Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019)

La base de datos ICE desarrollada por la Universidad de Bath que proporciona factores de emisión y energía incorporada de materiales de construcción comúnmente usados.

2.2.8 Construcción Sostenible.

Estrategia constructiva que busca reducir el impacto ambiental a través del uso eficiente de recursos, energía renovable y diseños adaptados al clima local (bioclimáticos).

2.2.9 Simapro.

Es un Software especializado para realizar el ACV, usado en investigación y certificaciones ambientales como LEED o EDGE.

2.2.10 Athena Impact Estimator.

Software desarrollado en Canadá para evaluar el impacto ambiental de edificios, basado en modelado de diseño y materiales; útil en fases iniciales del proyecto.

2.2.11 Factores de Emisión.

Valores que indican cuántos kilogramos de CO₂e se generan por unidad de material o energía (kg CO₂e/kg, m² o MJ), utilizados para estimar huella de carbono en construcción.

2.2.12 Reglamento Especial de Evaluación Ambiental.

Normativa salvadoreña que regula el procedimiento para evaluar el impacto ambiental de proyectos de construcción, incluyendo viviendas de interés social.

2.2.13 Materiales de Construcción.

Componentes como cemento, acero, bloques de concreto, madera o lámina, que representan distintas huellas de carbono según su origen, procesamiento y transporte.

2.2.14 Eficiencia Energética.

Uso racional de la energía en edificaciones, incluyendo estrategias como aislamiento, diseño pasivo o integración de energías renovables.

2.2.15 Indicadores de Sostenibilidad

Parámetros utilizados para medir el impacto ambiental de una ciudad o edificio, incluyendo la huella de carbono, hídrica y de materiales.

2.3 MARCOS NORMATIVOS INTERNACIONALES PARA LA MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO.

La medición rigurosa y estandarizada de la huella de carbono requiere el uso de marcos normativos reconocidos internacionalmente que garanticen la coherencia, transparencia y comparabilidad de los resultados. En el contexto de la construcción, y en particular en la evaluación ambiental de viviendas de interés social, estos marcos proporcionan los lineamientos técnicos para identificar, cuantificar y reportar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo del ciclo de vida de materiales, procesos y sistemas constructivos.

Entre los marcos más utilizados a nivel global se encuentran las normas ISO 14040 (Organización Internacional de Normalización 2006a) y 14044 sobre ACV, el protocolo británico

PAS 2050 para la cuantificación de la huella de carbono en productos, y el GHG Protocol, ampliamente adoptado por empresas, gobiernos y proyectos para contabilizar emisiones en distintos niveles organizacionales. Estas herramientas han servido como base para regulaciones y programas de sostenibilidad en múltiples países y resultan fundamentales para estructurar estudios ambientales con validez técnica y aplicabilidad práctica.

2.3.1 ISO 14040 e ISO14044: Normas Internacionales Para el Análisis de Ciclo de Vida.

Las normas ISO 14040:2006 y ISO 14044:2006b forman parte de la familia de normas ISO 14000, que se enfocan en la gestión ambiental. Estas dos en particular establecen los principios, requisitos y directrices para realizar un ACV, una metodología que evalúa los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto, proceso o servicio. (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

2.3.2 Normas PAS 2050: Protocolo Para Evaluar la Huella de Carbono de Productos y Servicios.

Las normas PAS 2050 (Publicly Available Specification 2050 Especificación Disponible Públicamente 2050) por sus siglas en inglés, es un protocolo desarrollado en el Reino Unido por el BSI (Institución Británica de Normas), en colaboración con DEFRA (Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales) (Department for Environment, Food and Rural Affairs) y Carbon Trust, con el propósito de proporcionar una metodología estandarizada para evaluar la huella de carbono de productos y servicios a lo largo de su ciclo de vida.

Publicado por primera vez en 2008 y revisado en 2011, el estándar PAS 2050:2011 define los principios, requisitos y reglas específicas para cuantificar las emisiones de GEI asociadas a un

producto, expresadas en kilogramos de CO₂ equivalente por unidad funcional (por ejemplo, kg CO₂e/m² o por vivienda).

2.3.3 GHG Protocol: Marco Metodológico para Calcular Emisiones de GEI en Diferentes Sectores.

El GHG Protocol es una iniciativa conjunta entre el WRI (Instituto de Recursos Mundiales) por sus siglas en inglés y el WBCSD (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, por sus siglas en inglés), establecida para desarrollar normas internacionales destinadas a la cuantificación, reporte y gestión de emisiones de GEI.

2.4 MEDICIÓN Y ENFOQUES.

La metodología más común para medir la huella de carbono en construcción es el ACV, el cual abarca las siguientes etapas:

- Extracción y procesamiento de materiales
- Fabricación y transporte
- Construcción y montaje
- Uso y mantenimiento
- Demolición o disposición final

Para realizar una medición sistemática, se emplean herramientas como SimaPro, Athena Impact Estimator o bases de datos como ICE. Sin embargo, en países como El Salvador, donde el acceso a estas herramientas puede ser limitado, se recurre a estimaciones con factores de emisión estandarizados o valores regionales publicados.

2.4.1 *SimaPro*

Es uno de los softwares más reconocidos a nivel mundial para realizar ACV de productos, procesos y sistemas. Fue desarrollado por PRé Sustainability, con sede en los Países Bajos y permite modelar todo el ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (cradle-to-grave), incluyendo transporte, producción, uso y desecho. Se usa para calcular la huella de carbono de materiales como concreto, acero, madera, etc., y comparar diferentes alternativas constructivas.

Por ejemplo, puede evaluar si una vivienda construida con bloques de concreto genera más o menos emisiones que una con bloques de tierra comprimida (BTC).

Viene integrado con bases de datos como Ecoinvent, que contiene miles de procesos industriales y sus impactos ambientales asociados, genera informes técnicos para certificaciones como LEED, BREEAM, EDGE.

2.4.2 *Athena Impact Estimator for Buildings*

Es un software desarrollado por el Athena Sustainable Materials Institute (Canadá), especializado en evaluar el impacto ambiental de edificaciones, enfocado específicamente en el sector construcción, el software permite ingresar el diseño de un edificio (dimensiones, materiales, sistemas constructivos) y calcula impactos como:

- Huella de carbono (CO₂e)
- Consumo de energía
- Contaminación del aire y agua
- Generación de residuos

2.4.3 ICE – Inventory of Carbon and Energy

Es una base de datos pública creada por la Universidad de Bath (Reino Unido) (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019), que recopila información sobre el contenido energético y la huella de carbono de materiales de construcción comunes.

Este catálogo de información contiene valores de energía incorporada (embodied energy) y emisiones de carbono incorporado (embodied carbon) para materiales como acero, concreto, madera, grava, arena, polímeros, vidrio, entre otros. No es un software, sino una base de datos que se puede usar manualmente o incorporarse a modelos propios (por ejemplo, en Excel o en software como OpenLCA). Ideal para proyectos de investigación o tesis, como esta, donde se desea hacer un análisis comparativo básico de materiales.

A fin de cuantificar el impacto ambiental de los materiales y procesos constructivos involucrados en los casos de estudio, se ha utilizado la base de datos ICE versión 3.0, desarrollada por la Universidad de Bath. A continuación, en la tabla 1, se presenta la ficha técnica de esta herramienta, destacando sus principales características, alcances, limitaciones, entre otros elementos.

TABLA 1 FICHA TÉCNICA DE LA BASE DE DATOS ICE V3.0

Elemento	Descripción
Nombre completo	Inventory of Carbon and Energy (ICE), Version 3.0
Autores	Prof. Geoffrey Hammond y Craig Jones
Institución	University of Bath, Reino Unido
Año de publicación	2011
Cobertura	Más de 100 materiales de construcción comúnmente utilizados en obras civiles
Formato	Hoja de cálculo con estructura por filas (materiales) y columnas (valores)
Unidad de análisis	Kilogramo de material (kg)
Indicadores clave	Energía incorporada (MJ/kg) y Carbono incorporado (kg CO ₂ e/kg)
Enfoque metodológico	Cradle-to-gate (desde la extracción hasta la puerta de la fábrica)
Fuente de datos	Revisión de literatura técnica, bases industriales y estudios de ACV previos
Uso permitido	Libre para investigación académica (no comercial)
Aplicaciones comunes	Evaluaciones de sostenibilidad, certificaciones verdes, análisis comparativos
Ventajas	Accesible, ampliamente validada, permite comparaciones consistentes
Limitaciones	No considera transporte, instalación ni fin de vida del material

Nota: Fuente (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019), elaboración propia

2.5 ALCANCES DE LAS EMISIONES

El GHG Protocol establece tres niveles o alcances (scopes) de medición:

- Alcance 1: Emisiones directas generadas en el sitio de construcción, por ejemplo, maquinaria pesada que quema diésel.
- Alcance 2: Emisiones indirectas por el consumo de electricidad utilizada en obra.
- Alcance 3: Emisiones indirectas de la cadena de suministro, como la fabricación y transporte de materiales de construcción (bloques, acero, cemento, etc.).

El alcance 3 suele representar el mayor porcentaje de emisiones en proyectos de vivienda, especialmente en edificaciones de bajo consumo energético, como las viviendas de interés social.

2.6 APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LA HUELLA DE CARBONO EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL

La construcción de viviendas de interés social, orientada a atender el déficit habitacional de sectores vulnerables, presenta un doble desafío: cumplir una función social esencial y, al mismo tiempo, reducir su impacto ambiental. En este contexto, la aplicación de estrategias dirigidas a minimizar la huella de carbono resulta fundamental, tanto desde una perspectiva técnica como desde la sostenibilidad a largo plazo del sector vivienda. (UNEP, 2020)

Desde el enfoque del ACV, la mayor parte de las emisiones de GEI asociadas a este tipo de viviendas se concentran en la etapa inicial de construcción, particularmente en la producción, transporte y uso de materiales convencionales como el cemento, acero, bloques de concreto y lámina galvanizada. Por tanto, las estrategias más efectivas deben enfocarse en esas etapas clave.

2.6.1 Selección de Materiales Locales y de Menor Impacto

Los edificios reflejan la cultura y el entorno donde se construyen, adaptándose a la disponibilidad de recursos, al clima y a las tradiciones locales. Sin embargo, no todos los materiales de construcción son igual de sostenibles. En un contexto en el que la industria busca reducir emisiones de CO₂ y construir de manera más responsable, han surgido materiales ecológicos que permiten disminuir la huella de carbono incorporada en las edificaciones.

Entre los 10 materiales más destacados para la construcción sostenible se encuentran: acero reciclado, bambú, corcho, hempcrete (u hormigón de cáñamo), hormigón prefabricado, madera reciclada o recuperada, micelio, plástico reciclado, terrazo y vidrio reciclado. Cada uno ofrece beneficios particulares, como durabilidad, capacidad de aislamiento, reducción de residuos, bajo impacto ambiental o incluso propiedades carbono-negativas.

En conjunto, estos materiales representan alternativas viables para promover edificaciones más sostenibles, eficientes y alineadas con los retos actuales del sector construcción (según Cemex Ventures. (s.f.). Top 10 materiales de construcción sostenibles para la construcción ecológica. Recuperado de <https://www.cemexventures.com/es>)

2.6.2 Optimización del Transporte y Logística de Obra

La eficiencia en la logística de transporte también constituye una estrategia clave. Reducir distancias entre centros de acopio y obra, evitar traslados innecesarios, utilizar vehículos de alta capacidad o tecnologías híbridas, e implementar planes de abastecimiento por zonas, puede disminuir significativamente las emisiones por combustibles fósiles (GHG Protocol, s.f.). En zonas

lejanas, como San Pedro Masahuat, la planificación del transporte adquiere mayor relevancia debido a las condiciones geográficas y de infraestructura vial.

2.6.3 Diseño Eficiente y Durabilidad Constructiva

Otra estrategia eficaz es el diseño arquitectónico adaptado al entorno (bioclimático), que permite reducir el uso de sistemas de climatización y disminuir la demanda energética durante la vida útil de la vivienda. Del mismo modo, la elección de sistemas constructivos duraderos, con baja necesidad de mantenimiento o sustitución, reduce la frecuencia de renovaciones materiales, lo cual impacta positivamente en la reducción de emisiones acumuladas a lo largo del ciclo de vida.

2.6.4 Estrategias Integradas en Proyectos Nacionales

Aunque en El Salvador estas prácticas aún no están generalizadas, existen precedentes en proyectos impulsados por ONG's o instituciones como FUNDASAL (Fundación Salvadoreña de Desarrollo y Vivienda Mínima), que han incorporado el uso de materiales alternativos, captación de agua lluvia y ventilación cruzada como parte del diseño de viviendas resilientes. La integración paulatina de estas estrategias en proyectos de vivienda social a nivel nacional puede contribuir de manera tangible a los compromisos del país en materia de adaptación y mitigación al cambio climático.

Diversos estudios han demostrado que la aplicación conjunta de estas estrategias puede lograr reducciones de hasta un 30 % en la huella de carbono total de una vivienda de interés social. Si bien estas cifras dependen de las condiciones locales y del tipo de materiales empleados, constituyen una base técnica sólida para reorientar las políticas habitacionales hacia un modelo de bajo impacto ambiental. (UNEP, 2020)

2.7 PRINCIPIOS DE SOSTENIBILIDAD APLICADOS A LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS

La sostenibilidad en el ámbito de la construcción implica reducir el impacto ambiental, económico y social de los procesos edificatorios a lo largo de su ciclo de vida. Para viviendas de interés social, esto representa un reto crítico debido a la presión de construir a bajo costo, en plazos cortos y con materiales convencionales.

Aplicar principios de sostenibilidad, como la eficiencia de materiales, el diseño pasivo, el uso de insumos locales y la minimización de residuos, puede reducir significativamente la huella de carbono y mejorar la calidad de vida de los ocupantes.

Esta visión se alinea con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), particularmente el ODS 11 (ONU, s.f.): Ciudades y comunidades sostenibles, y el ODS 13: Acción por el clima (ONU, Acción climática, s.f.).(UNEP, 2020) (ONU, 2015).

La construcción de viviendas de interés social, orientada a atender el déficit habitacional de sectores vulnerables, presenta un doble desafío: cumplir una función social esencial y, al mismo tiempo, reducir su impacto ambiental. En este contexto, la aplicación de estrategias dirigidas a minimizar la huella de carbono resulta fundamental, tanto desde una perspectiva técnica como desde la sostenibilidad a largo plazo del sector vivienda.

Desde el enfoque del ACV, la mayor parte de las emisiones de GEI asociadas a este tipo de viviendas se concentran en la etapa inicial de construcción, particularmente en la producción, transporte y uso de materiales convencionales como el cemento, acero, bloques de concreto y lámina galvanizada. Por tanto, las estrategias más efectivas deben enfocarse en esas etapas clave.

2.8 INDICADORES AMBIENTALES APLICADOS A LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

La evaluación de la sostenibilidad ambiental en el sector construcción requiere de herramientas cuantitativas que permitan medir el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente. En este contexto, los indicadores de sostenibilidad juegan un rol fundamental al facilitar el seguimiento, comparación y mejora de prácticas constructivas. Estos indicadores permiten vincular el desarrollo urbano con sus consecuencias ecológicas, y son especialmente útiles en el diseño, ejecución y monitoreo de políticas públicas relacionadas con vivienda social.

Entre los indicadores más utilizados a escala global y regional destacan la huella de carbono, la huella hídrica, la huella ecológica y la huella de materiales, los cuales permiten cuantificar impactos específicos derivados de la producción, uso y disposición de insumos durante el ciclo de vida de una vivienda.

A continuación, se describen los principales tipos de indicadores aplicables en el contexto urbano, con énfasis en aquellos que pueden ser utilizados para evaluar la construcción de viviendas de interés social en El Salvador.

2.8.1 Indicadores Ambientales en la Construcción Sostenible

Los indicadores ambientales se definen como parámetros cuantificables que reflejan el estado o evolución de un fenómeno relacionado con el ambiente. En la construcción, estos indicadores permiten evaluar los efectos de materiales, procesos y decisiones de diseño en el medio natural.

Entre los indicadores más relevantes se encuentran:

- Huella de carbono (CO₂e): Mide las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a un producto, servicio o actividad, expresadas en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e).
- Huella hídrica: Evalúa el volumen de agua dulce consumida directa e indirectamente en la producción de materiales o en la operación de una edificación.
- Huella ecológica: Calcula la superficie biológicamente productiva necesaria para sostener el consumo de recursos y absorber los residuos generados.
- Huella de materiales: Representa el peso total de materiales utilizados en la producción de una vivienda, incluyendo recursos renovables y no renovables.

Estos indicadores pueden utilizarse individualmente o en conjunto para analizar la sostenibilidad global de un proyecto de vivienda.

2.8.2 La Footprint Family (Familia de Huellas) Como Enfoque Integral

La iniciativa conocida como Footprint Family ha agrupado diversos indicadores de impacto ambiental bajo tres grandes categorías: emisiones contaminantes, consumo de recursos y huella compuesta. Este enfoque ha sido adoptado por organismos internacionales como la Unión Europea y por investigadores en el campo de la sostenibilidad urbana.

Categorías según la Footprint Family:

- Emisiones contaminantes: carbono, nitrógeno, fósforo, ozono, PM10, PM2.5, química e hídrica.
- Consumo de recursos: huella terrestre y huella hídrica.
- Huella compuesta: impacto sobre la biodiversidad.

Esta agrupación permite comparar impactos de manera integrada y facilitar la toma de decisiones en políticas de planificación urbana y edificación sostenible.

2.8.3 Importancia de la Huella de Carbono Como Indicador Clave

La huella de carbono se ha consolidado como uno de los indicadores más utilizados en las últimas dos décadas, debido a su estrecha relación con el cambio climático. Su medición permite establecer compromisos de reducción de emisiones, evaluar el desempeño ambiental de un proyecto y comparar materiales o procesos constructivos desde una perspectiva de eficiencia ambiental.

Según el Global Status Report for Buildings and Construction (Informe sobre el Estado Mundial de la Edificación y la Construcción) (UNEP, Estado Mundial de los Edificios y la Construcción, s.f.), el sector construcción genera aproximadamente el 38 % de las emisiones globales de GEI, lo que evidencia la importancia de integrar este indicador en la planificación y ejecución de proyectos de vivienda social.

2.8.4 Aplicación en el Entorno Urbano Salvadoreño

En El Salvador, la medición formal de estos indicadores aún es limitada, especialmente en el ámbito de vivienda de interés social. Sin embargo, investigaciones recientes y programas piloto desarrollados por agencias como ONU-Hábitat (ONU-Hábitat, 2015) y Hábitat para la Humanidad han comenzado a incluir parámetros de sostenibilidad en la evaluación de asentamientos urbanos vulnerables.

Por ejemplo, se han realizado estudios de emisiones per cápita en áreas urbanas que relacionan la densidad poblacional con el consumo energético y el tipo de transporte utilizado.

Ciudades con mayor densidad y acceso a transporte colectivo tienden a generar menores emisiones, mientras que los entornos dispersos, sin planificación, incrementan la huella de carbono por habitante (Paravantis et al., 2021; Brown et al., 2009).

2.8.5 Relevancia Para la Vivienda de Interés Social

Incorporar indicadores de sostenibilidad en la planificación y diseño de viviendas de interés social permite no solo reducir impactos ambientales, sino también orientar políticas públicas hacia modelos más resilientes, equitativos y eficientes. A través de herramientas como el ACV, la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019) y metodologías del GHG Protocol, es posible cuantificar estos indicadores desde las etapas tempranas del proyecto, permitiendo tomar decisiones informadas sobre materiales, ubicación, sistemas constructivos y eficiencia energética.

La estandarización de estos indicadores en los procesos de financiamiento, licenciamiento y certificación podría ser una vía estratégica para mejorar la calidad ambiental del parque habitacional nacional y alinearlos con los compromisos climáticos asumidos por El Salvador.

2.9 ANTECEDENTES HISTÓRICOS EN EL SALVADOR.

La vivienda de interés social en El Salvador ha transitado por diversas etapas en función de los contextos políticos, económicos y sociales del país. Desde las primeras experiencias institucionales de urbanización en la década de 1950, hasta iniciativas recientes orientadas a la resiliencia climática, se observa una evolución en los enfoques, actores involucrados y criterios técnicos aplicados en la construcción de viviendas. A continuación, se describen los principales hitos por periodo cronológico.

2.9.1 Periodo 1950–1980: Urbanización inicial y primeros programas de vivienda popular

Durante esta etapa, el Estado salvadoreño, en conjunto con el sector privado, impulsó los primeros proyectos de vivienda popular. En 1950 se creó el Instituto de Vivienda Urbana (IVU), cuya misión era desarrollar soluciones habitacionales para sectores de bajos ingresos (Instituto de Vivienda Urbana, 1967; UES, 1998; FONAVIPO, 2018).

Entre los proyectos representativos de este periodo se encuentran:

- Colonia Santa Lucía, una de las primeras iniciativas de vivienda masiva.
- Colonia San Benito y Urbanización Montserrat, destinadas inicialmente a sectores medios pero que marcaron pauta en el urbanismo habitacional.
- Urbanización San Antonio Abad, Colonia Atlacatl y IVU Mejicanos, orientadas a la expansión urbana de la capital.

Se fortalecieron mecanismos de financiamiento habitacional como el Banco Hipotecario y la Caja Mutual de Ahorro y Crédito.

Los planes de urbanización estuvieron vinculados al crecimiento industrial y al fenómeno de migración rural-urbana. Las fuentes principales que documentan esta etapa incluyen el Plan Nacional de Vivienda (MOP, 1985), estudios de la UES (1998), memorias del IVU (1961–1967) y publicaciones de FONAVIPO (2018, 2002).

2.9.2 Periodo 1980–2000: Reconstrucción y atención postconflicto

Finalizado el conflicto armado (1979–1992), el país enfrentó la urgente necesidad de reconstrucción de viviendas e infraestructura, especialmente para atender a población desplazada y zonas afectadas por la guerra. Este contexto marcó una nueva fase en la política habitacional.

Instituciones como el IVU y FONAVIPO lideraron proyectos, con el respaldo de entidades internacionales como el Banco Mundial, USAID y el PNUD (FONAVIPO, 2018). Algunos proyectos emblemáticos incluyen:

- Urbanización San Ramón (1985): Construcción de 1,000 viviendas para familias desplazadas. Incluyó servicios básicos y conectividad urbana.
- Complejo Habitacional Valle Verde (1990): Desarrollo de 1,500 viviendas en Apopa, con enfoque comunitario y apoyo internacional.
- Urbanización Las Brisas (1992): Más de 2,000 viviendas en Soyapango, como parte de estrategias de repoblamiento suburbano.

Estos proyectos destacaron por incorporar servicios básicos y esquemas de financiamiento accesibles.

2.9.3 Periodo 2000–presente: Prioridad en la cobertura habitacional y cambios en los enfoques de intervención.

Desde el año 2000, el principal objetivo ha sido reducir el déficit habitacional cuantitativo. Esto ha llevado a promover soluciones habitacionales de rápida ejecución, priorizando bajos costos por encima de criterios de sostenibilidad ambiental o eficiencia energética.

Entre los proyectos desarrollados en este periodo se destacan:

- Complejo Habitacional San Esteban y El Renacer (2008–2009): Ejecutados por ACOVICHSS con el modelo de ayuda mutua y el apoyo de AECID y FUNDASAL. Beneficiaron a 21 familias del Centro Histórico.

- Villas de San Pedro – San Pedro Masahuat, La Paz: Proyecto orientado a familias con alta vulnerabilidad. Las viviendas fueron construidas con sistemas convencionales (bloque, concreto, lámina metálica) y acceso parcial a servicios básicos.
- Comunidad Nuevo Amanecer – San Martín, San Salvador: Reubicación de familias afectadas por fenómenos naturales. Las soluciones fueron mínimas, pero en algunos casos se incorporaron materiales alternativos y autoconstrucción asistida.
- Complejo Habitacional El Espino – Santa Ana: Proyecto de vivienda vertical gestionado por FONAVIPO, con enfoque en densificación urbana y atención a grupos vulnerables.

Este periodo refleja una coexistencia entre modelos tradicionales y algunos esfuerzos puntuales por introducir prácticas de participación comunitaria y criterios sostenibles.

Fuentes principales consultadas:

- Instituto de Vivienda Urbana. (1967). *Memoria Laboral del IVU 1961–1967*.
- Universidad de El Salvador. (1998). *Historia y Desarrollo de la Vivienda en El Salvador*.
- Ministerio de Obras Públicas. (1985). *Plan Nacional de Vivienda*.
- FONAVIPO. (2002, 2018). *Evolución de la Vivienda Social en El Salvador*.

2.10 EVOLUCIÓN Y TRANSICIÓN HACIA LA SOSTENIBILIDAD EN LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL.

En los últimos años, la vivienda de interés social en El Salvador ha experimentado un cambio progresivo en su enfoque, evidenciado tanto en el aumento de la inversión pública y

privada como en la introducción gradual de criterios de sostenibilidad en el diseño y construcción de nuevos proyectos habitacionales.

Un ejemplo destacado de la participación del sector privado fue la Iniciativa para la Construcción de 5,500 Viviendas de Interés Social, anunciada en 2018, que contemplaba una inversión de \$165 millones para ejecutarse en un período de tres años. Las primeras 800 viviendas se planificaron en el departamento de Usulután, con unidades de aproximadamente 50 m², distribuidas en tres habitaciones, sala, comedor, cocina y baño, a un precio accesible de \$32,000 por unidad. Este tipo de propuestas reflejan el interés del sector privado en participar en el desarrollo habitacional dirigido a sectores de ingreso medio-bajo.

Paralelamente, ha habido una transición gradual hacia enfoques más sostenibles en la vivienda social. Desde inicios del siglo XXI, y con mayor impulso en la última década, diversas instituciones han comenzado a integrar principios ambientales y sociales en el diseño de proyectos habitacionales. Estos incluyen el uso racional de recursos, el mejoramiento del confort térmico, la eficiencia energética y el aprovechamiento de materiales con menor impacto ambiental.

Organizaciones como Hábitat para la Humanidad El Salvador han promovido activamente la adopción de prácticas constructivas sostenibles, incluyendo el uso de materiales locales, techos reflectivos, ventilación cruzada y sistemas de captación de agua lluvia. Además, agencias de

Naciones Unidas como ONU-Hábitat (ONU-Hábitat, 2015), el PNUD y la ONUDI han impulsado estudios y pilotos de viviendas urbanas sostenibles, enfocados en transformar las condiciones de pobreza y exclusión mediante asentamientos más resilientes y ambientalmente responsables.

El BID (Banco Interamericano de Desarrollo) también ha desempeñado un rol clave al implementar programas financieros para ampliar el acceso a créditos hipotecarios destinados a viviendas de interés social. Su enfoque ha promovido no solo el acceso a la vivienda, sino también la integración de criterios de sostenibilidad como parte del financiamiento, fortaleciendo así la transición hacia modelos habitacionales más inclusivos y ambientalmente conscientes.

Por su parte, CASALCO (Cámara Salvadoreña de la Industria de la Construcción) ha comenzado a posicionar el tema de la sostenibilidad dentro de la agenda técnica del sector, destacando en foros recientes que una vivienda construida con criterios sostenibles puede reducir su huella de carbono hasta en un 35 % a escala global, alineando así al sector nacional con tendencias internacionales en arquitectura verde y eficiencia energética.

Estos avances representan un cambio de paradigma que, aunque aún limitado en su alcance, señala una tendencia ascendente hacia la sostenibilidad en la construcción de vivienda social en El Salvador.

2.11 IMPACTO AMBIENTAL DE LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA SOCIAL.

La construcción de viviendas de interés social, aunque responde a una necesidad fundamental de habitabilidad para sectores vulnerables, también conlleva implicaciones ambientales significativas. Los principales factores que inciden en la huella ecológica del proceso constructivo, centrándose en las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de los materiales utilizados, el transporte de insumos y el consumo energético durante las distintas fases de obra. Comprender estos impactos es esencial para identificar oportunidades de mitigación y diseñar estrategias que favorezcan una edificación más sostenible, sin comprometer los objetivos sociales del sector vivienda.

2.11.1 Emisiones Asociadas a Materiales de Construcción.

Los materiales utilizados en la vivienda social, como cemento, acero y bloques de concreto tienen una alta huella de carbono debido a sus procesos de fabricación.

- **CEMENTO:** Es un material clave en la construcción, pero su producción es altamente contaminante debido a la calcinación de piedra caliza, un proceso que libera grandes cantidades de CO₂. La producción de cemento emite aproximadamente 0.86 toneladas de CO₂ por cada tonelada de cemento (IEA, 2023). En el país, los principales productores de cemento son Holcim El Salvador Y Cementos Fortaleza, empresas que abastecen el mercado local. La dependencia del cemento, sumada al crecimiento urbano y de infraestructura, incrementa su impacto ambiental. (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019)

- **ACERO:** Es fundamental en la construcción de viviendas sociales, utilizado principalmente en estructuras y refuerzos. Su producción implica la extracción de mineral de hierro y procesos de refinación que generan grandes emisiones de CO₂. El acero genera entre 1.8 y 2.3 toneladas de CO₂ por tonelada producida (IEA, 2023). En El Salvador, el principal productor de acero es Aceros de Guatemala, que abastece al mercado salvadoreño con acero laminado y varillas de refuerzo, del mismo modo CORINCA produce, vende y distribuye acero dentro y fuera del territorio nacional. También se importa acero de países como México y China, lo que agrega emisiones derivadas del transporte marítimo y terrestre. (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019)
- **BLOQUES DE CONCRETO:** Son el material más utilizado en la construcción de viviendas sociales debido a su costo relativamente bajo y durabilidad. Sin embargo, su producción depende del cemento y la extracción de agregados como arena y grava, cuya explotación ha causado degradación ambiental en ríos y cuencas del país. La huella de carbono de los bloques de concreto varía entre 0.22 y 0.30 kgCO₂e/kg, dependiendo de la proporción de cemento, tipo de mezcla y proceso de fabricación (Hammond & Jones, 2011). Esta estimación considera tanto las emisiones del cemento como la energía utilizada en la compactación y curado. Los principales productores de bloques de concreto en El Salvador incluyen a SALTEX, BLOKITUBOS, BLOQUES DE LA PEÑA entre otros productores de menor tamaño, que suministran productos para proyectos de vivienda e infraestructura.

- **MADERA EXPLOTADA:** Explotada localmente, la madera es uno de los materiales con menor huella de carbono, especialmente cuando proviene de fuentes locales y sostenibles (UNEP, 2020) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). Durante su crecimiento, los árboles capturan CO₂ de la atmósfera, lo cual se retiene en el material incluso después de cortado y utilizado en construcción. Este proceso se conoce como "secuestro de carbono". En ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019), la huella de carbono de la madera se presenta entre -0.8 y +0.2 kg CO₂e/kg, dependiendo de si es madera aserrada, secada al horno, o sin tratamiento industrial. (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019)
- **AGREGADOS (grava y arena):** Extraídos de ríos y bancos locales la grava tiene una baja huella de carbono por kilogramo ~0.005–0.006 kgCO₂e/kg, ya que no requiere procesos químicos para su producción. Sin embargo, su impacto ambiental radica en la extracción, ya que la minería de grava puede generar erosión, pérdida de biodiversidad y deterioro de ecosistemas hídricos si no se regula adecuadamente. La arena también tiene una huella de carbono relativamente baja en términos de emisiones directas ~0.004 kg/CO₂e, pero presenta impactos ambientales similares a la grava. En El Salvador, la extracción excesiva de arena en ríos como el Acelhuate y Lempa ha generado conflictos sociales y daños ecológicos. (MARN, 2017; Estudio UES, 2019).

Tanto la arena como la grava tienen una huella de carbono baja, de aproximadamente 0.004 a 0.006 kgCO₂e/kg, ya que no requieren procesamiento térmico ni transformación química (ICE v3.0). No obstante, su extracción representa un impacto ambiental considerable por afectación directa a ríos, cuencas y suelos.

A continuación, se presenta un listado de diversos materiales utilizados en viviendas de interés social, detallando su uso principal.

La intención de incluir esta información es proporcionar una base para el análisis del impacto ambiental de diferentes materiales, lo cual es fundamental en el desarrollo de este trabajo para los estudios de huella de carbono embebida. *ICE v3.0 (Circular Ecology)*, *Hammond & Jones (2011)*, y publicaciones complementarias del *Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido (DEFRA)*.

TABLA 2 MATERIALES MÁS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN EL SALVADOR.

No	Material	Uso principal
1	Cemento (bls 42.5 kg)	Aglomerante para concretos, morteros y plantillas; lechadas y grouts.
2	Arena seca	Agregado fino para morteros y concretos y repellos.
3	Grava (3/4 o 3/8 plg)	Agregado grueso para concretos estructurales y firmes.
4	Agua	Mezclado y curado de concreto y mortero.
5	Lámina de zinc-aluminio	Cubierta de techo y remates de cubierta.
6	Hierro liso #2	Refuerzo ligero: estribos, mallas y detalles menores.
7	Hierro corrugado #3	Refuerzo en losas, soleras y elementos secundarios.
8	Hierro corrugado #4	Refuerzo en vigas y columnas livianas; zapatas y soleras.
9	Hierro corrugado #5	Refuerzo principal en vigas y elementos estructurales.
10	Hierro corrugado #6	Refuerzo de mayor demanda: zapatas, vigas y columnas.
11	Panel de fibrocemento 8 mm	Divisiones interiores livianas; cielos y tabiques.
12	Bloque concreto 10 cm (8.64 kg)	Muros divisorios y paredes no portantes.
13	Bloque concreto 15 cm (11.36 kg)	Muros portantes y perimetrales.
14	Bloque concreto 20 cm (14 kg)	Muros de mayor carga o contención.
15	Polín C 4" ch 14	Estructura para cubierta.
16	Vidrio 6 mm	Ventanería y cerramientos traslúcidos.
17	Piso cerámico/porcelanato	Acabado final de pisos interiores y húmedos.
18	Madera plywood 3/4	Encofrados/ formaletas; mobiliario/puertas según diseño.
19	Cuartón pino 4"x2"	Estructuras ligeras temporales; bastidores/soportes de encofrado.
20	Costanera pino 2"x2"	Apoyos y bastidores ligeros; cielos falsos/encofrado.
21	Tierra (material selecto)	Rellenos, sub-bases y nivelaciones compactadas.
22	Pintura látex	Acabado de muros interiores y algunos exteriores.
23	Pintura anticorrosiva	Protección de elementos metálicos (polines, marcos).
24	Tubería PVC 2"	Sistemas sanitarios/hidráulicos secundaria y ventilaciones.
25	Alambre de amarre cal 16	Amarre de acero de refuerzo en armados y estribos.
26	Lámina de fibrocemento 8 mm	Divisiones, cielos y fachadas ligeras resistentes a humedad.
27	Gasolina	Combustible para equipos menores en obra (mezcladoras, compactadoras pequeñas).
28	Diésel	Combustible para maquinaria y transporte de obra.
29	Lámina troquelada 0.91 mm	Puertas metálicas troqueladas y cerramientos livianos.

Nota: Fuente, elaboración propia

2.11.2 El Transporte de Materiales y la Energía Utilizada en la Construcción

El impacto ambiental de la construcción de viviendas de interés social en El Salvador está fuertemente influenciado por el transporte de materiales y el consumo de energía en obra. La huella de carbono derivada de estos factores es el resultado de la emisión de GEI provenientes de la quema de combustibles fósiles y del uso intensivo de recursos energéticos en las diferentes etapas del proceso constructivo.

El transporte de materiales representa una de las fuentes principales de emisiones debido al uso de camiones de carga y otros vehículos pesados que funcionan con diésel. La distancia que recorren estos materiales desde su punto de extracción o fabricación hasta el sitio de construcción determina la cantidad de emisiones generadas. Cuanto mayor sea la distancia, mayor será el consumo de combustible y, por ende, la emisión de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas en suspensión, contribuyendo a la contaminación ambiental y al cambio climático.

En promedio, un camión de carga pesada puede emitir entre 0.12 y 0.28 kg de CO₂ por tonelada transportada por kilómetro recorrido, dependiendo del tipo de combustible, eficiencia del motor y condiciones de carga (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019). Este valor sirve como parámetro de referencia para estimar las emisiones generadas en el transporte de materiales de construcción.

Además, el estado de las carreteras y la eficiencia logística influyen significativamente en la cantidad de energía utilizada en el transporte, ya que recorridos más largos o ineficientes pueden incrementar el consumo de combustible y, por ende, las emisiones asociadas.

Por otro lado, el consumo de energía en la construcción incluye el uso de maquinaria pesada, herramientas eléctricas y procesos industriales relacionados con la fabricación de materiales de construcción. Las actividades como la excavación, nivelación de terreno, mezclado de concreto, montaje de estructuras y acabados requieren una gran cantidad de energía, la cual, en su mayoría, proviene de fuentes no renovables como el petróleo y la electricidad generada a partir de combustibles fósiles. La dependencia de esta energía intensiva incrementa las emisiones de GEI, lo que amplifica la huella de carbono del sector de la construcción.

En el contexto de El Salvador, donde la infraestructura energética aún depende en parte de fuentes convencionales, el impacto del consumo de energía en la construcción es significativo. Además, la disponibilidad de materiales de construcción locales o importados juega un papel crucial en el cálculo total de las emisiones de carbono, ya que los materiales importados requieren mayor transporte y, por lo tanto, generan más emisiones en comparación con los producidos dentro del país.

2.12 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV)

La metodología del ACV es una herramienta estandarizada para evaluar los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o servicio, considerando todas las etapas de su existencia: desde la extracción de materias primas, pasando por la fabricación, transporte y uso, hasta su disposición final. Esta metodología se encuentra normada en la ISO 14040: 2006a y es ampliamente utilizada para comparar la carga ambiental de diferentes materiales de construcción en función de su comportamiento ambiental durante el ciclo de vida.

Según Balderas y Arista (2019), el ACV se compone de cuatro fases principales:

1. Definición del objetivo y alcance:

Se establece el propósito del estudio, los límites del sistema y la unidad funcional, lo cual permite comparar de forma homogénea distintos materiales o procesos constructivos.

Ejemplo: Evaluar el impacto ambiental, medido en huella de carbono, de dos tipos de muros utilizados en viviendas de interés social en El Salvador:

- Opción 1: Bloques de concreto
- Opción 2: Bloques de ladrillo de obra

Alcance del sistema:

Desde la extracción de materiales (arena, cemento, tierra) hasta el montaje en obra (cradle-to-site). No se incluye la etapa de uso ni demolición.

Unidad funcional: "1 metro cuadrado de muro construido con cada sistema, con una vida útil estimada de 50 años y funciones estructurales equivalentes."

2. Análisis de inventario del ciclo de vida:

Se recopilan los datos sobre los flujos de entrada (materias primas, energía, agua) y salida (emisiones, residuos) del sistema evaluado, generando un inventario detallado del consumo de recursos y emisiones a lo largo del ciclo de vida.

Aplicándolo a un ejemplo: 1 m² de muro de bloques de concreto en una vivienda de interés social.

- Flujos de entrada (inputs):

- 12 bloques de concreto (con peso total de 96 kg)

- 8 kg de mezcla de mortero (cemento + arena)
 - 5 litros de agua
 - 0.5 kWh de energía eléctrica para mezcla y transporte en sitio
- Flujos de salida (outputs):
- 19.4 kg CO₂e (según ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019) para bloques y mortero)
 - Residuos de corte de bloques: 0.5 kg
 - Agua residual: 1.5 litros

Este inventario permite cuantificar los recursos utilizados y las emisiones generadas, sirviendo como base para el cálculo de impactos ambientales en la siguiente fase del ACV.

3. Evaluación del impacto del ciclo de vida:

Esta fase traduce los datos del inventario en categorías de impacto ambiental como el calentamiento global, la acidificación o el agotamiento de recursos naturales, cuantificando así los efectos ambientales del sistema analizado.

Ejemplo:

- Resultados de impacto ambiental (por m² de muro):
- Calentamiento global (huella de carbono): 19.4 kg CO₂e

Este tipo de resultados permite identificar que el principal impacto del muro está en la emisión de gases de efecto invernadero, debido al uso de cemento y transporte, y orienta decisiones hacia materiales de menor carga ambiental.

4. Interpretación del ciclo de vida:

Se analizan los resultados obtenidos a la luz del objetivo inicial del estudio. Se identifican los procesos más críticos, se evalúa la incertidumbre de los datos y se proponen medidas para minimizar los impactos negativos detectados.

Ejemplo:

Interpretación de resultados del ACV para 1 m² de muro de bloques de concreto:

- Procesos más críticos identificados:

La producción de cemento en el mortero y los bloques representa más del 70 % del total de emisiones de CO₂e.

- Evaluación de incertidumbre:

Los factores de emisión utilizados provienen de la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019), que representa condiciones del Reino Unido. Aunque es una referencia válida, se reconoce que pueden variar con respecto a las condiciones reales de producción en El Salvador.

- Medidas propuestas para reducción del impacto:

- ✓ Sustituir parcialmente el cemento por puzolana local (ceniza volcánica) en el mortero. (PNUD, 2021; CASALCO, 2022)
- ✓ Utilizar bloques alternativos con menor huella de carbono, como BTC (Bloque de Tierra Comprimida).
- ✓ Reducir distancias de transporte mediante el uso de materiales producidos en la zona del proyecto.

Estas fases se integran en un enfoque sistemático que permite tomar decisiones más informadas en el diseño y construcción de edificaciones, especialmente en el caso de viviendas de interés social, donde la eficiencia material y energética resulta crucial.

2.13 LA UNIDAD FUNCIONAL

En estudios de del ACV y huella de carbono, la unidad funcional (UF) es un parámetro clave que permite cuantificar y comparar los impactos ambientales de un sistema. Se define como una medida de referencia que describe el servicio o función del producto en estudio, asegurando coherencia en los resultados y facilitando la comparación con otras opciones constructivas.

En el contexto de la construcción de viviendas de interés social en El Salvador, la unidad funcional debe reflejar el propósito principal de la vivienda en términos de su ciclo de vida, considerando los materiales, procesos constructivos y el uso del inmueble.

Para establecer una unidad funcional adecuada, es necesario definir los siguientes criterios:

- Magnitud espacial y temporal: Dimensiones físicas de la vivienda, su capacidad de uso y la vida útil proyectada.
- Servicios prestados: Función básica de la vivienda (alojamiento para una familia de bajos recursos con estándares mínimos de habitabilidad).
- Sostenibilidad y eficiencia: Consideración de materiales locales, procesos constructivos y eficiencia energética.

Con base en estos criterios, una unidad funcional apropiada en este contexto podría expresarse como:

"Una vivienda de interés social de 42 a 60 m² con capacidad para alojar a una familia promedio salvadoreña (4 a 5 personas), con una vida útil de 50 años y construida con materiales convencionales o alternativos disponibles localmente."

La unidad funcional propuesta resume de forma precisa el servicio que se busca evaluar mediante el ACV: una vivienda de interés social construida en El Salvador. Esta unidad considera los aspectos clave del contexto local, como el tamaño promedio de la vivienda (entre 42 y 60 m²), su función social (alojar a una familia típica de 4 a 5 miembros), la vida útil esperada (50 años) y el uso de materiales convencionales o alternativos disponibles localmente. Esta definición permite realizar comparaciones consistentes entre diferentes soluciones constructivas, asegurando que el impacto ambiental se mida con base en un mismo nivel de servicio habitacional, según la tabla 3.

TABLA 3 UNIDADES FUNCIONALES EN ACV PARA VIVIENDA

UNIDAD FUNCIONAL (UF)	DESCRIPCIÓN	APLICABILIDAD EN VIVIENDA DE I. SOCIAL
1 m ² de vivienda construida	Compara materiales o sistemas por metro cuadrado construido; útil para estudios técnicos con enfoque en diseño estructural.	Alta – útil para comparar sistemas constructivos básicos.
1 vivienda tipo (unidad habitacional)	Evalúa el impacto ambiental completo por unidad de vivienda construida, considerando todos los componentes y su ciclo de vida.	Muy alta – adecuada para análisis integrales como este estudio.
1 m ³ de espacio habitable	Enfocado en el volumen útil construido; se usa cuando la altura y disposición de espacios son variables entre alternativas.	Media – menos frecuente en estudios de vivienda social.
1 vivienda para 4 personas durante 50 años	Considera el uso completo de la vivienda en el tiempo, ideal para estudios con enfoque social o de impacto familiar.	Alta – permite vincular el impacto ambiental al servicio social de la vivienda.
1 vivienda construida con materiales locales	Evalúa el desempeño ambiental de viviendas construidas específicamente con materiales del contexto local.	Alta – promueve análisis basados en disponibilidad de recursos locales.

Nota: Fuente elaboración propia

2.14 FICHA TÉCNICA: BASE DE DATOS ICE V3.0

La base de datos Inventory of Carbon and Energy (ICE) v3.0 es una herramienta elaborada por Circular Ecology que proporciona valores de energía incorporada (EE) y huella de carbono (CO₂e) de diversos materiales de construcción. Su objetivo principal es facilitar la evaluación ambiental de edificaciones y procesos constructivos mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con enfoque cradle-to-gate y cradle-to-site.

1. Nombre completo de la base:

Inventory of Carbon and Energy (ICE) – Versión 3.0

2. Institución desarrolladora

Circular Ecology (anterior Mente University of Bath)

3. Año de publicación

Diciembre de 2024 (versión educativa actualizada)

4. Tipo de datos que contiene

- Energía incorporada por kg (MJ/kg)
- Huella de carbono incorporada (kgCO₂e/kg)
- Datos cradle-to-gate y cradle-to-site

5. Metodología

Basado en Análisis de Ciclo de Vida (ACV), conforme a los principios de ISO 14040 y 14044, con factores adaptados del sistema PAS 2050 y otras normativas europeas.

6. Aplicación en esta investigación

En esta tesis se utilizaron los factores de emisión cradle-to-site provistos por ICE v3.0 para estimar la huella de carbono de materiales típicos empleados en la construcción de viviendas de interés social en El Salvador. Se aplicó como insumo para los casos A y B.

7. Observaciones importantes

- Los datos se refieren a condiciones de Reino Unido y Europa; sin embargo, son internacionalmente aceptados como referencia por su coherencia metodológica.
- Se realizó ajuste crítico con base en factores locales cuando fue pertinente (ej. electricidad y transporte).
- No se recomienda utilizar para cálculo financiero o decisiones legales sin adaptación contextual.

2.15 NORMATIVA Y POLÍTICAS AMBIENTALES APLICABLES EN EL SALVADOR PARA VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL.

La gestión ambiental en el sector de la construcción en El Salvador está regulada por un conjunto de leyes, normas técnicas e instrumentos institucionales cuyo objetivo es reducir el impacto ambiental de las actividades productivas, incluyendo la edificación de viviendas de interés social. Aunque no existe una política nacional específica enfocada exclusivamente en la reducción de la huella de carbono en la construcción, varias disposiciones legales e institucionales inciden directamente en la sostenibilidad de estos proyectos.

2.15.1 Principales Marcos Normativos

- Ley de Medio Ambiente (Asamblea Legislativa de El Salvador, 1998) (Decreto Legislativo No. 233/1998) Establece la obligación de realizar estudios de impacto ambiental (EIA) para proyectos que puedan generar afectaciones significativas al entorno. Las viviendas de interés social generalmente están clasificadas en la Categoría B1 o B2, lo que implica requisitos ambientales simplificados o

moderados según su escala y localización. (Estudio de Impacto Ambiental (EIA) se encuentra en el Artículo 22 del Reglamento General de la Ley de Medio Ambiente (Asamblea Legislativa de El Salvador, 1998))

- El Artículo 25 establece que los proyectos deben incluir medidas de prevención, mitigación, compensación o restauración ambiental.
- Normas Técnicas Salvadoreñas (NTS) Emitidas por CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) complementadas por la DIGESTYC (Dirección General de Estadísticas y Censos) y el MOP (Ministerio de Obras Públicas).

Algunas normas relevantes son:

- NTS 11.42.01:2001 – Concreto estructural: requisitos mínimos.
- NTS ISO 14064-1 – Gestión de gases de efecto invernadero (aplicable a organizaciones). Aunque no son obligatorias para vivienda de interés social, sirven como base para implementar mejores prácticas.
- Lineamientos del MARN a través de la Guía Ambiental para Proyectos Habitacionales, el MARN establece criterios de cumplimiento ambiental relacionados con: Manejo de residuos de construcción, control de emisiones de polvo y ruido, protección de cuerpos de agua y suelos durante las obras.

Aunque estas guías no exigen la cuantificación de la huella de carbono, sí promueven indirectamente acciones que la reducen, como el uso de materiales locales y la gestión de residuos.

2.15.2 Instituciones Involucradas en la Vivienda de Interés Social

- FONAVIPO (FONAVIPO, 2018) Financiamiento y gestión de proyectos de vivienda social, en los últimos años ha impulsado prototipos habitacionales más resilientes al cambio climático, aunque aún con débil integración de métricas de carbono.
- Fondo Social para la Vivienda (FSV). Entidad financiera del Estado que otorga créditos preferenciales para vivienda de interés social. No incluye aún requisitos ambientales estrictos, pero colabora con iniciativas de urbanismo sostenible.
- Oficinas Municipales de Medio Ambiente

Las Oficinas Municipales de Medio Ambiente en El Salvador desempeñan un papel crucial en la verificación del cumplimiento de permisos ambientales a nivel local. Estas oficinas, también conocidas como Unidades Ambientales Municipales (UAM), son estructuras especializadas encargadas de supervisar, coordinar y dar seguimiento a las políticas, planes, programas, proyectos y acciones ambientales dentro de sus respectivos municipios. Su objetivo principal es garantizar que las actividades de desarrollo se realicen en armonía con la protección y conservación de los recursos naturales.

Además, algunas municipalidades han comenzado a exigir medidas de mitigación ambiental más estrictas, adaptadas a las características específicas de sus territorios. Por ejemplo, la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS (OPAMSS, 2020)), que coordina el desarrollo urbano en el Área Metropolitana de San Salvador, ha implementado regulaciones más rigurosas para proyectos de construcción en zonas ambientalmente sensibles.

Estas medidas buscan prevenir impactos negativos en el medio ambiente y promover un desarrollo urbano sostenible.

Es importante destacar que, según la Ley de Medio Ambiente (Asamblea Legislativa de El Salvador, 1998) de El Salvador, toda actividad, obra o proyecto que pueda generar impactos ambientales negativos debe someterse a un proceso de EIA y obtener el correspondiente permiso ambiental emitido por el MARN. Sin embargo, las municipalidades, a través de sus Unidades Ambientales, tienen la facultad de complementar estas regulaciones nacionales con normativas locales más estrictas, según lo consideren necesario para la protección de su entorno.

2.15.3 Buenas Prácticas Internacionales en Vivienda Social Sostenible y Comparación con El Salvador.

En el marco de los esfuerzos globales por reducir la huella de carbono en la construcción de viviendas sociales, numerosos países han adoptado buenas prácticas ambientales que abarcan desde la selección de materiales hasta estrategias de diseño pasivo y eficiencia energética. Estas experiencias demuestran que es viable alcanzar niveles más sostenibles en la edificación, incluso en contextos de recursos limitados, siempre que existan políticas coherentes, incentivos financieros y capacidades técnicas instaladas.

Con el objetivo de identificar oportunidades de mejora para el caso salvadoreño, se ha elaborado la Tabla 4, la cual compara una serie de elementos clave entre la práctica internacional y la situación actual en El Salvador, destacando las brechas existentes y las posibles áreas de avance. Esta herramienta analítica permite visualizar de forma sintética dónde se ubica el país en relación con estándares sostenibles ya implementados en otras regiones, así como reflexionar sobre nacional.

La fuente base utilizada para el diseño de esta tabla fue el informe técnico del Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido (DEFRA), complementado con literatura científica, normativa salvadoreña vigente y experiencias de organismos como FONAVIPO y Hábitat para la Humanidad. Esta comparación aporta insumos concretos para la formulación de estrategias orientadas a la mejora del desempeño ambiental en futuros programas habitacionales de interés social.

TABLA 4 COMPARACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS INTERNACIONALES PARA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE Y SU APLICACIÓN EN EL SALVADOR

ELEMENTO	PRACTICA INTERNACIONAL	SITUACION ACTUAL EN EL SALVADOR	OBSERVACIONES
Diseño bioclimático	México (Ecocasa), Colombia (Proyectos EDGE), India, Vietnam, Sudáfrica.	Presente de forma ocasional. Algunos proyectos de ONG lo aplican, pero no está institucionalizado ni normado.	Existe potencial, sobre todo en zonas cálidas; requiere formación de técnicos y arquitectos.
Materiales de bajo impacto	India (BTC), Sudáfrica (bloques de tierra), Vietnam (bambú), Colombia (bloques reciclados), México (paneles ligeros).	Predomina el uso de concreto y bloques tradicionales con alta huella de carbono. Se usan materiales locales pero sin criterios de sostenibilidad.	Hay oportunidad de diversificar el uso de materiales de menor huella.
Certificaciones sostenibles	Colombia (EDGE), México (EDGE y Ecocasa), Sudáfrica (normas locales verdes), Vietnam (UN-Habitat).	No se aplican certificaciones ambientales específicas para viviendas de interés social.	El país podría promover certificaciones simplificadas o adaptadas a su contexto.
Eficiencia energética	México (viviendas con techos aislados y calentadores solares), Colombia (iluminación LED, electrodomésticos eficientes), India.	Muy limitada. No es un requisito ni una práctica común en proyectos sociales.	Posible implementación en zonas con buena radiación solar.
Gestión de residuos de obra	Colombia, Sudáfrica y México (programas de reducción y reciclaje de residuos en obra).	Prácticas irregulares. Algunas municipalidades y el MARN promueven gestión básica, pero no es sistemática.	Se requiere normar y fiscalizar con más rigor.
Participación comunitaria	Sudáfrica (Zenzeleni Housing), India (autoconstrucción rural), ONG globales como Hábitat en varios países.	En algunos proyectos rurales o de ONG (como Hábitat), pero no en proyectos estatales masivos.	Potencial para reducir costos y aumentar apropiación de la vivienda.
Apoyo institucional a lo verde	México (INFONAVIT + KfW), Colombia (BID + EDGE), Vietnam (UN-Habitat), India (IFC).	FONAVIPO ha iniciado proyectos resilientes, pero sin enfoque explícito en reducción de huella de carbono.	Necesario fortalecer el marco institucional y financiero para lo sostenible.
Normativa y planificación urbana	Colombia y México han avanzado en normativas de construcción sostenible y urbanismo resiliente.	Normativa ambiental se centra en mitigación de impacto, no en carbono. Urbanismo sostenible aún es incipiente.	Puede evolucionar hacia criterios de bajas emisiones.

Nota: Elaboración propia.

2.16 FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL PARA LA METODOLOGÍA

El presente capítulo ha desarrollado los fundamentos conceptuales, normativos, históricos y técnicos necesarios para comprender el impacto ambiental de la construcción de viviendas de interés social en El Salvador, con énfasis en su huella de carbono. A través de la sistematización de fuentes documentales, bases de datos especializadas y marcos metodológicos internacionalmente reconocidos, se ha delineado el contexto técnico y social que sustenta el objeto de estudio.

Se ha justificado el uso de herramientas como el ACV y la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019), seleccionadas por su validez técnica, replicabilidad y aceptación en estudios ambientales a escala internacional. Estas herramientas permiten estimar con precisión la carga ambiental de materiales y procesos constructivos, lo que resulta fundamental para los objetivos de esta investigación.

El recorrido histórico de la vivienda social en El Salvador ha permitido contextualizar la evolución de sus sistemas constructivos, así como identificar patrones y decisiones institucionales que han incidido en su eficiencia ambiental. A la vez, se ha reconocido la incorporación incipiente de estrategias de sostenibilidad en algunos proyectos recientes, aunque aún persisten desafíos en la integración sistemática de criterios ambientales.

Finalmente, la revisión de herramientas metodológicas, indicadores y buenas prácticas internacionales permite establecer los lineamientos que guiarán la fase metodológica de la investigación. De esta manera, el marco teórico no solo sustenta los conceptos clave, sino que también ofrece una base estructural para la definición del enfoque, las técnicas y el procedimiento de análisis que se presentarán en el siguiente capítulo.

2.17 CONTEXTO INVESTIGATIVO, LIMITACIONES Y REPLICABILIDAD

En los últimos años, la investigación sobre sostenibilidad en vivienda social ha cobrado importancia en América Latina. Diferentes estudios han explorado temas como el impacto ambiental de los materiales, el uso de metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la incorporación de principios sostenibles en proyectos habitacionales. Estos antecedentes permiten contextualizar esta investigación y le dan respaldo técnico y académico.

Sin embargo, como toda tesis, este estudio también presenta ciertas limitaciones. Por un lado, el análisis se centró únicamente en la etapa de construcción (enfoque *cradle-to-site*), sin incluir las fases de uso o demolición. Además, se utilizaron bases de datos internacionales como ICE v3.0, lo que podría generar diferencias con las condiciones reales del país. También hubo partidas constructivas con información parcial, y no se realizaron mediciones directas en campo, lo que restringe la validación empírica de los resultados. A pesar de eso, se aplicaron métodos aceptados por la literatura científica y se adaptaron con criterios técnicos sólidos.

Finalmente, uno de los objetivos del estudio fue que pueda ser replicado por otros investigadores. Para ello, se documentó todo el proceso metodológico, los factores de emisión utilizados y las hojas de cálculo aplicadas. Esto permite que otros estudiantes o profesionales puedan aplicar la misma lógica en proyectos similares, incluso en contextos diferentes, contribuyendo así al análisis ambiental en la construcción de vivienda social en El Salvador.

El contenido completo de esta información, incluyendo las fuentes, fichas técnicas y procedimientos aplicados, ha sido incorporado en los anexos del presente documento para facilitar su consulta y asegurar la transparencia metodológica.

Para una mejor interpretación de lo anteriormente mencionado se puede consultar en los anexos 3.5, 3.6 y 3.7

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

3.1 CASO DE ESTUDIO “A”: VILLAS DE SAN PEDRO

La construcción de viviendas de interés social, orientada a atender el déficit habitacional de sectores vulnerables, presenta un doble desafío: cumplir una función social esencial y, al mismo tiempo, reducir su impacto ambiental. En este contexto, la aplicación de estrategias dirigidas a minimizar la huella de carbono resulta fundamental, tanto desde una perspectiva técnica como desde la sostenibilidad a largo plazo del sector vivienda. (UNEP, 2020)

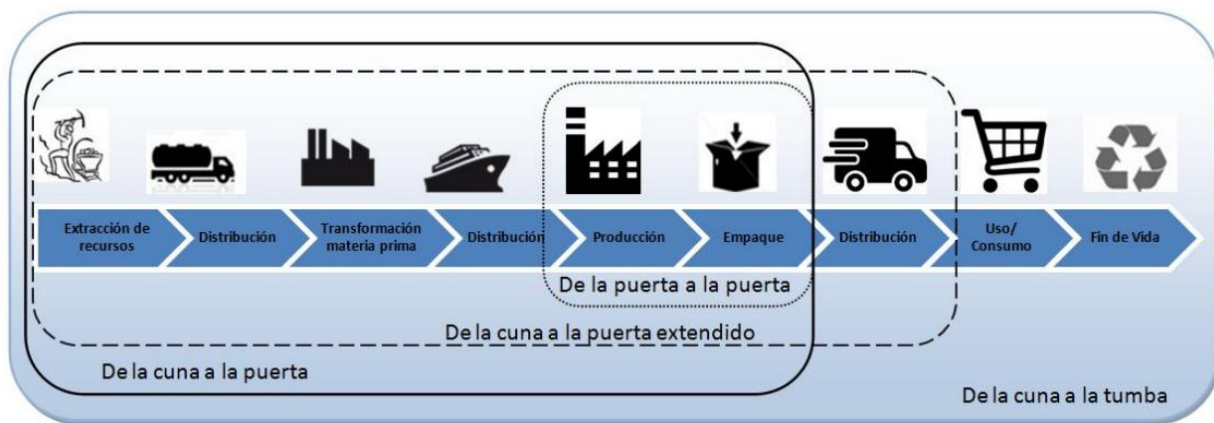
Desde el enfoque del ACV, la mayor parte de las emisiones de GEI asociadas a este tipo de viviendas se concentran en la etapa inicial de construcción, particularmente en la producción, transporte y uso de materiales convencionales como el cemento, acero, bloques de concreto y lámina galvanizada. Por tanto, las estrategias más efectivas deben enfocarse en esas etapas clave.

3.1.1 Metodología Aplicada

La metodología empleada para el presente caso se basa en el enfoque de ACV, conforme a los lineamientos establecidos por las normas ISO 14040 e ISO 14044, que definen los principios, marcos y requisitos técnicos para evaluar los impactos ambientales asociados a productos o procesos (ISO, 2006a, 2006b). El análisis fue delimitado bajo un alcance tipo *cradle-to-site*, es decir, desde la extracción de materias primas hasta el momento en que la vivienda queda terminada y lista para su ocupación, excluyendo las fases de uso, mantenimiento y disposición final. Esta elección responde a la naturaleza del estudio, que se centra en las emisiones incorporadas durante la etapa de construcción, así como a la disponibilidad de información verificable para este tramo del ciclo de vida.

Toda referencia a cradle-to-gate en el capítulo debe entenderse como parte del insumo de factores, pero el límite analítico del estudio es cradle-to-site. Para asegurar comparabilidad, todos los factores de emisión empleados en los cálculos se expresan y aplican en la unidad base $\text{kgCO}_2\text{e/kg}$ de material. Cuando una fuente o ficha técnica reporta valores por m^2 o por metro lineal (ML), se convierte previamente a masa (kg) utilizando densidades, espesores o pesos unitarios documentados.

FIGURA 2 LÍMITES DEL SISTEMA TÍPICAMENTE UTILIZADOS EN UN ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA



Nota: Fuente Manual de implementación de la metodología de análisis de ciclo de vida en la construcción, BID.

El caso Villas de San Pedro fue seleccionado como unidad de análisis debido a su carácter representativo del modelo de vivienda social mínima en El Salvador, su relevancia institucional y la existencia de documentación técnica verificable, incluyendo planos arquitectónicos, catálogos de partidas, listas de materiales y acceso al sitio de construcción. Este proyecto, ejecutado por instituciones públicas en una zona rural del departamento de La Paz, permite reflejar las condiciones típicas de las construcciones subsidiadas en contextos de bajo ingreso, con sistemas

constructivos convencionales y materiales de alta carga ambiental como cemento, bloques de concreto y lámina galvanizada.

El procedimiento metodológico seguido comprendió las siguientes fases operativas:

1. definición de la unidad funcional como una vivienda tipo de 45 m² de área construida;
2. recopilación de datos primarios en campo (mediciones, observaciones, fotografías) y secundarios (planos, especificaciones técnicas, catálogos de obra);
3. aplicación de factores de emisión extraídos de la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019).
4. cálculo de emisiones por partida y por metro cuadrado mediante hojas de cálculo estructuradas en Microsoft Excel, según metodología reproducible documentada en los anexos de este trabajo.

La aplicación de una estrategia metodológica basada en la triangulación de fuentes y técnicas ha permitido fortalecer la validez de los resultados presentados.

La combinación del enfoque cuantitativo centrado en el cálculo de emisiones mediante hojas de cálculo y factores de emisión estandarizados con elementos cualitativos derivados de la observación directa en campo, entrevistas y revisión documental, ayudan a una interpretación integral del impacto ambiental asociado a la construcción de viviendas sociales. Esta integración metodológica responde a criterios de credibilidad, trazabilidad y replicabilidad, elementos esenciales en investigaciones de análisis ambiental (Denzin, 1978; Flick, 2014).

En este sentido, los resultados consolidados que se muestran en la Tabla 5 no deben interpretarse únicamente como valores numéricos, sino como el producto de un proceso sistemático

de verificación técnica que refleja fielmente la interacción entre planificación y realidad constructiva en contextos salvadoreños.

La Tabla 5 reúne los factores de emisión expresados en kilogramos de CO₂ equivalente por kilogramo de material, complementados con valores de peso específico y referencias bibliográficas. Su propósito es servir como insumo metodológico para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero en las diferentes partidas constructivas, garantizando la trazabilidad de los datos y la coherencia con fuentes reconocidas a nivel internacional. (Uso aplicable en el caso A y B)

Las cantidades fueron obtenidas mediante el cálculo detallado por actividad constructiva, aplicando factores de emisión específicos por material y unidad de medida.

El cálculo detallado de emisiones de carbono incorporado se realizó mediante el siguiente procedimiento técnico, estructurado por partida constructiva:

1. Cuantificación de materiales (métrica base por actividad según plan de oferta):

Se identificaron y verificaron las cantidades de materiales utilizadas en cada actividad constructiva (por ejemplo: muros, losas, cimentación, cubierta), utilizando:

- Planos arquitectónicos y estructurales del proyecto.
- Catálogos de partidas suministrados por el desarrollador.
- Levantamientos de campo (observación directa, mediciones in situ).
- Fotografías técnicas y fichas de registro (ver Anexos Técnicos – Caso A).

Ejemplo:

Para la partida "Muros de bloque", se cuantificaron m² de muro y se estimó el número total de bloques, volumen de mortero, y cantidad de acero de refuerzo.

2. Asignación de factores de emisión:

A cada insumo se le asignó un factor de emisión específico, en unidades de kg CO₂e por unidad de material (kg, m³, m², ml), extraído de la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019).

Ejemplo:

- Cemento gris Portland → 0.93 kg CO₂e/kg
- Acero de refuerzo → 1.40 kg CO₂e/kg
- Bloques de concreto → 0.12 kg CO₂e/unidad (estimación propia por composición y peso unitario)

3. Cálculo de emisiones por partida: Se aplicó la siguiente fórmula básica:

Emisiones (kg CO₂e) = Cantidad del material (u) × Factor de emisión (kg CO₂e/u)

Ejemplo:

- Material: Lámina de acero aluminizado cal. 26 (0.40 mm)

a	Area	44.51	m ²
b	Espesor	0.0004	mt
c	Volumén	0.017804	m ³
d	ρ de Lámina Zinc Aluminio	7200	kg/m ³
e = (c x d)	Peso	128.19	kg
f	Factor de Emision	2.60	kgCO ₂ e/kg
g= (e x f)	Total	333.29	kgCO₂e

- Material: Polín C #4 ch 14. L= 41.55 mt

a	Area Polín C 4"x2" (0.10x0.05mt)	8.31	m ²
b	Espesor	0.0019	mt
c	Volumén	0.015789	m ³
d	ρ de Lámina Zinc Aluminio	7850	kg/m ³
e = (c x d)	Peso	123.94	kg
f	Factor de Emision	2.15	kgCO ₂ e/kg
g= (e x f)	Total	266.48	kgCO₂e

Para realizar algunos de los cálculos anteriores y adelante, se hará uso de la tabla de equivalencias de calibres y espesores, la cual corresponderá a la tabla 41, dentro del anexo 4 para los casos donde sea necesario trabajar con láminas metálicas.

4. Agrupación y presentación: Los resultados se organizaron por materiales y por partidas constructiva (cimentación, muros, cubierta, acabados, instalaciones) y se expresaron en:

- kg CO₂e totales por materiales
- kg CO₂e totales por partidas
- kg CO₂e por m² de vivienda
- Porcentaje respecto al total de emisiones.

Esto contribuyó a la generación de:

- Gráfico de comparación de emisiones absolutas y específicas por caso de estudio.
- Tabla 35. Materiales que más contribuyen en la generación de GEI por caso.

5. Validación

- Se realizó triangulación con observaciones de campo y entrevistas.
- Se contrastaron los resultados con referencias bibliográficas sobre huella de carbono en vivienda social en contextos similares.

TABLA 5 DISTRIBUCION DE FACTOR POR EMISION DE KG CO2E/KG SEGUN MATERIAL. (ESTA TABLA SE USARÁ PARA AMBOS CASOS DE ESTUDIO)

No	Material	Peso específico (kg/m³)	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Fuente / Comentario	Fuentes bibliográficas detalladas
1	Cemento (bls 42.5 kg)	1100	0.93	ICE v3.0 / Portland CEM I	ICE v3.0; Inventory of Carbon & Energy (Hammond & Jones, Univ. Bath)
2	Arena seca	1600	0.005	ICE v3.0 / Arena lavada	ICE v3.0; BEDEC ITEC, Generalitat de Catalunya
3	Grava (3/4 o 3/8 plg)	1700	0.005	ICE v3.0 / Grava triturada	ICE v3.0; BEDEC ITEC
4	Agua	1000	0.0003	ICE v3.0 / Agua potable	ICE v3.0; EPA GHG Emission Factors Hub
5	Lámina de zinc-aluminio	7200	2.6	ICE v3.0 / Steel sheet - Aluzinc	ICE v3.0; World Steel Association LCI Data
6	Hierro liso #2	7850	1.4	ICE v3.0 / Steel rebar	ICE v3.0; AISI Steel Construction Manual
7	Hierro corrugado #3	7850	1.4	ICE v3.0 / Steel rebar	ICE v3.0; AISI Steel Construction Manual
8	Hierro corrugado #4	7850	1.4	ICE v3.0 / Steel rebar	ICE v3.0; AISI Steel Construction Manual
9	Hierro corrugado #5	7850	1.4	ICE v3.0 / Steel rebar	ICE v3.0; AISI Steel Construction Manual
10	Hierro corrugado #6	7850	1.4	ICE v3.0 / Steel rebar	ICE v3.0; AISI Steel Construction Manual
11	Panel de fibrocemento 8 mm	1250	0.45	ICE v3.0 / Fibre cement board	ICE v3.0; Ecoinvent Database
12	Bloque concreto 10 cm (8.64 kg)	1900	0.12	ICE v3.0 / Concrete block - dense	ICE v3.0; NRMCA Industry-Average EPD
13	Bloque concreto 15 cm (11.36 kg)	1900	0.12	ICE v3.0 / Concrete block - dense	ICE v3.0; NRMCA Industry-Average EPD
14	Bloque concreto 20 cm (14 kg)	1900	0.12	ICE v3.0 / Concrete block - dense	ICE v3.0; NRMCA Industry-Average EPD
15	Polín C 4" ch 14	7850	2.15	ICE v3.0 / Cold formed steel section	ICE v3.0; AISI Cold-Formed Steel Standards
16	Vidrio 6 mm	2500	1.2	ICE v3.0 / Float glass	ICE v3.0; International Glass Federation (IGU)
17	Piso cerámico porcelanato	2100	0.65	ICE v3.0 / Porcelain tile	ICE v3.0; BEDEC ITEC
18	Madera plywood 3/4	600	0.29	ICE v3.0 / Plywood (softwood)	ICE v3.0; American Wood Council EPD
19	Cuartón pino 4"x2"	550	0.18	ICE v3.0 / Softwood structural timber	ICE v3.0; CONAFOR México
20	Costanera pino 2"x2"	550	0.18	ICE v3.0 / Softwood structural timber	ICE v3.0; CONAFOR México
21	Tierra (material selecto)	1800	0.003	ICE v3.0 / Earth fill	ICE v3.0; BEDEC ITEC
22	Pintura látex	1200	2.5	ICE v3.0 / Emulsion paint	ICE v3.0; BEDEC ITEC
23	Pintura anticorrosiva	1600	3.8	ICE v3.0 / Solvent-based protective paint	ICE v3.0; Environmental Product Declaration - Sherwin-Williams
24	Tubería PVC 2"	1380	1.9	ICE v3.0 / PVC pipe	ICE v3.0; PlasticsEurope LCI Database
25	Alambre de amarre cal 16	7850	2.1	ICE v3.0 / Steel wire	ICE v3.0; AISI Steel Manual
26	Lámina de fibrocemento 8 mm	1250	0.45	ICE v3.0 / Fibre cement sheet	ICE v3.0; Ecoinvent Database
27	Gasolina	720	3.15	ICE v3.0 / Petrol - bulk	ICE v3.0; DEFRA UK Emissions Conversion Factors
28	Diésel	832	3.1	ICE v3.0 / Diesel - bulk	ICE v3.0; DEFRA UK Emissions Conversion Factors
29	Lamina troquelada cal. 20	7850	2.15	ICE v3.0 / Cold formed steel section	ICE v3.0; AISI Cold-Formed Steel Standards

Fuente: Circular Ecology. (2019). Inventory of Carbon & Energy (ICE), version 3.0. University of Bath. Recuperado de <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>.

La tabla 5 anterior muestra los materiales inmersos en las actividades constructivas ejecutadas en el proyecto de vivienda social del caso “A” (Villas de San Pedro), así también su correspondiente estimación del factor de emisión y la densidad de ellos. El cálculo se realizó mediante la aplicación de factores de emisión documentados en la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011; Circular Ecology, 2019), expresados en kilogramos de CO₂ equivalente por unidad de material.

3.1.2 Instrumentos y Recolección de Datos

La recolección de datos tuvo como finalidad cuantificar con precisión las cantidades de materiales utilizados en la construcción, verificar *in situ* los métodos constructivos reales aplicados, y contrastar las especificaciones técnicas con las condiciones materiales observadas durante la ejecución del proyecto.

Las visitas de campo se realizaron entre agosto y octubre de 2024 en el sitio del proyecto Villas de San Pedro, ubicado en el cantón El Porvenir, municipio de San Pedro Masahuat, departamento de La Paz. Estas permitieron el acceso visual a elementos estructurales, técnicas constructivas y características materiales de la vivienda.

Los instrumentos empleados para la recolección de información incluyeron:

a) Ficha de levantamiento técnico por unidad funcional.

Este formato permitió documentar de manera estructurada los aspectos clave observables en campo. La ficha incluye:

- Información general del proyecto (ubicación, responsable del levantamiento, fecha de visita)
- Croquis o descripción funcional de espacios (distribución básica de la vivienda)

- Datos técnicos verificados por elemento constructivo, como:
 - ✓ Muros (dimensiones y tipo de bloque)
 - ✓ Cubierta (tipo de estructura y pendiente)
 - ✓ Pisos, puertas y ventanas (dimensiones y materiales)

Ficha Técnica de Vivienda – Villas de San Pedro

1. Información General

Proyecto: Villas de San Pedro

Ubicación: San Pedro Masahuat, La Libertad

Unidad funcional evaluada: Vivienda tipo de interés social

Fecha de visita: agosto de 2024

Responsable del levantamiento: Ismael Álvarez/Humberto Hernandez

2. Croquis Esquemático o Distribución Espacial

Describe aquí la distribución básica de la vivienda (puede incluirse un croquis a mano si se imprime):

- ✓ Sala y comedor integrados
 - ✓ 2 habitaciones
 - ✓ 1 baño tipo Letrina abonera más ducha.
 - ✓ Cocina
 - ✓ Patio
 - ✓ Pila de concreto
- ##### 3. Datos Técnicos Verificados

Elemento Constructivo	Dimensiones/Características	Material Observado
Muros de cerramiento	Altura 2.40 m, espesor 10 cm	Bloque de concreto
Cubierta	Pendiente 2 aguas, altura cumbre 3.00 m	Lámina metálica sobre estructura canal C
Piso	Concreto	Cerámico
Puertas	0.90 x 2.10 m (principal)	Lamina troquelada
Ventanas	1.20 x 1.00 m promedio	Lamina troquelada

4. Observaciones Adicionales

- Se observó coincidencia general entre planos y ejecución física.
- No se identificaron sustituciones de materiales.
- La cimentación no fue visible durante la visita.

Observaciones adicionales sobre coincidencia entre planos y ejecución, sustituciones de materiales y limitaciones de visibilidad (por ejemplo, cimentación no visible).

Esta ficha fue llenada manualmente en campo y posteriormente digitalizada para su archivo técnico. Constituye una evidencia directa del estado constructivo de la vivienda y del uso real de los materiales.

b) Formato de levantamiento de cantidades de obra

Diseñado para registrar las partidas constructivas clave observadas durante la visita, este instrumento incluye:

- Código y descripción de partida
- Unidad de medida
- Cantidad estimada observada en sitio

Las cantidades fueron verificadas mediante mediciones con cinta, estimación de superficie y contraste con los planos de obra y catálogo de partidas del proyecto. Las partidas incluidas corresponden a elementos relevantes para el análisis de emisiones, tales como muros de bloque, repellos, cubierta metálica, piso cerámico, puertas y ventanas.

Formato de Levantamiento de Cantidades de Obra

Este formato está diseñado para el registro de cantidades de obra durante el levantamiento de una unidad funcional. Cada partida debe ser registrada con los siguientes detalles para asegurar un control adecuado de las cantidades ejecutadas y los materiales utilizados en el proyecto.

Fecha: septiembre/2024

Código de Partida	Descripción de la Partida	Unidad de Medida	Cantidad
	Muro de bloque 10cm. h=2.40	M2	58.50
	Cubierta de lámina de zinc- alum	M2	44.51
	Polín Z para estructura de techo	ML	41.55
	Repello y afinado interior y exterior	M2	6.08
	Piso de concreto	M2	36.32
	Puertas metálicas	U	2
	Ventanas metálicas	U	4

Notas:

1. Incluiremos las partidas de interés según plan de oferta proporcionado.
2. Compararemos las medidas reales vrs. las cantidades de obra.
3. La información de los elementos que no se pueden observar serán obtenidos de planos.

c) Validación de datos en caso de discrepancias

En los casos en que se identificaron diferencias entre lo ejecutado en campo y lo indicado en planos o catálogos (por ejemplo, variaciones en dimensiones menores o tipos de acabados), se aplicó el siguiente procedimiento:

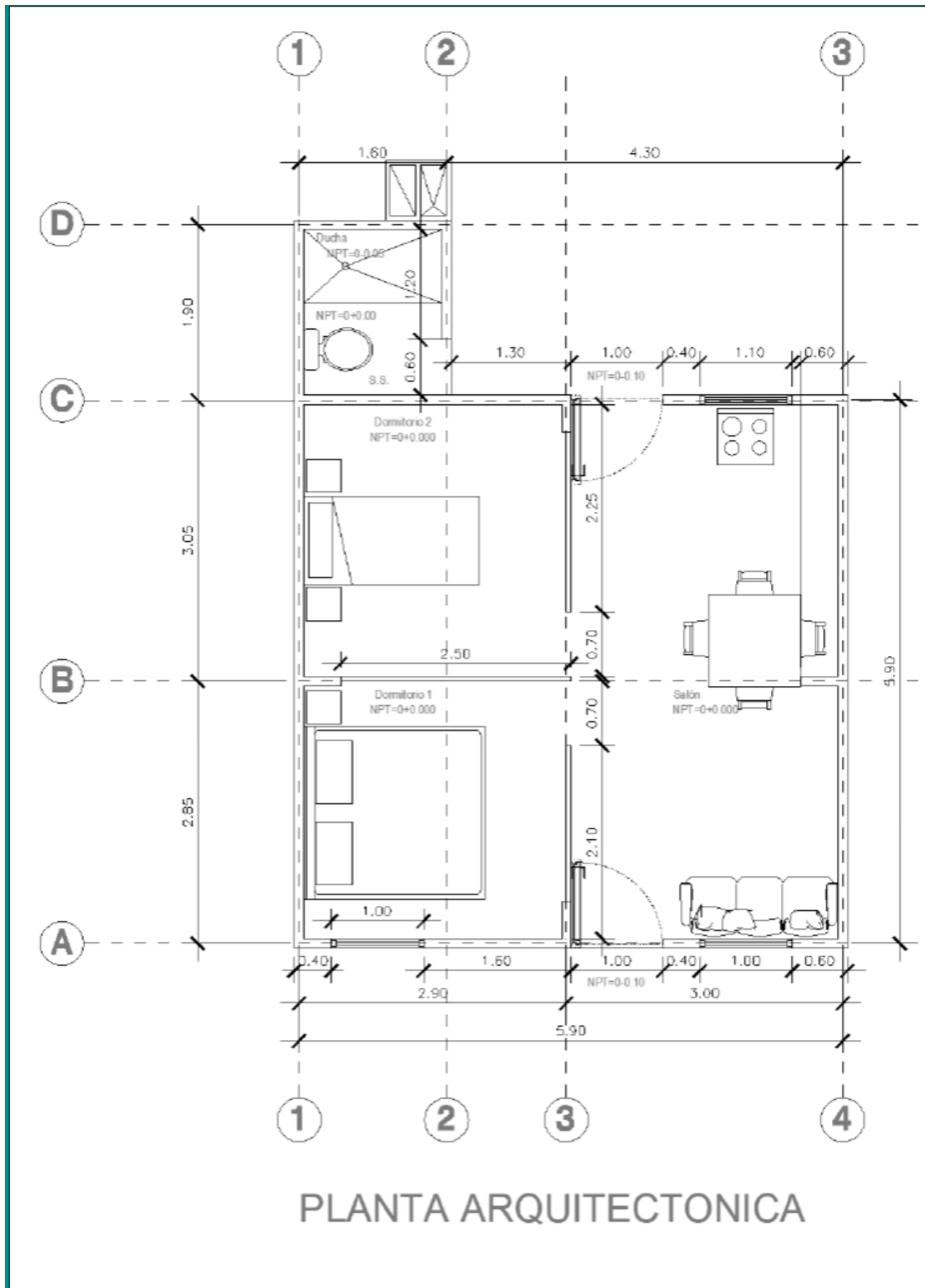
- Prioridad a la observación directa siempre que los elementos estuvieran accesibles y visibles.
- Consulta cruzada con documentos técnicos: en caso de duda, se revisó el catálogo de partidas proporcionado por el desarrollador y los planos arquitectónicos/estructurales.
- Registro de las limitaciones o inconsistencias en el apartado de “Observaciones adicionales” del instrumento correspondiente.

d) Plantillas de entrevista dirigidas a los habitantes y personas relacionadas con el proyecto (ver Anexo 2.1.1).

e) Revisión directa de planos arquitectónicos, estructurales y de instalaciones (anexo 4), así como de catálogos de partidas de obra (anexo 3.4), proporcionados por la entidad desarrolladora del proyecto.

f) Registro fotográfico para validación visual de cada caso (ver Anexo 7).

PLANO 1: PLANTA ARQUITECTONICA (CASO A).



NOTA: DOCUMENTO TECNICO VILLAS DE SAN PEDRO

La observación fue realizada por el grupo, se registraron mediciones físicas de componentes constructivos, condiciones del sitio, y cotejó las cantidades con los catálogos técnicos de obra. Esta información fue posteriormente validada mediante documentación institucional del proyecto, permitiendo un cruce de datos entre la planificación y la ejecución real.

Los criterios de validación aplicados incluyeron:

1. Análisis de planos y obra ejecutada.
2. Verificación con normas técnicas nacionales e internacionales.
3. Contraste con publicaciones científicas y manuales técnicos de vivienda social en contextos similares.

3.1.3 Sistematización de datos técnicos.

Toda la información fue elaborada mediante hojas de cálculo para esta investigación. Dichas herramientas contienen los datos cuantificados por partida, las fórmulas aplicadas, los factores de emisión empleados, así como referencias cruzadas con los documentos técnicos revisados y los supuestos asumidos durante el cálculo.

Esta estructuración metodológica permite asegurar la trazabilidad completa del análisis, su validación técnica y la posibilidad de replicación por parte de otros investigadores que consulten el estudio.

Para una mejor interpretación de cómo se obtienen los valores de la estimación de emisión de GEI, se muestra un ejemplo

(Columna A) Material	(Columna B) Peso específico (kg/m³)	(Columna C) Cantidad Utilizada en kg	(Columna D) Factor CO2e (kg CO2e/kg)	(Columna E) kg CO2e/ material	%
Material utilizado en el proyecto	Valor de Tabla 5, según material utilizado en pagina 60	Cantidad de material utilizada en el proyecto según plan de oferta	Valor obtenido de Tabla 8, en pagina 68	Valor obtenido multiplicar valor de columna C y D	Porcentaje correspondiente por partida

A continuación, un ejemplo.

**TABLA 6 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA:
ESTRUCTURA Y CUBIERTA DE TECHO DE LAMINA DE ALUMINIO**

Material	Cantidad	unidad	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Lámina de Zinc Aluminio	128.19	kg	2.60	333.29	55.57%
Polin C 4"x2" ch 14	123.94	kg	2.15	266.48	44.43%
TOTAL kg CO2e				599.77	100.00%

Nota: Ejemplo de elaboración propia.

La tabla número 7 que se presenta a continuación es un resumen de los materiales utilizados en cada partida constructiva, mostrando sus cantidades totales en peso. Esta información permite tener una visión general del consumo de insumos en el proyecto y sirve como base para realizar cálculos posteriores relacionados con costos o impactos ambientales.

TABLA 7 PESOS DE MATERIALES CASO A (VILLAS DE SAN PEDRO)

PARTIDA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	MATERIALES											TOTAL PESO POR PARTIDA (kg)
				AGUA	CEMENTO	HIERRO	ALAMBRE CAL 16	BLOQUE 10/15 CM	ARENA	GRAVA	POLIN	LAMINA ZINC ALUMINIO CAL. 26	LAMINA TROQUELADA CAL. 20	FIBRO-CEMENTO 8 mm	
3.1	Suministro y construccion de pilotes de diametro 30 cm Ref. 6 varillas #4, espiral de #2 y paso @15cm	ML	44.00	708.24 kg	1,670.76 kg	350.53 kg	10.45 kg		2,645.76 kg	2,917.20 kg					8,302.95 kg
3.2	Suministro y construccion de vigas de fundacion VF-1 25x40cm, 4#4 est. #2 @ 15cm	M3	2.01	456.87 kg	1,076.36 kg	131.63 kg	3.95 kg		1,704.48 kg	1,879.35 kg					5,252.65 kg
4.1	Paredes de bloque de concreto de 10 cm	M2	58.50	468.00 kg	621.56 kg	83.64 kg	2.52 kg		3,463.20 kg	3,480.75 kg					8,119.67 kg
4.2	Solera intermedia SI + cargadero, bloque de concreto de 15 cm, 1#3	ML	54.20	216.00 kg	410.02 kg	57.96 kg	1.27 kg	1,539.28 kg	1,555.20 kg	1,870.00 kg					5,649.73 kg
4.3	Solera de coronamiento SC, bloque de concreto 15 cm	ML	30.00	198.00 kg	226.95 kg	19.32 kg	1.04 kg	852.00 kg	1,136.00 kg	1,666.00 kg					4,099.31 kg
4.4	Piso de mortero f'c=125 kg/cm2, e=5 cm. Incluye 10 cm de restitution con suelo selecto	M2	36.32	400.40 kg	556.92 kg				1,485.12 kg	2,196.74 kg					4,639.18 kg
4.5	Repello 1:4 y afinado 1:1, de paredes en ducha h= 1.90	M2	6.08	31.53 kg	67.62 kg				161.28 kg						260.43 kg
5.1 / 5.2	Polin C de 4" ch 14 con celosia de varilla de acero corrugado d=3/8 @ 60cm. Incluye Varilla de polin de acero corrugado de 3/8"	ML	41.55			22.00 kg					154.93 kg				176.92 kg
5.3	Cubierta de techo de laminado de acero con recubrimiento de aleacion de aluminio cal 26, incluye capote de lamina de la misma aleacion	M2	44.51									129.47 kg			129.47 kg
6.1	Puerta de lamina troquelada 1x2 mts	U	2.00										22.69 kg		22.69 kg
6.2	Puerta de lamina troquelada 0.85x1.95mts	U	1.00										48.19 kg		48.19 kg
6.3	Ventana de lamina troquelada 1x1	U	4.00										25.50 kg		25.50 kg
9.1	Division de fibrocemento de 8 mm con estructura de tubo industrial de 2x1 ch 21 y tubo estructural de 2x1 ch 14	M2	20.09											238.43 kg	238.43 kg
	TOTAL PESO POR MATERIAL			2,479.04 kg	4,630.19 kg	665.08 kg	19.23 kg	2,391.28 kg	12,151.04 kg	14,010.04 kg	154.93 kg	129.47 kg	96.38 kg	238.43 kg	

Nota: Tabla de elaboración propia.

Las siguientes fichas de explosión de insumos para el caso A constituyen un instrumento técnico que permite desglosar de manera sistemática los materiales, cantidades y pesos involucrados en cada partida constructiva. Su propósito es proporcionar una visión clara y ordenada de los recursos requeridos, facilitando tanto el control de obra como la estimación de impactos asociados, logística o evaluaciones ambientales. La información se presenta de forma estandarizada, lo que asegura coherencia en el análisis y trazabilidad en los cálculos realizados para cada actividad del proyecto.

FICHAS DE EXPLOSION DE INSUMOS

EXPLOSION DE INSUMOS

3.1

PARTIDA: Suministro y construccion de pilotes de diametro 30 cm Ref. 6 varillas #4, espiral de #2 y paso @15cm

CANTIDAD: 44.00 / 3.12

UNIDAD: ml / m3

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	39.31	1,670.76	20.12%
2	Arena seca	m3	1.65	2,645.76	31.87%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m3	1.72	2,917.20	35.13%
4	Agua	lt	708.24	708.24	8.53%
5	Hierro corrugado #4	mt	303.60	301.78	3.63%
6	Hierro liso #2	mt	195.80	48.75	0.59%
7	Alambre de amarre	kg	23.00	10.45	0.13%
TOTAL (kg)				8,302.95	100.00%

3.2

PARTIDA: Suministro y construccion de vigas de fundacion VF-1 25x40cm, 4#4 est. #2 @ 15cm

CANTIDAD: 2.01

UNIDAD: m3

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	25.33	1,076.36	20.49%
2	Arena seca	m3	1.07	1,704.48	32.45%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m3	1.11	1,879.35	35.78%
4	Agua	lt	456.87	456.87	8.70%
5	Hierro corrugado #4	mt	80.40	79.92	1.52%
6	Hierro liso #2	mt	207.70	51.72	0.98%
7	Alambre de amarre	kg	8.70	3.95	0.08%
TOTAL (kg)				5,252.65	100%

EXPLOSION DE INSUMOS

PARTIDA: 4.1
Paredes de bloque de concreto de 10 cm
CANTIDAD: 58.50
UNIDAD: M2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Bloque 10 cm (8.63kg)	unidad	595.75	5,141.32	38.77%
2	Cemento gris (42.5 kg)	bls	14.63	621.56	4.69%
3	Arena seca	m3	2.16	3,463.20	26.12%
4	Grava 3/4" o 3/8"	m3	2.05	3,480.75	26.25%
5	Agua	lt	468.00	468.00	3.53%
6	Hierro corrugado #3	mt	99.50	55.72	0.42%
7	Hierro liso #2	mt	112.13	27.92	0.21%
8	Alambre de amarre	kg	2.52	2.52	0.02%
TOTAL (kg)				13,261.00	100.00%

4.2
PARTIDA:
Solera intermedia SI + cargadero, bloque de concreto de 15 cm, 1#3
CANTIDAD: 54.20
UNIDAD: ML

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Bloque 15 cm (11.36kg)	unidad	135.50	1,539.28	27.25%
2	Cemento gris (42.5 kg)	bls	9.65	410.02	7.26%
3	Arena seca	m3	0.97	1,555.20	27.53%
4	Grava 3/4" o 3/8"	m3	1.10	1,870.00	33.10%
5	Agua	lt	216.00	216.00	3.82%
6	Hierro corrugado #3	mt	103.50	57.96	1.03%
8	Alambre de amarre	kg	1.27	1.27	0.02%
TOTAL (kg)				5,649.73	100.00%

4.3
PARTIDA:
Solera de coronamiento SC, bloque de concreto 15 cm
CANTIDAD: 30.00
UNIDAD: ML

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Bloque 15 cm (11.36kg)	unidad	75.00	852.00	20.78%
2	Cemento gris (42.5 kg)	bls	5.34	226.95	5.54%
3	Arena seca	m3	0.71	1,136.00	27.71%
4	Grava 3/4" o 3/8"	m3	0.98	1,666.00	40.64%
5	Agua	lt	198.00	198.00	4.83%
6	Hierro corrugado #3	mt	34.50	19.32	0.47%
8	Alambre de amarre	kg	1.04	1.04	0.03%
TOTAL (kg)				4,099.31	100.00%

EXPLOSION DE INSUMOS

4.4

PARTIDA: Piso de mortero f'c=125 kg/cm2, e=5 cm. Incluye 10 cm de restitution con suelo selecto

CANTIDAD: 36.32 / 1.82

UNIDAD: M2 / M3

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	13.10	556.92	12.00%
2	Arena seca	m3	0.93	1,485.12	32.01%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m3	1.29	2,196.74	47.35%
4	Agua	lt	400.40	400.40	8.63%
TOTAL (kg)				4,639.18	100.00%

4.5

PARTIDA: Repello 1:4 y afinado 1:1, de paredes en ducha h= 1.90

CANTIDAD: 6.08 / 0.09

UNIDAD: M2 / M3

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	1.59	67.62	25.96%
2	Arena seca	m3	0.10	161.28	61.93%
4	Agua	lt	31.53	31.53	12.11%
TOTAL (kg)				260.43	100.00%

5.1 y 5.2

PARTIDA: Polin C de 4" ch 14 con celosia de varilla de acero corrugado d=3/8 @ 60cm (incluye atiezador #3)

CANTIDAD: 41.55

UNIDAD: ML

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Polin C 4"x2" ch14	mt	41.55	154.93	87.57%
2	Hierro corrugado #3	mt	39.28	22.00	12.43%
TOTAL (kg)				176.92	100.00%

5.3

PARTIDA: Cubierta de techo de laminado acero con recubrimiento de aleacion de aluminio cal 26, incluye capote de lamina de la misma aleacion

CANTIDAD: 44.51

UNIDAD: M2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Lamina de Zinc Aluminio cal. 26 (0.404 mm)	m2	44.51	129.47	100.00%
TOTAL (kg)				129.47	100.00%

EXPLOSION DE INSUMOS

PARTIDA: 6.1 y 6.2
Puerta de lamina troquelada 1x2 mts + 0.85x1.95 mts. Cal. 24 (0.511mm)
CANTIDAD: 3.00
UNIDAD: c/u

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Puerta de lamina troquelada 1x2 + 0.85x1.95 mts. Cal. 24 (0.511 mm)	m2	5.66	22.69	100.00%
			TOTAL (kg)	22.69	100.00%

PARTIDA: 6.3
Ventana de lamina troquelada 1x1 cal. 24 (0.511 mm)
CANTIDAD: 4.00
UNIDAD: c/u

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Ventana de lamina troquelada 1x1	m2	4.00	25.50	100.00%
			TOTAL (kg)	25.50	100.00%

9.1
PARTIDA: Division de fibrocemento de 8 mm con estructura de tubo industrial de 2x1 ch 21 y tubo estructural de 2x1 ch 14
CANTIDAD: 20.09
UNIDAD: m2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Panel de fibrocemento 8 mm	m2	20.09	200.90	84.26%
2	Tubo Industrial 2"x1" ch 14	ml	16.80	37.53	15.74%
			TOTAL (kg)	238.43	100.00%

Los cálculos que se presentan a continuación de la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero se elaboran a partir de la información previamente sistematizada en las fichas de explosión de insumos, mientras estas últimas permiten identificar y cuantificar con detalle los materiales empleados en cada partida constructiva, las fichas de emisiones utilizan dichos datos como base para aplicar los factores de emisión correspondientes. Estos factores provienen de la Tabla 5, lo que permite transformar las cantidades y pesos de materiales en valores expresados en

kilogramos de CO₂ equivalente. De esta forma, existe una relación metodológica directa: las explosiones de insumos aportan los volúmenes y pesos, la Tabla 5 proporciona los factores de emisión, y las fichas de emisiones integran ambos elementos para calcular el impacto ambiental. Este encadenamiento permite el análisis de la huella de carbono dentro del proyecto.

TABLA 8 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PILOTE 30 CMS DIAMETRO

Partida 3.1 Suministro y construccion de pilotes de diametro 30 cm Ref. 6 varillas #4, espiral de #2 y paso @15cm				ML	44.00
				M3	3.11
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/ material	%
Cemento (bls 42.5 kg)	1100	1670.76	0.930	1553.81	74.18%
Arena seca	1600	2645.76	0.005	13.23	0.63%
Grava (3/4 o 3/8 plg)	1700	2917.20	0.005	14.59	0.70%
Agua	1000	708.24	0.000	0.21	0.01%
Hierro corrugado #4	7850	301.78	1.400	422.49	20.17%
Hierro liso #2	7850	48.75	1.400	68.26	3.26%
Alambre de amarre cal 16	7850	10.45	2.100	21.95	1.05%
TOTAL kg CO2e				2,094.53	100.00%

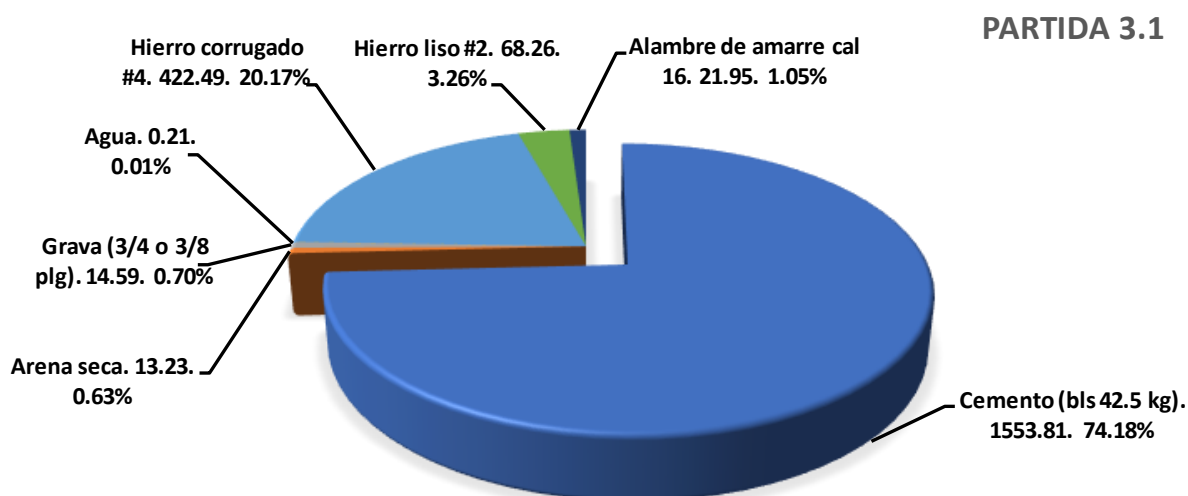


GRAFICO 1 Suministro y construccion de pilotes de diametro 30 cm Ref. 6 varillas #4, espiral de #2 y paso @15cm
Nota: Tabla de elaboración propia.

TABLA 9 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: VIGA DE FUNDACION VF-1

Partida 3.2: Suministro y construccion de vigas de fundacion VF-1 (25x40cm. 4#4 Est #2 @ 15 cm)				cantidad en M ³	2.01
Material	Peso específico (kg/m ³)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Cemento (bls 42.5 kg)	1,100.00	1,076.36	0.93	1,001.01	82.61%
Arena seca	1,600.00	1,704.48	0.01	8.52	0.70%
Grava (3/4 o 3/8 plg)	1,700.00	1,879.35	0.01	9.40	0.78%
Agua	1,000.00	456.87	0.00	0.14	0.01%
Hierro corrugado #4	7,850.00	79.92	1.40	111.88	9.23%
Hierro liso #2	7,850.00	51.72	1.40	72.40	5.98%
Alambre de amarre cal 16	7,850.00	3.95	2.10	8.30	0.69%
TOTAL kg CO2e				1,211.66	100.00%

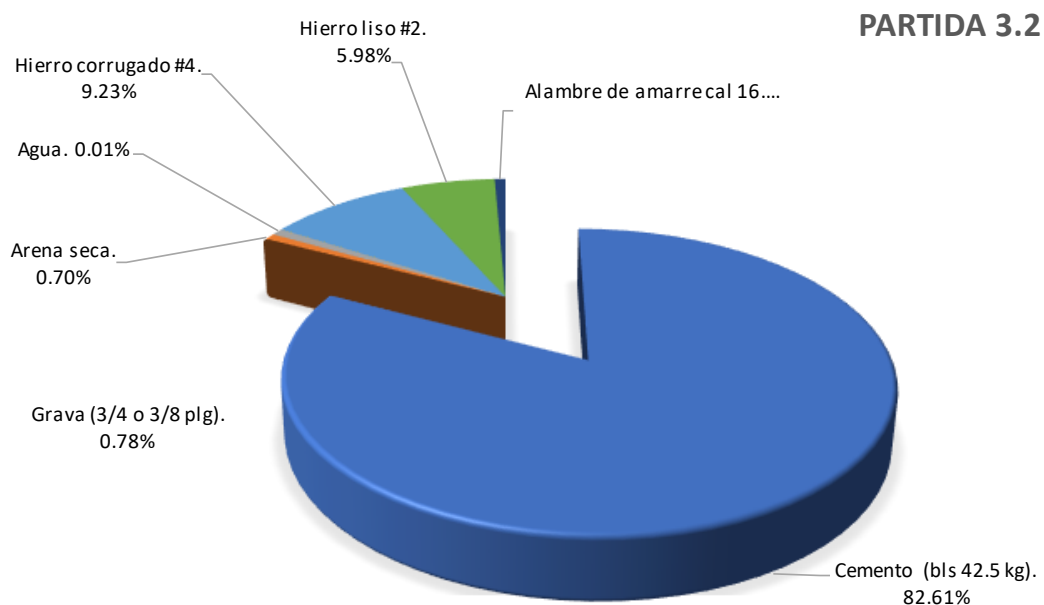


GRAFICO 2 Suministro y construccion de vigas de fundacion VF-1 (25x40cm. 4#4 Est #2 @ 15 cm)

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 10 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PARED DE CONCRETO DE 10 CM

Partida 4.1 : Paredes de bloque de concreto de 10 cm				M2	58.50
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Cemento (bls 42.5 kg)	1,100.00	621.56	0.93	578.05	42.75%
Arena seca	1,600.00	3,463.20	0.01	17.32	1.28%
Grava (3/4 o 3/8 plg)	1,700.00	3,480.75	0.01	17.40	1.29%
Agua	1,000.00	468.00	0.00	0.14	0.01%
Hierro corrugado #3	7,850.00	55.72	1.40	78.01	5.77%
Hierro liso #2	7,850.00	27.92	1.40	39.09	2.89%
Alambre de amarre cal 16	7,850.00	2.52	2.10	5.29	0.39%
Bloque concreto 10 cm (8.64 kg)	1,900.00	5,141.32	0.12	616.96	45.62%
TOTAL kg CO2e				1,352.26	100.00%

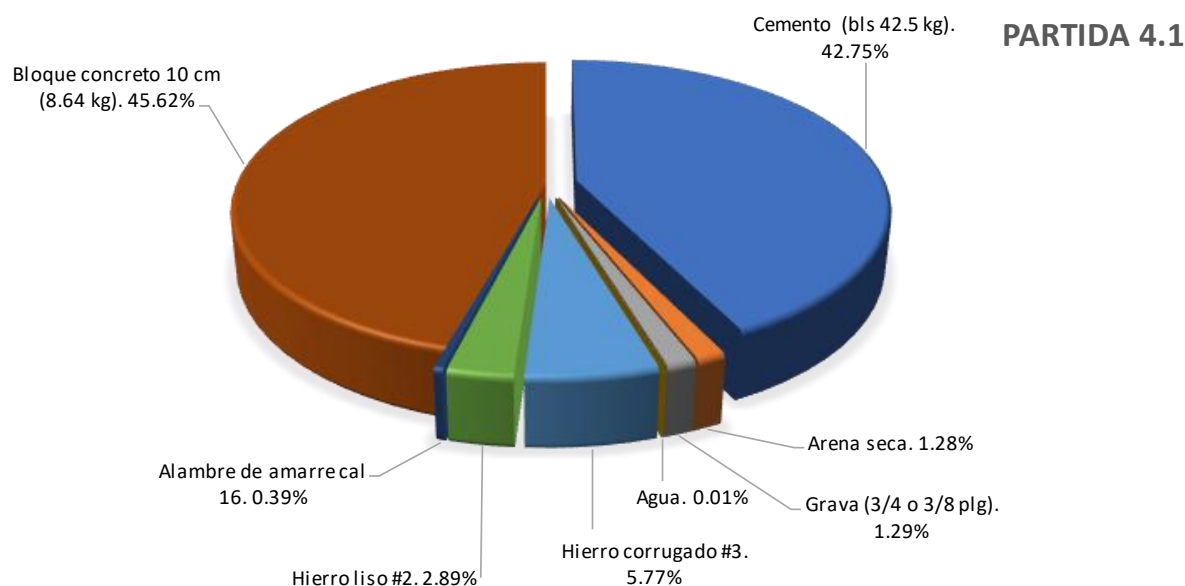


GRAFICO 3 Paredes de bloque de concreto de 10 cm

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 11 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA INTERMEDIA Y CARGADERO, BLOQUE DE 15 CM

Partida 4.2 : Solera intermedia SI + cargadero, bloque de concreto de 15 cm, 1#3				ML	54.20
				M²	10.84
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Cemento (bls 42.5 kg)	1,100.00	410.02	0.93	381.32	57.17%
Arena seca	1,600.00	1,555.20	0.01	7.78	1.17%
Grava (3/4 o 3/8 plg)	1,700.00	1,870.00	0.01	9.35	1.40%
Agua	1,000.00	216.00	0.00	0.06	0.01%
Hierro corrugado #3	7,850.00	57.96	1.40	81.14	12.16%
Alambre de amarre cal 16	7,850.00	1.27	2.10	2.67	
Bloque concreto 15 cm (11.36 kg)	1,900.00	1,539.28	0.12	184.71	27.69%
TOTAL kg CO2e				667.04	99.60%

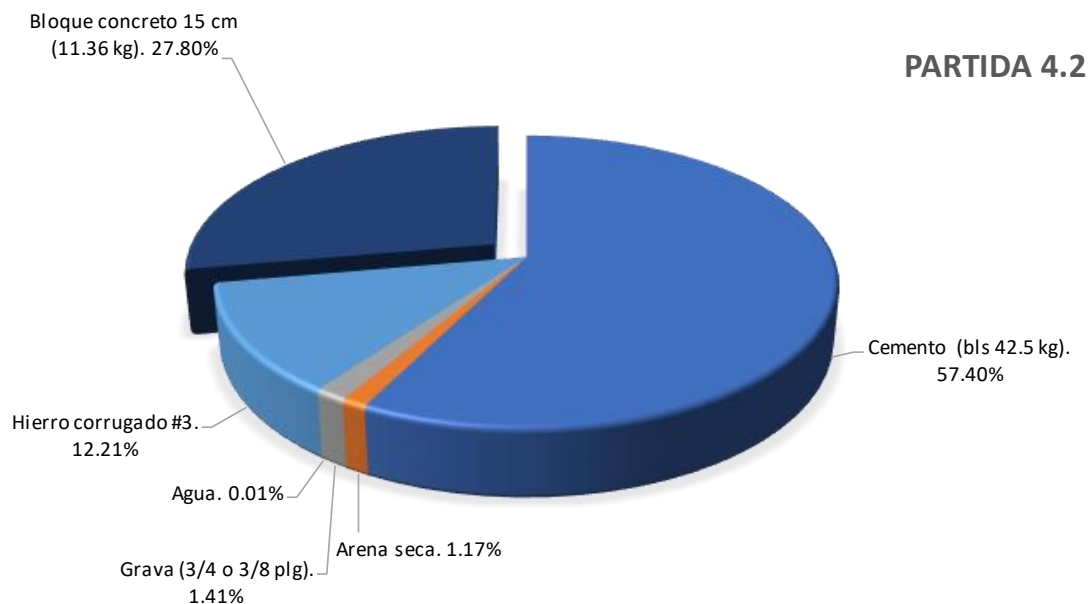


GRAFICO 4 Solera intermedia SI + cargadero, bloque de concreto de 15 cm, 1#3

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 12 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA DE CORONAMIENTO SC (BLOQUE SOLERA DE 15 CM)

Partida 4.3: Solera de coronamiento SC, bloque de concreto 15 cm				ML	30.00
				M ²	6.00
Material	Peso específico (kg/m ³)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Cemento (bls 42.5 kg)	1,100.00	226.95	0.93	211.06	59.19%
Arena seca	1,600.00	1,136.00	0.01	5.68	1.59%
Grava (3/4 o 3/8 plg)	1,700.00	1,666.00	0.01	8.33	2.34%
Agua	1,000.00	198.00	0.00	0.06	0.02%
Hierro corrugado #3	7,850.00	19.32	1.40	27.05	7.59%
Alambre de amarre cal 16	7,850.00	1.04	2.10	2.17	0.61%
Bloque concreto 15 cm (11.36 kg)	1,900.00	852.00	0.12	102.24	28.67%
TOTAL kg CO2e				356.59	100.00%

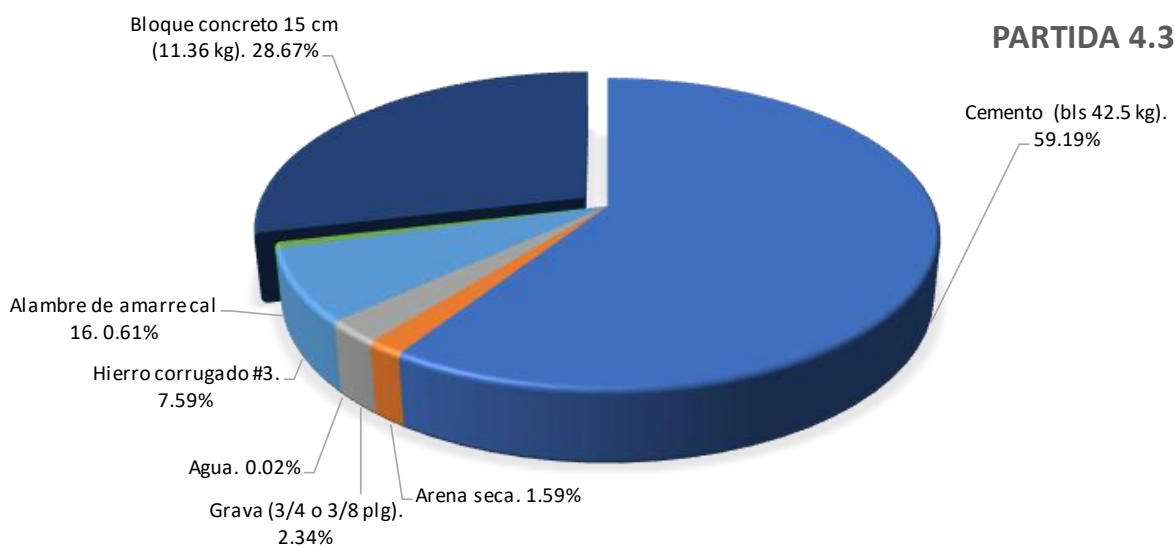


GRAFICO 5 Solera de coronamiento SC, bloque de concreto 15 cm

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 13 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PISO DE MORTERO F'C 125 KG/CM2

Partida 4.4: Piso de mortero f'c=125 kg/cm2, e=5 cm. Incluye 10 cm de restitution con suelo selecto				M2	36.32
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Cemento (bls 42.5 kg)	1,100.00	556.92	0.93	517.94	96.55%
Arena seca	1,600.00	1,485.12	0.005	7.43	1.38%
Grava (3/4 o 3/8 plg)	1,700.00	2,196.74	0.005	10.98	2.05%
Agua	1,000.00	400.40	0.0003	0.12	0.02%
TOTAL kg CO2e				536.47	100.00%

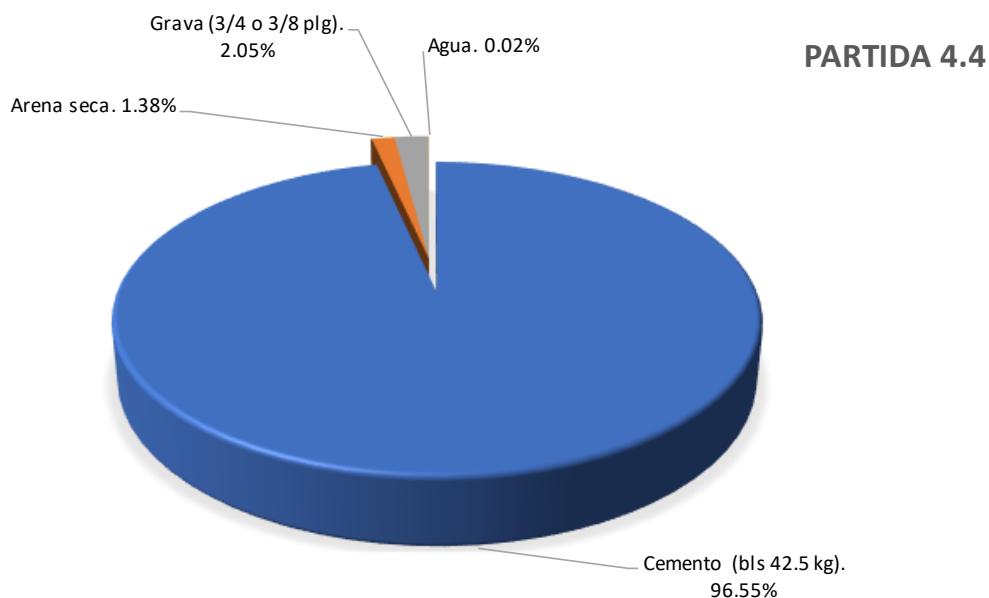


GRAFICO 6 Piso de mortero f'c=125 kg/cm2, e=5 cm. Incluye 10 cm de restitution con suelo selecto

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 14 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: REPELLO Y AFINADO 1:1 DE PAREDES DE DUCHA H=1.90 MTS

Partida 4.5: Repello 1:4 y afinado 1:1, de paredes en ducha h= 1.90				M2	6.08
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Cemento (bls 42.5 kg)	1,100.00	67.62	0.93	62.88	98.72%
Arena seca	1,600.00	161.28	0.01	0.81	1.27%
Agua	1,000.00	31.53	0.00	0.01	0.01%
TOTAL kg CO2e				63.70	100.00%

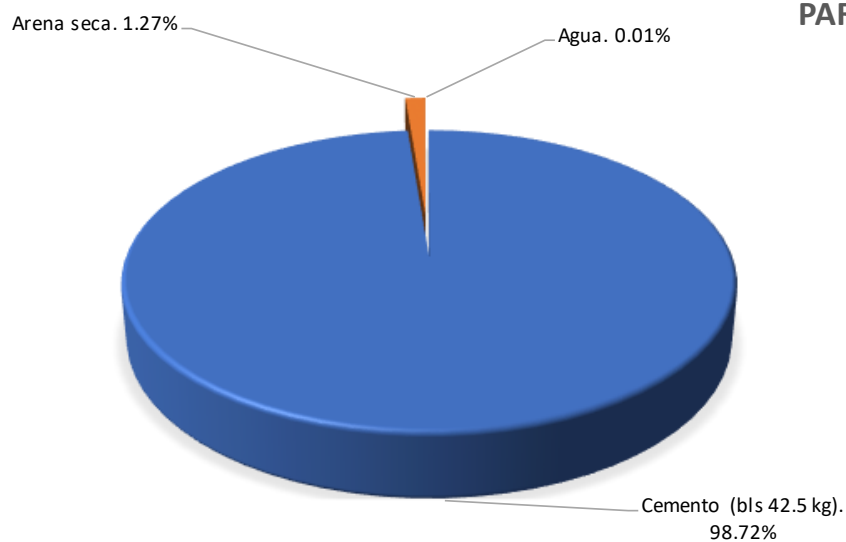
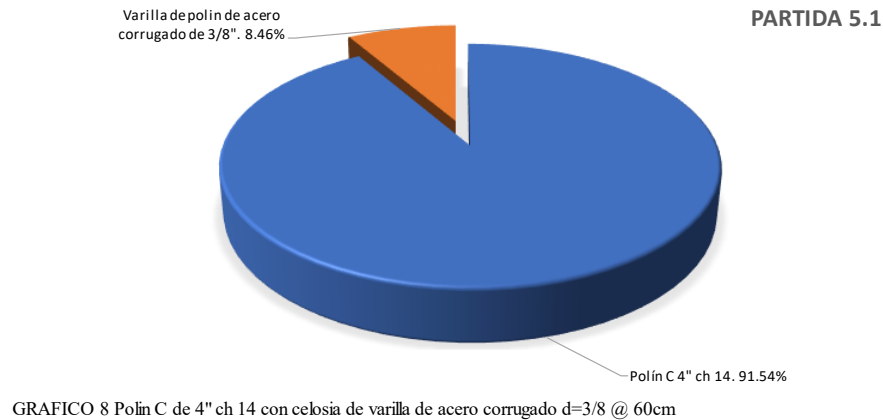


GRAFICO 7 Repello 1:4 y afinado 1:1, de paredes en ducha h= 1.90

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 15 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: POLIN C DE 4" CH 14 CON CELOSIA DE HO CORRUGADO DE 3/8 @ 60

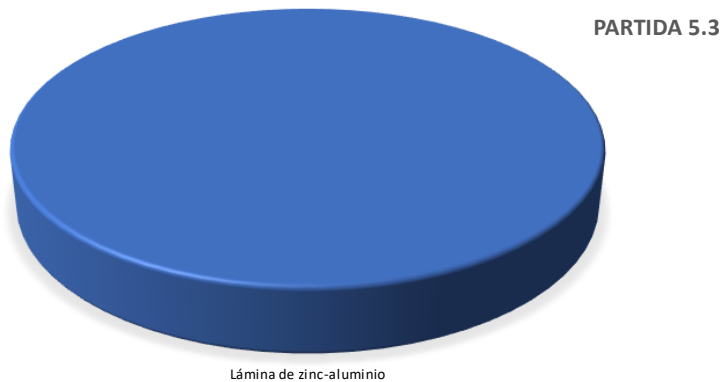
Partida 5.1 y 5.2: Polin C de 4" ch 14 con celosía de varilla de acero corrugado d=3/8 @ 60cm				ML	41.55
Material	Peso específico (kg/m²)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Polin C 4" ch 14	7850.00	154.93	2.15	333.10	91.54%
Varilla de polin de acero corrugado de 3/8"	7850.00	22.00	1.40	30.80	8.46%
TOTAL kg CO2e				363.89	100.00%



Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 16 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: CUBIERTA DE TECHO DE LAMINA GALVANIZADA

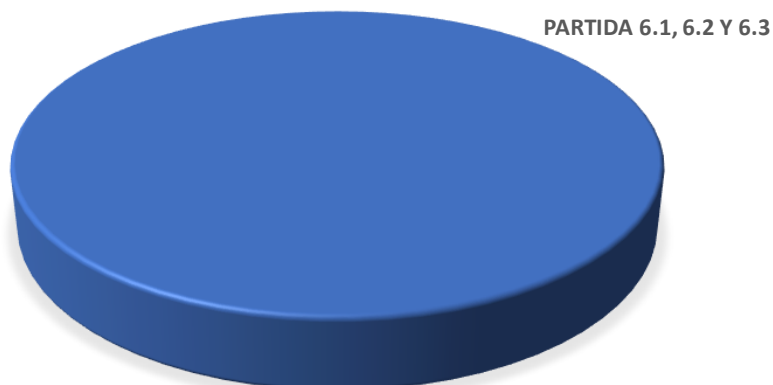
Partida 5.3: Cubierta de techo de lamina de acero con recubrimiento de alacion de aluminio cal 26, incluye capote de lamina de la misma alacion				M2	44.51
Material	Peso específico (kg/m²)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Lámina de zinc-aluminio	7200.00	129.47	2.60	336.62	100.00%
TOTAL kg CO2e				336.62	100.00%



Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 17 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PUERTAS Y VENTANAS DE LAMINA TROQUELADA

Partida 6.1, 6.2 y 6.3: Puertas y ventanas de lamina troquelada.				UNIDAD	2
Material	Peso especifico (kg/m²)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Lamina troquelada cal 26	7,850.00	48.19	2.50	120.48	100.00%
TOTAL kg CO2e				120.48	100.00%



Lamina troquelada cal 26

GRAFICO 10 Puerta de lamina troquelada 1x2 mts

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 18 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: DIVISION DE FIBROCEMENTO DE 8 MM.

Partida 9.1: Division de fibrocemento de 8 mm con estructura de tubo industrial de 2x1 ch 21 y tubo estructural de 2x1 ch 14				M2	20.09
Material	Peso especifico (kg/m²)	Cantidad Utilizada en Kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	Sub-Total kg CO2e	%
Lámina de fibrocemento 8 mm	1,250.00	200.90	0.45	90.41	52.84%
Tubo Industrial 2"x1" ch 14	7850	37.53	2.15	80.68	47.16%
TOTAL kg CO2e				171.09	100.00%

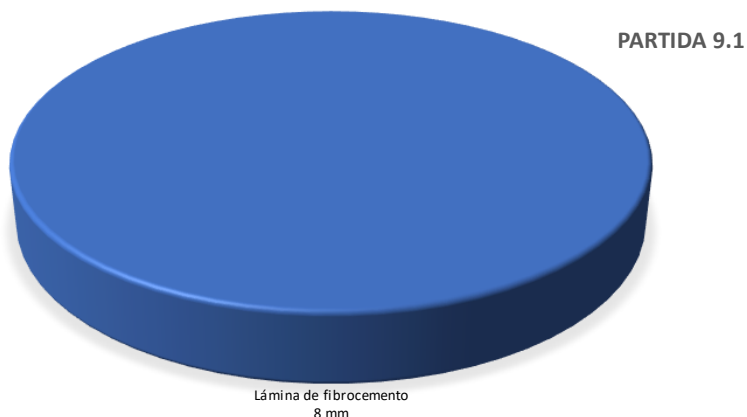


Lámina de fibrocemento 8 mm

GRAFICO 11 Division de fibrocemento de 8 mm con estructura de tubo industrial de 2x1 ch 21

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

3.1.4 *Análisis de emisión por material.*

Esta sección presenta el análisis detallado de la huella de carbono asociada a los materiales empleados en la construcción de la unidad funcional del proyecto Villas de San Pedro (Caso A). A partir de la sistematización de cantidades verificadas y la aplicación de factores de emisión obtenidos de la base ICE v3.0, se identifican los componentes constructivos con mayor peso en la carga ambiental del proyecto.

Para cada partida se estimó la cantidad de material en kg, sobre la cual se aplicó el factor de emisión correspondiente expresado en kilogramos de CO₂ equivalente por kilogramo de material (kg CO₂e/kg). Ver Tabla 5. Esta metodología permite descomponer el impacto ambiental por tipo de material y establecer comparaciones directas con los resultados obtenidos en el Caso A.

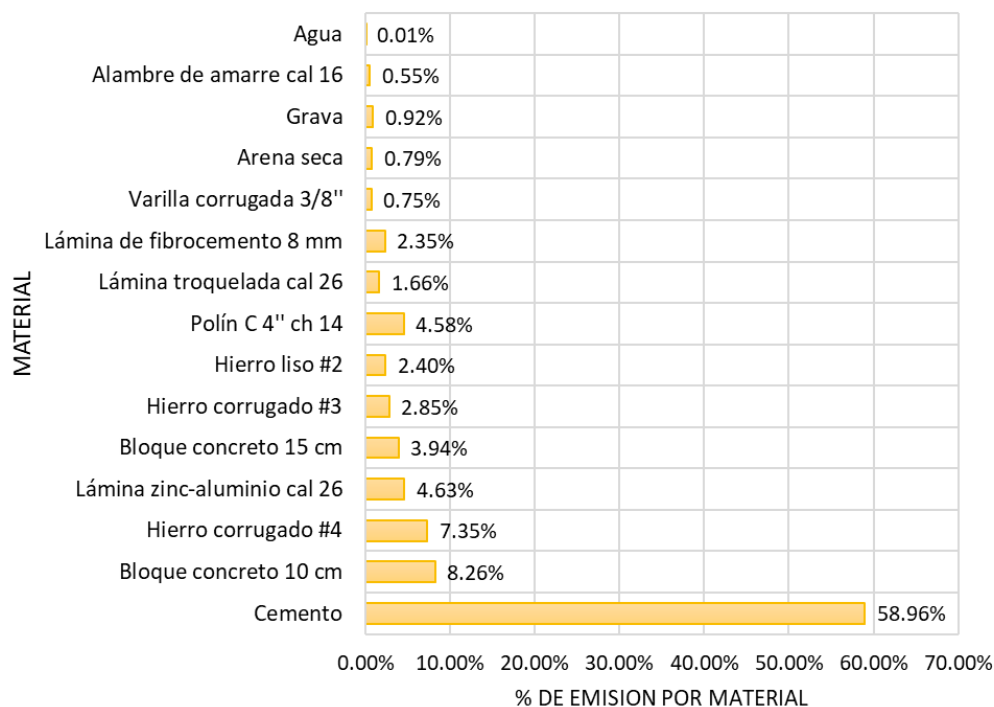
Los resultados reflejan que los materiales con mayor contribución a la huella de carbono en esta unidad funcional son el cemento, bloques de concreto, acero de refuerzo, lamina de cubierta y polín. Se observan también aportes relevantes provenientes del fibrocemento.

La tabla 19 y grafico 12 que se presenta a continuación muestra el resultado consolidado del análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por material, calculado con base en la sumatoria de los datos obtenidos en las fichas técnicas de cada partida constructiva. La información ha sido expresada en kilogramos de CO₂ equivalente (kgCO₂e), considerando los factores de emisión específicos aplicados a cada insumo. Además, se incluye el porcentaje relativo que representa cada material respecto al total de emisiones generadas en el proyecto, lo cual permite identificar aquellos con mayor impacto ambiental embebido.

TABLA 19 RESUMEN DE EMISIONES DE GEI POR MATERIAL EN PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A).

MATERIAL	kgCO2e	% Por material	% Agrupado
Cemento	4,289.07	58.96%	58.96%
Bloque concreto 10 cm	600.96	8.26%	12.21%
Bloque concreto 15 cm	286.95	3.94%	
Hierro corrugado #4	534.37	7.35%	13.89%
Hierro corrugado #3	207.00	2.85%	
Hierro liso #2	174.75	2.40%	
Varilla corrugada 3/8"	54.29	0.75%	
Alambre de amarre cal 16	40.10	0.55%	
Lámina zinc-aluminio cal 26	336.62	4.63%	4.63%
Polín C 4" ch 14	333.10	4.58%	4.58%
Lámina troquelada cal 26	120.48	1.66%	1.66%
Lámina de fibrocemento 8 mm	171.09	2.35%	2.35%
Arena seca	57.76	0.79%	1.72%
Grava	67.05	0.92%	
Agua	0.74	0.01%	0.01%
TOTAL	7,274.33	100.00%	100.00%

GRÁFICO 1 RESUMEN EMISIONES DE GEI POR MATERIAL EN PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A)



Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

3.1.5 Análisis de emisiones por partida para el proyecto Villas de San Pedro (Caso A).

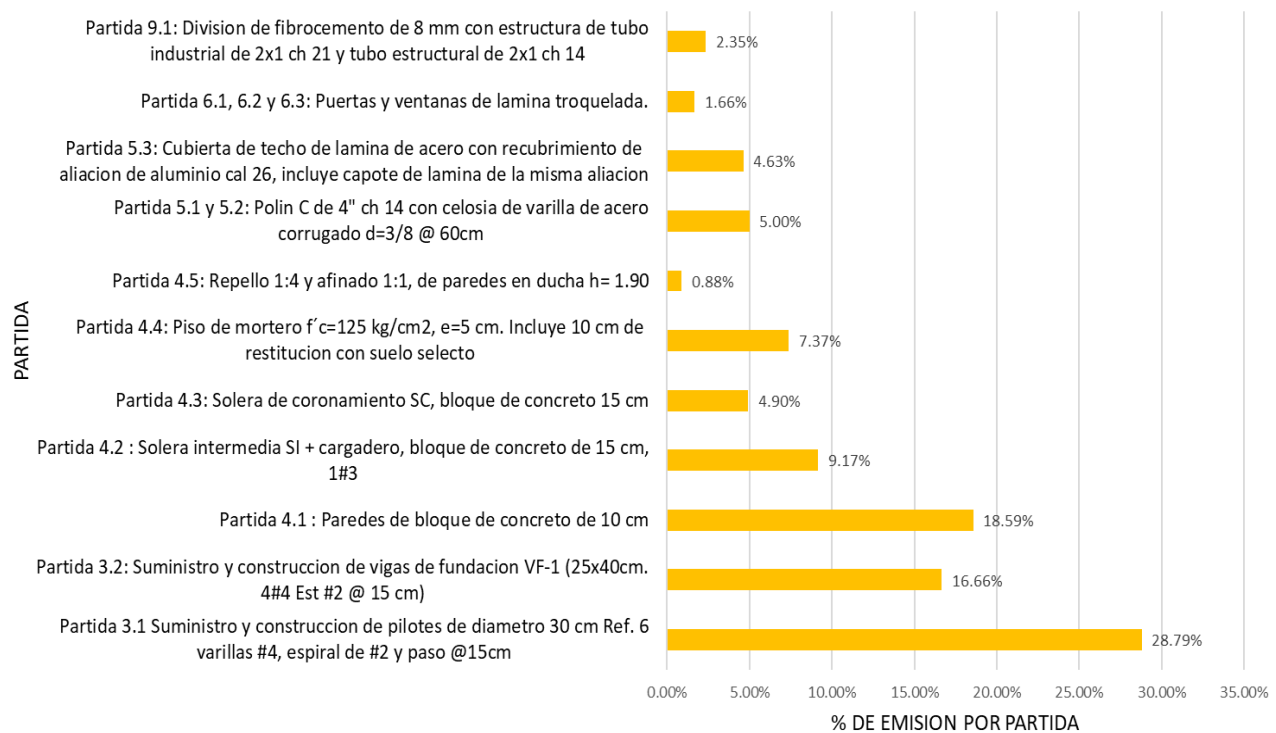
A continuación, se presentan los resultados preliminares consolidados en la Tabla 20 y grafico 13 donde se detalla la emisión estimada por partida constructiva.

La información ha sido expresada en kilogramos de CO₂ equivalente (kgCO₂e), considerando los factores de emisión específicos resultante para cada partida. Además, se incluye el porcentaje relativo que representa cada una respecto al total de emisiones generadas en el proyecto, lo cual permite identificar aquellos rubros con mayor impacto ambiental embebido.

TABLA 20 RESUMEN EMISIONES DE GEI POR PARTIDA EN PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A).

ITEM	PARTIDA	SUB-TOTAL kgCO ₂ e	% kg CO ₂ e	% Agrupado
3.1	Suministro y construccion de pilotes de diametro 30 cm Ref. 6 varillas #4, espiral de #2 y paso @15cm	2094.53	28.79%	86.36%
3.2	Suministro y construccion de vigas de fundacion VF-1 25x40cm, 4#4 est. #2 @ 15cm	1211.66	16.66%	
4.1	Paredes de bloque de concreto de 10 cm	1352.26	18.59%	
4.2	Solera intermedia SI + cargadero, bloque de concreto de 15 cm, 1#3	667.04	9.17%	
4.3	Solera de coronamiento SC, bloque de concreto 15 cm	356.59	4.90%	
4.4	Piso de mortero f'c=125 kg/cm ² , e=5 cm. Incluye 10 cm de restitution con suelo selecto	536.47	7.37%	
4.5	Repello 1:4 y afinado 1:1, de paredes en ducha h= 1.90	63.70	0.88%	
5.1	Polin C de 4" ch 14 con celosia de varilla de acero corrugado d=3/8 @ 60cm. Incluye Varilla de polin de acero corrugado de 3/8"	363.89	5.00%	5.00%
5.3	Cubierta de techo de laminade acero con recubrimiento de aleacion de aluminio cal 26, incluye capote de lamina de la misma aleacion	336.62	4.63%	4.63%
6.1, 6.2 y 6.3	Puerta de lamina troquelada 1x2 y 0.85x1.95 mts + Ventana de 1x1	120.48	1.66%	1.66%
9.1	Division de fibrocemento de 8 mm con estructura de tubo industrial de 2x1 ch 21 y tubo estructural de 2x1 ch 14	171.09	2.35%	2.35%
TOTAL		7,274.33	100.00%	100.00%

GRÁFICO 2 RESUMEN EMISIONES DE GEI POR PARTIDA EN PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A)



Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

3.1.6 Resultados preliminares de emisiones GEI para el Caso A.

Como resultado de la aplicación del modelo de análisis de ciclo de vida (ACV), bajo el enfoque cradle-to-site, se obtuvo una estimación consolidada de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para la unidad funcional correspondiente al proyecto Villas de San Pedro (Caso A).

El total estimado de emisiones de carbono incorporado ascendió a 7,274.33 kg CO₂e por vivienda, considerando exclusivamente los materiales utilizados y las partidas constructivas ejecutadas hasta la finalización de obra. Este valor fue obtenido mediante la conversión de

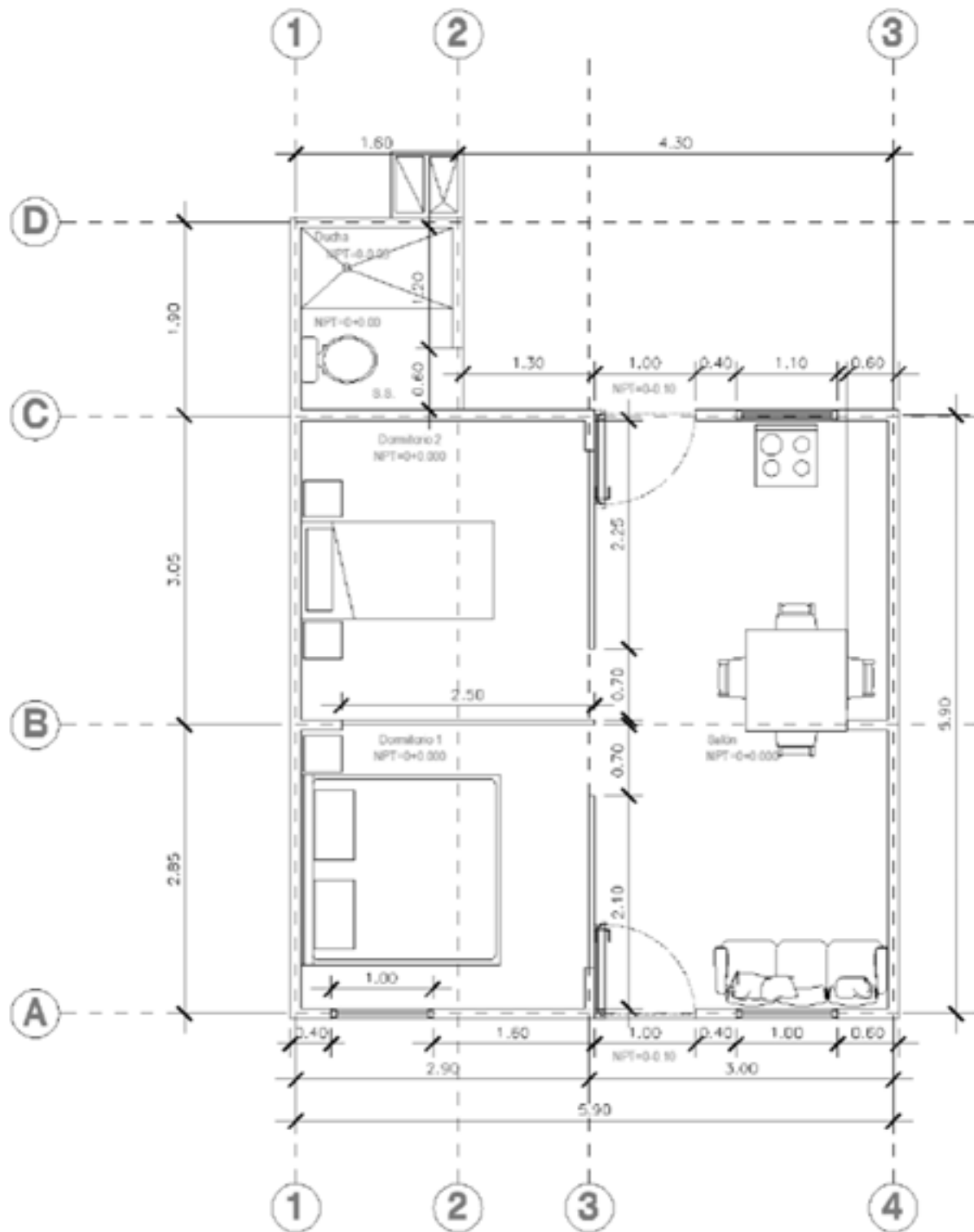
cantidades verificadas en campo a masa (kg) y la aplicación de factores de emisión documentados en la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011).

Las partidas con mayor contribución al total de emisiones fueron:

- Las obras de concreto estructural como Pilotes, vigas de fundación y soleras
- Pisos de concreto
- Mamposterías de bloque
- Elementos metálicos para la estructura y a cubierta de techo

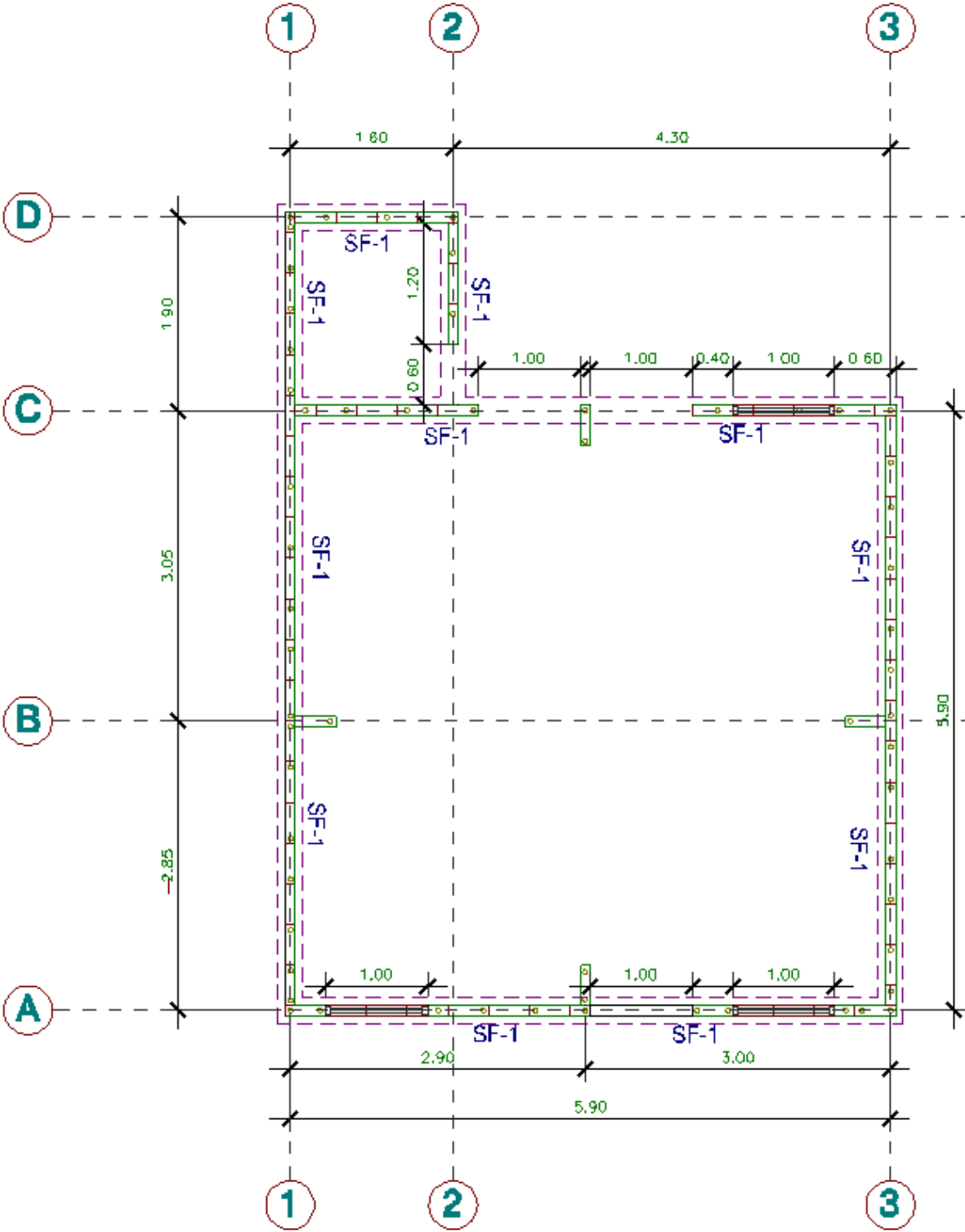
En conjunto, estos materiales concentran más del 95 % de las emisiones de CO₂e analizadas de la unidad funcional.

PLANO 1: PLANO ARQUITECTONICO (CASO A).



PLANTA ARQUITECTONICA

PLANO 2: PLANO ESTRUCTURAL (CASO A).



PLANTA ESTRUCTURAL

3.1.7 Alcances y Restricciones Técnicas del Análisis Aplicado en el Caso A.

A pesar de contar con documentación técnica detallada y haber realizado observación directa en el sitio del proyecto Villas de San Pedro, el presente análisis presenta algunas restricciones metodológicas que deben ser consideradas al interpretar los resultados obtenidos para este caso específico.

En primer lugar, el análisis se limitó a un enfoque cradle-to-site, excluyendo las fases de uso, mantenimiento y disposición final, debido a la falta de datos específicos sobre la operación prolongada de las viviendas y su comportamiento post-construcción. Esta delimitación implica que la huella de carbono presentada corresponde únicamente a la fase de construcción.

Asimismo, no se realizaron ensayos fisicoquímicos de laboratorio sobre los materiales empleados, por lo que se asumieron densidades y características técnicas estándar, basadas en bibliografía y documentos al alcance. Esto introduce un margen de incertidumbre que, aunque controlado, podría afectar la precisión absoluta del resultado.

Se aplicaron factores de emisión promedio extraídos de la base ICE v3.0, sin ajustar por marca comercial, procedencia geográfica o eficiencia energética de los procesos de producción, lo cual puede generar una variación respecto a los valores reales de los materiales utilizados en campo.

Tampoco se cuantificaron consumos energéticos indirectos de obra como iluminación, uso de herramientas eléctricas menores o transporte de personal, ya que estos valores no fueron confirmados durante las visitas de campo.

Estas restricciones no desmeritan la validez del análisis, pero sí deben ser tomadas en cuenta al momento de comparar con otras investigaciones o al extrapolar resultados a otros contextos constructivos. Los datos y procedimientos han sido documentados para garantizar la trazabilidad y replicabilidad del estudio, y constituyen una base sólida para futuras investigaciones.

3.1.8 Resultados técnicos y observaciones finales del Caso A.

La cuantificación de la huella de carbono para la unidad funcional ubicada en Villas de San Pedro permitió identificar los materiales con mayor aporte de emisiones, entre los cuales destacan el Cemento, el acero de refuerzo presente en elementos estructurales y los elementos para estructura y cubierta de techo. Estos materiales presentan factores de emisión altos, con un rango de 1,000 a 2,000 kg CO₂e/kg, lo que influye significativamente en el total de emisiones generadas por la construcción.

Las condiciones técnicas de esta vivienda, con estructura metálica en cubierta, muros de bloque de concreto y acabados convencionales, reflejan una solución constructiva de carácter rural, con menor grado de industrialización respecto al Caso B. Esto se traduce en una mayor participación de materiales sin control por parte de una supervisión estricta, los cuales incrementan la huella de carbono incorporada en la edificación.

El procedimiento aplicado, basado en cantidades verificadas en sitio y factores de emisión documentados, permite establecer con claridad las fuentes principales de emisiones por material. Estos hallazgos serán fundamentales para el análisis comparativo entre ambos casos, el cual se desarrolla en el capítulo siguiente.

PLAN DE OFERTA, PROYECTO VILLAS DE SAN PEDRO

Clave	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Obras Preliminares		
1.1	Trazo para construcción por unidad de área	M2	40.50
1.2	Descapote de 0.40 mt para construcción por unidad de área, incluye desalojo	M3	13.60
1.3	Restitución de 0.30 nt con suelo del lugar, incluye nivelación para construcción por unidad de área, incluye desalojo	M3	10.20
2	Excavaciones y compactaciones		
2.1	Excavación para fundaciones	M3	5.46
2.2	Compactación sobre fundaciones con material del lugar	M3	3.45
2.3	Desalojo de material sobrante	M3	2.61
3	Concreto Estructural		
3.1	Suministro y construcción de pilotes de diámetro 30 cm Ref. 6 varillas #4, espiral de #2 y paso @15cm	ML	44.00
3.2	Suministro y construcción de vigas de fundación VF-1	M3	2.01
4	Albañilería		
4.1	Paredes de bloque de concreto de 10 cm	M2	58.50
4.2	Solera intermedia SI + cargadero, bloque de concreto de 15 cm, 1#3	ML	54.20
4.3	Solera de coronamiento SC, bloque de concreto 15 cm	ML	30.00
4.4	Piso de mortero f'c=125 kg/cm ² , e=5 cm. Incluye 10 cm de restitución con suelo selecto	M2	36.32
4.5	Rpello 1:4 y afinado 1:1, de paredes en ducha h= 1.90	M2	6.08
5	Estructura metálica y cubierta de techo		
5.1	Polin C de 4" ch 14 con celosía de varilla de acero corrugado d=3/8 @ 60cm	ML	41.55
5.2	Varilla de polin de acero corrugado de 3/8"	ML	13.65
5.3	Cubierta de techo de laminado de acero con recubrimiento de aleación de aluminio cal 26, incluye capote de lámina de la misma aleación	M2	44.51
6	Puertas y ventanas		
6.1	Puerta de lámina troquelada 1x2 mts	U	2.00
6.2	Puerta de lámina troquelada 0.85x1.95mts	U	1.00
6.3	Ventana de lámina troquelada 1x1	U	4.00
7	Instalaciones Eléctricas		
7.1	Luminarias fluorescentes completa	U	5.00
7.2	Toma corrientes doble	U	4.00
7.3	Caja térmica completa, cuerpo terminal y conductor thhn No. 18	U	1.00
8	Instalaciones Hidráulicas		
8.1	Suministro e instalación de sistema de agua potable de 1/2" x 160 psi para ducha y pila (incluye trazo y excavación, compactación y artefactos para ducha)	S.G.	1.00
8.2	Suministro e instalación de tubería de 4" y caja con parrilla para A.L.L. (incluye trazo, excavación y compactación)	S.G.	1.00
8.3	Suministro e instalación de ducha	S.G.	1.00
9	Obras misceláneas y otros		
9.1	División de fibrocemento de 8 mm con estructura de tubo industrial de 2x1 ch 21 y tubo estructural de 2x1 ch 14	M2	20.09
	IMPORTE TOTAL DEL PRESUPUESTO		

Nota: Información Obtenida de Documentos Técnicos del Proyecto.

3.2 CASO DE ESTUDIO B: CIUDAD MARSELLA.

La segunda unidad funcional analizada corresponde a una vivienda ubicada en el proyecto residencial Ciudad Marsella, localizado en el municipio de San Juan Opico, departamento de La Libertad. Esta zona se caracteriza por un entorno periurbano en expansión, con mejor integración a servicios básicos, mayor densidad habitacional y cercanía a redes de transporte y actividad económica, en contraste con el caso A.

La vivienda evaluada cuenta con un área construida de 37 m², implantada en un lote de 77 m². Su distribución incluye sala-comedor, cocina y dos dormitorios, organizados en una planta compacta y funcional, orientada a la eficiencia espacial y a la optimización de materiales. Esta configuración se alinea con modelos promovidos por desarrolladores privados y cooperativas de vivienda con enfoque urbano o periurbano, sin financiamiento directo del Estado. Técnicamente, la unidad presenta un sistema constructivo tradicional con cimentación de concreto armado, muros portantes de bloque de concreto, estructura de techo metálica y cubierta de lámina galvanizada, con acabados básicos. Se evidencian mejoras en ejecución y condiciones urbanas, como accesos pavimentados, vialidad interna planificada y conexión directa a redes públicas. Este caso permite contrastar el impacto ambiental en función del entorno y organización urbana.

3.2.1 Metodología Aplicada (Caso B).

La metodología aplicada al caso Ciudad Marsella sigue los lineamientos técnicos establecidos para el análisis de ciclo de vida (ACV), según las normas ISO 14040 e ISO 14044 (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b), adoptando un alcance tipo cradle-to-site. Esto implica que se consideran las emisiones generadas desde la extracción de materias

primas hasta el momento en que la vivienda está completamente edificada y lista para su ocupación, tal como se puede apreciar en la figura 2 en la página 55 de este trabajo de investigación.

Los factores de emisión aplicados corresponden a la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011), la cual proporciona valores estandarizados por kilogramo de material, permitiendo el cálculo directo de las emisiones incorporadas. Esta metodología cuantitativa fue complementada con observación directa en el sitio de obra, revisión de planos, catálogos de partidas y entrevistas informales a personal técnico y operarios.

La recopilación de datos incluyó tanto insumos primarios (verificación in situ y mediciones) como secundarios (documentación técnica proporcionada por el desarrollador del proyecto). Los datos fueron sistematizados en hojas de cálculo, donde se integraron cantidades, factores de emisión y fórmulas de cálculo, lo que permite una trazabilidad completa del procedimiento.

Esta metodología garantiza la replicabilidad del estudio y posibilita la comparación directa de los resultados obtenidos con los del Caso A, en función del contexto, materiales y prácticas constructivas específicas.

3.2.2 Instrumentos y Recolección de Datos (Caso B).

La recolección de datos para la estimación de huella de carbono en la unidad funcional del proyecto Ciudad Marsella fue realizada durante una visita técnica de campo efectuada el día 14 de septiembre de 2024 por el equipo conformado por los Ismael Álvarez Guardado y José Humberto Hernández. El levantamiento se llevó a cabo con el fin de verificar físicamente las dimensiones,

materiales constructivos y características técnicas de la vivienda tipo. Para sistematizar esta información, se diseñaron e implementaron los siguientes instrumentos:

a) Ficha de levantamiento técnico por unidad funcional.

Este formato permitió documentar de manera estructurada los aspectos clave observables en campo. La ficha incluye:

- Información general del proyecto (ubicación, responsable del levantamiento, fecha de visita)
- Croquis o descripción funcional de espacios (distribución básica de la vivienda)
- Datos técnicos verificados por elemento constructivo, como:
 - Muros (dimensiones y tipo de bloque)
 - Cubierta (tipo de estructura y pendiente)
 - Pisos, puertas y ventanas (dimensiones y materiales)

1. Información General

Proyecto: Ciudad Marsella

Ubicación: San Juan Opico, La Libertad

Unidad funcional evaluada: Vivienda tipo de interés social

Fecha de visita: 14 de septiembre de 2024

Responsable del levantamiento: Ismael Álvarez/Humberto Hernandez

2. Croquis Esquemático o Distribución Espacial

Describe aquí la distribución básica de la vivienda (puede incluirse un croquis a mano si se imprime):

- ✓ Sala y comedor integrados
- ✓ 2 habitaciones
- ✓ 1 baño completo
- ✓ Cocina
- ✓ Área de lavandería
- ✓ Patio
- ✓ Cochera

3. Datos Técnicos Verificados

Elemento Constructivo	Dimensiones/Características	Material Observado
Muros perimetrales	Altura 2.60 m, espesor 15 cm	Bloque de concreto
Cubierta	Pendiente 2 aguas, altura cumbrera 3.40 m	Lámina metálica sobre estructura canal C
Piso	Ceramico	
Puertas	0.90 x 2.10 m (principal)	Metálica hueca
Ventanas	1.20 x 1.00 m promedio	Aluminio con vidrio claro

4. Observaciones Adicionales

- Se observó coincidencia general entre planos y ejecución física.
- No se identificaron sustituciones de materiales.
- La cimentación no fue visible durante la visita.

- b) Observaciones adicionales sobre coincidencia entre planos y ejecución, sustituciones de materiales y limitaciones de visibilidad (por ejemplo, cimentación no visible).

Esta ficha fue llenada manualmente en campo y posteriormente digitalizada para su archivo técnico. Constituye una evidencia directa del estado constructivo de la vivienda y del uso real de los materiales.

- c) Formato de levantamiento de cantidades de obra

Diseñado para registrar las partidas constructivas clave observadas durante la visita, este instrumento incluye:

- Código y descripción de partida
- Unidad de medida
- Cantidad estimada observada en sitio

Las cantidades fueron verificadas mediante mediciones con cinta, estimación de superficie y contraste con los planos de obra y catálogo de partidas del proyecto. Las partidas incluidas corresponden a elementos relevantes para el análisis de emisiones, tales como muros de bloque, repellos, cubierta metálica, piso cerámico, puertas y ventanas.

Formato de Levantamiento de Cantidades de Obra

Este formato está diseñado para el registro de cantidades de obra durante el levantamiento de una unidad funcional. Cada partida debe ser registrada con los siguientes detalles para asegurar un control adecuado de las cantidades ejecutadas y los materiales utilizados en el proyecto.

Fecha: Marzo/2025

Código de Partida	Descripción de la Partida	Unidad de Medida	Cantidad
	Muro de bloque 15 cm. h=2.40	M2	93.60
	Cubierta de lámina de zinc-alum	M2	77.00
	Polín Z para estructura de techo	ML	39
	Repello y afinado interior y exterior	M2	187.20
	Piso cerámico	M2	77.00
	Puertas metálicas	U	2
	Ventanas metálicas	U	4

Notas:

1. Incluiremos las partidas de interés según plan de oferta proporcionado.
2. Compararemos las medidas reales vrs. las cantidades de obra
3. La información de los elementos que no se pueden observar serán obtenidos de planos

d) Validación de datos en caso de discrepancias

En los casos en que se identificaron diferencias entre lo ejecutado en campo y lo indicado en planos o catálogos (por ejemplo, variaciones en dimensiones menores o tipos de acabados), se aplicó el siguiente procedimiento:

- Prioridad a la observación directa siempre que los elementos estuvieran accesibles y visibles.
- Consulta cruzada con documentos técnicos: en caso de duda, se revisó el catálogo de partidas proporcionado por el desarrollador y los planos arquitectónicos/estructurales.

- Registro de las limitaciones o inconsistencias en el apartado de “Observaciones adicionales” del instrumento correspondiente.
- Fotografías de visita al sitio



- Revisión de planos arquitectónicos, estructurales y de instalaciones, así como catálogos de partidas de obra, proporcionados por la entidad desarrolladora del proyecto

CATALOGO DE PARTIDAS VIVIENDA CIUDAD MARSELLA, SAN JUAN OPICO		
Actividad	Unidad	Cantidad Estimada
Obras Preliminares		
Trazo para construcción por unidad de área	m2	77.00
Descapote de 0.40 m, incluye desalojo	m3	23.10
Relleno con suelo cemento al 5%, incluye nivelación	m3	11.55
Excavaciones y compactaciones		
Excavación para fundaciones	m3	7.70
Compactación sobre fundaciones	m3	7.70
Concreto estructural		
Firme de concreto (espesor 10 cm)	m3	7.70
Albañilería		
Muros de bloque (altura 2.4 m)	m2	93.60
Repello y afinado interior y exterior	m2	187.20
Piso cerámico	m2	77.00
Estructura metálica y cubierta		
Cubierta de lámina zinc-alum	m2	77.00
Polín Z para estructura de techo	ml	39.00
Puertas y ventanas		
Puertas metálicas	U	2.00
Ventanas metálicas	U	4.00
Acabados		
Pintura en muros interiores y exteriores	m2	187.20
Instalaciones eléctricas		
Luminarias fluorescentes completas	U	5.00
Tomacorrientes dobles	U	4.00
Caja térmica, conductor THHN #18	U	1.00
Instalaciones hidráulicas		
Sistema de agua potable (1/2")	S.G.	1.00
Tubería de 4" para aguas lluvias	S.G.	1.00
Instalación de ducha	S.G.	1.00

Nota: Información proveniente del desarrollador del proyecto

Además, se tuvo acceso a documentos institucionales del desarrollador privado del proyecto, lo que facilitó la validación cruzada de los datos obtenidos.

3.2.3 *Sistematización de datos técnicos y análisis de emisiones (Caso B).*

Las cantidades de materiales por partida constructiva fueron verificadas en sitio mediante observación directa y contrastadas con los datos contenidos en el catálogo oficial del proyecto, permitiendo establecer una base técnica confiable para la aplicación de los factores de emisión.

Toda la información recolectada fue organizada y sistematizada para su posterior análisis mediante el modelo de ACV, manteniendo criterios de trazabilidad y replicabilidad.

La tabla 21 presentada a continuación constituye un resumen sistematizado del consumo total de materiales por cada partida constructiva correspondiente al caso de estudio “Ciudad Marsella”. Este instrumento fue elaborado con base en la verificación de datos didácticos y el contraste con el catálogo oficial de cantidades del proyecto, con el fin de establecer una base técnica confiable para el análisis ambiental.

Cada fila representa una partida constructiva específica (como fundaciones, estructura de muros, cubierta, acabados, entre otros), detallando el peso total (en kilogramos) de los materiales empleados en su ejecución. Las columnas agrupan los insumos más relevantes según su impacto constructivo y ambiental: agua, cemento, hierro, alambre, bloques de concreto, arena, grava, polín, lámina zinc-aluminio, adhesivo para piso y cerámica.

El peso de los materiales ha sido expresado en unidades homogéneas (kg) para facilitar su uso en cálculos posteriores, tales como la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante factores de emisión

TABLA 21 PESOS DE MATERIALES CASO B (CIUDAD MARSELLA)

PARTIDA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	MATERIALES											TOTAL PESO POR PARTIDA (kg)
				AGUA	CEMENTO	HIERRO	ALAMBR E CAL 16	BLOQUE 10/15 CM	ARENA	GRAVA	POLIN	LAMINA ZINC ALUMINIO CAL 26	ADHESIVO PARA PISO	CERAMIC A DE PISO 32X32	
3.1	Firme de concreto (espesor 10 cm)	m3	7.70	1663.20 kg	2748.90 kg				5790.40 kg	9293.90 kg					19,496.40
3.2	Solera de fundación (viga de amarre)	ml	39.00	505.44 kg	835.38 kg	156.30 kg	4.68 kg		1759.68 kg	2824.38 kg					6,085.86
3.3	Solera intermedia	ml	54.00	86.40 kg	114.75 kg	83.89 kg	2.52 kg	1165.05 kg	691.20 kg	440.64 kg					2,584.45
3.4	Solera de coronamiento	ml	39.00	62.40 kg	82.88 kg	84.04 kg	2.52 kg	1107.60 kg	499.20 kg	318.24 kg					2,156.87
3.5	Cargaderos sobre vanos	ml	6.00	62.40 kg	82.88 kg	9.32 kg	0.30 kg	170.40 kg	499.20 kg	318.24 kg					1,142.74
3.6	Nervios (esquinas y refuerzo)	ml	6.00	32.40 kg	53.55 kg	8.55 kg	0.26 kg		112.80 kg	181.05 kg					388.61
4.1	Muros de bloque 10cm (altura 2.4 m)	m2	93.60	748.80 kg	994.50 kg	176.21 kg	5.31 kg	10097.10 kg	5541.12 kg	5569.20 kg					23,132.24
4.2	Repello 2 cm y afinado interior y exterior	m2	187.20	2244.00 kg	5213.56 kg				11190.08 kg						18,647.64
4.3	Piso cerámico 32x32 cm	m2	77.00	4331.25 kg									4781.70 kg	1940.40 kg	11,053.35
5.1	Cubierta de lámina zinc-alum cal. 26	m2	77.00									223.98 kg			223.98
5.2	Polín Z para estructura de techo	ml	39.00								145.42 kg				145.42
	TOTAL PESO POR MATERIAL			9736.29 kg	10126.39 kg	518.31 kg	15.59 kg	12540.15 kg	26083.68 kg	18945.65 kg	145.42 kg	223.98 kg	4781.70 kg	1940.40 kg	85,057.56

Nota: Tabla de elaboracion propia.

Las siguientes fichas de explosión de insumos permiten organizar de manera clara y sistemática los materiales requeridos en cada partida constructiva correspondiente al caso de estudio (Ciudad Marsella). A través de ellas se detallan cantidades, unidades de medida, pesos y proporciones relativas, lo que facilita el control técnico y la comparación entre actividades.

EXPLOSION DE INSUMOS

3.1
PARTIDA: **Firme de concreto (espesor 10 cm)**
CANTIDAD: 7.70
UNIDAD: m³

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	64.68	2,748.90	14.10%
2	Arena seca	m ³	3.62	5,790.40	29.70%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m ³	5.47	9,293.90	47.67%
4	Agua	lt	1,663.20	1,663.20	8.53%
			TOTAL (kg)	19,496.40	100.00%

3.2
PARTIDA: **Solera de fundación (viga de amarre)**
CANTIDAD: 39.00 =2.34
UNIDAD: ml m³

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	19.66	835.38	13.73%
2	Arena seca	m ³	1.10	1,759.68	28.91%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m ³	1.66	2,824.38	46.41%
4	Agua	lt	505.44	505.44	8.31%
5	Hierro corrugado #3	mt	179.40	100.46	1.65%
6	Hierro liso #2	mt	224.25	55.84	0.92%
7	Alambre de amarre	kg	4.68	4.68	0.08%
			TOTAL (kg)	6,085.86	100.00%

PARTIDA: **3.3**
Solera intermedia
CANTIDAD: 54.00 =10.80
UNIDAD: ml m2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	2.70	114.75	4.44%
2	Arena seca	m3	0.43	691.20	26.74%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m3	0.26	440.64	17.05%
4	Agua	lt	86.40	86.40	3.34%
5	Hierro corrugado #3	mt	124.20	69.55	2.69%
6	Hierro liso #2	mt	57.60	14.34	0.55%
7	Alambre de amarre	kg	2.52	2.52	0.10%
8	Bloque 10 cm (8.63kg)	unidad	135.00	1,165.05	45.08%
			TOTAL (kg)	2,584.45	100.00%

PARTIDA: **3.4**
Solera de coronamiento
CANTIDAD: 39.00 =7.80
UNIDAD: ml m2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	1.95	82.88	3.84%
2	Arena seca	m3	0.31	499.20	23.14%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m3	0.19	318.24	14.75%
4	Agua	lt	62.40	62.40	2.89%
5	Hierro corrugado #4	mt	44.85	44.58	2.07%
6	Hierro corrugado #3	mt	44.85	25.12	1.16%
7	Hierro liso #2	mt	57.60	14.34	0.66%
8	Alambre de amarre	kg	2.52	2.52	0.12%
9	Bloque 15 cm (11.36kg)	unidad	97.50	1,107.60	51.35%
			TOTAL (kg)	2,156.87	100.00%

PARTIDA: **3.5**
Cargaderos sobre vanos
CANTIDAD: 6.00 =1.20
UNIDAD: ml m2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	1.95	82.88	7.25%
2	Arena seca	m3	0.31	499.20	43.68%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m3	0.19	318.24	27.85%
4	Agua	lt	62.40	62.40	5.46%
5	Hierro corrugado #3	mt	13.80	7.73	0.68%
6	Hierro liso #2	mt	6.40	1.59	0.14%
7	Alambre de amarre	kg	0.30	0.30	0.03%
8	Bloque 15 cm (11.36kg)	unidad	15.00	170.40	14.91%
			TOTAL (kg)	1,142.74	100.00%

PARTIDA: **3.6**
Nervios (esquinas y refuerzo)

CANTIDAD: 6.00 =0.15

UNIDAD: ml m3

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	1.26	53.55	13.78%
2	Arena seca	m3	0.07	112.80	29.03%
3	Grava 3/4" o 3/8"	m3	0.11	181.05	46.59%
4	Agua	lt	32.40	32.40	8.34%
5	Hierro corrugado #3	mt	13.80	7.73	1.99%
6	Hierro liso #2	mt	3.30	0.82	0.21%
7	Alambre de amarre	kg	0.26	0.26	0.07%
			TOTAL (kg)	388.61	100.00%

PARTIDA: **4.1**
Muros de bloque 10cm (altura 2.4 m)

CANTIDAD: 93.60

UNIDAD: m2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Bloque 10 cm (8.63kg)	unidad	1170.00	10,097.10	43.65%
2	Cemento gris (42.5 kg)	bls	23.40	994.50	4.30%
3	Arena seca	m3	3.46	5,541.12	23.95%
4	Grava 3/4" o 3/8"	m3	3.28	5,569.20	24.08%
5	Agua	lt	748.80	748.80	3.24%
6	Hierro corrugado #3	mt	195.00	109.20	0.47%
7	Hierro liso #2	mt	269.10	67.01	0.29%
8	Alambre de amarre	kg	5.31	5.31	0.02%
			TOTAL (kg)	23,132.24	100.00%

PARTIDA: **4.2**
Repello 2 cm y afinado interior y exterior

CANTIDAD: 187.20 =3.74

UNIDAD: m2 m3

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Cemento gris (42.5 kg)	bls	122.67	5,213.56	27.96%
2	Arena seca	m3	6.99	11,190.08	60.01%
3	Agua	lt	2244.00	2,244.00	12.03%
			TOTAL (kg)	18,647.64	100.00%

PARTIDA: **4.3**
Piso cerámico 32x32 cm
 CANTIDAD: 77.00
 UNIDAD: m2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Piso ceramico 32 x 32 cm	unidad	902.34	1,940.40	17.55%
2	Adhesivo estándar Cemix 20kg	bls	239.09	4,781.70	43.26%
3	Agua	lt	4331.25	4,331.25	39.18%
TOTAL (kg)				11,053.35	100.00%

PARTIDA: **5.1**
Cubierta de lámina zinc-alum cal. 26
 CANTIDAD: 77.00
 UNIDAD: m2

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Lamina de Zinc Aluminio cal. 26 (0.404 mm)	m2	77.00	223.98	100.00%
TOTAL (kg)				223.98	100.00%

PARTIDA: **5.2**
Polín Z para estructura de techo
 CANTIDAD: 39.00
 UNIDAD: ml

ITEM	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PESO (Kg)	%
1	Polín Z para estructura de techo	ml	39.00	145.42	100.00%
TOTAL (kg)				145.42	100.00%

Al igual que en el caso A, (valores de los factores de emisión) en el caso B, se tomará de la tabla 5 en la página 60 de este trabajo de investigación

Las tablas y gráficos siguientes muestran la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a una partida constructiva, integrando las cantidades de materiales utilizadas con sus respectivos factores de emisión. Este tipo de representación permite identificar la contribución relativa de cada insumo en el total de emisiones, facilitando el análisis comparativo y la comprensión visual del impacto ambiental generado en cada actividad del proyecto.

TABLA 22 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: FIRME DE CONCRETO, ESPESOR 10 CMS

Firme de concreto (espesor 10 cm)				m3	7.70
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/ material	%
Cemento (bls 42.5 kg)	1100	2748.90	0.930	2556.48	97.12%
Arena seca	1600	5790.40	0.005	28.95	1.10%
Grava (3/4 o 3/8 plg)	1700	9293.90	0.005	46.47	1.77%
Agua	1000	1663.20	0.0003	0.50	0.02%
TOTAL kg CO2e				2,632.40	100.00%

PARTIDA 2.1

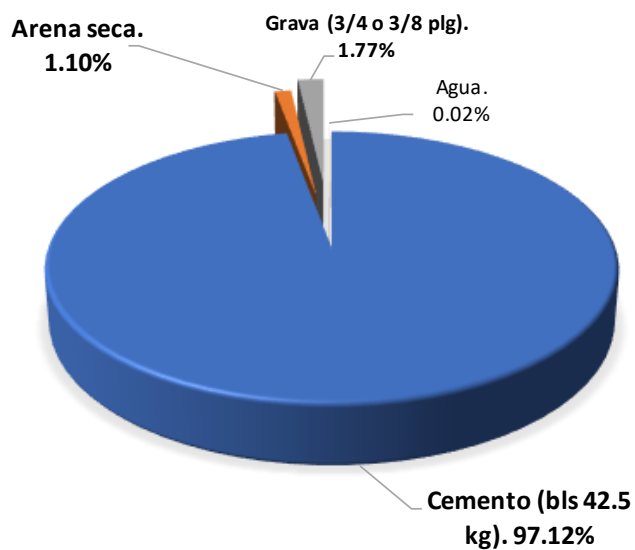


GRAFICO 1: Firme de concreto (espesor 10 cm)

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 23 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA DE FUNDACIÓN (VIGA DE AMARRE)

Solera de fundación (viga de amarre)				ml	39.00
				m3	2.34
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Cemento gris (42.5 kg)	1100	835.38	0.930	776.90	75.53%
Arena seca	1600	1759.68	0.005	8.80	0.86%
Grava 3/4" o 3/8"	1700	2824.38	0.005	14.12	1.37%
Agua	1000	505.44	0.0003	0.15	0.01%
Hierro corrugado #3	7850	100.46	1.4	140.65	13.67%
Hierro liso #2	7850	55.84	1.4	78.17	7.60%
Alambre de amarre	7850	4.68	2.1	9.83	0.96%
TOTAL kg CO2e				1,028.63	77.77%

PARTIDA 3.2

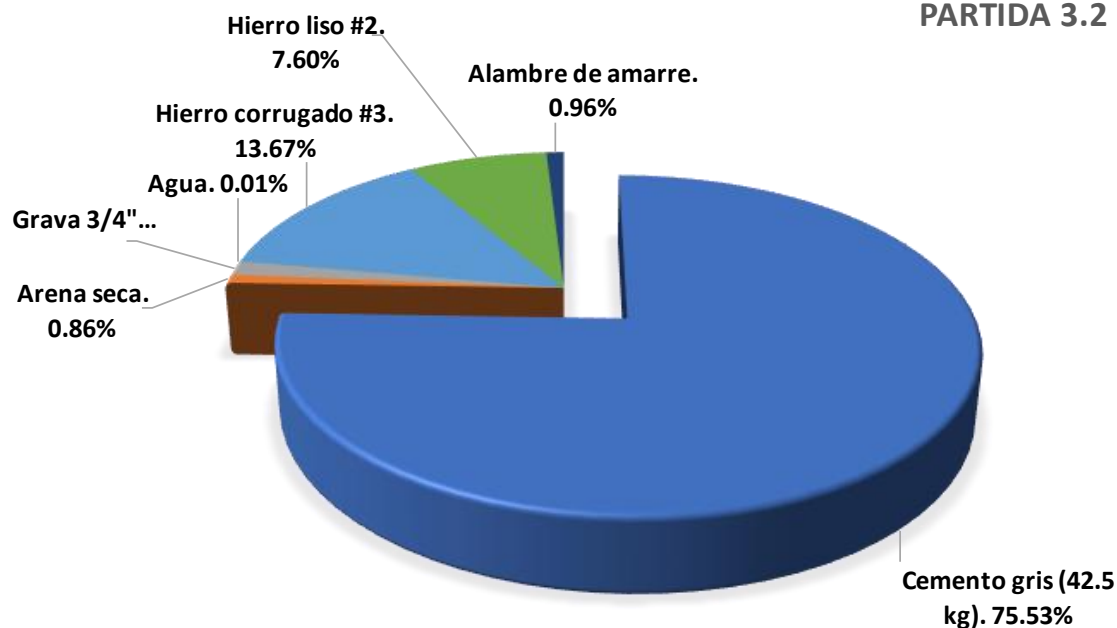


GRAFICO 2: Solera de fundación (viga de amarre)

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 24. ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA INTERMEDIA

Solera intermedia				ml	54.00
				m2	10.80
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Cemento gris (42.5 kg)	1100	114.75	0.930	106.72	28.46%
Arena seca	1600	691.20	0.005	3.46	0.92%
Grava 3/4" o 3/8"	1700	440.64	0.005	2.20	0.59%
Agua	1000	86.40	0.0003	0.03	0.01%
Hierro corrugado #3	7850	69.55	1.4	97.37	25.97%
Hierro liso #2	7850	14.34	1.4	20.08	5.36%
Alambre de amarre	7850	2.52	2.1	5.29	1.41%
Bloque 10 cm (8.63kg)	1900	1165.05	0.12	139.81	37.29%
TOTAL kg CO2e				374.95	100.00%

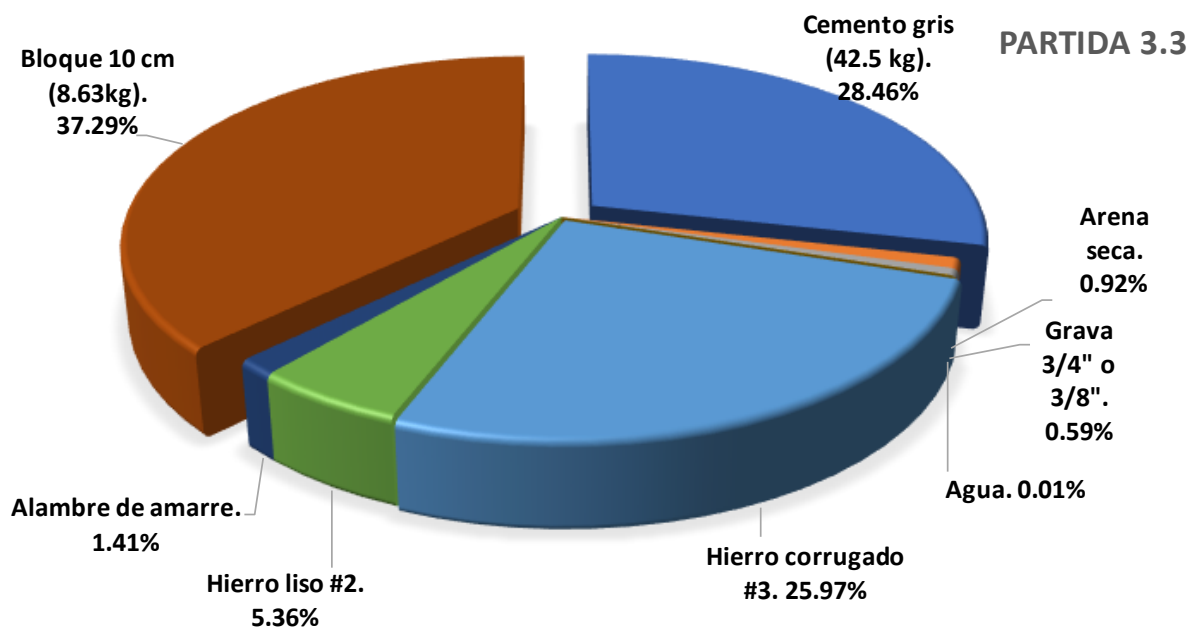


GRAFICO 3: Solera intermedia

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 25. ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: SOLERA DE CORONAMIENTO.

Solera de coronamiento				ml	39.00
				m2	7.80
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Cemento gris (42.5 kg)	1100	82.88	0.930	77.07	22.87%
Arena seca	1600	499.20	0.005	2.50	0.74%
Grava 3/4" o 3/8"	1700	318.24	0.005	1.59	0.47%
Agua	1000	62.40	0.0003	0.02	0.01%
Hierro corrugado #4	7850	44.58	1.4	62.41	18.52%
Hierro corrugado #3	7850	25.12	1.4	35.16	10.43%
Hierro liso #2	7850	14.34	1.4	20.08	5.96%
Alambre de amarre	7850	2.52	2.1	5.29	1.57%
Bloque 15 cm (11.36kg)	1900	1107.60	0.12	132.91	39.44%
TOTAL kg CO2e				337.04	100.00%

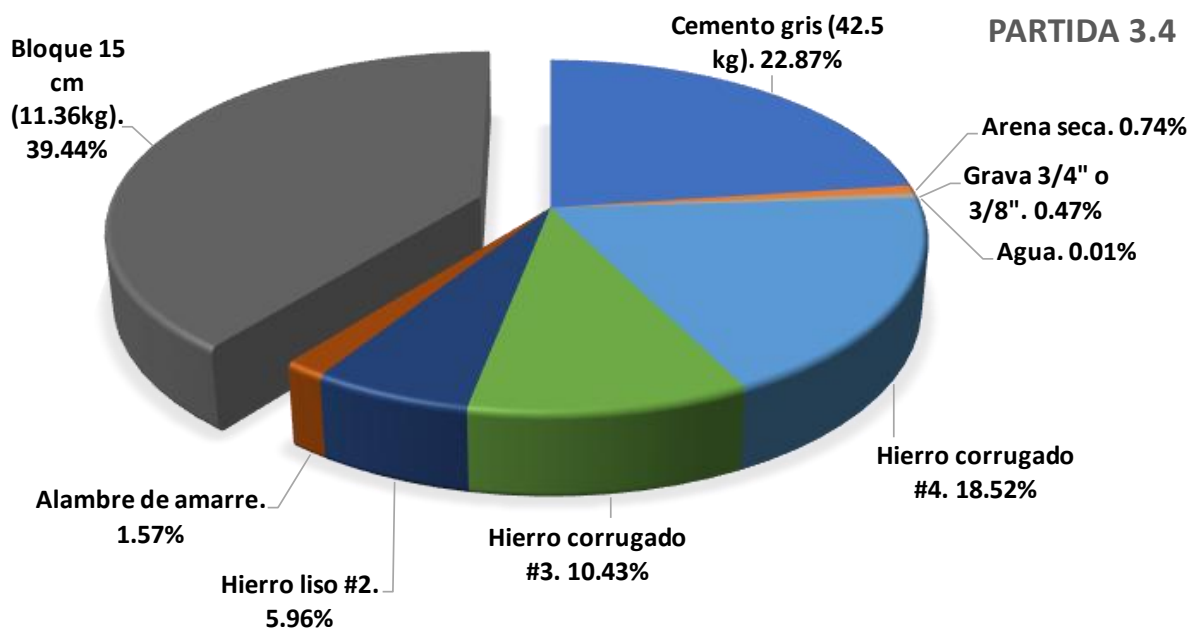


GRAFICO 4 : Solera de coronamiento

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 26 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: CARGADEROS SOBRE VANOS.

Cargaderos sobre vanos				ml	6.00
				m2	1.20
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Cemento gris (42.5 kg)	1100	82.88	0.930	77.07	66.84%
Arena seca	1600	499.20	0.005	2.50	2.16%
Grava 3/4" o 3/8"	1700	318.24	0.005	1.59	1.38%
Agua	1000	62.40	0.0003	0.02	0.02%
Hierro corrugado #3	7850	7.73	1.4	10.82	9.38%
Hierro liso #2	7850	1.59	1.4	2.23	1.93%
Alambre de amarre	7850	0.30	2.1	0.63	0.55%
Bloque 15 cm (11.36kg)	1900	170.40	0.12	20.45	17.73%
TOTAL kg CO2e				115.31	100.00%

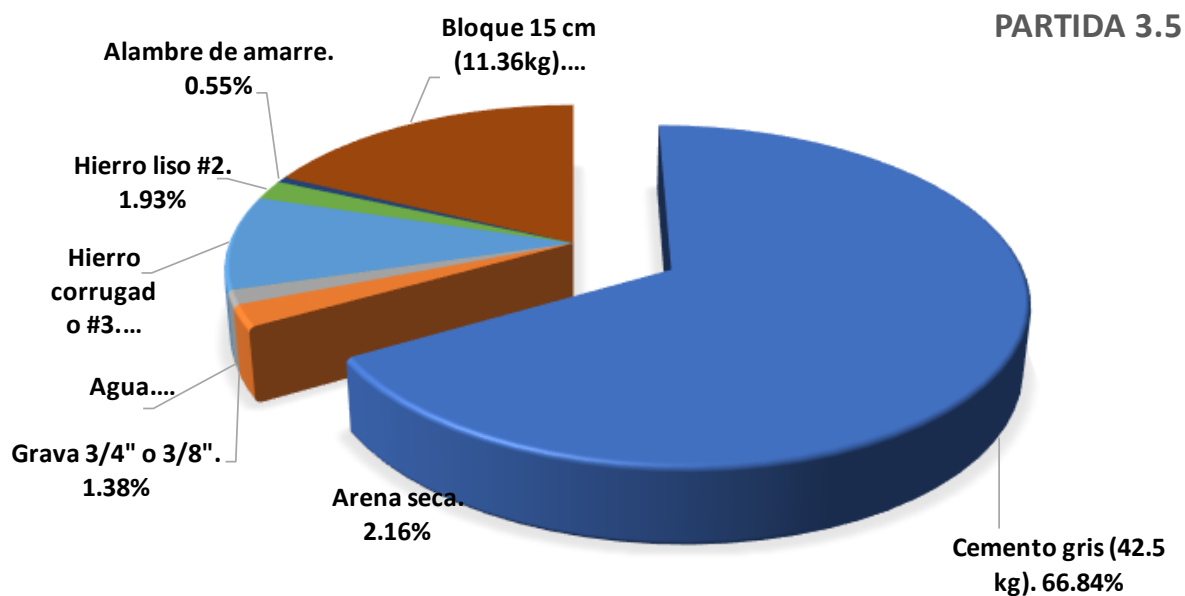


GRAFICO 5 : Cargaderos sobre vanos

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 27 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: NERVIOS (ESQUINAS Y REFUERZOS)

Nervios (esquinas y refuerzo)				ml	6.00
				m3	0.15
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Cemento gris (42.5 kg)	1100	53.55	0.930	49.80	78.06%
Arena seca	1600	112.80	0.005	0.56	0.88%
Grava 3/4" o 3/8"	1700	181.05	0.005	0.91	1.42%
Agua	1000	32.40	0.0003	0.0097	0.015%
Hierro corrugado #3	7850	7.73	1.4	10.82	16.96%
Hierro liso #2	7850	0.82	1.4	1.15	1.80%
Alambre de amarre	7850	0.26	2.1	0.55	0.86%
TOTAL kg CO2e				63.80	100.00%

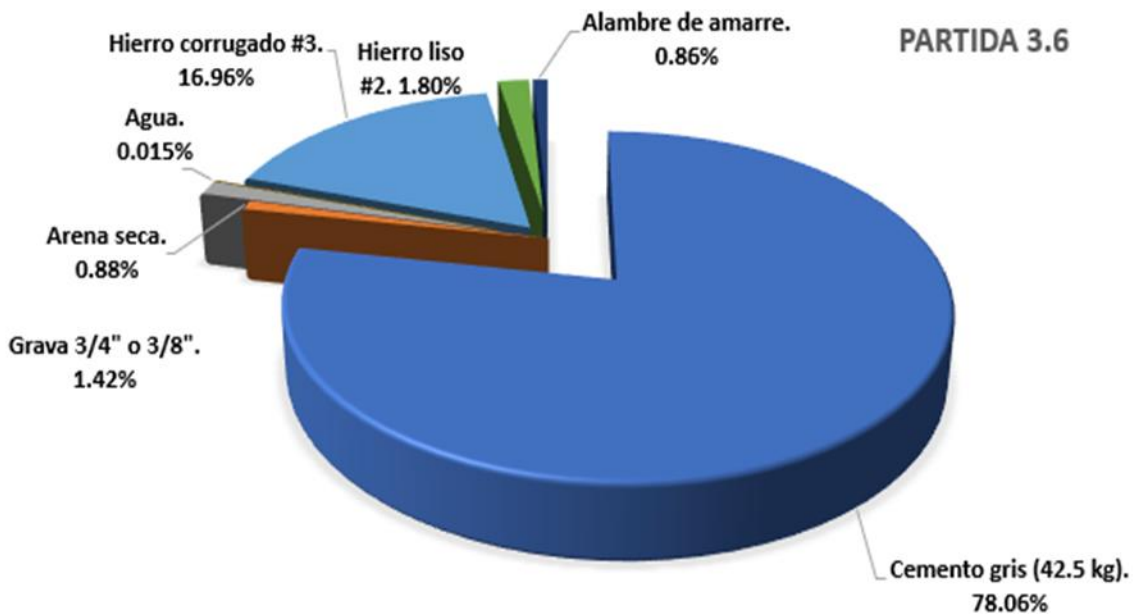


GRAFICO 6 : Esquinas y refuerzos

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 28 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: MUROS DE BLOQUE 10 CM (ALTURA 2.40 MT)

Muros de bloque 10cm (altura 2.4 m)				m2	93.60
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Bloque 10 cm (8.63kg)	1900	10097.10	0.12	1211.65	49.45%
Cemento gris (42.5 kg)	1100	994.50	0.93	924.89	37.75%
Arena seca	1600	5541.12	0.005	27.71	1.13%
Grava 3/4" o 3/8"	1700	5569.20	0.005	27.85	1.14%
Agua	1000	748.80	0.0003	0.22	0.01%
Hierro corrugado #3	7850	109.20	1.40	152.88	6.24%
Hierro liso #2	7850	67.01	1.40	93.81	3.83%
Alambre de amarre	7850	5.31	2.10	11.15	0.46%
TOTAL kg CO2e				2450.15	100.00%

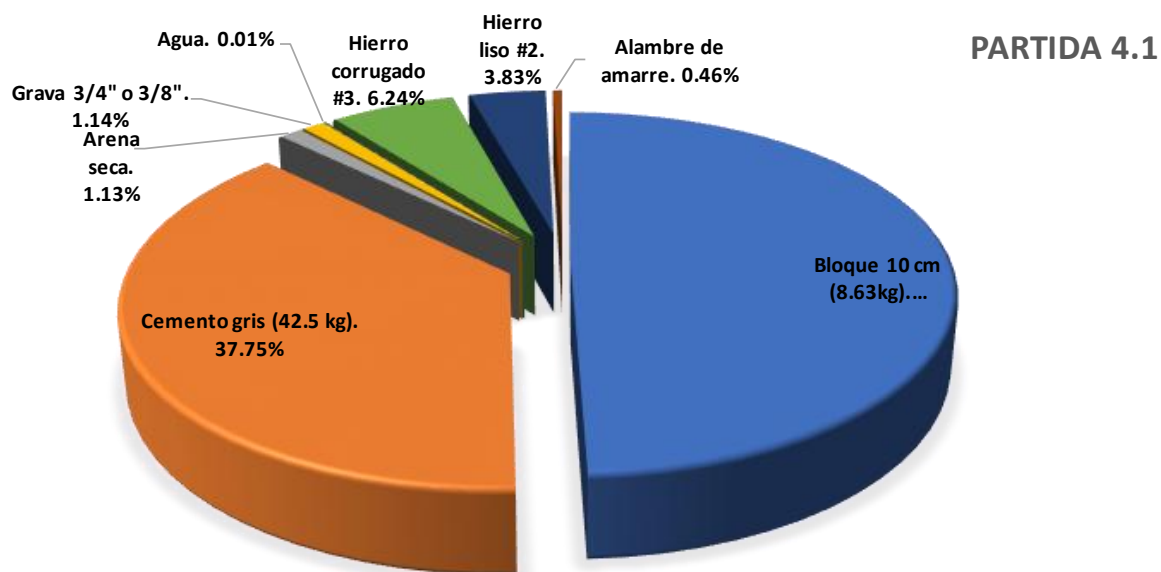


GRAFICO 7 : Muro de bloque 10 cm (Altura 2.4 mt)

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 29 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: REPELLO 2 CM Y AFINADO INTERIOR Y EXTERIOR

Repello 2 cm y afinado interior y exterior				m2	187.20
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Cemento gris (42.5 kg)	1100	5213.56	0.93	4848.61	98.85%
Arena seca	1600	11190.08	0.01	55.95	1.14%
Agua	1000	2244.00	0.0003	0.67	0.01%
TOTAL kg CO2e				4905.23	100.00%

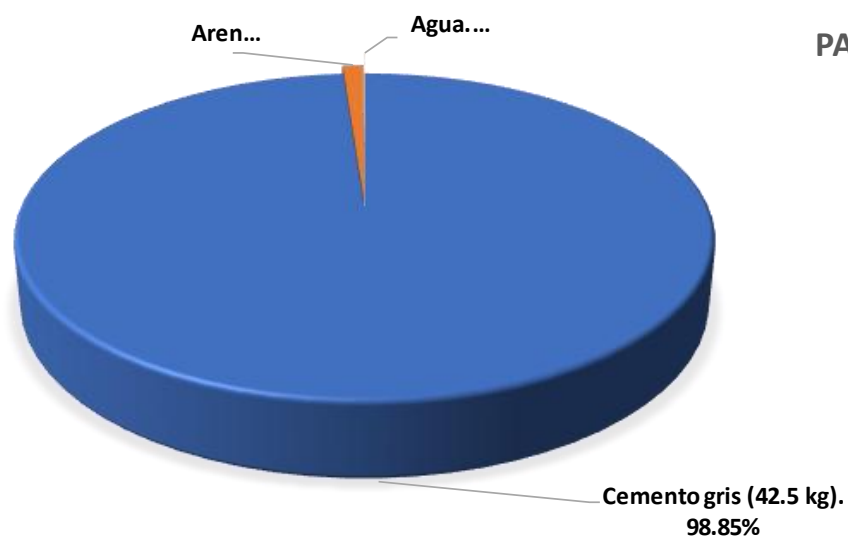


GRAFICO 8 : Repello y afinado interior y exterior

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 30 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: PISO CERAMICO 32X32

Piso cerámico 32x32 cm				m2	77.00
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/material	%
Piso ceramico 32 x 32 cm	2100	1940.40	0.65	1261.26	27.36%
Adhesivo estándar Cemix 20kg	1720	4781.70	0.70	3347.19	72.61%
Agua	1000	4331.25	0.0003	1.30	0.03%
TOTAL kg CO2e				4609.75	100.00%

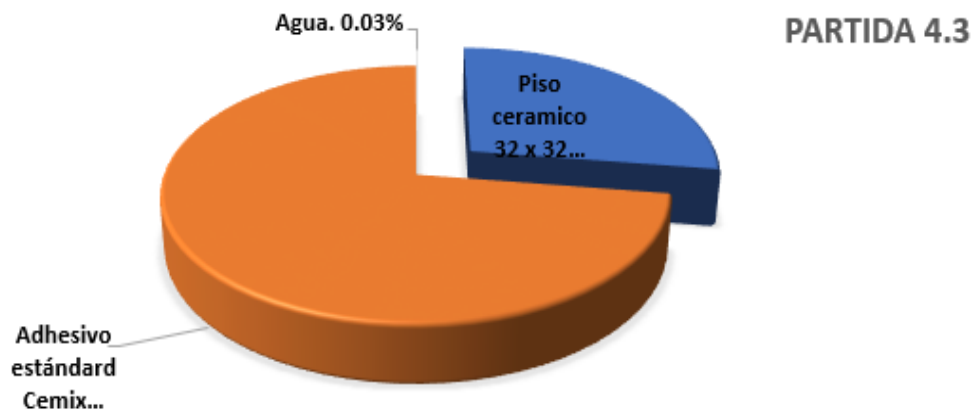


GRAFICO 9 : Piso ceramico 32x32

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 31 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: CUBIERTA DE LAMINA ZINC-ALUM CAL 26

Cubierta de lámina zinc-alum cal. 26				m2	77.00
Material	Peso específico (kg/m²)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/ material	%
Lamina de Zinc Aluminio cal. 26 (0.404 mm)	7200	223.98	2.60	582.34	100.00%
TOTAL kg CO2e				582.34	100.00%

PARTIDA 5.1

Lamina de Zinc Aluminio cal. 26 (0.404 mm). 100.00%

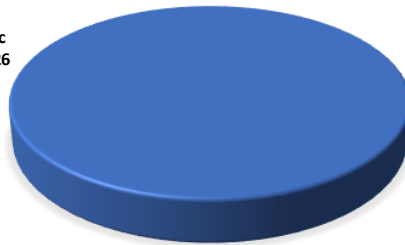


GRAFICO 10 : Cubierta de lámina zinc-alum cal 26

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

TABLA 32 ESTIMACION DE EMISIONES DE GEI PARA LA PARTIDA: POLIN Z PARA ESTRUCTURA DE TECHO

Polín Z para estructura de techo				ml	39.00
Material	Peso específico (kg/m³)	Cantidad Utilizada en kg	Factor CO2e (kg CO2e/kg)	kg CO2e/ material	%
Polín Z para estructura de techo	7850	145.42	2.15	312.65	100.00%
TOTAL kg CO2e				312.65	100.00%

PARTIDA 5.1

Polín Z para estructura de techo. 100.00%

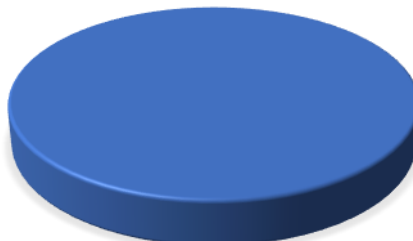


GRAFICO 11 : Polín Z para estructura de techo

Nota: Tabla y gráfico de elaboración propia.

3.2.4 *Análisis de Emisiones por Material.*

Esta sección presenta el análisis detallado de la huella de carbono asociada a los materiales empleados en la construcción de la unidad funcional del proyecto Ciudad Marsella. A partir de la sistematización de cantidades verificadas y la aplicación de factores de emisión obtenidos de la base ICE v3.0, se identifican los componentes constructivos con mayor peso en la carga ambiental del proyecto.

Para cada partida calculada se estimó la cantidad de material en kilogramos, sobre la cual se aplicó el factor de emisión correspondiente expresado en kilogramos de CO₂ equivalente por kilogramo de material (kg CO₂e/kg). Ver Tabla 5. Esta metodología permite descomponer el impacto ambiental por tipo de material y establecer comparaciones directas con los resultados obtenidos en el Caso B.

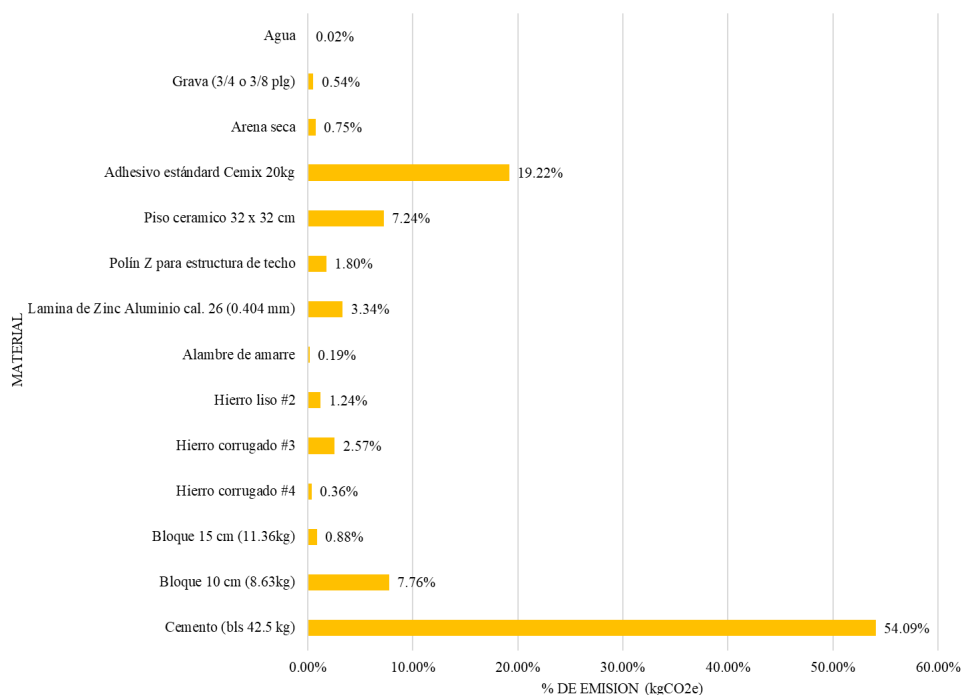
Los resultados reflejan que los materiales con mayor contribución a la huella de carbono en esta unidad funcional son el cemento, el acero y la lámina Aluminio-Zinc, utilizados respectivamente en la cimentación, elementos de refuerzo y cubierta del techo. Se observan también aportes relevantes provenientes del bloque de concreto utilizado en muros portantes.

La tabla 33 y el grafico 3 que se presenta a continuación muestra el resultado consolidado del análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por material, calculado con base en la sumatoria de los datos obtenidos en las fichas técnicas de cada partida constructiva. La información ha sido expresada en kilogramos de CO₂ equivalente (kgCO₂e), considerando los factores de emisión específicos aplicados a cada insumo. Además, se incluye el porcentaje relativo que representa cada material respecto al total de emisiones generadas en el proyecto, lo cual permite identificar aquellos con mayor impacto ambiental embebido.

TABLA 33 RESUMEN DE EMISIONES DE (GEI) POR MATERIAL EN EL PROYECTO CIUDAD MARSELLA (CASO B).

Material	kgCO2e	% Por material	% Agrupado
Cemento (bls 42.5 kg)	9,417.54	54.09%	54.09%
Bloque 10 cm (8.63kg)	1,351.46	7.76%	8.64%
Bloque 15 cm (11.36kg)	153.36	0.88%	
Hierro corrugado #4	62.41	0.36%	4.36%
Hierro corrugado #3	447.70	2.57%	
Hierro liso #2	215.52	1.24%	
Alambre de amarre	32.74	0.19%	
Lamina de Zinc Aluminio cal. 26 (0.404 mm)	582.34	3.34%	3.34%
Polín Z para estructura de techo	312.65	1.80%	1.80%
Piso ceramico 32 x 32 cm	1,261.26	7.24%	26.46%
Adhesivo estándar Cemix 20kg	3,347.19	19.22%	
Arena seca	130.42	0.75%	1.29%
Grava (3/4 o 3/8 plg)	94.73	0.54%	
Agua	2.93	0.02%	0.02%
TOTAL	17,412.25	100.00%	100.00%

GRÁFICO 3 RESUMEN EMISIONES DE GEI POR MATERIAL EN PROYECTO CIUDAD MARSELLA



Nota: Tabla y grafico de elaboración propia.

A partir de las cantidades de obra verificadas en campo (ver sección 3.2.2) y de los materiales identificados en la unidad funcional del proyecto Ciudad Marsella, se procedió a la cuantificación de las emisiones de carbono incorporado (CO₂e) mediante la aplicación directa de factores de emisión por unidad de masa.

La fórmula utilizada para el cálculo de emisiones por cada componente fue la siguiente:

$$\text{Emisión (kg CO}_2\text{e)} = \text{Cantidad de material (kg)} \times \text{Factor de emisión (kg CO}_2\text{e/kg)}$$

Donde:

- Cantidad de material fue obtenida mediante conversión de cantidades verificadas a kilogramos, considerando el peso específico estándar de cada material (ver Tabla 22).
- Factor de emisión se extrajo de la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011), ampliamente reconocida por su robustez metodológica en análisis de ciclo de vida (ACV).

Las cantidades por partida fueron previamente sistematizadas en hojas de cálculo, agrupadas en función del tipo de elemento constructivo (muros, cubierta, piso, estructura metálica, etc.). Para cada partida, se asignaron los materiales correspondientes y se estimó su peso total en kilogramos.

Los resultados de esta cuantificación se presentan en las Tablas 23 a 30, donde se detalla:

- El tipo de partida,
- El material predominante,
- El volumen o superficie construida,
- El peso equivalente estimado,
- El factor de emisión aplicado,
- Y la emisión resultante en kg CO₂e.

Esta información permite descomponer la huella de carbono total por componente constructivo y facilita el análisis comparativo con otros modelos habitacionales.

Cabe destacar que los materiales con mayor contribución a la huella total fueron el cemento, el adhesivo para piso, el piso cerámico, el acero de refuerzo (presente en polines y refuerzos) y la lámina de zinc-aluminio utilizada en la cubierta, los cuales concentran la mayor parte de las emisiones debido a su intensidad energética en fase de fabricación.

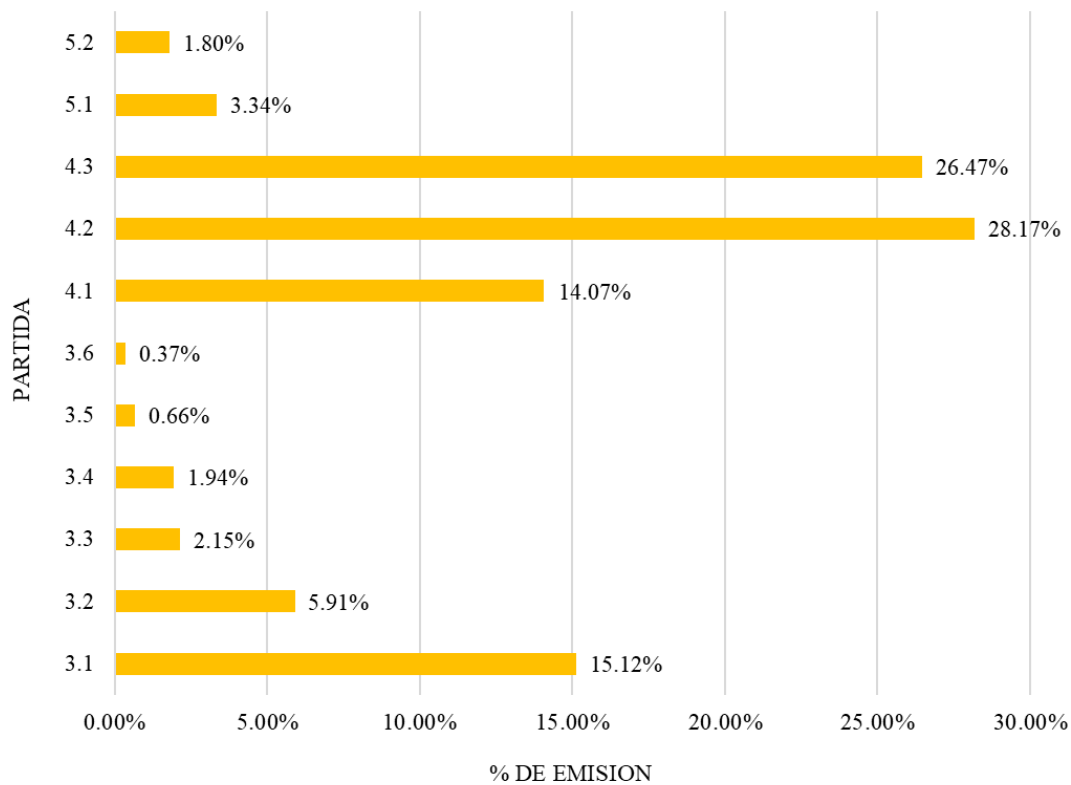
3.2.5 *Análisis de Emisión Por Partida*

A continuación, se presentan los resultados preliminares consolidados en la Tabla 34, donde se detalla la emisión estimada por partida constructiva:

TABLA 34 RESUMEN DE EMISIONES GEI ESTIMADA POR PARTIDA EN PROYECTO CIUDAD MARSELLA (CASO B)

ITEM	PARTIDA	SUBTOTAL kgCO ₂ e	% kg CO ₂ e	% Agrupado
3.1	Firme de concreto (espesor 10 cm)	2,632.40	15.12%	68.39%
3.2	Solera de fundación (viga de amarre)	1,028.63	5.91%	
3.3	Solera intermedia	374.95	2.15%	
3.4	Solera de coronamiento	337.04	1.94%	
3.5	Cargaderos sobre vanos	115.31	0.66%	
3.6	Nervios (esquinas y refuerzo)	63.80	0.37%	
4.1	Muros de bloque 10cm (altura 2.4 m)	2,450.15	14.07%	26.47%
4.2	Repello 2 cm y afinado interior y exterior	4,905.23	28.17%	
4.3	Piso cerámico 32x32 cm (incluye adhesivo)	4,609.75	26.47%	
5.1	Cubierta de lámina zinc-alum cal. 26	582.34	3.34%	3.34%
5.2	Polín Z para estructura de techo	312.65	1.80%	1.80%
TOTAL		17,412.25	100%	100%

GRÁFICO 4 RESUMEN DE EMISIONES GEI ESTIMADA POR PARTIDA EN PROYECTO CIUDAD MARSELLA (CASO B)



Nota: Tabla y grafico de elaboración propia.

Los resultados que se han presentado muestran que las partidas con mayor contribución al total de emisiones GEI son:

- Piso cerámico 32×32 cm (26.47%)
- Repello y afinado interior/exterior (28.17%)
- Firme de concreto 10 cm (15.12%)
- Muros de bloque 10 cm (14.07%)

En conjunto, estas cuatro partidas representan más del 80% del total de emisiones embebidas en el proyecto, lo cual evidencia que el impacto ambiental se concentra en los elementos de mayor volumen material y superficie aplicada.

Por el contrario, partidas como nervios, cargaderos y soleras representan porcentajes marginales, lo que sugiere que, aunque necesarias estructuralmente, su impacto climático es bajo en términos relativos.

Este análisis constituye una herramienta clave para priorizar estrategias de mitigación, sustitución de materiales o rediseño técnico en futuras intervenciones de vivienda social en contextos urbanos o periurbanos similares.

3.2.6 Resultados preliminares de emisiones GEI CASO B.

Como resultado de la aplicación del modelo de análisis de ciclo de vida (ACV), bajo el enfoque cradle-to-site, se obtuvo una estimación consolidada de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para la unidad funcional correspondiente al proyecto Ciudad Marsella.

El total estimado de emisiones de carbono incorporado ascendió a 17,412.25 kg CO₂e por vivienda, considerando exclusivamente los materiales utilizados y las partidas constructivas ejecutadas hasta la finalización de obra. Este valor fue obtenido mediante la conversión de cantidades verificadas en campo a masa (kg) y la aplicación de factores de emisión documentados en la base de datos ICE v3.0 (Hammond & Jones, 2011).

Los materiales con mayor contribución al total de emisiones fueron:

- Cemento (utilizado en obras de mamposterías, firmes de pisos y elementos estructurales)
- Piso cerámico y el adhesivo para el mismo,
- Polín Z metálico, cubierta de techo y acero de refuerzo (elementos estructurales y de techos).

En conjunto, estos materiales concentran más del 95 % de las emisiones de CO₂e analizadas de la unidad funcional.

3.2.7 Alcances y restricciones técnicas del análisis aplicado.

A pesar de contar con documentación técnica detallada y haber realizado observación directa en el sitio del proyecto Ciudad Marsella, el presente análisis presenta algunas restricciones metodológicas que deben ser consideradas al interpretar los resultados obtenidos para este caso específico.

En primer lugar, el análisis se limitó a un enfoque cradle-to-site, excluyendo las fases de uso, mantenimiento y disposición final, debido a la falta de datos específicos sobre la operación prolongada de las viviendas y su comportamiento post-construcción. Esta delimitación implica que la huella de carbono presentada corresponde únicamente a la fase de construcción.

Asimismo, no se realizaron ensayos fisicoquímicos de laboratorio sobre los materiales empleados, por lo que se asumieron densidades y características técnicas estándar, basadas en bibliografía y documentos al alcance. Esto introduce un margen de incertidumbre que, aunque controlado, podría afectar la precisión absoluta del resultado.

Se aplicaron factores de emisión promedio extraídos de la base ICE v3.0, sin ajustar por marca comercial, procedencia geográfica o eficiencia energética de los procesos de producción, lo cual puede generar una variación respecto a los valores reales de los materiales utilizados en campo.

Tampoco se cuantificaron consumos energéticos indirectos de obra como iluminación, uso de herramientas eléctricas menores o transporte de personal, ya que estos valores no fueron confirmados durante las visitas de campo.

Estas restricciones no desmeritan la validez del análisis, pero sí deben ser tomadas en cuenta al momento de comparar con otras investigaciones o al extrapolar resultados a otros contextos constructivos. Los datos y procedimientos han sido documentados para garantizar la trazabilidad y replicabilidad del estudio, y constituyen una base sólida para futuras investigaciones.

3.2.8 Resultados técnicos y observaciones finales del Caso B.

La cuantificación de la huella de carbono para la unidad funcional ubicada en Ciudad Marsella permitió identificar los materiales con mayor aporte de emisiones, entre los cuales destacan el Cemento, el hierro de refuerzo y los adhesivos utilizados en pisos cerámicos. Estos materiales presentan factores de emisión elevados, con un rango de 1,000 hasta cerca de 8,000 kg CO₂e/kg, lo que influye significativamente en el total de emisiones generadas por la construcción.

Las condiciones técnicas de esta vivienda, con estructura metálica en cubierta, muros de bloque de concreto y acabados convencionales, reflejan una solución constructiva de carácter urbano, con mayor grado de industrialización respecto al Caso A. Esto se traduce en una mayor participación de materiales procesados y manufacturados en planta, los cuales incrementan la huella de carbono incorporada en la edificación.

El procedimiento aplicado, basado en cantidades verificadas en sitio y factores de emisión documentados, permite establecer con claridad las fuentes principales de emisiones por material. Estos hallazgos serán fundamentales para el análisis comparativo entre ambos casos, el cual se desarrolla en el apartado siguiente.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 COMPARACIÓN DE EMISIONES TOTALES Y ESPECÍFICAS POR UNIDAD FUNCIONAL

El análisis comparativo entre los dos casos de estudio permite identificar diferencias significativas tanto en los valores absolutos de emisiones de CO₂e como en los valores relativos normalizados por superficie construida (kgCO₂e/m²).

En términos absolutos, la vivienda del Caso A, con una superficie construida de 44.51 m², registró una emisión total de 7,274.33 kg CO₂e, mientras que la vivienda del Caso B, con una superficie de 63.25 m², alcanzó 17,412.25 kg CO₂e. Esto representa una diferencia de 10,137.92 kg CO₂e adicionales en el Caso B, lo que evidencia un incremento de casi el doble de emisiones respecto al Caso A. Dicho aumento se explica tanto por la mayor superficie construida como por la incorporación más materiales de mayor carga de carbono, tales como bloques de concreto, refuerzo de acero, pisos cerámicos y cubiertas metálicas.

Por otro lado, en términos relativos, al normalizar las emisiones respecto al área construida, se obtuvo que la emisión específica en el caso A fue de 163.43 kg CO₂e/m², mientras que en el caso B ascendió a 275.29 kg CO₂e/m². Esto implica que, por cada metro cuadrado construido, el Caso B genera un 68% más emisiones que el Caso A, como se ve en el siguiente calculo:

$$\text{Incremento \%} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Caso A}} \times 100$$

$$\text{Incremento \%} = \frac{275.29-163.43}{163.43} \times 100$$

$$\text{Incremento \%} = \frac{111.86}{163.43} \times 100$$

$$\text{Incremento \%} = 0.68 \times 100$$

$$\text{Incremento \%} = 68.00\%$$

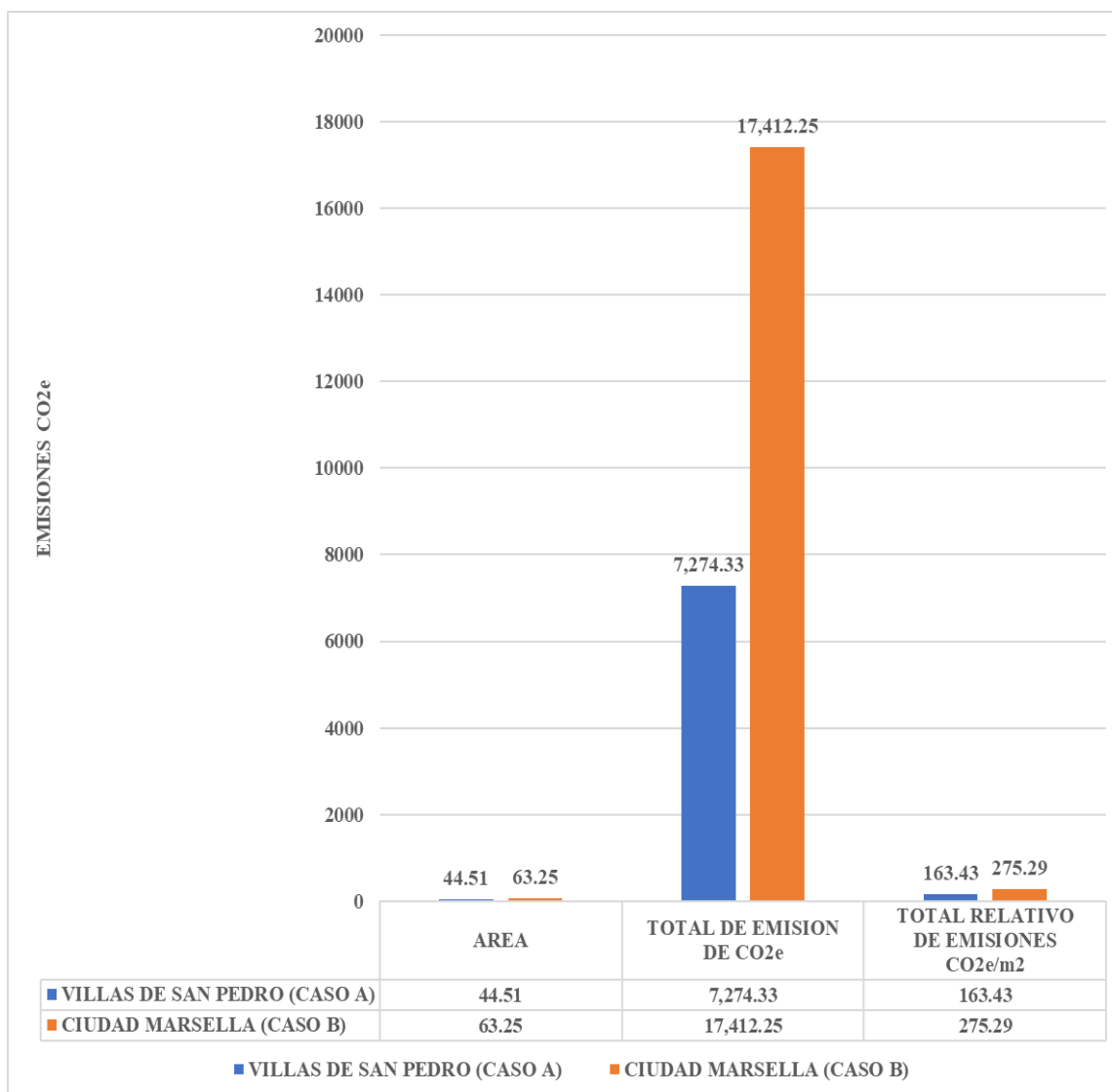
Este resultado refleja que, aun cuando la diferencia en área construida influye en las emisiones totales, la eficiencia ambiental de los sistemas constructivos aplicados en Ciudad Marsella es menor, dado su mayor grado de industrialización y uso intensivo de materiales procesados.

En conclusión, la comparación muestra que la solución constructiva rural de Villas de San Pedro presenta un menor impacto en términos de huella de carbono tanto en valores absolutos como relativos, mientras que la solución urbana de Ciudad Marsella, si bien responde a requerimientos de mayor durabilidad y estandarización, implica un mayor costo ambiental asociado a la construcción de viviendas de interés social en contextos urbanos.

Estas diferencias son técnicamente significativas dado que ambas unidades funcionales comparten la misma finalidad habitacional, similar área y características tipológicas, lo cual permite atribuir los cambios en la huella de carbono a factores constructivos y territoriales, más que a diferencias en función o escala.

En el gráfico 5 comparativo que se muestra a continuación se pueden ver las emisiones de carbono incorporado generadas por cada caso de estudio, tanto en términos absolutos (kg CO₂e por vivienda) como específicos (kg CO₂e por metro cuadrado construido), dicha información proviene de la tabla 20 para el caso A y de la tabla 34 para el caso B

GRÁFICO 5 COMPARACION DE EMISIONES ABSOLUTAS Y ESPECIFICAS POR CASO DE ESTUDIO



Nota: Tabla y grafico de elaboración propia.

La vivienda de Villas de San Pedro (Caso A) presenta una huella ambiental, con 7,274.33 kg CO₂e totales y 163.43 kg CO₂e/m², en comparación con la vivienda urbana de Ciudad Marsella (Caso B), que registra 17,412.25 kg CO₂e totales y 275.29 kg CO₂e/m². Esta diferencia refleja una mayor eficiencia ambiental relativa en el modelo Villas de San Pedro.

4.2 MATERIALES DOMINANTES Y PARTIDAS CON MAYOR IMPACTO

Del análisis por partida, se identificaron los materiales que más contribuyen a la huella de carbono total en cada caso. A continuación, se resumen las principales partidas y su contribución relativa:

TABLA 35 COMPATARIO DE MATERIALES QUE MAS CONTRIBUYEN A LA GENERACION DE HUELLA DE CARBONO ENTRE AMBOS PROYECTOS EN ESTUDIO

MATERIAL/PARTIDA (De tablas 19 y 33)	VILLAS DE SAN PEDRO (CASO A)	CIUDAD MARSELLA (CASO B)
Cemento/Elementos estructurales: firmes y mamposterías	58.96%	54.09%
Bloque de concreto 10 o 15 cm/Paredes	12.21%	8.64%
Hierro corrugado, liso y alambre de amarre/Elementos estructurales y paredes	13.89%	4.36%
Lamina de cubierta zinc Aluminio/Cubiertas de techo	4.63%	3.34%
Polín C y Z / Estructura de cubierta y divisiones	4.58%	1.80%
Lamina troquelada/Puertas y ventanas	1.66%	N/A
Lamina de fibrocemento/pared liviana	2.35%	N/A
Piso cerámico+adhesivo/Pisos	N/A	26.46%
Agregado fino y grueso/Elementos estructurales y mamposterías	1.72%	1.29%
Agua/Procesos constructivos	0.01%	0.02%

Nota: Fuente (Elaboración propia con información de tablas 10 a la tabla 20 del caso A y de la tabla 23 a la tabla 30 del caso B)

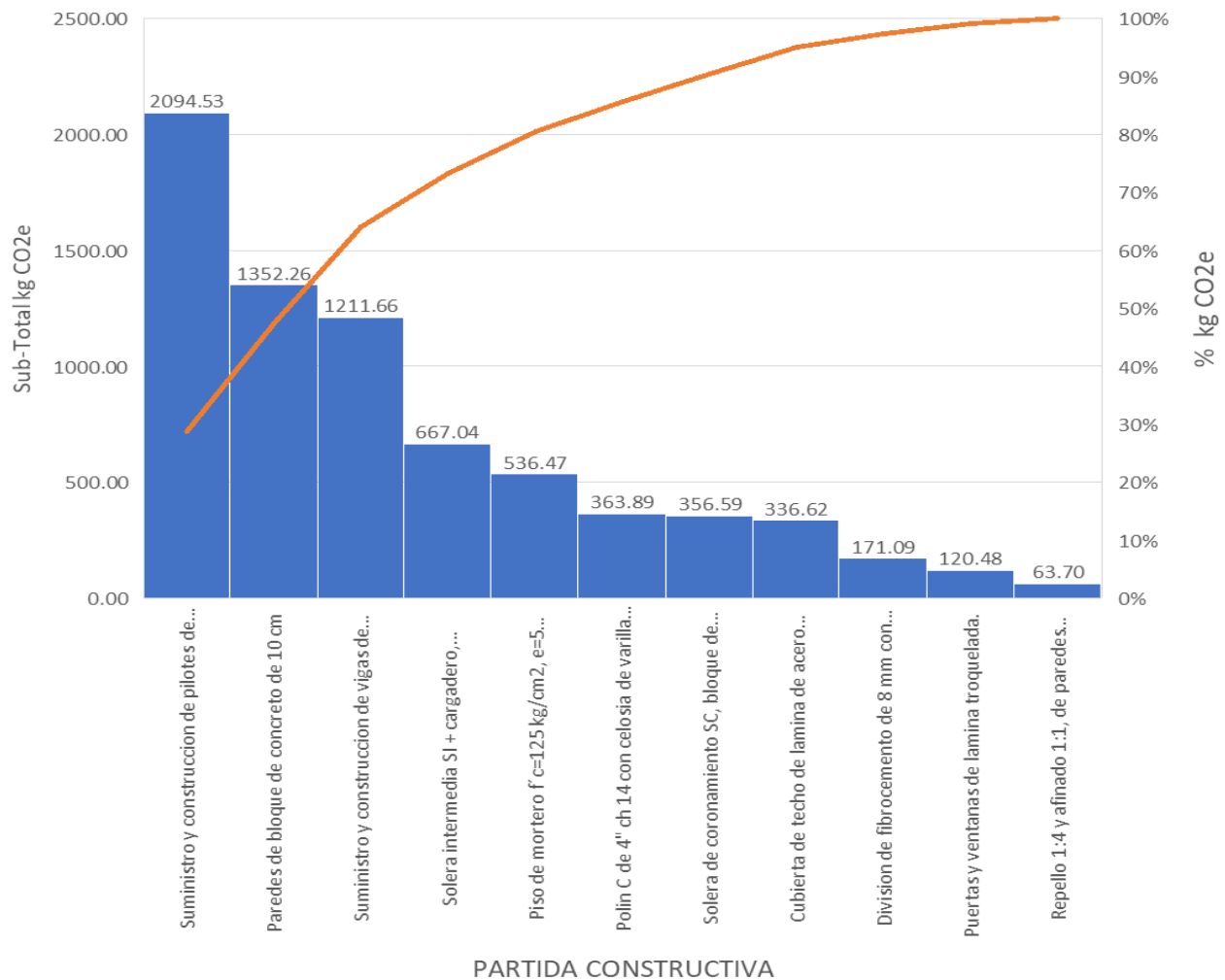
En el Caso A (Villas de San Pedro), la huella de carbono se concentra principalmente en bloques de concreto y cemento, que juntos suman más del 70% del total.

En el Caso B (Ciudad Marsella), aunque los bloques y el cemento siguen siendo determinantes, su peso relativo disminuye frente al aumento en la participación de cubiertas metálicas y cerámica, lo que evidencia un mayor grado de industrialización y mejores acabados.

Esto confirma que el contexto urbano incrementa la diversidad de materiales con alta carga de carbono, generando una mayor huella específica por metro cuadrado, mientras que el contexto rural mantiene un impacto más concentrado en materiales básicos.

A partir de los datos consolidados de emisiones por material y por partida, presentados en las Tablas 19 y 20 para el caso A (Villas de San Pedro) así como también las Tablas 33 y 34 para el caso B (Ciudad Marsella) del Capítulo 3, se elaboraron diagramas de Pareto, que facilitan la identificación de los insumos con mayor aporte a la huella de carbono. Estos gráficos permiten evidenciar de manera comparativa la concentración de emisiones en cada caso de estudio, destacando los materiales y partidas constructivas que representan la mayor proporción del impacto ambiental y que, por tanto, constituyen los principales focos de atención para estrategias de reducción, los cuales se presentan a continuación

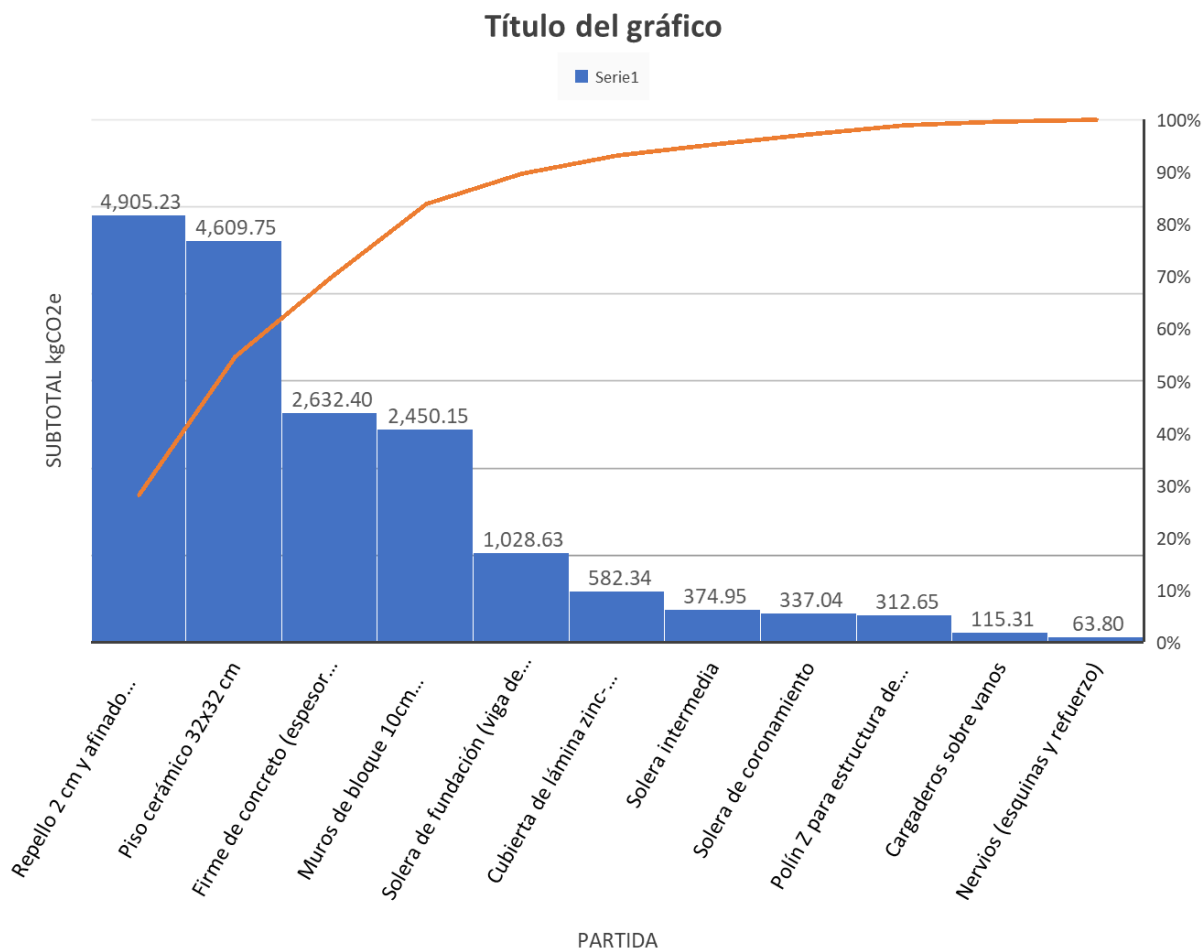
GRÁFICO 6 DIAGRAMA DE PARETO, EMISIONES POR PARTIDA (CASO A)



Fuente: Elaboración propia con base en ICE v3.0 y levantamiento de campo (2024)

- **Caso A (Villas de San Pedro):** mayor impacto en cimentación y estructura (pilotes, muros y vigas).

GRÁFICO 7 DIAGRAMA DE PARETO - EMISIONES POR PARTIDA (CASO B)



Fuente: Elaboración propia con base en ICE v3.0 y levantamiento de campo (2024)

- **Caso B (Ciudad Marsella):** mayor impacto en acabados y recubrimientos (piso cerámico, repello), además de los firmes de concreto.

En síntesis, los gráficos de Pareto permiten confirmar que:

- En viviendas rurales, la huella de carbono está concentrada en infraestructura básica.
- En viviendas urbanas, la huella se desplaza hacia los acabados y materiales procesados, lo que explica el incremento en la emisión específica por m² en Ciudad Marsella.

4.3 RELACIÓN ENTRE CONTEXTO TERRITORIAL Y CARGA AMBIENTAL

El análisis comparativo de la huella de carbono entre las dos unidades funcionales evidencia que el contexto territorial influye directamente en la configuración constructiva y, en consecuencia, en la carga ambiental generada.

En el Caso A (Villas de San Pedro) en zona rural de San Pedro Masahuat, la huella de carbono está principalmente concentrada en los elementos estructurales básicos, como pilotes de cimentación (28.7%), muros de bloque de 10 cm (18.6%) y vigas de fundación (16.7%). Estas tres partidas acumulan más del 60% del total de emisiones, lo que refleja un modelo constructivo orientado a garantizar estabilidad estructural con un uso limitado de acabados. La carga ambiental, por tanto, se deriva de un consumo intensivo de cemento y bloques de concreto, materiales de alta demanda en infraestructura básica pero escasa diversificación en acabados.

En contraste, el Caso B (Ciudad Marsella) zona urbana de San Juan Opico presenta una distribución distinta; los acabados y materiales procesados asumen un rol protagónico en las emisiones. El piso cerámico (26.47%), el repello interior y exterior (28.17%) y el firme de concreto (15.12%) concentran conjuntamente más del 69% de las emisiones, desplazando a los elementos estructurales tradicionales como principales contribuyentes. Este patrón responde al carácter urbano del proyecto, donde la estandarización y el confort habitacional demandan un mayor uso de materiales industrializados y manufacturados, con mayor huella incorporada.

En términos comparativos, se observa que:

- El ámbito rural genera un impacto ambiental más concentrado en la cimentación y estructura, debido al uso predominante de cemento y bloque.

- El ámbito urbano diversifica la carga ambiental hacia acabados y recubrimientos, elevando la huella de carbono específica por metro cuadrado y reflejando un mayor grado de industrialización en la vivienda de interés social.

En consecuencia, la relación entre contexto territorial y carga ambiental confirma que la localización y el nivel de urbanización determinan no solo la magnitud de las emisiones, sino también los materiales responsables de la mayor proporción de la huella de carbono. Mientras el medio rural concentra su impacto en componentes estructurales esenciales, el medio urbano amplía la huella hacia materiales de acabado y confort, incrementando así la intensidad ambiental de la vivienda.

4.4 DISCUSIÓN CRÍTICA Y TÉCNICA DE LOS RESULTADOS

El análisis de las partidas de obra en ambos casos de estudio permite establecer una visión crítica sobre los factores que más inciden en la generación de huella de carbono en la construcción de viviendas de interés social, diferenciando patrones propios de contextos rurales y urbanos.

En el Caso A, los resultados muestran que las mayores emisiones provienen de los elementos estructurales de cimentación y soporte: pilotes (28.79%), vigas de fundación (16.66%) y muros de bloque de concreto de 10 cm (18.59%). En conjunto, estas tres partidas representan más del 64% de las emisiones totales, lo que confirma que la mayor carga ambiental se concentra en el uso intensivo de cemento y bloques de concreto, materiales fundamentales para garantizar estabilidad estructural en un entorno rural con condiciones de suelo y acceso a materiales distintos al contexto urbano. La baja contribución de partidas secundarias como repellos (0.88%) y ventanas (1.66%) refuerza la idea de que la vivienda rural se caracteriza por un diseño austero, funcional y con acabados limitados, lo que restringe la diversificación de fuentes de emisiones.

Por el contrario, en el Caso B, la distribución de emisiones refleja un patrón más vinculado a la industrialización y estandarización constructiva. Las partidas de mayor peso corresponden a los acabados y superficies de uso intensivo, destacando el piso cerámico (26.47%), el repello y afinado interior/exterior (28.17%) y el firme de concreto (15.12%). Estas tres partidas concentran más del 69% del total, desplazando a los muros de bloque (114.07%) al cuarto lugar en importancia. Este comportamiento evidencia que, en contextos urbanos, el impacto ambiental no depende únicamente de la estructura portante, sino también de los materiales de terminación y confort habitacional, cuya fabricación y transporte demandan altos niveles de energía y emiten mayores cantidades de CO₂e.

La comparación técnica entre ambos casos pone en evidencia que la magnitud y el origen de las emisiones dependen del contexto territorial y del grado de industrialización de la obra. Mientras en la vivienda rural (Caso A) el peso relativo recae en elementos básicos de soporte estructural, en la vivienda urbana (Caso B) la huella se distribuye hacia materiales procesados y acabados, incrementando la emisión específica por metro cuadrado construido. En este sentido, la vivienda de Ciudad Marsella, aunque ofrece un estándar constructivo más elevado, presenta un mayor impacto ambiental unitario, lo que cuestiona la sostenibilidad de este modelo en la producción masiva de viviendas de interés social.

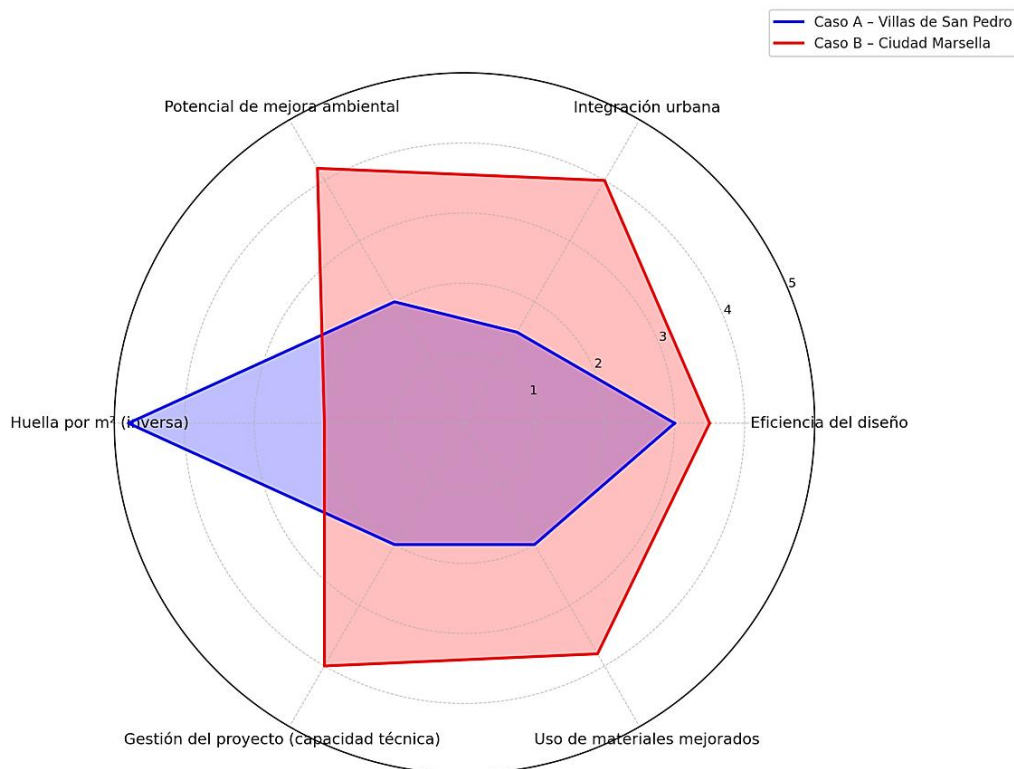
Finalmente, desde una perspectiva crítica, estos resultados evidencian la necesidad de repensar los criterios de diseño y selección de materiales en proyectos de vivienda social. Una mayor incorporación de materiales alternativos de baja huella, la optimización de los procesos constructivos y la promoción de tecnologías constructivas más sostenibles podrían reducir significativamente la carga ambiental, sin comprometer la funcionalidad ni la habitabilidad de las unidades.

TABLA 36 METODOLOGÍA DE ASIGNACIÓN DE PUNTAJES CUALITATIVOS PARA EL GRÁFICO RADAR

Parámetro Cualitativo	Dato de respaldo (numérico o técnico)	Interpretación técnica	Puntaje Caso A (1-5)	Puntaje Caso B (1-5)
Eficiencia del diseño	Caso A: emisiones concentradas en 3 partidas (64% en pilotes, muros y vigas).	Caso A: diseño más simple y funcional, aunque menos urbano.	3.00	3.50
	Caso B: distribución más diversificada, pero con más acabados.	Caso B: mayor diversidad constructiva, pero menos eficiente ambientalmente.		
Integración urbana	Caso A: vivienda rural, acabados básicos.	Caso A: baja integración al entorno urbano.	1.50	4.00
	Caso B: vivienda urbana, con repellos, cerámica y cubiertas estandarizadas.	Caso B: alta integración a estándares urbanos de confort.		
Potencial de mejora ambiental	Caso A: emisiones dominadas por materiales estructurales (cemento y bloque).	Caso A: pocas opciones de sustitución en materiales básicos.	2.00	4.20
	Caso B: emisiones altas en acabados (cerámica 22.75%, repellos 21.78%).	Caso B: amplio potencial de sustitución en acabados y recubrimientos.		
Huella de carbono por m ² (inversa)	Caso A: 163.43 kgCO _e /m ² .	Caso A tiene mejor desempeño ambiental relativo.	4.80	2.00
	Caso B: 222.97 kgCO _e /m ² .	Caso B penalizado por mayor huella específica.		

Parámetro Cualitativo	Dato de respaldo (numérico o técnico)	Interpretación técnica	Puntaje Caso A (1-5)	Puntaje Caso B (1-5)
Gestión del proyecto (capacidad técnica)	Caso A: construcción austera, recursos locales.	Caso A: gestión simple pero funcional.	2.00	4.00
	Caso B: mayor industrialización, estandarización en acabados.	Caso B: gestión técnica más robusta.		
Uso de materiales mejorados	Caso A: predominan cemento, bloque, acero.	Caso A: materiales convencionales, bajo nivel de innovación.	2.00	
	Caso B: adhesivos (15.29%), lámina zinc-aluminio (4.52%), cerámica (7.45%).	Caso B: incorporación de materiales industrializados y mejorados.		

GRÁFICO 8 COMPARACIÓN CUALITATIVA ENTRE AMBOS PROYECTOS EN ESTUDIO



Nota: Tabla y grafico Fuente (Elaboración propia)

Las diferencias cualitativas observadas entre ambos casos, considerando los resultados del gráfico comparativo, son las siguientes:

- **Eficiencia del diseño**

En términos de eficiencia, el Caso “A” muestra un modelo constructivo más simple y compacto, lo que se refleja en un menor número de partidas de alto impacto. Las cimentaciones (pilotes y vigas) concentran casi el 45% de las emisiones, lo que, aunque significativo, se asocia a la necesidad estructural del terreno. Por su parte, el Caso B – Ciudad Marsella introduce mayor diversidad de elementos (piso cerámico, repellos y acabados), lo que incrementa las emisiones específicas. Si bien el diseño urbano ofrece mayor confort y estandarización, es menos eficiente en términos ambientales, ya que utiliza materiales industrializados de alta huella de carbono.

- **Integración urbana**

El Caso B destaca por su integración al entorno urbano: cuenta con acabados estandarizados (cerámica, repellos, cubiertas metálicas) que responden a las expectativas de un mercado habitacional urbano y cumplen con criterios de durabilidad y presentación. En contraste, el Caso A responde a un contexto rural con menores exigencias estéticas y de confort, por lo que su integración urbana es limitada, aunque ambientalmente más sostenible. Esto evidencia cómo la localización geográfica influye directamente en las decisiones constructivas y, por ende, en la huella ambiental.

- **Potencial de mejora ambiental**

El Caso A tiene un potencial de mejora reducido, ya que sus emisiones provienen mayoritariamente de partidas estructurales básicas (cemento, bloques y pilotes), difíciles de sustituir en contextos rurales. En cambio, el Caso B presenta un mayor potencial de mejora ambiental: gran parte de sus emisiones se concentran en acabados (piso cerámico 26.47% y repellos 28.17%), donde podrían aplicarse alternativas de bajo carbono (pisos prefabricados de tierra estabilizada, morteros de cal, recubrimientos naturales). Esto indica que la vivienda urbana ofrece más oportunidades de sustitución tecnológica sin comprometer la habitabilidad.

- **Huella de carbono por m² (inversa)**

Al evaluar la emisión específica, el Caso A reporta 163.43 kgCO_{2e}/m², mientras que el Caso B alcanza 275.29 kgCO_{2e}/m². Representado inversamente, el Caso A obtiene una mejor calificación, ya que logra una menor carga ambiental por superficie construida. El Caso B, a pesar de su mayor calidad urbana, penaliza su desempeño ambiental debido a la mayor intensidad de materiales industrializados, reflejando una menor eficiencia en el uso de recursos respecto a la superficie construida.

- **Gestión del proyecto (capacidad técnica)**

El Caso B refleja una gestión técnica más avanzada, evidenciada en el uso de acabados uniformes y materiales procesados que facilitan la estandarización constructiva. Sin embargo, esta gestión se traduce en mayores emisiones debido a la dependencia de insumos industriales. El Caso A, en contraste, muestra una gestión

menos compleja y con recursos locales, lo que reduce la huella, aunque con limitaciones en términos de calidad arquitectónica y confort. Esto resalta la tensión entre eficiencia técnica y sostenibilidad ambiental.

- **Uso de materiales mejorados**

El Caso B utiliza materiales mejorados como lámina zinc-aluminio (3.34%) y adhesivos industriales (15.29%), que incrementan la durabilidad y resistencia de la vivienda, pero también elevan la huella ambiental. En el Caso A, el uso de materiales mejorados es menor, predominando insumos básicos como bloque de concreto, cemento y acero, con menor grado de transformación industrial. Esto posiciona al Caso B como una solución más robusta y duradera, aunque ambientalmente más costosa, mientras que el Caso A se mantiene como un modelo de bajo impacto, pero con limitaciones de calidad y confort.

En resumen, los seis ejes de análisis muestran que el Caso A es ambientalmente más eficiente por m², pero limitado en confort e integración urbana, mientras que el Caso B representa un modelo de mayor calidad urbana y técnica, con un potencial de mejora ambiental más amplio, aunque a costa de un impacto significativamente mayor en emisiones.

4.5 APOORTE TÉCNICO-ACADÉMICO

En lo técnico, se identificaron las partidas de mayor impacto (cemento, bloques, acabados), generando insumos útiles para orientar estrategias de reducción de emisiones. En lo académico, el

uso de gráficos de Pareto, radar y tablas metodológicas aporta herramientas claras y replicables para futuros estudios.

En síntesis, el trabajo constituye un aporte que fortalece la discusión técnica y académica sobre sostenibilidad en la vivienda social salvadoreña, ofreciendo una base práctica para la toma de decisiones en diseño y construcción.

4.6 APOORTE PRÁCTICO PARA LA INGENIERÍA Y LA GESTIÓN DE PROYECTOS

El estudio realizado ofrece un aporte práctico significativo para la ingeniería civil y la gestión de proyectos de vivienda social en El Salvador, al traducir la cuantificación de emisiones de CO₂e en herramientas de decisión aplicables al diseño, ejecución y control de obra.

En primer lugar, la sistematización de datos técnicos por partidas y materiales, junto con la aplicación de factores de emisión estandarizados (ICE v3.0), permite a los ingenieros contar con un modelo replicable para estimar la huella de carbono en fases tempranas de planificación. Esto representa una ventaja en la gestión de proyectos, al incorporar desde el inicio criterios ambientales en paralelo a los técnicos y financieros.

En segundo lugar, los resultados obtenidos evidencian que la mayor parte de las emisiones se concentra en pocos materiales críticos: cemento, bloques de concreto, acero de refuerzo, lámina metálica y acabados en pisos. Este hallazgo ofrece un insumo claro para la gestión de obra, ya que orienta a priorizar medidas de optimización, sustitución o eficiencia en la adquisición y uso de dichos insumos, generando beneficios tanto económicos como ambientales.

Asimismo, la integración de instrumentos de levantamiento de cantidades y fichas de explosión de insumos demostró su utilidad no solo para el cálculo ambiental, sino también como herramienta de control administrativo y técnico, al facilitar la trazabilidad entre lo planificado y lo

ejecutado en campo. Esta práctica fortalece la transparencia y la gestión de recursos dentro de los proyectos de vivienda social.

La comparación entre entornos rural y urbano confirma que el contexto territorial influye en la carga ambiental y, por tanto, en las estrategias de gestión. En áreas rurales, el reto se centra en reducir la intensidad de materiales estructurales básicos, mientras que en áreas urbanas el énfasis debe ponerse en optimizar los acabados y materiales industrializados. Esta distinción aporta una guía práctica para que los gestores de proyectos adapten sus decisiones según el entorno en que se desarrolle la vivienda.

En síntesis, el aporte práctico de esta investigación radica en proveer una metodología técnica, verificable y adaptable que puede ser integrada en procesos de diseño, planificación y gestión de proyectos habitacionales, contribuyendo a reducir la huella de carbono sin comprometer la funcionalidad ni la viabilidad económica de las soluciones de vivienda social en El Salvador.

4.7 APOORTE AL DESARROLLO SOSTENIBLE Y LA POLÍTICA PÚBLICA

Los resultados de esta investigación constituyen un aporte directo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente al ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y al ODS 13 (Acción por el clima), al proporcionar evidencia técnica sobre el impacto ambiental de la vivienda social en El Salvador. La cuantificación de emisiones por partidas y materiales no solo visibiliza la magnitud de la huella de carbono, sino que también orienta hacia alternativas constructivas que podrían reducirla significativamente sin comprometer la habitabilidad.

En el ámbito de la política pública, este trabajo ofrece insumos para instituciones como el Fondo Nacional de Vivienda Popular (FONAVIPO) y el Ministerio de Obras Públicas y de

Transporte (MOPT), que diseñan e implementan programas de vivienda de interés social. La identificación de materiales críticos como cemento, bloque de concreto, acero de refuerzo y acabados de pisos y revestimientos cerámicos permite priorizar acciones regulatorias e incentivos hacia el uso de materiales alternativos de bajo carbono, fomentando así una transición hacia modelos constructivos más sostenibles.

Además, la comparación entre contextos rurales y urbanos evidencia la necesidad de estrategias diferenciadas de política habitacional. Mientras en zonas rurales los esfuerzos deben concentrarse en la reducción del consumo de cemento y bloques, en las áreas urbanas la atención debe dirigirse a los acabados y materiales industrializados, donde existe mayor potencial de sustitución tecnológica. Esta distinción es clave para la formulación de políticas públicas adaptadas a la realidad del territorio.

En conclusión, el aporte de este estudio al desarrollo sostenible y la política pública se traduce en la generación de un marco de referencia técnico que puede orientar la toma de decisiones en programas nacionales de vivienda social, contribuyendo a reducir la huella de carbono del sector construcción y fortaleciendo el compromiso de El Salvador con la sostenibilidad ambiental y climática.

4.8 APOORTE INSTITUCIONAL Y EDUCATIVO

El presente trabajo ofrece un aporte institucional y educativo en dos niveles complementarios.

En el plano institucional, la investigación genera una base técnica que puede ser utilizada por entidades como el Ministerio de Vivienda, el Fondo Social para la Vivienda (FSV) y el Fondo Nacional de Vivienda Popular (FONAVIPO), en el diseño de programas de vivienda social con

criterios de sostenibilidad. La identificación de materiales y partidas de mayor huella de carbono constituye un insumo clave para la formulación de guías técnicas, lineamientos de diseño y estrategias de reducción de emisiones, que fortalezcan la gestión pública y promuevan soluciones habitacionales ambientalmente responsables.

En el plano educativo, el estudio contribuye a la formación de profesionales de la ingeniería civil y áreas afines, al demostrar cómo la cuantificación de la huella de carbono puede integrarse a los procesos constructivos de manera práctica y verificable. La incorporación de metodologías de análisis como el uso de factores de emisión estandarizados (ICE v3.0), gráficos de Pareto y modelos de radar cualitativo, brinda a los estudiantes y docentes herramientas de enseñanza y aprendizaje orientadas a la sostenibilidad, ampliando la perspectiva tradicional de la construcción hacia un enfoque ambiental.

En conjunto, el aporte institucional y educativo radica en que esta investigación no solo amplía el conocimiento académico sobre la huella de carbono en la vivienda social, sino que también ofrece a las instituciones públicas y a la academia un marco de referencia práctico para fortalecer políticas habitacionales, formar profesionales más conscientes de su impacto ambiental y avanzar hacia una construcción sostenible en El Salvador.

4.9 MODELO APLICATIVO DE LA METODOLOGÍA EN UNA PARTIDA CONSTRUCTIVA

Con el fin de demostrar la aplicabilidad práctica de la metodología empleada, se presenta un ejemplo de cálculo en una partida constructiva representativa: muro de bloque de concreto de 15 cm de espesor. Esta partida fue seleccionada por su relevancia en ambos casos de estudio y por su peso dentro de la huella de carbono total.

➤ **Cuantificación de la partida**

A partir del levantamiento de cantidades, se registró un volumen de 93.60 m² de muros de bloque de concreto de 10 cm en el Caso B – Ciudad Marsella.

➤ **Factores de emisión aplicados**

Se emplearon los valores estandarizados de la base de datos ICE v3.0 para el bloque de concreto, expresados en kg CO₂e por kg de material. El bloque de 10 cm presenta un factor de emisión promedio de 0.12 kg CO₂e/kg, ajustado a la densidad y volumen utilizado.

➤ **Conversión de unidades**

A partir de la densidad del bloque (8.63 kg/unidad) y su equivalencia en superficie, se determinó el peso total asociado a los 93.60 m² levantados. Este procedimiento permitió transformar los datos de campo (m²) a unidades comparables con los factores de emisión (kg).

➤ **Resultado del cálculo**

La multiplicación de la cantidad total de material por el factor de emisión arrojó un subtotal de 1,211.65 kg CO₂e únicamente para esta partida. Este valor corresponde al 8.59% de las emisiones totales del Caso B, lo que confirma su importancia dentro del balance ambiental de la vivienda.

➤ **Interpretación técnica**

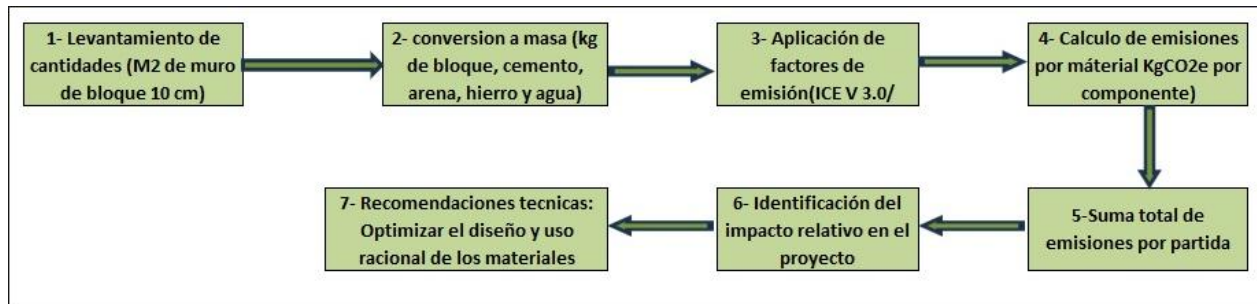
Este ejercicio evidencia cómo la metodología de análisis basada en el cruce entre cantidades de obra verificadas y factores de emisión estandarizados permite identificar con precisión el impacto de cada partida en la huella total. Al mismo tiempo, abre la posibilidad de evaluar alternativas de sustitución (como bloques de tierra-cemento o sistemas prefabricados livianos) para reducir la carga ambiental sin comprometer la estabilidad estructural.

En síntesis, el modelo aplicativo confirma que la metodología propuesta no solo es replicable, sino también adaptable a distintas partidas constructivas, constituyendo una herramienta

práctica tanto para la gestión de proyectos como para la docencia en ingeniería civil orientada a la sostenibilidad.

El siguiente diagrama sintetiza la metodología aplicada para la estimación de la huella de carbono en partidas constructivas, desde el levantamiento de cantidades hasta la formulación de recomendaciones técnicas. Este esquema refleja el carácter secuencial, verificable y replicable del proceso, integrando mediciones de obra, factores de emisión estandarizados (ICE v3.0) y análisis comparativos de impacto. Su aplicación no solo permite cuantificar las emisiones con precisión, sino también orientar decisiones de diseño, selección de materiales y gestión de proyectos hacia alternativas más sostenibles.

FIGURA 3 APLICACION PRACTICA DEL ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

5.1.1 Impacto del cemento y materiales de concreto.

Los resultados obtenidos en ambos casos de estudio (Villas de San Pedro y Ciudad Marsella) evidencian que el cemento y los bloques de concreto son los materiales con mayor contribución a la huella de carbono incorporada, superando el 50 % de las emisiones totales en cada unidad funcional. Esto confirma su papel como principal insumo crítico en la construcción de viviendas de interés social.

5.1.2 Diferencias territoriales y de diseño.

El análisis mostró contrastes significativos entre los contextos rurales y urbanos. En el Caso A (San Pedro Masahuat), las emisiones totales fueron de 7,274.33 kgCO₂e con una intensidad de 163.43 kgCO₂e/m², mientras que en el Caso B (Ciudad Marsella) ascendieron a 17,412.25 kgCO₂e con 275.29 kgCO₂e/m². Esto refleja que, aunque el entorno urbano presenta mejores condiciones de infraestructura y materiales más estandarizados, también concentra una mayor carga ambiental por metro cuadrado construido.

5.1.3 Partidas con mayor incidencia

Las partidas estructurales Cimentaciones, Muros y Cubiertas concentran más del 80 % de las emisiones en ambos casos, confirmando que los elementos portantes y de envolvente son los determinantes en el impacto ambiental de las viviendas de interés social.

5.1.4 Metodología aplicada

La aplicación de un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), bajo los lineamientos de la norma ISO 14040/44 y utilizando la base de datos ICE v3.0, permitió garantizar trazabilidad, replicabilidad y coherencia técnica en los resultados. La triangulación de fuentes (planos, catálogos, observación directa y entrevistas) aseguró la validez de los datos.

5.1.5 Relevancia para El Salvador

Este estudio representa un aporte entre los pocos que existen en El Salvador en la cuantificación de la huella de carbono en viviendas sociales salvadoreñas, consolidando una línea base aplicable a futuros programas de vivienda, ya sea de carácter público o privado.

5.2 RECOMENDACIONES

Con base en los resultados y conclusiones anteriores, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a distintos actores del sector construcción, tanto públicos como privados, así como también recomendaciones estratégicas con enfoque ambiental, las cuales se enuncian a continuación:

5.2.1 Optimización de materiales

Promover el uso racional del cemento y el bloque de concreto, priorizando alternativas de menor impacto como adiciones minerales, concretos de baja resistencia para elementos no estructurales o bloques con componentes reciclados.

5.2.2 Diseño eficiente y adaptado al contexto

Incorporar criterios de eficiencia en el diseño, evitando sobreconsumos de materiales y considerando soluciones pasivas que reduzcan la necesidad de elementos de alta huella de carbono.

5.2.3 Fortalecimiento institucional y normativo

Integrar la evaluación de huella de carbono en los lineamientos técnicos de instituciones como el MOP, el FSV etc. y en programas habitacionales, de forma que los proyectos futuros incluyan metas ambientales medibles.

5.2.4 Capacitación y sensibilización

Incluir en la formación académica y técnica de ingenieros y arquitectos salvadoreños contenidos específicos sobre la huella de carbono en la construcción, fomentando su aplicación en la práctica profesional.

5.2.5 Escalabilidad de la metodología

Aplicar el modelo de análisis desarrollado en esta investigación a otros tipos de vivienda y proyectos de mayor escala, con el fin de contar con una base comparativa amplia que permita orientar políticas públicas y decisiones de inversión hacia soluciones más sostenibles.

ANEXOS

ANEXO 1 -REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asamblea Legislativa de El Salvador. (1998). Ley de Medio Ambiente. Decreto N.º 233.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2023). Déficit habitacional en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades. <https://www.iadb.org>
- Circular Ecology. (2019). ICE Database V3 launched. <https://circularecology.com/news/ice-database-v3-launched>
- FONAVIPO. (2018). Informe de proyectos habitacionales ejecutados.
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). Inventory of Carbon & Energy (ICE), Version 2.0. University of Bath.
- International Organization for Standardization. (2006a). ISO 14040:2006: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization. (2006b). ISO 14044:2006: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. <https://marn.gob.sv>
- ONU-Hábitat. (2015). Perfil Urbano Nacional de El Salvador. <https://unhabitat.org>
- OPAMSS. (2020). Reglamento de Construcción para el Área Metropolitana de San Salvador.
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://sdgs.un.org/goals>

Anexo 1.1 Referencias Complementarias

- Contreras, P., & Muñoz, A. (2020). Evaluación comparativa de la huella de carbono en viviendas sociales: caso de estudio en Chile. *Revista de Construcción Sustentable*, 15(2), 34–49.
- Paravantis, J. A., Santamouris, M., & Economidou, M. (2021). Urban density and environmental impact: An international review. *Energy and Buildings*, 239, 110881.

- Orlando, G., Ramírez, F., & Paredes, J. (2020). Salud y vivienda: implicaciones del diseño urbano en el bienestar de los habitantes. *Revista Latinoamericana de Estudios Urbanos*, 14(1), 22–36.
- Brown, M. A., Southworth, F., & Sarzynski, A. (2009). *Shrinking the carbon footprint of metropolitan America*. Brookings Institution, Metropolitan Policy Program.
- CEPAL. (2022). *Vivienda y sostenibilidad en América Latina: avances y desafíos*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- <https://www.cepal.org/es/publicaciones>
- Circular Ecology. (2019). ICE Database V3 launched.
- <https://circularecology.com/news/ice-database-v3-launched>
- Fondo Nacional de Vivienda Popular. (2018). *Lineamientos técnicos de vivienda de interés social*. San Salvador: FONAVIPO.
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). *Inventory of Carbon & Energy (ICE), Version 2.0*. University of Bath. <https://www.circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>
- Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- International Organization for Standardization. (2006a). ISO 14040:2006 - *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization. (2006b). ISO 14044:2006 - *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). *Guía nacional de construcción sostenible y eficiencia energética*. San Salvador: MARN.
- Ministerio de Obras Públicas. (2003). *Normas Técnicas para Construcción de Viviendas de Interés Social*. San Salvador: MOP.

ANEXO 2 APENDICE

Anexo 2.1 Anexos Técnicos Complementarios

Los siguientes anexos han sido incluidos como material complementario al cuerpo principal del documento. Constituyen insumos técnicos, metodológicos o documentales que respaldan los resultados presentados en los capítulos centrales, sin duplicar información ya integrada mediante tablas o figuras referenciadas. Cada anexo ha sido ubicado y citado en el capítulo correspondiente.

Anexo 2.1.1 – Formularios de encuesta aplicados en el Caso A y B. (Capítulo 3, subsección cualitativa)

Formulario de encuesta en Villas de San Pedro

Estimado/a participante,

Gracias por participar en esta encuesta. El objetivo es evaluar el impacto en la huella de carbono durante la construcción del proyecto habitacional "Villas de San Pedro". Su participación es valiosa para mejorar la sostenibilidad de futuros proyectos.

Instrucciones:

Por favor, responda las siguientes preguntas. Sus respuestas serán confidenciales. **Sección Sección 1:**

Información General

1.1 ¿Cuál es su relación con el proyecto?

- a) Beneficiario de una Vivienda
- b) Personal del Viceministerio de Vivienda
- c) Representante del BCIE
- d) Otro (especifique): _____

1.2 ¿En qué etapa del proyecto participó o tuvo mayor contacto?

- a) Planificación
- b) Construcción
- c) Post- construcción

Sección 2: Materiales y Construcción

2.1 ¿Qué tipo de materiales principales se utilizaron en la construcción?

- a) Madera
- b) Metal
- c) Concreto
- d) Otros (especifique): _____

2.2 ¿Se tomaron medidas para reducir la huella de carbono en la elección de materiales?

- a) Sí ☐
- b) No ☐
- c) No ☐ sé

2.3 ¿Se utilizaron materiales reciclados o de bajo impacto ambiental?

- a) Sí ☐
- b) No ☐
- c) No sé ☐

Anexo 2.1.2 Resumen de Resultados de Encuestas – Caso A: Villas de San Pedro

Este documento presenta un resumen cuantitativo e interpretativo de los resultados obtenidos a partir de las encuestas aplicadas a los residentes del proyecto Villas de San Pedro. Las encuestas se enfocaron en conocer aspectos relacionados con la habitabilidad, materiales predominantes, acceso a servicios y disposición a implementar mejoras en sus viviendas.

TABLA 37 RESUMEN DE RESPUESTAS A ENCUESTAS CASO A

Pregunta	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	Opción E	Respuestas A	Respuestas B	Respuestas C	Respuestas D	Respuestas E
Relación con el proyecto	Beneficiario	Personal Viceministerio	Representante BCE	Otro		12	5	5	3	0
Etapas de participación	Planificación	Construcción	Post-construcción			8	11	6	0	0
Materiales utilizados	Madera	Metal	Concreto	Otros		4	7	10	4	0
Reducción de huella de carbono en materiales	Sí	No	No sé			15	6	4	0	0
Uso de materiales reciclados o de bajo impacto	Sí	No	No sé			13	8	4	0	0
Reducción de consumo de energía durante construcción	Sí	No	No sé			13	7	5	0	0
Uso de transporte sostenible	Sí	No				12	13	0	0	0
Gestión adecuada de residuos	Sí	No				17	8	0	0	0
Minimización de generación de residuos	Sí	No				15	10	0	0	0
Calificación del compromiso con reducción de huella de carbono	1 (Muy bajo)	2 (Bajo)	3 (Moderado)	4 (Alto)	5 (Muy alto)	2	2	5	10	6

Nota: Fuente Elaboración propia con base en encuestas aplicadas en Villas de San Pedro.

Resumen por categorías clave

- Todos los encuestados son beneficiarios directos de las viviendas asignadas por programas sociales.
- La mayoría reporta construcciones en etapa post-ocupación, con mejoras menores realizadas por iniciativa propia.

- El material predominante es el bloque de concreto con techos de lámina metálica.
- El acceso a energía eléctrica y agua potable es generalizado, pero el acceso a drenaje sanitario es limitado.
- Todos los encuestados conocen o han escuchado del concepto de eficiencia energética, aunque no del término 'huella de carbono'.
- La mayoría percibe condiciones térmicas calurosas dentro de su vivienda.
- Casi todos manifiestan estar dispuestos a mejorar sus viviendas si ello representa ahorro económico o energético.

Formulario de encuesta de caso B (Ciudad Marsella)

Número de encuesta: _____

Cantidad de personas en la vivienda: _____

1. ¿Conoce usted el término 'huella de carbono'?

Respuesta: _____

2. ¿Considera que su vivienda presenta condiciones térmicas adecuadas durante el día?

Respuesta: _____

3. ¿Con qué materiales considera que fue construida principalmente su vivienda?

Respuesta: _____

4. ¿Dispone de servicios básicos completos (agua potable, energía eléctrica, drenaje, recolección de basura)?

Respuesta: _____

5. ¿Ha realizado mejoras o modificaciones en su vivienda desde que fue entregada?

Respuesta: _____

6. ¿El diseño de su vivienda permite una buena ventilación natural?

Respuesta: _____

7. ¿Cuál es su medio de transporte habitual para desplazarse al trabajo o actividades diarias?

Respuesta: _____

8. ¿Estaría dispuesto a implementar mejoras que reduzcan el consumo de energía en su vivienda?

Respuesta: _____

9. ¿Con qué frecuencia realiza mantenimiento o limpieza del sistema de drenaje o recolección de aguas grises?

Respuesta: _____

10. ¿Cuál considera que es el principal beneficio ambiental que debería tener una vivienda social?

Respuesta: _____

Anexo 2.1.3 Resumen de Resultados de Encuestas – Caso B: Ciudad Marsella

El siguiente formulario fue diseñado para recopilar información directamente de los habitantes del proyecto habitacional Ciudad Marsella, con el objetivo de evaluar aspectos relacionados con habitabilidad, percepción ambiental, eficiencia energética y disposición a realizar mejoras sostenibles. Las respuestas permitirán complementar el análisis técnico de la huella de carbono incorporada desde una perspectiva social y de usuario final.

TABLA 38 RESUMEN DE RESPUESTAS A ENCUESTAS CASO B

Nº Encuesta	Personas en vivienda	¿Conoce el termino "Huella de carbono"?	¿Condiciona s térmicas adecuadas?	Material predominante	Servicios básicos completos	¿Mejoras realizadas?	¿Buena ventilación natural?	Medio de transporte	¿Dispuesto a mejorar vivienda?	Frecuencia de mantenimiento	Beneficio ambiental esperado
1	4	Sí	No	Bloque y cerámica	Sí	Sí	Sí	Vehículo	Sí	No lo realiza	Mejor calidad de aire
2	4	No	No	Bloque con techo metálico	Sí	No	No	Vehículo	Sí	Trimestral	Ahorro energético
3	3	No	No	Bloque con techo metálico	Sí	Sí	No	Vehículo	Sí	Trimestral	Reducción de residuos
4	5	No	Sí	Bloque y afinado	Sí	Sí	Sí	Motocicleta	Sí	Mensual	Reducción de residuos
5	4	Sí	No	Bloque y cerámica	Sí	No	No	Autobús	Sí	Trimestral	Mejor calidad de aire
6	3	Sí	Sí	Bloque y afinado	Sí	No	No	Motocicleta	Sí	No lo realiza	Mejor calidad de aire
7	3	No	Sí	Bloque con techo metálico	Sí	Sí	Sí	Motocicleta	Sí	Mensual	Ahorro energético
8	4	Sí	No	Bloque con techo metálico	Sí	Sí	Sí	Motocicleta	Sí	Mensual	Mejor calidad de aire

Nota: Fuente (Elaboración propia con base en encuestas aplicadas en Ciudad Marsella).

Anexo 2.1.4 – Resumen Analítico Comparativo de Resultados de Encuesta (Casos A y B)

Este anexo presenta un análisis comparativo entre los resultados obtenidos mediante encuestas aplicadas en el Caso A (Villas de San Pedro) y Caso B (Ciudad Marsella). La información se estructura por categorías clave, interpretando la relación entre variables sociales, constructivas y ambientales vinculadas a la huella de carbono en viviendas de interés social.

1. Composición demográfica

- Caso A: Tendencia a núcleos familiares mayores (>4 personas).
- Caso B: Promedio de 3.8 personas por vivienda.

Las viviendas del caso A tienden a alojar más personas por unidad, lo que influye en consumo y eficiencia.

2. Conocimiento ambiental

- Caso A: 15 de 25 (60%) conocen el término.
- Caso B: 4 de 8 (50%) lo conocen.

Mayor exposición institucional en el entorno rural podría explicar este contraste.

3. Materiales utilizados

- Caso A: Predominio de concreto, metal, madera.
- Caso B: Bloque con techo metálico, revestimientos en paredes y cerámica.

Ambos emplean materiales con carbono incorporado, aunque el Caso B presenta acabados más eficientes.

4. Servicios básicos

- Caso A: se observó el uso de letrinas.
- Caso B: 100% cuenta con agua, energía, manejo de residuos sólidos y drenaje.

La cobertura urbana favorece menores emisiones indirectas por infraestructura.

5. Mejoras realizadas

- Caso A: 15 encuestados realizaron mejoras.
- Caso B: 5 de 8 realizaron mejoras.

En el entorno villas de San Pedro se percibe mayor apropiación del espacio construido.

6. Ventilación natural

- Caso A: No especificado.
- Caso B: 4 de 8 afirman contar con buena ventilación.

El diseño urbano debe priorizar confort pasivo para reducir consumo energético.

7. Transporte

- Caso A: Uso equilibrado de transporte sostenible.
- Caso B: Mayor uso de motocicleta y vehículo.

Se identifica mayor huella indirecta por movilidad urbana.

8. Manejo de residuos

- Caso A: Alta autoevaluación positiva (17 dicen gestionar adecuadamente residuos).
- Caso B: 3 realizan mantenimiento mensual o trimestral, 2 no lo hacen.

Se requiere fortalecer prácticas sostenibles post-ocupación.

9. Compromiso con sostenibilidad

- Caso A: Alta autoevaluación (10 con calificación 4, 6 con 5).
- Caso B: Todos dispuestos a mejorar sus viviendas.

Existe alto potencial para intervenciones sostenibles si se provee asistencia técnica.

ANEXO 3 INFORMACIÓN PARA COMPLEMENTO

Anexo 3.1 – Ficha técnica de las unidades funcionales A y B.

Este anexo presenta la ficha técnica resumida de cada una de las unidades funcionales analizadas en los casos de estudio. Las fichas permiten identificar las características constructivas, dimensiones, materiales predominantes y condiciones del entorno consideradas para el análisis de huella de carbono.

Caso A – Unidad Funcional: Villas de San Pedro

- Ubicación: San Pedro Masahuat, La Paz (zona rural)
- Área construida: 36.0 m²
- Área de terreno: 60.0 m²
- Habitaciones: 2
- Materiales predominantes: Bloques de concreto, lámina galvanizada, concreto simple en pisos
- Cobertura de servicios: Agua potable parcial, energía eléctrica disponible, sin drenaje sanitario
- Infraestructura complementaria: Calle sin pavimentar, sin red de transporte directo
- Observaciones relevantes: Viviendas entregadas por programa social estatal, sin personalización o ampliación inicial

Caso B – Unidad Funcional: Ciudad Marsella

- Ubicación: San Juan Opico, La Libertad (zona urbana intermedia)
- Área construida: 63.25 m²
- Área de terreno: 77.0 m²
- Habitaciones: 2
- Materiales predominantes: Bloques de concreto, cerámica parcial, estructura metálica de techo
- Cobertura de servicios: Agua potable, energía eléctrica, drenaje sanitario y recolección de basura
- Infraestructura complementaria: Calle pavimentada, acceso a transporte público
- Observaciones relevantes: Algunas viviendas han sido modificadas por los habitantes con criterios particulares de mejora

Anexo 3.2 – Extracto técnico de la base ICE v3.0 utilizada en los cálculos. (Capítulo 2)

Este anexo presenta una ampliación del extracto técnico de la base de datos ICE v4.0 (2024), con los valores de carbono incorporado (kg CO₂e/kg) de los materiales utilizados en los casos de estudio Villas de San Pedro y Ciudad Marsella. En la tabla XX siguiente los datos reflejan los materiales más frecuentes en estructuras, cubiertas, acabados y redes sanitarias.

TABLA 39 VALORES DE CARBONO INCORPORADO (KG CO₂E/KG) DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LOS CASOS DE ESTUDIO VILLAS DE SAN PEDRO Y CIUDAD MARSELLA

Material	Carbono incorporado (kg CO₂e/kg)	Comentario técnico
Bloques de concreto	0.100	Elemento estructural predominante en muros de carga y cerramiento.
Concreto f _c =210 kg/cm ² (mezclado en obra)	0.100	Concreto convencional para zapatas, losas y vigas en sitio.
Concreto premezclado f _c =3000 psi	0.126	Valor medio reportado por ICE para hormigón de mayor resistencia industrial.
Lamina metálica galvanizada ondulada	2.270	Elemento de cubierta en viviendas tipo económica.
Cerámica para piso	0.980	Baldosa de uso común en viviendas con acabados intermedios.
Mortero de cemento	0.150	Para asentado de mampostería y repellos.
Pintura base agua	4.900	Valor representativo para pinturas de emulsión aplicadas interiormente.
Acero corrugado (varilla de refuerzo)	1.460	Valor típico para acero de refuerzo reciclado.
Estructura metálica (perfil liviano)	1.830	Utilizado en techos inclinados, cubiertas o ampliaciones urbanas.
PVC (tubería sanitaria)	2.000	Promedio de emisiones incorporadas en plásticos rígidos para infraestructura sanitaria.

Material	Carbono incorporado (kg CO ₂ e/kg)	Comentario técnico
Cemento Portland (a granel)	0.850	Material base para mortero y concreto; mayor contribuyente de CO ₂ por unidad de masa.
Arena lavada	0.005	Árido fino para mezclas de concreto y mortero.
Grava (agregado grueso)	0.007	Utilizada como agregado en mezclas estructurales.
Ladrillo artesanal cocido	0.213	Valor estimado para ladrillo tradicional en muros no portantes.

Fuente: ICE Database v3.0 (University of Bath, 2024). Valores adaptados al contexto de uso en El Salvador.

Anexo 3.3 – Extracto técnico de materiales seleccionados (ICE v3.0)

Este extracto técnico presenta los factores de emisión cradle-to-site (huella de carbono incorporada) de los materiales más representativos empleados en los casos de estudio A y B, calculados con base en la versión educativa de la base ICE v4.0.

TABLA 40 FACTORES DE EMISIÓN CRADLE-TO-SITE (HUELLA DE CARBONO INCORPORADA)

Material	Descripción general	Huella de carbono (kgCO ₂ e/kg)	Fuente ICE v3.0
Bloque de concreto	Bloques huecos utilizados en muros portantes	0.104	ICE v3.0
Concreto premezclado	Concreto 30 MPa, uso en fundaciones y pisos	0.134	ICE v3.0
Acero corrugado	Refuerzo estructural estándar	1.60	ICE v3.0
Lámina metálica	Cubierta de techo galvanizada	2.70	ICE v3.0
Madera blanda	Uso limitado en elementos temporales o cubiertas	-0.82	ICE v3.0
Pintura base agua	Usada en interiores	5.60	ICE v3.0
Cerámica	Usada en pisos y áreas húmedas	0.65	ICE v3.0
Cal hidráulica	Material alternativo al cemento (opcional)	0.06	ICE v3.0

Nota: Estos valores son promedios internacionales referenciales y pueden variar ligeramente dependiendo del proceso industrial y contexto local.

Anexo 3.4 Catálogo De Partidas Casos A Y B

CATALOGO DE PARTIDAS CASO A

Plan de oferta Proyecto Villas de San Pedro, Sn Pedro Masahuat			
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Obras Preliminares		
1.1	Trazo para construcción por unidad de área	M2	40.50
1.2	Descapote de 0.40 mt para construcción por unidad de área, incluye desalojo	M3	13.60
1.3	Restitucion de 0.30 nt con suelo del lugar, incluye nivelacion para construcción por unidad de area, incluye desalojo	M3	10.20
2	Excavaciones y compactaciones		
2.1	Excavacion para fundaciones	M3	5.46
2.2	Compactacion sobre fundaciones con material del lugar	M3	3.45
2.3	Desalojo de material sobrante	M3	2.61
3	Concreto Estructural		
3.1	Suministro y construccion de pilotes de diametro 30 cm Ref. 6 varillas #4,	ML	44.00
3.2	Suministro y construccion de vigas de fundacion VF-1	M3	2.01
4	Albañileria		
4.1	Paredes de bloque de concreto de 10 cm	M2	58.50
4.2	Solera intermedia SI + cargadero, bloque de concreto de 15 cm, 1#3	ML	54.20
4.3	Solera de coronamiento SC, bloque de concreto 15 cm	ML	30.00
4.4	Piso de mortero f'c=125 kg/cm2, e=5 cm. Incluye 10 cm de restitucion con	M2	36.32
4.5	Rpello 1:4 y afinado 1:1, de paredes en ducha h= 1.90	M2	6.08
5	Estructura metalica y cubierta de techo		
5.1	Polin C de 4" ch 14 con celosia de varilla de acero corrugado d=3/8 @	ML	41.55
5.2	Varilla de polin de acero corrugado de 3/8"	ML	13.65
5.3	Cubierta de techo de laminada acero con recubrimiento de aliaacion de	M2	44.51
6	Puertas y ventanas		
6.1	Puerta de lamina troquelada 1x2 mts	U	2.00
6.2	Puerta de lamina troquelada 0.85x1.95mts	U	1.00
6.3	Ventana de lamina troquelada 1x1	U	4.00
7	Instalaciones Electricas		
7.1	Luminarias fluorescentes completa	U	5.00
7.2	Toma corrientes doble	U	4.00
7.3	Caja termica completa, cuerpo terminal y conductor thhn No. 18	U	1.00
8	Instalaciones Hidraulicas		
8.1	Suministro e instalacion de sistema de agua potable de 1/2" x 160 psi para ducha y pila (incluye trazo y excavacion, compactacion y artefactos para ducha)	S.G.	1.00
8.2	Suministro e instalacion de tuberia de 4" y caja con parrilla para A LL	S.G.	1.00
8.3	Suministro e instalacion de ducha	S.G.	1.00
9	Obras miscelaneas y otros		
9.1	Division de fibrocemento de 8 mm con estructura de tubo industrial de 2x1 ch 21 y tubo estructural de 2x1 ch 14	M2	20.09
	IMPORTE TOTAL DEL PRESUPUESTO		

CATALOGO DE PARTIDAS CASO B

CONSTRUCCION DE VIVIENDA CIUDAD MARSELLA, SAN JUAN OPICO

Actividad	Unidad	Cantidad Estimada
Obras Preliminares		
Trazo para construcción por unidad de área	m2	77.00
Descapote de 0.40 m, incluye desalojo	m3	23.10
Relleno con suelo cemento al 5%, incluye nivelación	m3	11.55
Excavaciones y compactaciones		
Excavación para fundaciones	m3	7.70
Compactación sobre fundaciones	m3	7.70
Concreto estructural		
Firme de concreto (espesor 10 cm)	m3	7.70
Solera de fundación (viga de amarre)	ml	39.00
Solera intermedia	ml	54.00
Solera de coronamiento	ml	39.00
Cargaderos sobre vanos	ml	6.00
Contrafuertes	U	8.00
Albañilería		
Muros de bloque (altura 2.4 m)	m2	93.60
Repello y afinado interior y exterior	m2	187.20
Piso cerámico	m2	77.00
Estructura metálica y cubierta		
Cubierta de lámina zinc-alum	m2	77.00
Polín Z para estructura de techo	ml	39.00
Puertas y ventanas		
Puertas metálicas	U	2.00
Ventanas metálicas	U	4.00
Acabados		
Pintura en muros interiores y exteriores	m2	187.20
Instalaciones eléctricas		
Luminarias fluorescentes completas	U	5.00
Tomacorrientes dobles	U	4.00
Caja térmica, conductor THHN #18	U	1.00
Instalaciones hidráulicas		
Sistema de agua potable (1/2")	S.G.	1.00
Tubería de 4" para aguas lluvias	S.G.	1.00
Instalación de ducha	S.G.	1.00

Anexo 4. EQUIVALENCIAS DE CALIBRES Y ESPESORES EN METALES

Para realizar los cálculos de la página 58 “Lámina de acero aluminizado cal. 26” de este trabajo de investigación y en los casos donde sea necesario trabajar con láminas metálicas se hará uso de la tabla 40 que se muestra a continuación.

TABLA 41 TABLA DE EQUIVALENCIAS DE CALIBRES Y ESPESORES DE METALES

Calibre	Acero estándar (in)	Acero estándar (mm)	Acero galvanizado (in)	Acero galvanizado (mm)	Acero inoxidable (in)	Acero inoxidable (mm)	Aluminio (in)	Aluminio (mm)	Latón (in)	Latón (mm)	Cobre (in)	Cobre (mm)
7	0.179	4.554	0.18	4.572	0.188	4.763	0.144	3.665	0.144	3.665	0.18	4.572
8	0.164	4.176	0.168	4.27	0.172	4.366	0.129	3.264	0.129	3.264	0.165	4.191
9	0.15	3.797	0.153	3.891	0.156	3.967	0.114	2.906	0.114	2.906	0.148	3.759
10	0.135	3.416	0.138	3.51	0.141	3.571	0.102	2.588	0.102	2.588	0.134	3.404
11	0.12	3.038	0.123	3.132	0.125	3.175	0.091	2.304	0.091	2.305	0.12	3.048
12	0.105	2.657	0.108	2.753	0.109	2.779	0.081	2.052	0.081	2.053	0.109	2.769
14	0.075	1.897	0.079	1.994	0.078	1.984	0.064	1.628	0.064	1.628	0.083	2.108
16	0.06	1.519	0.064	1.613	0.063	1.588	0.051	1.29	0.051	1.291	0.065	1.651
18	0.048	1.214	0.052	1.311	0.05	1.27	0.04	1.024	0.04	1.024	0.049	1.245
20	0.036	0.912	0.04	1.006	0.038	0.953	0.032	0.813	0.032	0.812	0.035	0.889
22	0.03	0.759	0.034	0.853	0.031	0.792	0.025	0.643	0.025	0.644	0.028	0.711
24	0.024	0.607	0.028	0.701	0.025	0.635	0.02	0.511	0.02	0.511	0.022	0.559
26	0.018	0.455	0.022	0.551	0.019	0.475	0.017	0.404	0.016	0.405	0.018	0.457
28	0.015	0.378	0.019	0.475	0.016	0.396	0.013	0.32	0.013	0.321	0.014	0.356
30	0.012	0.305	0.016	0.399	0.013	0.318	0.01	0.254	0.01	0.255	0.012	0.305

Fuente: <https://xometry.pro/es/articulos/normas-de-espesor-de-chapa-y-tablas-de-calibres>

Para ilustrar el uso de la tabla de equivalencias, se considera una lámina de zinc-aluminio calibre 22 que cubre un área de 45 m². El objetivo es determinar su volumen en metros cúbicos y, a partir de ello, estimar su peso.

De acuerdo con la tabla de calibres, el espesor correspondiente al calibre 22 para aluminio-zinc es de 0.64 mm, equivalente a 0.00064 m. El volumen se obtiene multiplicando el área por el espesor:

$$V = A \times e = 45 \text{ m}^2 \times 0.00064 \text{ m} = 0.0288$$

Por lo tanto, el volumen de la lámina es de 0.0288 m³.

Si además se requiere el peso aproximado, basta multiplicar el volumen por la densidad del material. En el caso del zinc-aluminio, se adopta una densidad de 7,200 kg/m³ según la base de datos ICE v3.0: $\text{Peso} = V \times \rho$

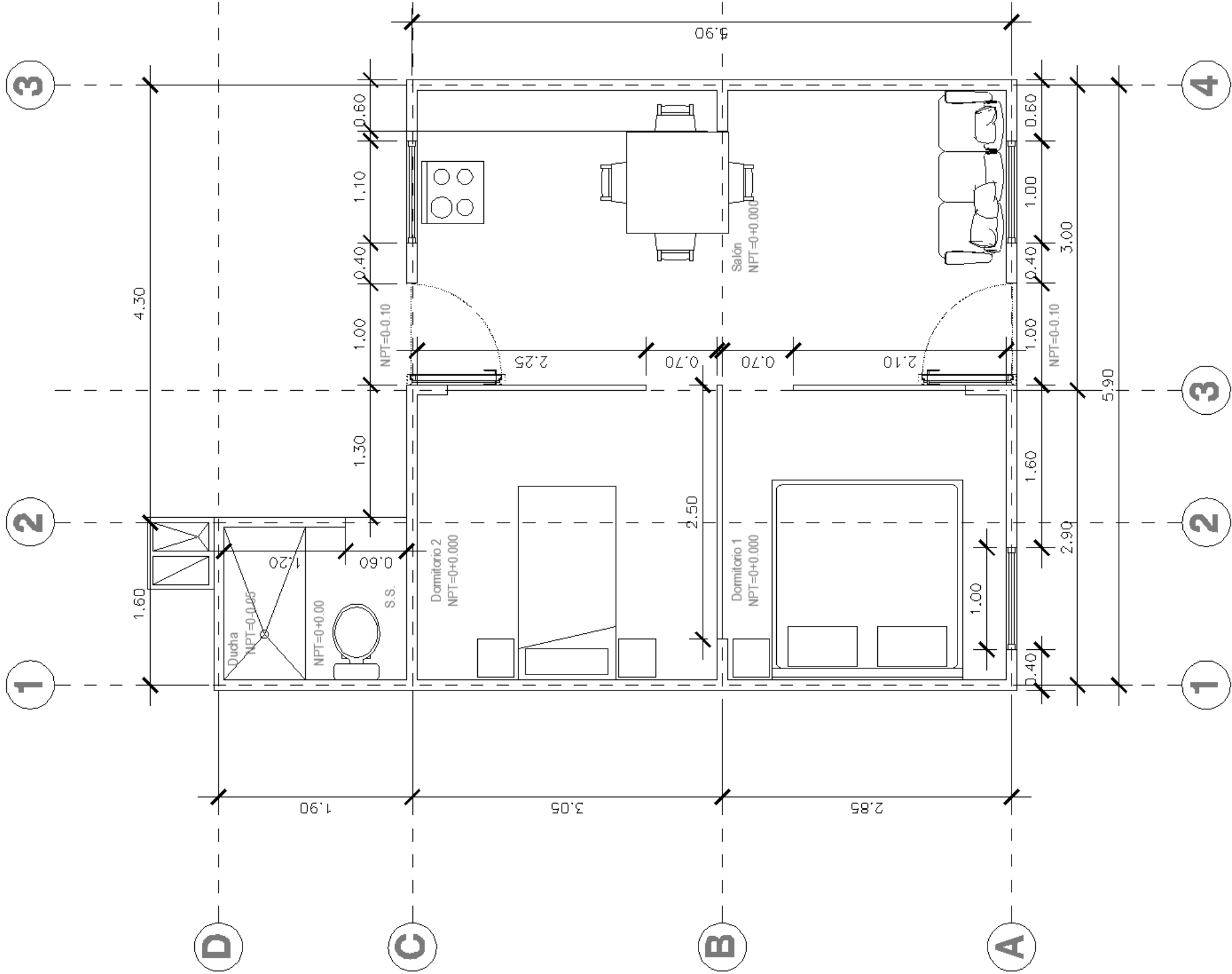
$$\text{Peso} = 0.0288 \text{ m}^3 \times 7,200 \text{ kg/m}^3 = 207.36 \text{ kg}$$

De esta forma, una lámina de zinc-aluminio calibre 22 con un área de 45 m² tiene un volumen de 0.0288 m³ y un peso aproximado de 207 kg.

Anexo 5 PLANOS VILLAS DE SAN PEDRO:

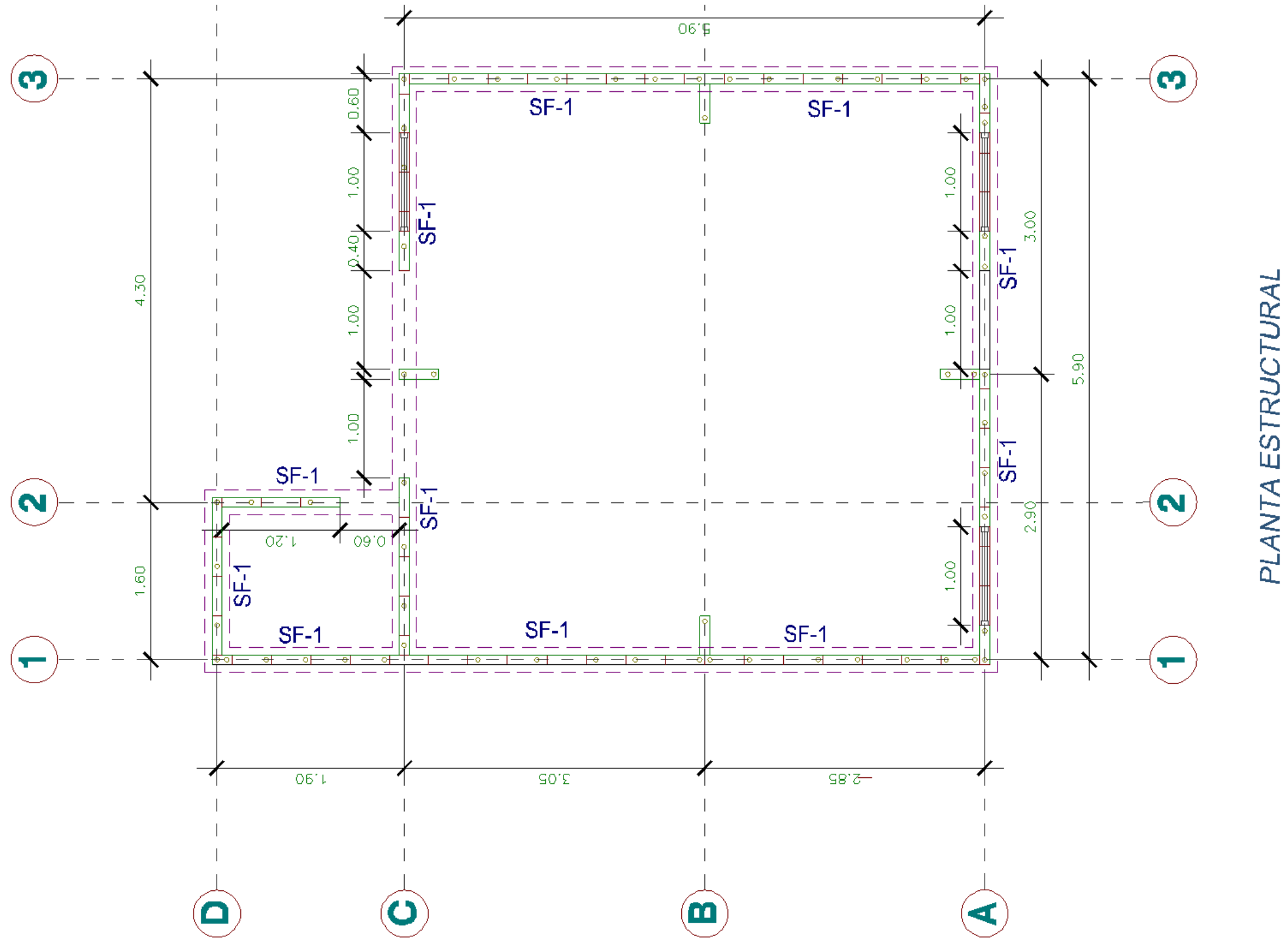
A continuación, se presentan los planos de las viviendas de interés social en Villas de San Pedro en San Pedro Masahuat con los que se han construido dichas viviendas.

Anexo 5.1 Planta Arquitectónica

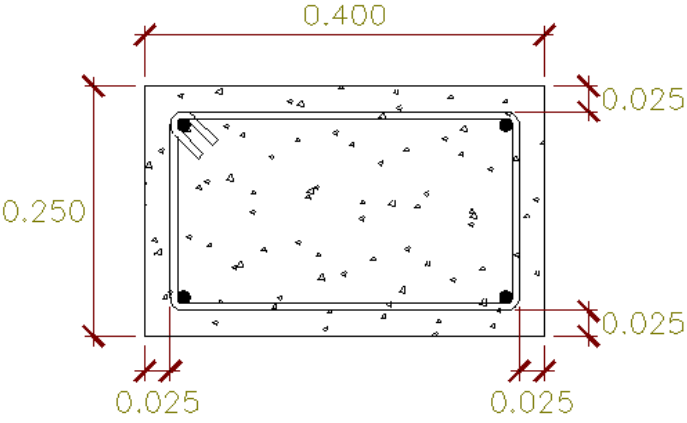


PLANTA ARQUITECTONICA

Anexo 5.2 Planta Estructural de Fundaciones y Modulaci3n

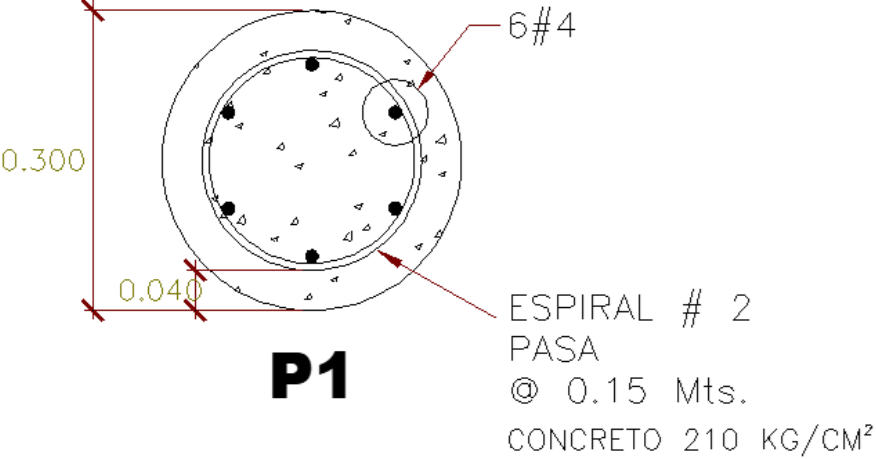


Anexo 5.3 Detalles de Fundaciones



● 4#4 Y
ESTRIBO #2 @0.15 Mts.
CONCRETO 210 KG/CM²

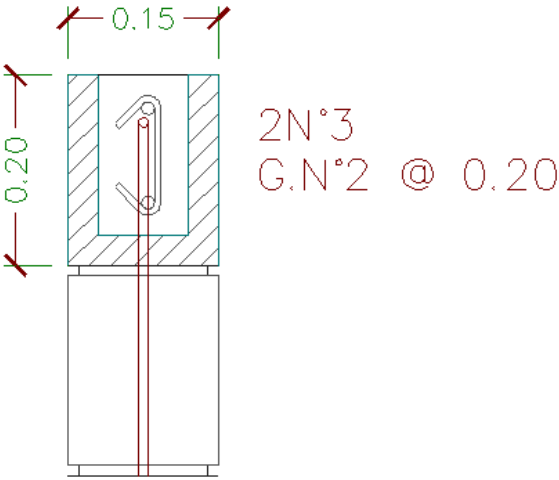
VF-1



P1

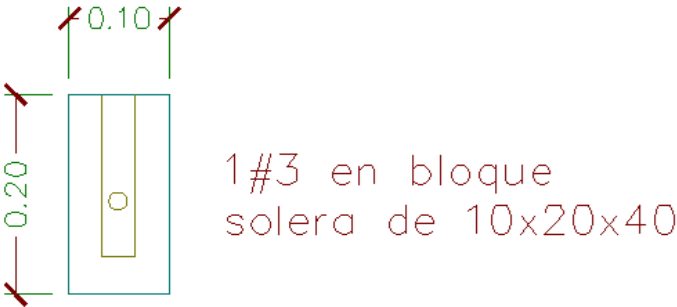
6#4
ESPIRAL # 2
PASA
@ 0.15 Mts.
CONCRETO 210 KG/CM²

DETALLE DE PILOTE



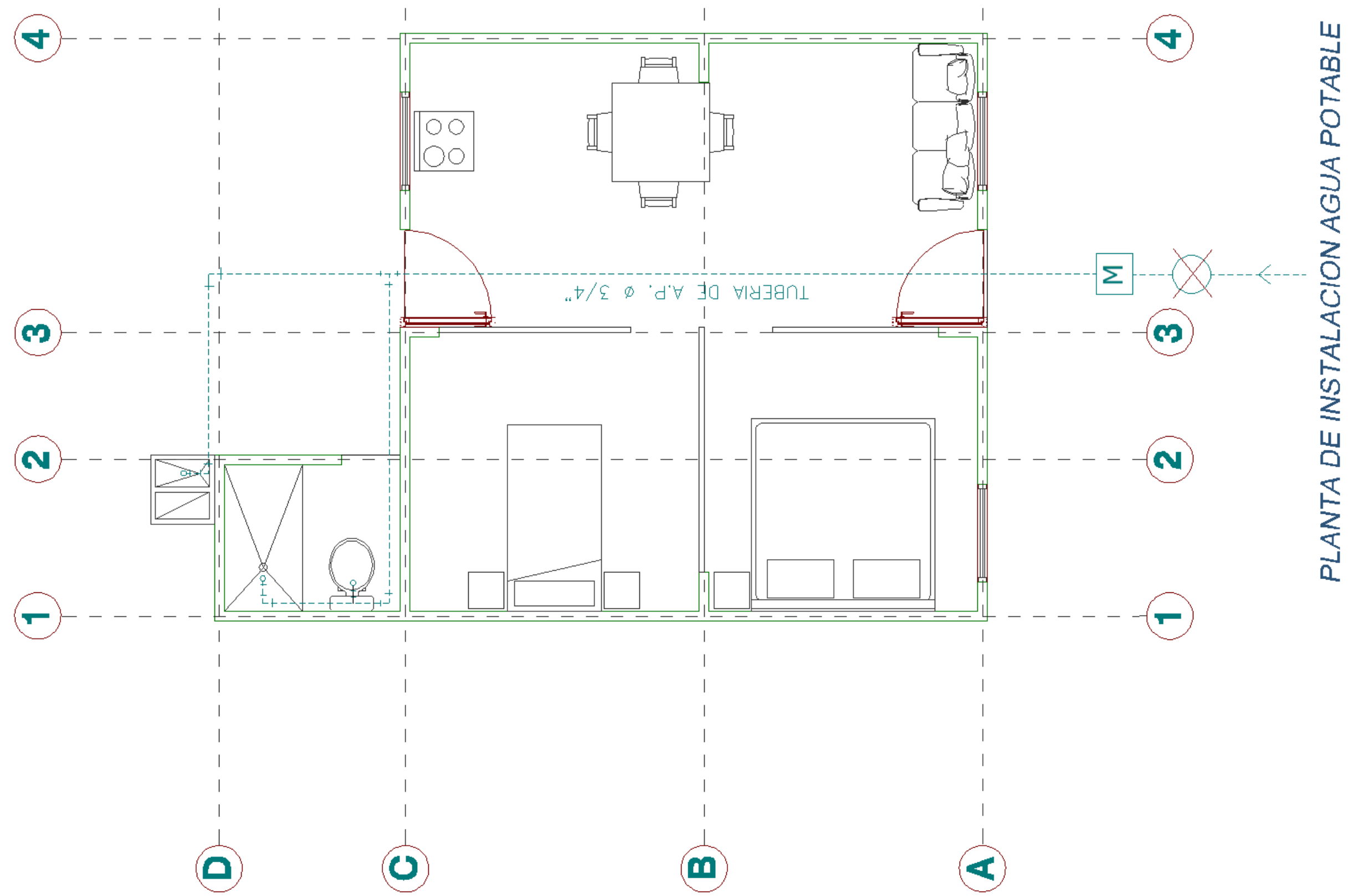
SC-1

Mo-1



SC-2

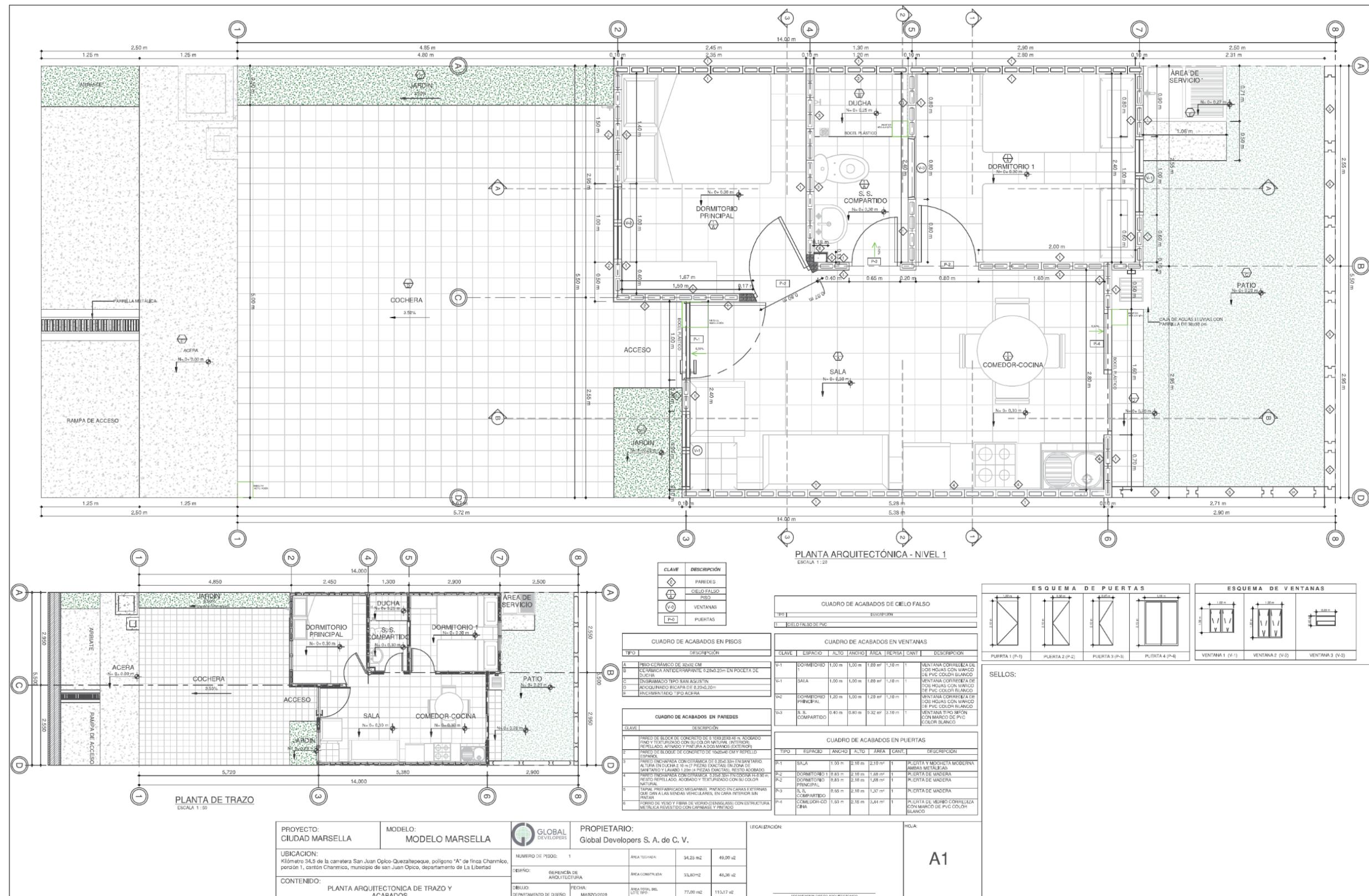
Anexo 5.4 Planta de Instalación de Agua Potable



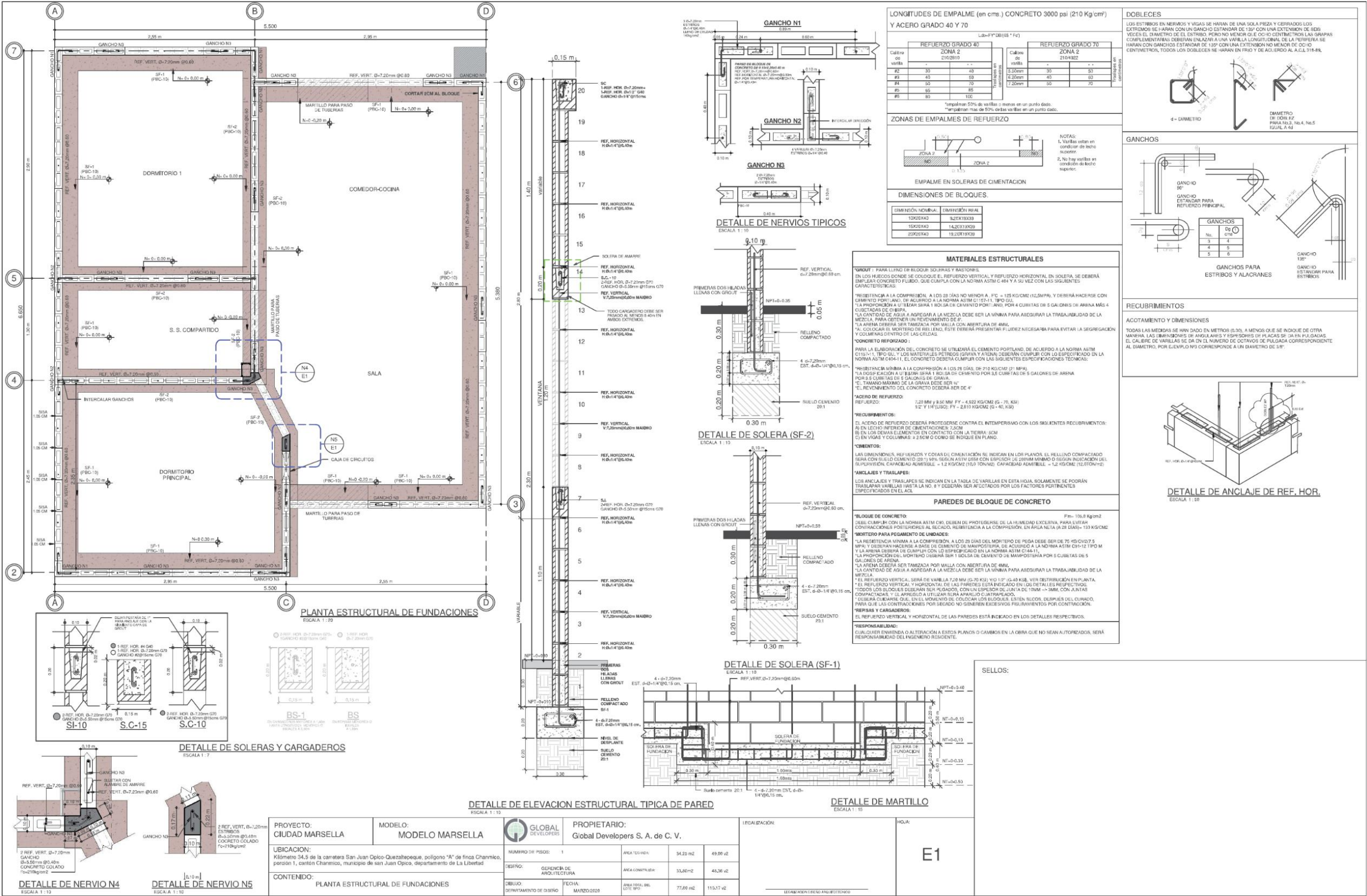
Anexo 6 PLANOS CIUDAD MARSELLA:

A continuación, se presentan los planos de ciudad Marsella con los que se han construido dichas viviendas de interés social en un polígono (A)

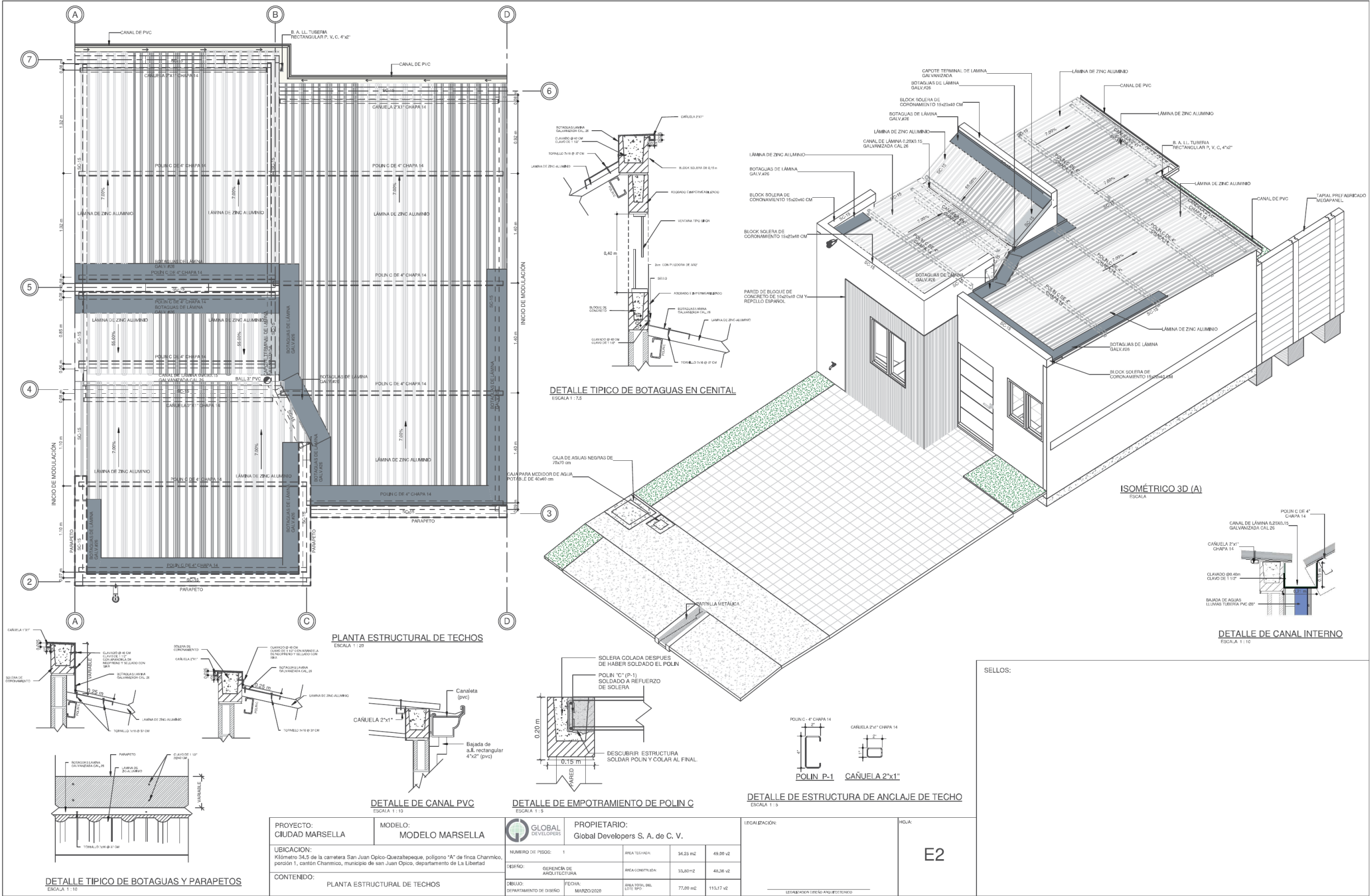
Anexo 6.1 Planta Arquitectónica



Anexo 6.2 Planta Estructural de Fundaciones



Anexo 6.3 Planta de acabados



Anexo 7 REGISTRO FOTOGRÁFICO DE VISITAS TÉCNICAS

Este anexo presenta evidencia fotográfica recolectada durante las visitas técnicas a los sitios correspondientes a los estudios de caso A y B. Cada imagen se acompaña de una descripción técnica breve que contextualiza su relevancia para la investigación, las cuales se pueden apreciar a continuación.

Anexo 7.1 Registro fotográfico Villas de San Juan



Fotografía 1

Descripción técnica: En la fotografía se muestra la fachada de las viviendas de interés social en Villas de San Pedro



Fotografía 2

Descripción técnica: Las viviendas no cuentan con una adecuada urbanización lo que hace que las condiciones de vida sean limitadas, no se tienen buenos sistemas drenaje de aguas lluvias, las calles son de tierra



Fotografía 3

Descripción técnica:

Estado de las calles en todo el proyecto residencial, calles de tierra con canaletas de aguas lluvias, no cuentan con sistema de aguas negras, utilizan letrinas aboneras, todas las aguas grises son tiradas a las cunetas.



Fotografía 4

Descripción técnica:

Los residentes debido a su bajo nivel de ingresos no han remodelado sus viviendas, por lo que la mayoría mantienen sus viviendas tal como las recibieron



Fotografía 5

Descripción técnica:

Registro y respaldo de la visita de campo de nuestra parte al proyecto residencial Villas de San Pedro

Anexo 7.2 Registro Fotográfico Ciudad Marsella



Fotografía 1

Descripción técnica:

Podemos ver la fachada y la cochera, el tipo de ventanas, acabados, los cuales reflejan que las casas de ciudad Marsella son con mejores acabados y más finos respecto a otras colonias



Fotografía 2

Descripción técnica:

Las cocheras de las casas de ciudad Marsella cuentan con espacio para 2 vehículos, ya que la mayoría de las personas que habitan aquí tienen posibilidad de tener 2 o inclusive 3 vehículos



Fotografía 3

Descripción técnica:

Ciudad Marsella está dividido por Quartier, para el ingreso a cada uno de ellos, se cuenta con caseta de vigilancia, lo que la hace una residencial de interés social con acceso exclusivo.



Fotografía 4

Descripción técnica:

A diferencia del caso en estudio A, ciudad Marsella cuenta con drenajes de aguas negras y agua lluvia, jardines, aceras y arriates, lo que hace tener más comodidad con los servicios básicos como también un buen servicio de recolección de desechos sólidos.



Fotografía 5

Descripción técnica:

Realizando encuesta a habitante de
ciudad Marsella, polígono “A”



Fotografía 6

Descripción técnica:

Realizando encuesta a habitante de
Ciudad Marsella