

## Sostenibilidad y Resiliencia en Estructuras

Francisco José Luna Rodríguez<sup>1</sup>, Julio Cesar Leal Vaca<sup>2</sup>, Braulio Saul Hernández Guillen<sup>3</sup>, Juan Manuel Ramirez Gutiérrez<sup>3</sup>, Edgar Iván Guzman Olmos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato [luna.fj@ugto.mx](mailto:luna.fj@ugto.mx)<sup>1</sup>

<sup>2</sup>Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato [julio.leal@ugto.mx](mailto:julio.leal@ugto.mx)<sup>2</sup>

<sup>3</sup>Estudiante del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato

### Resumen

El presente trabajo es una recopilación de información respecto a la sostenibilidad y resiliencia enfocada a estructuras. Como primer acercamiento se determinan los puntos clave que deben cumplir nuestras estructuras para poder ser consideradas sostenibles y resilientes llegando a los conceptos de ecodiseño y las emisiones de dióxido de carbono a nuestra atmósfera. Debido a lo amplio del tema el trabajo se enfoca al análisis de emisiones de carbono de cuatro sistemas de losas de concreto, lo anterior sentando las bases para determinar las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas respecto al tema de sostenibilidad.

**Palabras clave:** Sostenibilidad; Resiliencia, Estructuras.

### Introducción

#### Estructura

En la ingeniería civil, una estructura se puede definirse como un conjunto de elementos interrelacionados, diseñados e implementados con el fin específico de alcanzar un objetivo constructivo. Estas estructuras pueden variar en complejidad, desde algo simple como una viga hasta construcciones más complejas como rascacielos o puentes. Así, una estructura puede adoptar diversas formas y sistemas como, por ejemplo, sistemas de losas, muros, columnas y vigas, entre otros.<sup>1</sup>

#### Sostenibilidad en Estructuras

Generalmente cuando se habla de sostenibilidad se hace referencia al impacto que tienen las diversas acciones humanas en relación con el medio ambiente, la sociedad y la economía, y cómo es que ciertas prácticas pueden continuar llevándose sin afectar los recursos del entorno con los que se disponen para las generaciones futuras. Ahora bien, en diversas fuentes o publicaciones, como las que se desarrollan por parte del Banco Interamericano de Desarrollo, la ONU, entre otros, se menciona una “Sostenibilidad en Infraestructuras” logrando vislumbrar así una interpretación orientada en cuanto a la ingeniería civil se refiere. A pesar de ello, no resulta obvio qué es la sostenibilidad en estructuras. Derivado entonces de la interpretación antes mencionada sobre lo que implica en sí la sostenibilidad, podemos inferir que la **sostenibilidad en estructuras se refiere a la integración de estrategias para mitigar los impactos negativos ambientales, sociales y económicos en la construcción de sistemas estructurales**. Esto implica la implementación de consideraciones ambientales en el diseño y desarrollo de dichos sistemas con el fin de minimizar los efectos adversos a lo largo del ciclo de vida de un proyecto (ecodiseño), enfatizando la eficiencia energética, la reducción de residuos, el uso de materiales reciclables y renovables, y la

implementación de tecnologías innovadoras para mejorar la resiliencia y durabilidad de las construcciones, promoviendo así un desarrollo sostenible.

### Resiliencia en Estructuras

Ambientalmente la resiliencia es un primer actor frente a las acciones que llevan a la sostenibilidad del entorno. Tomando como referencia a (Juan & Ayala Milán, 2022), el término resiliencia hace referencia a la habilidad de un sistema estructural para adaptarse y mitigar los efectos inesperados provocados por perturbaciones externas, logrando restablecer su estado de operación previo, o incluso mejorarlo, en el menor lapso de tiempo factible.

Cabe señalar que la sostenibilidad y la resiliencia ligados a estructuras se pueden llegar a considerar como conceptos esencialmente asociados; esto con el fin de lograr una mejor respuesta de las estructuras que, para este caso, brinden un mejor servicio en cuanto a su uso en procesos constructivos.

### Panorama actual en México respecto a Sostenibilidad y Resiliencia

En México la implementación del diseño estructural sostenible y resiliente es un tema que, si bien se está incorporando cada vez más, aún existen áreas de oportunidad donde se pueden llevar a cabo acciones que mejoren la implementación de estas prácticas. El gobierno mexicano y la industria constructora no han aprovechado al máximo los beneficios que traen consigo estas tendencias y el potencial que tiene para reducir la huella de carbono que la industria de la construcción genera año con año.

El escaso avance en el tema de la sostenibilidad en México es algo que provoca incertidumbre hacia el futuro, puesto que hoy en día México enfrenta un alto aumento en las temperaturas promedio, olas de calor y una crisis hídrica que no tiene antecedentes.

El Centro de Investigación Conjunta de la Comisión Europea informó que las emisiones crecieron un 19% entre los años 2021 y 2022, algo que se puede contrarrestar implementando prácticas sostenibles de diseño ya que según el Consejo Mundial de Edificaciones Verdes (WGBC) los edificios sostenibles reducen hasta un 30% la emisión de gases contaminantes.

En tenor de lo anterior, en México existen normas que regulan y promueven la construcción sostenible como es el caso de la Norma Mexicana de Edificación Sustentable (NMX- S-17025-1-IMNC-2019) la cual establece los requisitos a evaluar para mejorar y determinar el desempeño ambiental de los edificios. Por otro lado, también existen certificaciones internacionales que promueven las prácticas sustentables de diseño como lo es la certificación LEED, que en México su implementación está cada vez más presente, aunque aún existen retos por vencer para que los edificios logren obtener este grado de certificación y por ende puedan considerarse sostenibles.

## Ecodiseño en Estructuras

El ecodiseño es una metodología que integra consideraciones ambientales en la concepción y desarrollo de productos, con el objetivo de mejorar su calidad y reducir los costes de fabricación. Esta metodología se basa en analizar las etapas del ciclo de vida del producto, desde la obtención de materias primas y componentes, pasando por su producción, distribución y uso, hasta su eventual eliminación y reciclaje.

### Líneas de acción o evaluación del ecodiseño en la construcción

El ecodiseño representa una oportunidad significativa para el sector de la construcción. A continuación, se presentan enfoques prácticos para evaluar o establecer directrices de ecodiseño en este sector, basándose en las normas ISO-14040 y 14044, conforme a lo establecido por ECOSIGN Project, y la norma ISO-14006 y sus variantes:

- A. **Análisis de Ciclo de Vida (ACV):** El ACV es una herramienta esencial para identificar las fases críticas en la vida de una construcción donde se pueden implementar mejoras ecológicas. Este análisis abarca desde la extracción de materiales, producción, uso, hasta la disposición final. Mediante el ACV, es posible cuantificar los impactos ambientales asociados a cada etapa, lo que permite a los ingenieros tomar decisiones informadas para reducir el impacto ambiental global.
- B. **Selección de Materiales:** La selección de materiales es un componente crítico del ecodiseño. Utilizar materiales reciclados y recursos renovables contribuye significativamente a reducir la huella de carbono de las estructuras y a fomentar la economía circular en la construcción. Además, se deben considerar materiales que sean duraderos, no tóxicos y que requieran un mínimo mantenimiento. El uso de materiales locales también puede reducir las emisiones de carbono relacionadas con el transporte.
- C. **Optimización de Procesos:** La implementación de técnicas de construcción avanzadas puede reducir considerablemente el consumo de energía y la generación de residuos. Esto incluye la adopción de tecnologías de construcción modular, técnicas de prefabricación y el uso de maquinaria eficiente. Además, la gestión adecuada de los residuos de construcción y demolición es crucial para minimizar el impacto ambiental. La optimización de los procesos constructivos también puede involucrar el uso de software de modelado de información de construcción (BIM) para mejorar la eficiencia y coordinación en todas las etapas del proyecto.
- D. **Ecodiseño Integrado:** El ecodiseño integrado implica una colaboración multidisciplinaria que abarca a arquitectos, ingenieros, urbanistas y otros profesionales, con el objetivo de incorporar criterios ambientales en todas las etapas del diseño y construcción de estructuras. Esta colaboración asegura que los principios de sostenibilidad se consideren de manera holística, desde el diseño conceptual hasta la construcción y el mantenimiento. Además, la integración de tecnologías inteligentes y sistemas de gestión ambiental en los edificios puede mejorar la eficiencia energética y la calidad ambiental interior.

La adopción de directrices de ecodiseño en el desarrollo y ejecución de proyectos constructivos ofrece múltiples beneficios. A continuación, se destacan algunos de ellos:

- 1. **Sostenibilidad Ambiental:** El ecodiseño contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental al reducir la explotación de recursos naturales y minimizar la generación de residuos y emisiones contaminantes. Esto se logra a través de una cuidadosa selección de materiales y técnicas de construcción que priorizan el menor impacto ambiental posible.
- 2. **Eficiencia Energética:** Las edificaciones diseñadas bajo principios de ecodiseño suelen ser altamente eficientes en términos energéticos. Esto se traduce en una reducción del consumo de energía y los costos operativos asociados, además de una menor huella de carbono. El diseño puede incluir el uso de fuentes de energía renovable, sistemas de aislamiento térmico avanzados y tecnologías de gestión energética inteligentes.
- 3. **Economía Circular:** El ecodiseño promueve la economía circular mediante el uso de materiales reciclados y reciclables, lo que disminuye la dependencia de materias primas vírgenes y reduce la cantidad de residuos generados. Este enfoque no solo es beneficioso para el medio ambiente, sino que también puede ser económicamente ventajoso a largo plazo.
- 4. **Salud y Bienestar:** Uno de los objetivos del ecodiseño es crear ambientes interiores saludables, mejorando la calidad de vida de los ocupantes. Esto se logra mediante el uso de materiales no tóxicos, la maximización de la luz natural y una adecuada ventilación. Estos factores no solo mejoran el confort, sino que también pueden aumentar la productividad y bienestar general de las personas.
- 5. **Resiliencia:** Las estructuras diseñadas bajo principios de ecodiseño son más resilientes ante eventos climáticos extremos y cambios ambientales. Incorporan elementos como la gestión eficiente del agua y la energía, lo que las hace más robustas y adaptables. Estas características son cruciales en un contexto de cambio climático y eventos naturales cada vez más severos.
- 6. **Valor a Largo Plazo:** Las edificaciones sostenibles y resilientes suelen tener una mayor valorización a largo plazo. No solo en términos económicos, sino también en cuanto a funcionalidad y habitabilidad.

Estas estructuras pueden ofrecer un retorno de inversión más alto debido a sus menores costos operativos y su capacidad de adaptación a futuras necesidades y condiciones ambientales.

### Implementación del Ecodiseño en Estructuras

Para implementar eficazmente el ecodiseño en la construcción de estructuras o sistemas estructurales, habrá de ser necesario seguir ciertos criterios y prácticas específicas:

- **Diseño para la Durabilidad:** Las estructuras deben ser diseñadas para perdurar, resistiendo el paso del tiempo y minimizando la necesidad de reparaciones frecuentes. Esto implica la selección de materiales y técnicas constructivas que aseguren una larga vida útil.
- **Diseño para el Desmontaje:** Es esencial considerar la facilidad de desmontaje y reciclaje de los componentes de la estructura al final de su vida útil. Esto facilita la reutilización de materiales y reduce la cantidad de residuos generados.
- **Mantenimiento Eficiente:** El diseño debe permitir un mantenimiento fácil y económico, garantizando que la estructura pueda mantenerse en óptimas condiciones con el mínimo impacto ambiental.
- **Multiusos y Adaptabilidad:** Las estructuras deben ser diseñadas para ser multiusos y adaptables a diferentes funciones y necesidades a lo largo del tiempo. Esto aumenta su utilidad y valor a largo plazo.
- **No Contaminantes:** Tanto en su proceso productivo como en su uso y eliminación, las estructuras deben ser no contaminantes. Esto incluye la selección de materiales y procesos que minimicen las emisiones de contaminantes y residuos.

## Sostenibilidad, Cambio Climático y Resiliencia Estructural

La constante búsqueda de mejores condiciones de vida impulsa un desarrollo continuo en nuestro entorno construido. Según Nigel Topping y el Dr. Mahmoud Mohieldin, se espera un crecimiento poblacional mundial en las ciudades para el año 2060, según una publicación a través de World Green Building Council. Además del cambio climático actual, el envejecimiento de la infraestructura y la falta de inversión resulta importante considerar la implementación de sistemas estructurales resilientes. Estos sistemas habrán de ser capaces de incorporar estrategias que permitan la adaptación y/o mitigación de los problemas futuros. De manera que la construcción basada en sistemas estructurales resilientes asegurará su capacidad para resistir fenómenos meteorológicos externos provocados por el cambio climático. Ahora bien, es crucial integrar sistemas estructurales resilientes no solo en nuevos proyectos, sino también en estructuras existentes, con el objetivo de reducir la probabilidad de que fenómenos climáticos, tanto graduales como extremos, tengan un impacto negativo en la sociedad y en la edificación a nivel local, regional y/o nacional.

### Líneas de Acción o Evaluación de la Resiliencia en Estructuras

El diseño de sistemas estructurales se ha de basar en parámetros técnicos que, bajo condiciones ambientales normales, garanticen la seguridad y la eficiencia económica. Sin embargo, frente a fenómenos extremos y repentinos derivados del cambio climático, es imposible mantener estas condiciones de seguridad en el diseño estructural sin comprometer su economía. Dado que no podemos enfrentar directamente los efectos del cambio climático, **las estructuras resilientes deben ser aquellos sistemas que proporcionen a la infraestructura procesos eficientes de recuperación y restauración después de sufrir daños.** Para lograrlo, se puede:

- a. Establecer normas y directrices de construcción de sistemas estructurales mediante la implementación de procesos constructivos y de diseño que hagan frente a condiciones climáticas extremas.
- b. Invertir en el mantenimiento y mejora de sistemas estructurales existentes con el fin de prevenir daños de pequeña y mediana escala.

- c. Brindar orientación para la renovación e innovación de sistemas estructurales de edificios existentes con el fin de alentar a la población a realizar cambios asequibles en sus propiedades.
- d. Construir rutas rápidas de respuesta a la cadena de suministro de sistemas estructurales en situaciones de emergencia.
- e. Evaluar el riesgo de la vida útil de los sistemas estructurales en relación con el cambio climático.
- f. Seleccionar materiales adecuados para la creación de sistemas estructurales en relación con la idoneidad de su uso bajo condiciones climáticas probables a futuro.
- g. Diseñar los sistemas estructurales para la durabilidad, el desmontaje y el mantenimiento, tomando en consideración que estos sean resilientes frente a inundaciones, tormentas, olas de calor, sismos, entre otros fenómenos asociados al cambio climático.
- h. Reducir el impacto ambiental de la creación de sistemas estructurales a la vez que se amplía su eficiencia.

### Herramientas y Certificaciones para la Resiliencia

La certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) es una herramienta fundamental para evaluar y promover la sostenibilidad y resiliencia en la construcción. LEED se enfoca en reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorar la eficiencia en el uso de recursos, abordando el impacto ambiental de los edificios. A continuación, se presentan estándares en relación con la certificación LEED y la resiliencia:

- Evaluación y Planificación para la Resiliencia (IPpc98): Este criterio evalúa si hubo una planificación previa que considere los posibles impactos de desastres naturales y perturbaciones, enfocándose en el rendimiento a largo plazo del edificio bajo condiciones climáticas futuras.
- Diseño para una Mayor Resiliencia (IPpc99): Busca diseñar y construir edificios capaces de resistir con mínimo daño eventos climáticos esperados, implementando medidas de mitigación identificadas en la evaluación previa.
- Supervivencia Pasiva y Energía de Respaldo durante Interrupciones (IPpc100): Evalúa la capacidad del edificio para mantener condiciones térmicas adecuadas durante interrupciones de energía o pérdidas de combustible, y si cuenta con suficiente energía de reserva para operar equipos críticos.

### Impacto de la Certificación LEED

Estudios muestran que el 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de edificios. El enfoque LEED reduce estas cifras significativamente al centrarse en la sostenibilidad y uso eficiente de recursos. LEED evalúa criterios como el cambio climático (35%), uso de recursos hídricos (15%), biodiversidad (10%) y economía verde (10%).

En cifras, estudios realizados por la Universidad de California en Berkeley y la U.S. General Services Administration (en 2018) revelaron que edificios construidos bajo una certificación LEED y en operación:

- Redujeron en un 50% los GEI por consumo de agua, 48% por desechos sólidos y 5% por transporte en comparación con edificios convencionales
- Usan 23% menos energía, 28% menos agua y generan 9% menos residuos, reduciendo así su huella de carbono.

Estas mejoras contribuyen directamente a la reducción de gases de efecto invernadero y a la huella de carbono, promoviendo una construcción más sostenible y resiliente.

## Líneas de Acción o Evaluación de la Sostenibilidad en Estructuras

Evaluar la sostenibilidad de un sistema estructural en la construcción implica un análisis detallado en tres ámbitos fundamentales: el medio ambiente, la economía y la sociedad. Estos aspectos se desglosan en parámetros específicos que determinan si una edificación cumple con los requisitos necesarios para ser considerada sostenible. Es esencial adoptar criterios internacionales, ya que la sostenibilidad debe contemplar no solo los impactos locales sino también las repercusiones globales, asegurando que el desarrollo no perjudique a comunidades y ecosistemas en otras regiones.

- **Medio Ambiente:** El ámbito medioambiental se centra en la reducción del impacto negativo de la construcción sobre los ecosistemas y los recursos naturales. Se consideran aspectos como la eficiencia energética, el uso de materiales reciclados o sostenibles, la gestión del agua, y la minimización de residuos y emisiones. La evaluación se realiza mediante indicadores específicos que miden el consumo de energía, la eficiencia en el uso del agua, y la gestión de residuos, entre otros.
- **Economía:** Desde el punto de vista económico, la sostenibilidad implica que el proyecto sea económicamente viable y que los costos a largo plazo, incluyendo el mantenimiento y la operación, sean competitivos. Se deben considerar los costos iniciales de construcción y los beneficios económicos derivados de la eficiencia energética, la durabilidad de los materiales y la reducción de costos operativos a lo largo del ciclo de vida del edificio.
- **Sociedad:** El impacto social de un proyecto de construcción sostenible incluye la creación de un entorno seguro y saludable para los ocupantes y la comunidad circundante. Esto abarca la accesibilidad, la seguridad, la comodidad y el bienestar de los usuarios, así como la integración del proyecto en la comunidad local y su contribución al desarrollo social y económico de la región.
- **Herramientas y certificaciones para la sostenibilidad:** Una herramienta clave para evaluar la sostenibilidad en la construcción es la certificación LEED. Este sistema de evaluación internacional no se centra únicamente en un aspecto o fase del proyecto, sino que ofrece una visión integral, promoviendo el desarrollo sostenible en todas las etapas del proyecto mediante el uso de puntuaciones. A continuación, se presentan estándares en relación con la certificación LEED y la sostenibilidad:
  - **Ubicación y Transporte:** Evaluación de la accesibilidad del proyecto y su impacto en el transporte local.
  - **Sitios Sustentables:** Consideración del impacto del sitio de construcción en el medio ambiente.
  - **Eficiencia del Agua:** Medición del uso eficiente y responsable del agua.
  - **Energía y Atmósfera:** Evaluación de la eficiencia energética y el impacto atmosférico del proyecto.
  - **Materiales y Recursos:** Uso de materiales sostenibles y gestión de recursos.
  - **Calidad del Ambiente Interior:** Aseguramiento de un entorno interior saludable y confortable para los ocupantes.
  - **Innovación:** Reconocimiento de iniciativas innovadoras en sostenibilidad.
  - **Prioridad Regional:** Consideración de los factores de sostenibilidad específicos de la región del proyecto.

Cada uno de estos aspectos es evaluado mediante criterios específicos que proporcionan una puntuación acumulativa, determinando el nivel de certificación alcanzado. La certificación LEED asegura que los proyectos de construcción no solo cumplan con altos estándares de sostenibilidad, sino que también promuevan prácticas innovadoras y responsables a nivel global.

## **Materiales: Sostenibilidad en la Fabricación de Estructuras**

Hasta el momento se ha destacado la importancia de sistemas estructurales adaptables y eficientes en el campo de la construcción para lograr soluciones sostenibles y resilientes. No obstante, el desarrollo, fabricación e implementación de cualquier sistema estructural conlleva un efecto negativo ambiental, mismo que es importante considerar para que en materia de sostenibilidad su uso resulte conveniente.

Así pues, la construcción de sistemas estructurales conlleva un impacto ambiental significativo, derivado de los diversos procesos involucrados en la fabricación y elaboración de los componentes necesarios. Este impacto no se limita a la producción, sino que se extiende desde la extracción de materias primas hasta el transporte y la gestión de residuos. Cada etapa del proceso constructivo puede tener consecuencias negativas para nuestro entorno. En este contexto, es importante considerar de qué manera los materiales de construcción afectan al medio ambiente para poder mitigar su impacto.

Los materiales de construcción, esenciales para la implementación de sistemas estructurales, generan un impacto ambiental en varios aspectos interrelacionados:

- Consumo de recursos naturales: Destaca la explotación de recursos pétreos y forestales.
- Destrucción de hábitats naturales: El desplazamiento de especies se produce tanto por la construcción de nuevos emplazamientos urbanos como por la explotación necesaria para desarrollar proyectos.
- Generación de residuos: La acumulación de escombros contamina y degrada el entorno donde se desechan.
- Contaminación del suelo y agua: Los residuos desechados pueden contener partículas y componentes tóxicos que dañan directamente al suelo y a los cuerpos de agua.
- Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI): La energía requerida y los procesos de fabricación de los componentes empleados en el desarrollo de sistemas estructurales contribuyen significativamente a la generación de GEI.

Estos aspectos pueden ser regulados mediante la implementación de leyes. Sin embargo, en el ámbito de la ingeniería, es importante destacar que algunos materiales de construcción contribuyen de manera significativa a la contaminación ambiental, principalmente a través de las emisiones de CO<sub>2</sub>, un gas de efecto invernadero. Esto abre la puerta a la implementación de sistemas estructurales diseñados específicamente para reducir la huella de carbono. A continuación, se presenta un desglose de datos en relación con la huella de carbono generada por algunos materiales y/o procesos implicados en la construcción (Se indica solo la parte referente a los materiales):

**Tabla 1. Factor de Emisión de CO<sub>2</sub> en Materiales de Construcción**

No	Concepto	Factor de Emisiones de CO <sub>2</sub>	No	Concepto	Factor de Emisiones de CO <sub>2</sub>
137	Base Hidráulica natural	12.8 kg/m <sup>3</sup>	172	Mezcla templada con betún	39.02 kg/t
138	Base Hidráulica artificial	11.2 kg/m <sup>3</sup>	173	Mezcla templada con emulsión	37.92 kg/t
139	Agregados Pétreos (general)	3.7 kg/t	174	Mezclas en frío	29.29 kg/t
140	Agua	0.319 kg/m <sup>3</sup>	175	Mezcla Bituminosa en caliente (con filler de aportación: 2% cemento)	73.166 kg/t
141	Cemento (general)	771 kg/t	176	Mezcla Bituminosa en caliente (con filler de aportación: 2% cal)	80.432 kg/t
142	CEM Tipo I (Cemento Portland)	866 kg/t	177	Tubo de Concreto armado 300 mm	73.01 kg/m
143	CEM Tipo II	709 kg/t	178	Tubo de Concreto armado 400 mm	114.87 kg/m
144	CEM Tipo III A	461 kg/t	179	Tubo de Concreto armado 500 mm	121.68 kg/m
145	CEM Tipo III B	247 kg/t	180	Tubo de Concreto armado 600 mm	160.62 kg/m
146	CEM Tipo V	502 kg/t	181	Tubo de Concreto armado 700 mm	250.42 kg/m
147	Suelo-cemento	26.96 kg/t	182	Tubo de Concreto armado 800 mm	264.315 kg/m
148	Grava-cemento	31.25 kg/t	183	Tubo de Concreto armado 1000 mm	344.435 kg/m
149	Barras de acero corrugado para Concreto armado (99% de material reciclado)	722 kg/t	184	Tubo de Concreto armado 1200 mm	424.555 kg/m
150	Barras de acero corrugado para Concreto armado (59% de material reciclado)	1400 kg/t	185	Tubo de Concreto armado 1500 mm	544.735 kg/m
151	Barras de acero corrugado para Concreto armado (39% de material reciclado)	1860 kg/t	186	Tubo de Concreto armado 1800 mm	664.915 kg/m
152	Concreto (general)	244 kg/m <sup>3</sup>	187	Tubo de Concreto armado 2000 mm	982.745 kg/m
153	Concreto en masa <= 25 MPa	196.34 kg/m <sup>3</sup>	188	Tubo de Concreto armado 3000 mm	1501.945 kg/m
154	Concreto en masa > 25 MPa	260.61 kg/m <sup>3</sup>	189	Tubo de PVC rígido 50 mm	3.19 kg/m
155	Concreto en masa 15/20 MPa	235 kg/m <sup>3</sup>	190	Tubo de PVC rígido 90 mm	4.65 kg/m
156	Concreto en masa 20/25 MPa	251.45 kg/m <sup>3</sup>	191	Tubo de PVC rígido 110 mm	6.75 kg/m
157	Concreto en masa 25/30 MPa	265.55 kg/m <sup>3</sup>	192	Tubo de PVC rígido 160 mm	10.33 kg/m
158	Concreto en masa 30/35 MPa	282 kg/m <sup>3</sup>	193	Tubo de PVC rígido 200 mm	17.67 kg/m
159	Concreto en masa 35/40 MPa	310.2 kg/m <sup>3</sup>	194	Tubo de PVC rígido 250 mm	22.63 kg/m

160	Concreto en masa 40/45 MPa	354.85 kg/m <sup>3</sup>	195	Tubo de PVC rígido 315 mm	31.84 kg/m
161	Concreto armado 20/25 MPa	296.687 kg/m <sup>3</sup>	196	Acero galvanizado	2340.5 kg/kg
162	Concreto armado 25/30 MPa	310.787 kg/m <sup>3</sup>	197	Acero estructural S275 perfil laminado	1.735 kg/kg
163	Concreto armado 30/35 MPa	327.237 kg/m <sup>3</sup>	198	Barrera de seguridad con Perfil de doble onda de acero galvanizado	37.8 kg/m
164	Concreto armado 35/40 MPa	355.437 kg/m <sup>3</sup>	199	Poste de perfil de acero galvanizado C-120 para barrera de seguridad	23.848 kg/m
165	Concreto armado 40/45 MPa	400.087 kg/m <sup>3</sup>	200	Pintura para marcas viales	2.805 kg/t
166	Producto filmógeno de curado para Concreto	14 kg/kg	201	Mortero de cemento de dosificación M-5 (1:6)	272 kg/m <sup>3</sup>
167	Plastificante para Concreto	13.73 kg/kg	202	Mortero de cemento de dosificación M-7,5 (1:5)	312 kg/m <sup>3</sup>
168	Betún (general)	174.244 kg/t	203	Mortero de cemento de dosificación M-10 (1:4)	364 kg/m <sup>3</sup>
169	Emulsión bituminosa (general)	203.746 kg/t	204	Mortero de cemento de dosificación M-15 (1:3)	442 kg/m <sup>3</sup>
170	Mezclas en caliente (con filler de recuperación: calizo)	46.34 kg/t	205	Camión de transporte general	0.122 kg/t.km
171	Mezclas semicaliente	42.51 kg/t			

Los datos previamente presentados pueden ser examinados en el contexto de las siguientes consideraciones, asumiendo su aplicación en un proyecto de construcción estándar:

1. La energía necesaria (tanto combustibles como electricidad) para la operación de maquinaria y transporte general (bajo el concepto 205), varía dependiendo del consumo específico de cada tipo de equipo y vehículo. De esta manera, la huella de carbono resultante del uso de estos agentes energéticos puede no estar claramente definida para un proyecto estándar sin información adicional.
2. El empleo de maquinaria está fuertemente ligado a las demandas específicas del proyecto. Sin embargo, es posible realizar consideraciones sobre ciertos tipos de maquinaria que permitan establecer una comparativa basada en su uso.
3. Los materiales de construcción, al igual que la maquinaria y los agentes energéticos, varían en relación con las actividades que se llevan a cabo en la obra. Sin embargo, es posible realizar un análisis basado en ciertos tipos de materiales, lo que permitiría elaborar cuadros comparativos de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a cada uno de ellos.

## Desarrollo y Casos de Estudio

Dado el amplio espectro de lo que son las estructuras o sistemas estructurales, la focalización en la sostenibilidad y resiliencia puede resultar desafiante debido a la diversidad de enfoques y métodos disponibles, como se ha mencionado en los párrafos anteriores. Por lo tanto, para abordar de manera efectiva y práctica el tema de 'Sostenibilidad y Resiliencia en Estructuras', este análisis se centrará en losas, que son sistemas estructurales fundamentales en la construcción.

El término 'losas' (en plural) se refiere a elementos estructurales cuya dimensión en espesor es significativamente menor en comparación con sus otras dimensiones, como la longitud y el ancho (Bernal, 2012). Estos elementos son cruciales para la transferencia de cargas dentro de una estructura, ya que tienen la capacidad de distribuir tanto cargas permanentes como variables a otros componentes estructurales, como vigas y columnas. Esta habilidad de distribución de cargas convierte a las losas en un componente esencial en el diseño y comportamiento de las estructuras.

## Tipos de Losas

Para comprender y evaluar la sostenibilidad y resiliencia de las losas, es necesario llevar a cabo un análisis comparativo basado en especificaciones clave, tal como se indica en los lineamientos de evaluación para la sostenibilidad, resiliencia y ecodiseño mencionados anteriormente. Este análisis permitirá identificar las características que hacen que una losa sea más sostenible y resiliente que otra. En esta investigación, se han seleccionado cuatro tipos de losas que son representativas en la práctica de la construcción y que presentan diferentes características en términos de compacidad y materiales:

1. **Losa Nervada:** Caracterizada por la presencia de nervaduras que aumentan su rigidez y capacidad de carga, manteniendo un peso reducido en comparación con una losa maciza de igual resistencia.
2. **Losa Maciza:** Un elemento homogéneo y continuo de concreto, sin vacíos o nervaduras, que ofrece alta capacidad de carga y estabilidad, pero con un peso propio considerable.
3. **Losa Tipo Vigueta-Bovedilla de Jalcreto:** Combina viguetas de concreto reforzado con bovedillas de jalcreto (un tipo de concreto ligero), proporcionando una solución que equilibra rigidez y peso.
4. **Losa Tipo Vigueta-Bovedilla de Poliestireno:** Similar en estructura a la losa de jalcreto, pero utilizando bovedillas de poliestireno, lo que reduce significativamente el peso propio y mejora las propiedades térmicas y acústicas de la estructura.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo y una lista de características generales que proporcionan una visión detallada de las ventajas y desventajas de cada tipo de losa mencionado anteriormente:

*Tabla 2. Cuadro Comparativo de Ventajas y Desventajas de Diferentes Tipos de Losas*

Tipo de Losa	Ventajas	Desventajas
Nervada	Alta rigidez y capacidad de carga. Menor peso en comparación con losa maciza de igual resistencia. Eficiente en el uso de materiales debido a la reducción de concreto en las zonas no críticas.	Proceso construcción complejo y laborioso. Requiere encofrados específicos y detallados. Mayor Costo inicial debido a la complejidad del diseño y la mano de obra.
Maciza	Alta capacidad de carga y estabilidad estructural Homogeneidad en la distribución de cargas. Sencillez en el diseño y construcción	Mayor peso propio lo cual incrementa el peso del sistema. Mayor consumo de concreto, lo que puede aumentar los costos. Menor eficiencia en el uso de materiales.
Vigueta con Bovedilla de Jalcreto	Reducción de peso propio en comparación con losas macizas. Mejor eficiencia en el uso de materiales debido a las bovedillas. Buena resistencia térmica y acústica.	Menor capacidad de carga en comparación a losas macizas y nervadas. Complejidad en el ensamble de viguetas y bovedillas. Vulnerabilidad en las bovedillas de jalcreto durante la construcción.
Vigueta con Bovedilla de Poliestireno	Reducción de peso propio respecto a los otros sistemas. Excelente aislamiento térmico y acústico debido al poliestireno. Las bovedillas facilitan la manipulación y montaje.	Menor capacidad de carga en comparación a los otros sistemas. Riesgo de deterioro del poliestireno si no se protege adecuadamente del fuego y agua. Potencialmente mayor costo de materiales debido al poliestireno.

**Tabla 3.** Lista de Características y Tipos de Losas que las Cumplen

Características	Losa	Losa	Vigueta-	Vigueta-
	Nervada	Maciza	Jalcreto	Poliestireno
Alta rigidez y capacidad de carga	✓	✓		
Menor peso propio	✓		✓	✓
Alta estabilidad estructural		✓		
Eficiente en el uso de materiales	✓		✓	
Sencillez en el diseño y construcción		✓		
Buena resistencia térmica y acústica			✓	✓
Menor consumo de concreto	✓		✓	✓
Facilidad de manipulación y montaje				✓
Potencial de ahorro en costos iniciales			✓	✓

## Metodología de Análisis

La metodología de análisis adoptada para evaluar la sostenibilidad y resiliencia de una losa se fundamenta en la posibilidad de empleo de un análisis simplificado, según se infiere de acuerdo con FEMA (2012b), en dos enfoques principales: el análisis simplificado de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el análisis simplificado de costos. Esta elección metodológica está justificada por su capacidad para proporcionar una evaluación comprensiva y balanceada de los impactos ambientales y económicos, factores cruciales para determinar la viabilidad de soluciones estructurales sostenibles y resilientes, esto en el entendido de las definiciones de sostenibilidad y resiliencia estructural con cumplimiento de un adecuado ecodiseño.

### Análisis Simplificado de Emisiones de Dióxido de Carbono

La decisión de realizar un análisis simplificado de emisiones de CO<sub>2</sub> responde a la necesidad de cuantificar y minimizar el impacto ambiental de las estructuras. Esta metodología es ampliamente aceptada en la literatura científica (Juan & Ayala Milán, 2022), manuales, certificaciones y en prácticas industriales debido a los siguientes motivos:

- **Contribución al Cambio Climático:** Las emisiones de CO<sub>2</sub> son un factor determinante en el cambio climático. La industria de la construcción es una de las mayores emisoras de CO<sub>2</sub>, principalmente debido a la producción de cemento y el uso de maquinaria pesada. Evaluar y reducir estas emisiones es fundamental para cumplir con los objetivos internacionales de reducción de gases de efecto invernadero.
- **Cumplimiento Normativo:** Muchos países han implementado regulaciones que exigen la evaluación de las emisiones de CO<sub>2</sub> en proyectos de construcción. El análisis simplificado permite cumplir con estas normativas de manera eficiente y efectiva.
- **Certificaciones Ambientales:** Metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) son fundamentales para obtener certificaciones ambientales (LEED, BREEAM) que reconocen y promueven prácticas de construcción sostenible.
- **Disponibilidad de Datos:** Existen bases de datos estandarizadas que proporcionan factores de emisión específicos para materiales y procesos de construcción. Esto facilita la implementación de un análisis simplificado sin requerir recursos extensivos.

- **Método Eficiente:** Un enfoque simplificado permite obtener resultados aproximados y útiles sin la necesidad de un análisis exhaustivo y complejo, lo que es adecuado para proyectos con limitaciones de tiempo y recursos.

Así, la evaluación de la sostenibilidad de las losas se realizará considerando las emisiones de dióxido de carbono, tomando en cuenta los factores de emisión asociados a los procesos y materiales empleados en el proceso constructivo.

#### Análisis Simplificado de Costos

La evaluación de las emisiones de dióxido de carbono permite determinar la sostenibilidad de una estructura o sistema estructural. Sin embargo, aún persiste la interrogante de cómo evaluar la resiliencia en estructuras.

#### Resultados de Análisis de Losas

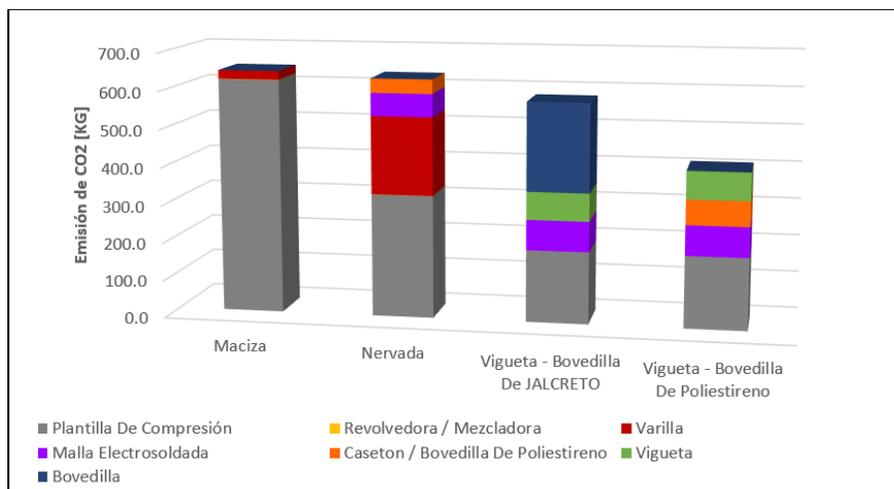


Figura 1. Emisión de Kg de CO<sub>2</sub> por tipo de losa módulo de 4.2mx4.2m.

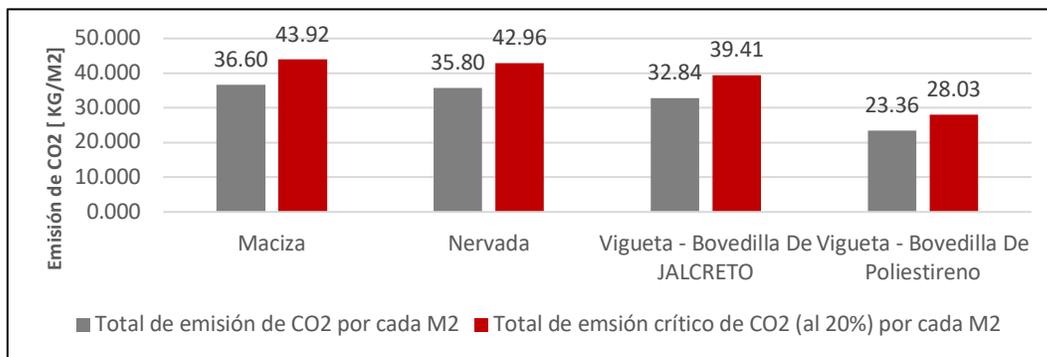


Figura 2. Emisión de Kg de CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup> por tipo de Losa.

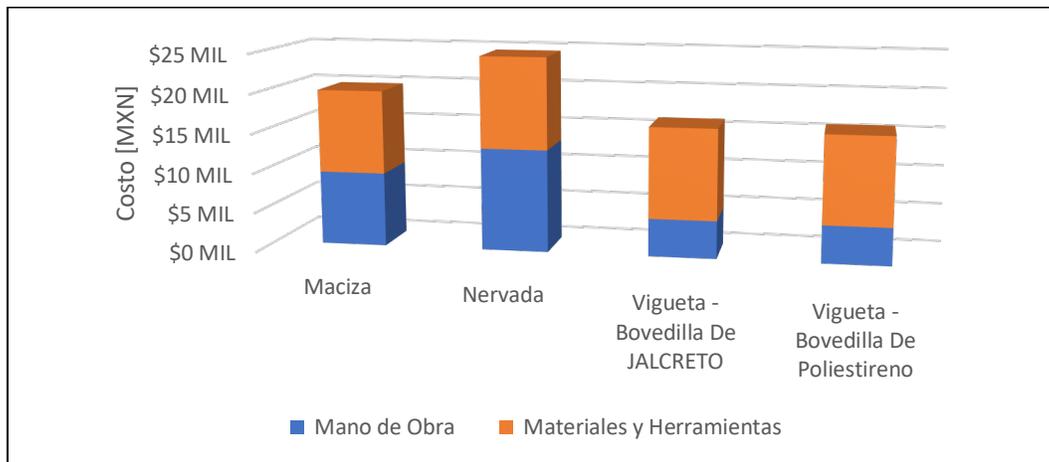


Figura 3. Comparativo de cada tipo de losa de acuerdo con sus respectivos costos de construcción.

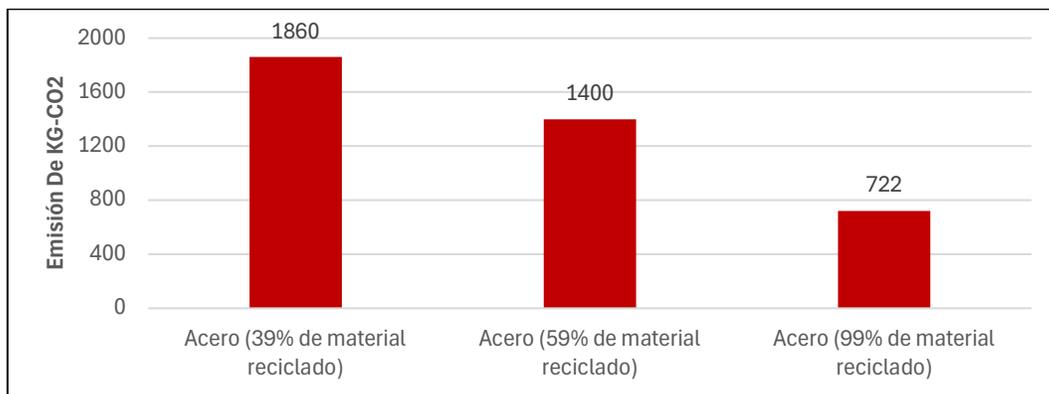


Figura 4. Comparación de equivalentes de emisión de CO2 por cada kilogramo de acero.

## Conclusiones

La gestión de materiales en la construcción representa una de las mayores áreas de costo. Controlar el desperdicio no solo permite gestionar una porción significativa del costo total del proyecto, sino que también es crucial para la sostenibilidad y resiliencia en el sector. En la construcción de sistemas estructurales, como lo son las losas, es vital optimizar los procesos constructivos para minimizar el impacto ambiental y los costos de fabricación. Para lograrlo, es esencial desarrollar metodologías que promuevan la reutilización y reciclaje de materiales, y que integren prácticas sostenibles en la gestión de desperdicios, asegurando la resiliencia de las estructuras y contribuyendo a la reducción de GEI.

A continuación, se presenta una comparativa sobre 2 tipos de losas donde se aprecian oportunidades de mejora en cuanto al control de desperdicios para la optimización de sus procesos constructivos:

**Tabla 4. Aspectos Por Mejorar en los Sistemas de Losa**

Aspecto	Losa maciza	Losa de Vigueta y Bovedilla de Jalcreto
Corte de Acero	Implementar técnicas de corte más precisas y controladas para reducir el desperdicio.	Continuar optimizando los procedimientos de corte en planta para minimizar aún más los desperdicios.
Almacenamiento de Acero	Mejorar las prácticas de almacenamiento elevando el acero y protegiéndolo adecuadamente para reducir la corrosión.	Mantener las condiciones controladas de almacenamiento y considerar tecnologías adicionales para prolongar la vida útil del acero.
Desperdicio de Concreto	Capacitar al personal en técnicas de vertido precisas y controladas para minimizar el exceso de material.	Investigar métodos avanzados de dosificación y vaciado de concreto que reduzcan aún más los desperdicios.
Gestión de Residuos	Implementar programas de reciclaje más eficientes y documentar los volúmenes de desperdicios para mejoras continuas.	Explorar opciones de reciclaje más avanzadas y mejorar la logística de reciclaje para maximizar la recuperación de materiales.
Eficiencia de Materiales	Evaluar regularmente los procesos de construcción para identificar áreas de mejora y optimizar el uso de materiales.	Continuar estandarizando los procesos de fabricación para maximizar la eficiencia y minimizar el desperdicio de materiales.

Ahora bien, en general, para alcanzar un equilibrio entre sostenibilidad y resiliencia en las losas, se recomienda el uso de prefabricados que generen menores emisiones de CO<sub>2</sub> y sean económicamente viables. A continuación, se presentan algunas recomendaciones específicas para lograr que las losas resulten ser sostenibles y resilientes en términos económicos:

1. **Optar por el uso de Prefabricados:** La utilización de elementos prefabricados, como las losas tipo vigueta-bovedilla de poliestireno, no solo reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, sino que también optimiza los costos de construcción y mantenimiento. Los prefabricados garantizan una calidad constante y una reducción en los tiempos de construcción, lo que se traduce en una mayor eficiencia y menores costos. Sin embargo, es importante considerar factores como la rigidez, capacidad de carga y la estabilidad estructural.
2. **Implementar Materiales Reciclados y Alternativos:** La utilización de acero con alto contenido de material reciclado es esencial para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorar la sostenibilidad de las losas. Se recomienda el uso de acero reciclado al 99% en las losas nervadas para maximizar la reducción de emisiones. Además, es viable considerar el uso de materiales alternativos al concreto debido a la alta contaminación asociada con sus componentes, especialmente el cemento. Un ejemplo destacado en estudio es el concreto reforzado con grafeno. Investigadores de la Universidad de Exeter han descubierto que incorporar grafeno en el concreto lo hace dos veces más resistente que el concreto convencional y cuatro veces más resistente al agua, lo cual podría inferir una reducción en sus emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 50%.
3. **Evaluación del Ciclo de Vida:** Realizar una evaluación del ciclo de vida (LCA) de los materiales y métodos constructivos para identificar y minimizar el impacto ambiental en todas las etapas del proyecto, desde la extracción de materias primas hasta la demolición y reciclaje de los materiales al final de su vida útil.
4. **Consideraciones Económicas:** Elegir materiales y métodos que optimicen el costo-beneficio, teniendo en cuenta no solo los costos iniciales de construcción, sino también los costos de mantenimiento y restauración a lo largo de la vida útil de la estructura.

5. **Capacitación y Mano de Obra:** Invertir en la capacitación de la mano de obra para la instalación de los nuevos sistemas prefabricados y el manejo de materiales reciclados. Una mano de obra bien capacitada puede mejorar la eficiencia de la construcción y reducir los costos asociados a errores y retrabajos.

## Bibliografía/Referencias

- Alvear, A., Campos, J. P., Ciancio, J., Dalaison, W., Angelis, G. D., Escovar, M. A., . . . Zambrano, A. (Diciembre de 2023). Resiliencia y sostenibilidad en los códigos de construcción de América Latina y el Caribe: análisis regional comparativo y oportunidades de fortalecimiento. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Resiliencia-y-sostenibilidad-en-los-codigos-de-construccion-de-America-Latina-y-el-Caribe-analisis-regional-comparativo-y-oportunidades-de-fortalecimiento-y-oportunidades-de-fortalecimiento.pdf>
- Arenes, J.-F., Bernard, Y., Bertrand, B., Bret, B., Cuenca, E., Jankel, S., . . . Lescude-Plaa, L. (octubre de 2023). Estrategias locales de vivienda: un camino hacia ciudades sostenibles, respetuosas con el medio ambiente, e inclusivas. Guía de buenas prácticas. (A. R. Elías, O. Chevalier, D. Alba, & P. Pelloux, Edits.) Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Un-camino-hacia-ciudades-sostenibles-respetuosas-con-el-medio-ambiente-e-inclusivas-guia-de-buenas-practicas.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo, IBD Invest. (Mayo de 2018). ¿Qué es la infraestructura sostenible? Un marco para orientar la sostenibilidad a lo largo del ciclo del proyecto. Obtenido de <https://publications.iadb.org/en/publications/spanish/viewer/%C2%BFQu%C3%A9-es-la-infraestructura-sostenible-Un-marco-para-orientar-la-sostenibilidad-a-lo-largo-del-ciclo-de-vida-del-proyecto.pdf>
- Construction, G. A., Agency, I. E., & Programme, U. N. (2020). GlobalABC Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector, IEA, Paris. Obtenido de [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/Latin%20America\\_Roadmap\\_FINAL.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/Latin%20America_Roadmap_FINAL.pdf)
- Global Alliance for Buildings and Construction & UN Environment. (noviembre de 2016). Global Roadmap Towards LOW-GHG and Resilient Buildings. Obtenido de [https://globalabc.org/sites/default/files/2020-03/GABC\\_Global\\_Roadmap\\_Website.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/2020-03/GABC_Global_Roadmap_Website.pdf)
- Juan, G. T., & Ayala Milán, G. (29 de Agosto de 2022). Análisis de la Resiliencia Sísmica de Edificios. Ingeniería Sísmica, 47-73. doi:10.18867
- Saha, D. (5 de Abril de 2018). Low-carbon infrastructure: an essential solution to climate change? Obtenido de <https://blogs.worldbank.org/en/ppps/low-carbon-infrastructure-essential-solution-climate-change>
- Sustainable Infrastructure Tool Navigator. (4 de Febrero de 2021). Sustainable Infrastructure: An Introduction. Obtenido de <https://sustainable-infrastructure-tools.org/get-started/>