



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

PLAN DE MANEJO Y VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS CON PROPIEDADES DE REÚSO Y RECICLAJE, GENERADOS DE LAS ACTIVIDADES DE TERMINADOS Y REMODELACIONES DE EDIFICACIONES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
DIANA ISABEL GUERRERO CAMPOS

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR:
M. I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., OCTUBRE DE 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Georgina Fernández Villagómez

Secretario: Dr. Enrique César Valdez

Vocal 1: Dr. José Manuel Gómez Soberón

Vocal 2: M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

Vocal 3: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Lugar donde se realizó la tesis: Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por servicios de uso de infraestructura y de apoyo analítico, por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma NMX-CC-9001-IMNC-2015 y la internacional ISO 9001:2015 No. de Certificado CMX C SGC 209 2020, válido en el período del 12 de noviembre de 2020 al 11 de noviembre de 2023.

Y Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería.

TUTOR DE TESIS:

DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA

FIRMA

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la salud, fortaleza y perseverancia para alcanzar cada objetivo en mi vida.

A mi madre Gricelda por ser mi primera maestra y mi primera amiga, por guiarme, acompañarme y confiar en mí. A mi padre Carlos que Dios lo tiene en su gloria y ahora es un ángel en mi vida, por haberme dejado la mejor herencia del mundo, sus enseñanzas. A mis hermanos Carlos y Daniel por el cariño y apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora la Dra. María Neftalí Rojas Valencia por su dirección y apoyo en este recorrido, por su paciencia y motivación, por honrar el mundo de la investigación con su ejemplo y dedicación, le agradezco todo lo que me ha enseñado. Al Dr. Enrique César Valdez, al M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, a la Dra. Georgina Fernández Villagómez y al Dr. José Manuel Gómez Soberón por su guía y consejos para el desarrollo del presente documento. Al Arq. Jaime Quezada, por compartir de manera abierta su conocimiento y amplia experiencia en el área del manejo adecuado de residuos sólidos provenientes de la industria de la construcción. Al Arq. Aurelio López Espíndola y al Arq. Israel Mendoza Zuppa del Instituto de Ingeniería por su ayuda para acceder a la información relacionada a los residuos de construcción generados en los Edificios 2 y 7 del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Al M. Constantino Gutiérrez Palacios de la facultad de Ingeniería por todos los conocimientos otorgados, y por su apoyo para acceder a la maquinaria utilizada para la extracción del material reciclado. Al personal del Laboratorio de Sanitario y Ambiental (LISA), por su apoyo en la realización de las pruebas de caracterización del material extraído. Al Ing. Roberto Sotero Briones Méndez Técnico Académico de la Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM por su apoyo para poder hacer uso de las instalaciones del LIA para realizar los ensayos correspondientes. Al Ing. Víctor Hugo Torres Romero del Laboratorio de Estructuras y Materiales (LEM) por su apoyo para acceder a los equipos requeridos y por su disposición. A la Lic. Josefina Elizabeth Plata García de la biblioteca USI del Instituto de Ingeniería por su amabilidad y ayuda para acceder a la normativa actualizada referente al tema desarrollado. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por recibirme con las puertas abiertas y otorgarme la oportunidad de concluir esta importante etapa académica.

A Hamilton Mosquera, Ana Paola Chango, Salomé Vergara, Josué Fernández, Ángel Changoluisa, Nataly Quelal, Pablo Trejo y Mauro Cortez por su amistad y el apoyo que me han brindado.

CONTENIDO

1	JUSTIFICACIÓN.....	1
2	HIPÓTESIS.....	2
3	OBJETIVOS.....	2
3.1	General	2
3.2	Específicos.....	2
4	MARCO TEÓRICO	3
4.1	Definiciones utilizadas en la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD).....	3
4.1.1	Terminados y remodelación.....	3
4.1.2	Residuos de manejo especial	4
4.1.3	Separación de residuos	4
4.1.4	Almacenamiento	5
4.1.5	Recolección y transporte	6
4.1.6	Centros de acopio y/o transferencia	7
4.1.7	Valorización	7
4.1.8	Disposición final.....	7
4.1.9	Generadores.....	7
4.1.10	Plan de Manejo.....	8
4.1.11	Gestión integral de residuos	8
4.1.12	Inventario de residuos.....	8
4.2	RCD generados en América Latina.....	9
4.3	Comparación de los aspectos técnicos entre la legislación de RCD en América Latina y España	15
4.4	Efectos hacia el ambiente causados como consecuencia del manejo no técnico de residuos sólidos de las actividades de terminados y remodelaciones de edificaciones	19
4.5	Experiencias del manejo de RCD en otros países de América Latina	20
4.5.1	Experiencia en Costa Rica.....	20
4.5.2	Experiencia en Ecuador.....	21
4.6	Alternativas de reducción y aprovechamiento.....	21
4.6.1	Edificaciones sostenibles.....	22

4.6.2	Uso de agregados reciclados como reemplazo de agregados naturales en la elaboración de concreto	25
4.6.3	Reciclaje de plástico en la elaboración de madera plástica	26
4.6.4	Reciclaje de lámparas de mercurio	27
4.6.5	Reciclaje de paneles de yeso	33
5	METODOLOGÍA	34
5.1	Selección de las áreas de estudio	35
5.1.1	Descripción de las áreas de estudio y los trabajos realizados	36
5.2	Elaboración de estudios de generación de residuos	38
5.2.1	Edificio 7	38
5.2.2	Edificio 2 y oficinas corporativas	39
5.3	Elaboración del plan de manejo y valorización	39
5.4	Propuesta de una tecnología no convencional para el reciclaje de los residuos generados.....	39
5.4.1	Extracción del material a reciclar	40
5.4.2	Caracterización física del material	42
5.4.3	Diseño y fabricación del producto reciclado.....	48
5.4.4	Evaluación de aspectos dimensionales	50
6	RESULTADOS.....	51
6.1	Estudios de generación.....	51
6.2	Plan de manejo y valorización.....	58
6.2.1	Marco Normativo.....	59
6.2.2	Modalidad del plan de manejo y su ámbito de aplicación territorial.....	59
6.2.3	Residuos objeto del plan.....	59
6.2.4	Diagnóstico	60
6.2.5	Cadena de valor e integrantes	62
6.2.6	Etapas del manejo	63
6.2.7	Recolección	66
6.2.8	Transporte	66
6.2.9	Valorización	67
6.2.10	Disposición final	72

6.2.11	Metas de cobertura del plan, de recuperación o aprovechamiento del residuo	73
6.2.12	Mecanismos de operación, control y monitoreo.....	74
6.3	Propuesta de tecnología no convencional para el reciclaje de paneles de yeso.....	76
6.3.1	Material extraído	76
6.3.2	Caracterización física del material	77
6.3.3	Diseño y fabricación del producto reciclado.....	79
6.3.4	Evaluación de aspectos dimensionales	80
6.3.5	Evaluación de aspectos dimensionales	81
7	CONCLUSIONES	83
8	RECOMENDACIONES.....	85
9	REFERENCIAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Actividades de remodelación (Edificio 7, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]).	3
Figura 2.	Separación general de residuos.	5
Figura 3.	Almacenamiento de residuos peligrosos y no peligrosos, en construcciones.	6
Figura 4.	Recolección y transporte de residuos de construcción.	6
Figura 5.	Proceso de construcción.	9
Figura 6.	PIB y consumo interno de materiales en los países de la OCDE.	10
Figura 7.	Tipos de residuos de RCD.	11
Figura 8.	Volumen de residuos de construcción y demolición en Concretos Reciclados.	13
Figura 9.	Alternativas de manejo de residuos generados en un proceso de construcción.	14
Figura 10.	Gestión integral de lámparas de mercurio.	29
Figura 11.	Triturador de lámparas con recuperación de mercurio.	30
Figura 12.	Impactador.	30
Figura 13.	Equipo Lamptroyer.	31
Figura 14.	Ciclo de reciclado de lámparas fluorescentes.	32
Figura 15.	Fases de la investigación.	34
Figura 16.	Áreas de estudio, Edificios 2 y 7 IINGEN – UNAM.	36
Figura 17.	Pesaje de los residuos generados en la remodelación interior del Edificio 7.	38
Figura 18.	Fases del desarrollo del material reciclado.	40
Figura 19.	Reducción inicial del tamaño del residuo.	41
Figura 20.	Molino de martillos marca Servex modelo P205 (3000 a 3400 rpm).	41
Figura 21.	Licuadora industrial Waring Blendor modelo CB-5.	41
Figura 22.	Tamizado malla 2.36 mm (izquierda) y tamizado malla 1.4 mm (derecha).	42
Figura 23.	Residuos de papel posterior al tamizado.	42
Figura 24.	Análisis por tamizado.	43
Figura 25.	Determinación del contenido de humedad.	44

Figura 26.	Materiales utilizados para la determinación del contenido orgánico.....	45
Figura 27.	Determinación de la relación agua / yeso.	46
Figura 28.	Determinación del tiempo inicial de fraguado.	47
Figura 29.	Pesaje de los materiales.....	49
Figura 30.	Amasado manual.....	49
Figura 31.	Moldeo.....	50
Figura 32.	Extracción.....	50
Figura 33.	Determinación del largo, ancho y espesor de la loseta.....	51
Figura 34.	Segunda planta del Edificio 7, antes y después de la remodelación.....	52
Figura 35.	Almacenamiento de residuos generados en el Edificio 7.....	53
Figura 36.	Depósito exclusivo para desechos de construcción del Instituto de Ingeniería.....	53
Figura 37.	Fachada del Edificio 2 antes y después de la remodelación.	55
Figura 38.	Porcentaje por categoría del total de RCD generados en cada área de estudio.....	57
Figura 39.	Porcentaje de yeso extraído de residuos de paneles de yeso....	76
Figura 40.	Granulometría del yeso extraído.....	77
Figura 41.	Dimensiones del molde.....	80
Figura 42.	Dimensiones de la loseta.....	81
Figura 43.	Dimensiones de la loseta.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Estimación de la generación de RCD en el 2018 en México por tipo de obra.....	12
Tabla 2.	Generación de residuos en obras de construcción y demolición.	12
Tabla 3.	Aspectos legislativos más relevantes en torno a la gestión de RCD.....	15
Tabla 4.	Generación anual de escombros de construcción en Costa Rica.....	21
Tabla 5.	Diseño de las mezclas	48
Tabla 6.	Residuos generados en la remodelación del Edificio 7.....	54
Tabla 7.	Residuos generados en la remodelación del Edificio 2.....	55
Tabla 8.	Residuos generados en las labores de terminados de un corporativo.....	56
Tabla 9.	Cadena productiva de la industria de terminados y remodelaciones... ..	62
Tabla 10.	Clasificación de los residuos de construcción y demolición.....	65
Tabla 11.	Alternativas de valorización.	67
Tabla 12.	Aprovechamiento de agregados reciclados en elementos no estructurales.....	70
Tabla 13.	Sitios autorizados de recepción de RCD.	72
Tabla 14.	Metas de cobertura del plan, recuperación o aprovechamiento..	74
Tabla 15.	Estrategias de operación y control.....	74
Tabla 16.	Granulometría del yeso extraído.....	77
Tabla 17.	Contenido de humedad.....	78
Tabla 18.	Contenido orgánico.....	78
Tabla 19.	Relación agua/yeso (Mezcla 1).....	79
Tabla 20.	Relación agua/ polvo (Mezclas 2, 3 y 4)	79
Tabla 21.	Valores promedio de las dimensiones de las losetas.	82
Tabla 22.	Valores promedio de las dimensiones de las losetas.	82

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials.
BID	Banco Interamericano de Desarrollo.
CMIC	Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.
CSMX	Concretos Sustentables Mexicanos.
CE	Comisión Europea.
CU	Ciudad Universitaria.
EC	Economía Circular.
EMASEO EP	Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito.
EMGIRS	Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
FCCyT	Foro Consultivo Científico y Tecnológico A.C.
LEED	Liderazgo en energía y diseño ambiental.
LGPGIR	Ley general para la prevención y gestión integral de residuos.
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
PIB	Producto Interno Bruto.
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
PM	Plan de Manejo.
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
SOBSE	Secretaría de Obras y Servicios.
RAMIR	Registro y Autorización de Establecimientos Mercantiles, de servicios y/o unidades de transporte relacionados con el manejo integral de residuos sólidos urbanos y/o de manejo especial de competencia local que operen y transiten en la CDMX.
RCD	Residuos de la Construcción y Demolición.
UE	Unión Europea.
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México.
USGBC	United States Green Building Council.

1 JUSTIFICACIÓN

Las actividades de construcción y remodelación tienen gran importancia para el desarrollo de los pueblos. Según datos del Banco Mundial, el 55% de la población mundial actual vive en áreas urbanas y se espera que para 2045, este valor aumente en 1.5 veces hasta llegar a 6,000 millones de personas. Este crecimiento genera importantes impactos en el ambiente, planteando grandes desafíos para satisfacer la demanda de recursos naturales de manera sostenible. Uno de los aspectos de mayor preocupación es la cantidad y volumen de desechos que se generan con la construcción de nuevas obras, demolición o remodelación de estructuras viejas (Leandro, 2007).

En la Ciudad de México, un proceso de remodelación de los espacios interiores de un corporativo cuya área sea aproximada a 3,000 m², puede generar un volumen de residuos sólidos de hasta 176 m³, los cuales serán retirados en camiones de volteo sin control alguno desconociendo el destino final de dichos materiales de residuos sólidos, siendo varios de estos materiales, residuos de tratamiento especial como fibras de vidrio y minerales, residuos de pinturas y esmaltes, cristales recocidos y templados y en ocasiones asbestos.

Cuando la generación de estos residuos es inevitable, deben pasar a ser considerados como un recurso, a partir del cual, pueden ser recuperados materiales reusables, materia prima e incluso energía. A este proceso de recuperación y tratamiento que pone a gran parte de los desechos en condiciones técnicas y económicas de ser vueltos al mercado se lo denomina proceso de valorización de los residuos sólidos (Ibáñez y Corroccoli, 2002).

De ahí la importancia de elaborar y posteriormente difundir a aquellos relacionados con la gestión de los escombros u otros residuos derivados de los procesos constructivos una herramienta de gestión, con acciones y alternativas viables para promover un desempeño ambiental sostenible en el desarrollo de este tipo de proyectos.

2 HIPÓTESIS

Las actividades de terminados y remodelación de edificaciones involucran la generación de residuos de una composición muy variada que, en la mayor parte de los casos, son transportados a sitios de disposición final. La elaboración e implementación de un plan de manejo (PM), contribuye a la disminución de la generación y maximización de la valorización de los materiales generados en estas actividades.

3 OBJETIVOS

3.1 General

Proponer un plan de manejo y valorización de los residuos sólidos con propiedades de reúso y reciclaje, generados de las actividades de terminados y remodelaciones de edificaciones, basados en la normativa vigente tanto nacional como internacional, para la contribución en la disminución de la generación y maximización de la valorización de dichos materiales.

3.2 Específicos

1. Seleccionar, mediante métodos no probabilísticos, obras para la realización de estudios de generación de los residuos de actividades de terminados y remodelaciones para la observancia de su comportamiento en cuanto a la generación de residuos sólidos se refiere.
2. Identificar, mediante estudios de generación, los materiales provenientes de actividades de terminados y remodelaciones para la determinación de su composición de manera cualitativa y cuantitativa.
3. Desarrollar, con base en la NOM-161-SEMARNAT-2011 y legislación pertinente, un PM que pueda ser aplicado tanto a las áreas de estudio, como a empresas constructoras y aquellas que realizan terminados y remodelaciones para hacerlas partícipes del manejo correcto de los residuos sólidos derivados de sus actividades.
4. Proponer mediante la fabricación de una tecnología no convencional el reciclaje o tratamiento de uno o varios de los residuos generados para que se evite su entrega en sitios de disposición final, reintegrándolos a la cadena productiva.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Definiciones utilizadas en la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD)

A continuación, se presentan las definiciones utilizadas en la gestión de este tipo de residuos.

4.1.1 Terminados y remodelación

Los terminados son todos aquellos procesos o actividades que se realizan posterior a la obra gris, también conocidos como acabados de construcción, como se aprecia en la Figura 1. Es decir, son aquellos detalles que dan un aspecto estético, funcional y habitable a la edificación; como, por ejemplo, pisos, ventanas, puertas, pintura y enyesado de paredes. Los materiales que son utilizados para realizar estos trabajos pueden ser: yeso, cerámica, madera, impermeabilizantes, pinturas, ladrillos, piezas de mampostería, etc. (Eralte, 2017).



Figura 1. Actividades de remodelación (Edificio 7, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]).

Los trabajos de remodelación son las actividades o procesos que implican sustituir ciertos componentes o espacios de la edificación, ya sea por fines estéticos o de habitabilidad. Es un proceso mucho más elaborado (a diferencia de la renovación que son cambios puntuales) que transforma totalmente el funcionamiento de habitaciones. Como, por ejemplo, el agrandar el espacio para

la sala, eliminar dormitorios, quitar ventanas, etc. Es decir, cambiar los tamaños internos de la edificación y todo lo que implica posteriormente con trabajos de terminados (MAAT, 2019).

4.1.2 Residuos de manejo especial

Se consideran residuos de manejo especial a aquellos que se generan en cualquier actividad relacionada con la extracción, beneficio, transformación, procesamiento y/o utilización de materiales para producir bienes y servicios, y que no poseen características domiciliarias o de peligrosidad, por ejemplo: residuos tecnológicos de las industrias de la informática y fabricantes de productos electrónicos, residuos de fabricantes de vehículos automotores o RCD en una cantidad mayor a 80 m³.

También se consideran dentro de esta categoría, a aquellos residuos sólidos urbanos generados en una cantidad igual o mayor a 10 t/año y que requieran un manejo específico para su valorización y aprovechamiento (NOM-161-SEMARNAT-2011, 2013).

4.1.3 Separación de residuos

La separación de residuos implica clasificarlos de acuerdo a su composición. Para ello es importante realizar este proceso en la fuente, es decir en las instalaciones de la obra de terminados o remodelaciones, a fin de posteriormente realizar su valorización, ver la Figura 2. La separación en origen conlleva los siguientes tipos de operaciones (Comisión Europea [CE], 2016):

- Separación de residuos peligrosos.
- Deconstrucción (desmantelamiento que incluye la separación de desechos y materiales de fijación).
- Separación de materiales de fijación.
- Demolición estructural o mecánica.



Figura 2. Separación general de residuos.

Fuente: Martínez y Tomé, 2008.

4.1.4 Almacenamiento

El almacenamiento temporal de los residuos, como se evidencia en la Figura 3, implica disponer de un espacio adecuado en donde se depositarán los diferentes tipos de residuos generados durante la construcción ya sea en los terminados o remodelaciones. El almacenamiento en el sitio de construcción debe contemplar los siguientes factores (CE, 2016):

- El tipo de residuos y las características químicas y físicas de los materiales almacenados.
- La ubicación y el clima de la obra.
- Las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas, incluida la cercanía a la superficie.
- Los acuíferos, la calidad del agua y los valores ambientales protegidos.
- El período durante el cual se almacenará el material.
- El enfoque de gestión propuesto para el material almacenado, que incluya las cuestiones de seguridad relativas a impedir el acceso a visitantes no autorizados, como por ejemplo niños.



Figura 3. Almacenamiento de residuos peligrosos y no peligrosos, en construcciones.

Fuente: Martínez y Tomé, 2008.

4.1.5 Recolección y transporte

La recolección y transporte de residuos es la operación consistente en juntar residuos, incluida su clasificación y almacenamiento iniciales con el objeto de transportarlos a una instalación de tratamiento de residuos (CE, 2016). Ejemplo de ello es lo que se observa en la Figura 4.



Figura 4. Recolección y transporte de residuos de construcción.

Fuente: Martínez y Tomé, 2008.

4.1.6 Centros de acopio y/o transferencia

Los centros de acopio y/o transferencias son las instalaciones para la prestación de servicios a terceros en donde se reciben, cuantifican, reúnen, trasvasan y acumulan temporalmente residuos de la construcción y demolición para ser reutilizados, o enviados a instalaciones autorizadas para su tratamiento, reciclaje, reutilización, co-procesamiento o disposición final (NACMX-007-RNAT-2019, 2021).

4.1.7 Valorización

La valorización es un conjunto de acciones asociadas, cuyo objetivo es recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos, mediante su reincorporación en procesos productivos, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral y eficiencia ambiental, tecnológica y económica (Ley general para la prevención y gestión integral de residuos [LGPGIR], 2003).

El aprovechamiento de residuos es el “conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar el valor económico de los residuos mediante su reutilización, remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales secundados o de energía” (LGPGIR, 2003).

El reciclado es la “transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos (LGPGIR, 2003).

4.1.8 Disposición final

La disposición final es la “acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos (LGPGIR, 2003).

4.1.9 Generadores

La categoría de cada generador está basada en el volumen o su equivalente en masa según el tipo de material, de residuos de la construcción y demolición

(RCD) que generen sus actividades por proyecto al año, de acuerdo con lo que se indica a continuación (NACMX-007-RNAT-2019, 2021):

- Grandes generadores: más de 80 m³/año (o proyecto).
- Pequeños generadores: más de 7 m³/año y hasta 80 m³/año (o proyecto).
- Microgeneradores: hasta 7 m³/año (o proyecto).

4.1.10 Plan de Manejo

El Plan de Manejo es un instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el diagnóstico básico para la gestión integral de residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno (LGPGIR, 2003).

4.1.11 Gestión integral de residuos

La gestión integral de residuos es un conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región (LGPGIR, 2003).

4.1.12 Inventario de residuos

El inventario de residuos es una base de datos en la cual se asientan con orden y clasificación los volúmenes de generación de los diferentes residuos, que se integra a partir de la información proporcionada por los generadores en los formatos establecidos para tal fin, de conformidad con lo dispuesto en este ordenamiento (LGPGIR, 2003).

4.2 RCD generados en América Latina.

Las actividades de construcción necesitan de materiales que son extraídos de diferentes partes de un país o incluso importados. Posteriormente, se fabrican todos los componentes necesarios para usarlos en el proceso de la construcción, incluido las terminaciones o posteriores remodelaciones necesarias. El esquema general del ciclo de vida que prevalece para este tipo de materiales se presenta en la Figura 5.



Figura 5. Proceso de construcción.

Adaptado de: Muñoz, 2018.

Existe un vínculo muy potente entre urbanización y crecimiento económico. En todo el mundo, las ciudades contribuyen a más del 80% del producto interno bruto (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2014). Por ejemplo, en los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), se evidencia la relación directa entre el Producto Interno Bruto (PIB) y el consumo interno de minerales para la construcción, o el uso de madera que frecuentemente utilizada en los terminados de las construcciones (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2011), como se puede observar en la Figura 6.

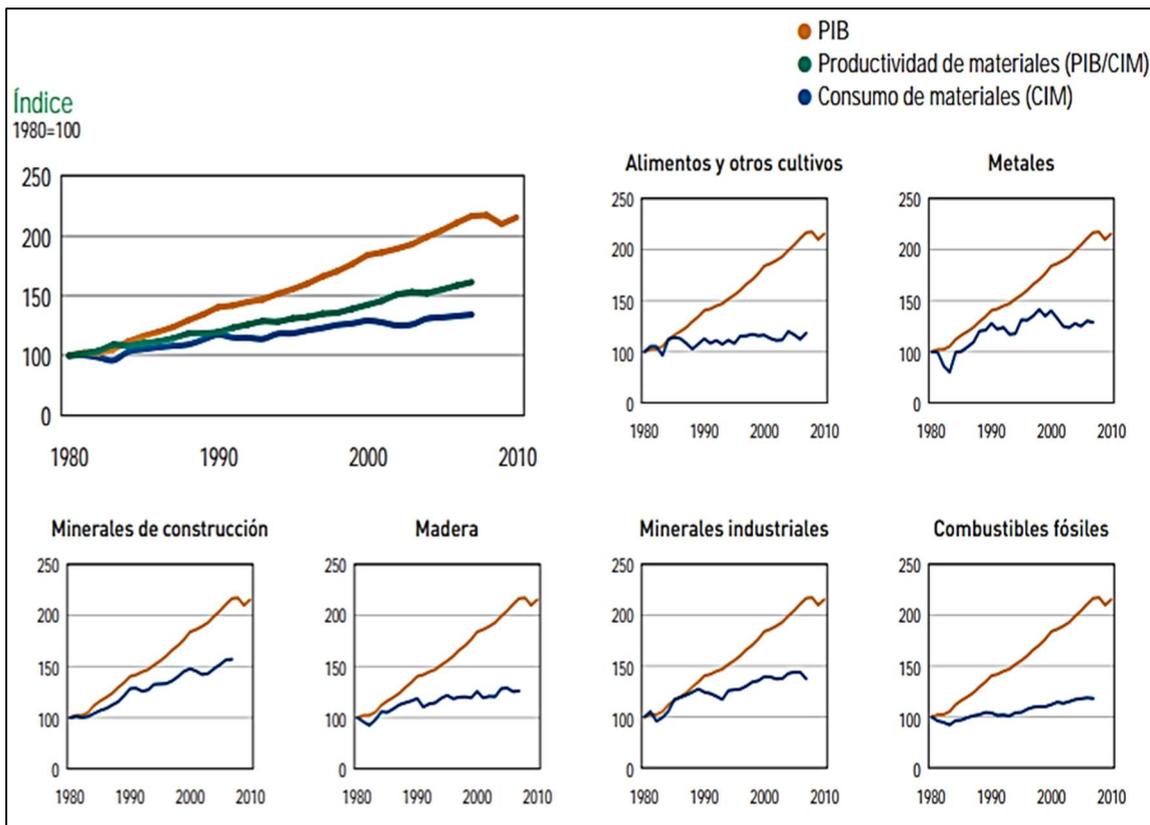


Figura 6. PIB y consumo interno de materiales en los países de la OCDE.

Fuente: PNUMA, 2011.

Los residuos que se generan de las actividades de construcción y demolición se pueden clasificar en aprovechables y no aprovechables; estos también pueden ser generados en actividades de terminados y remodelaciones. Ejemplos de cada tipo de residuo se observan en la Figura 7.

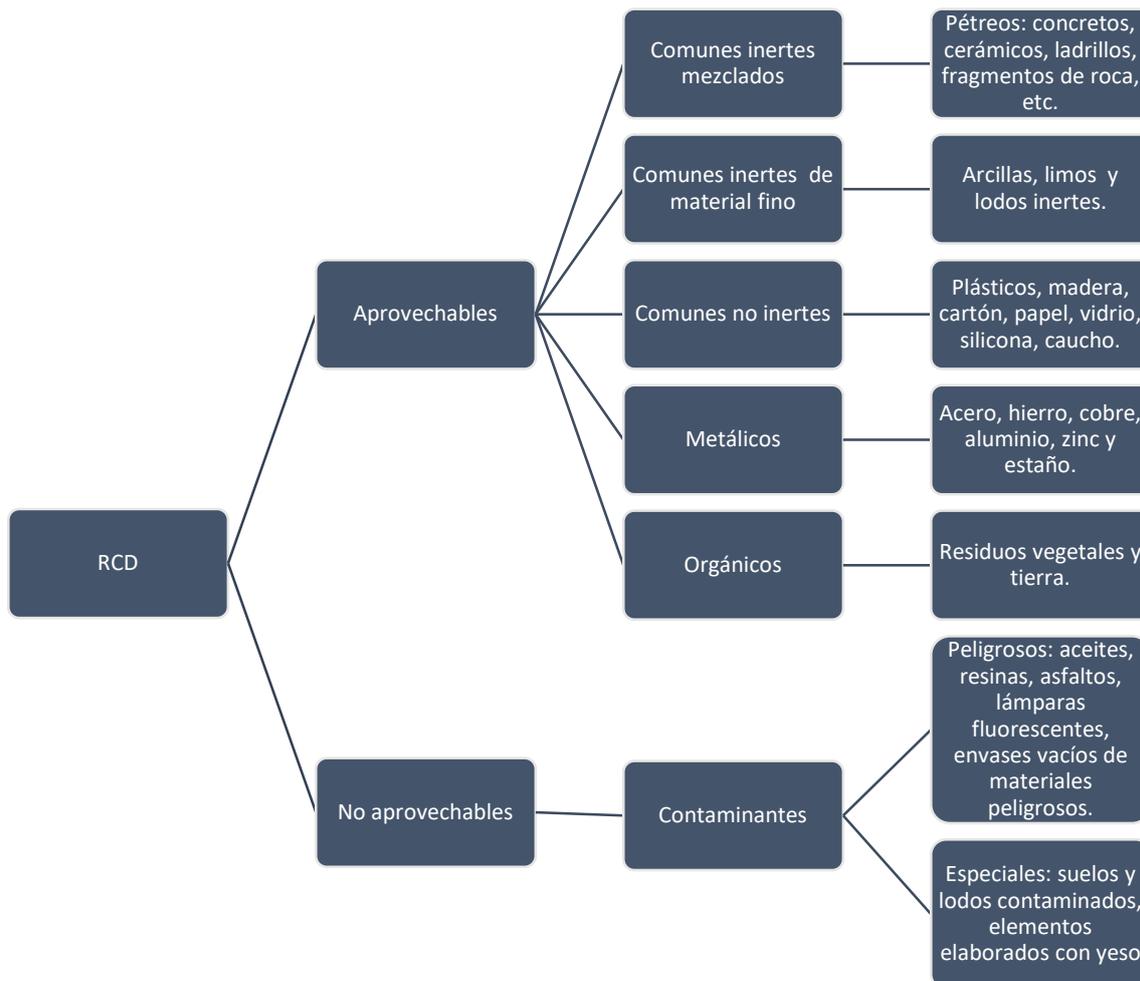


Figura 7. Tipos de residuos de RCD.

Adaptado de: Orozco et al., 2014.

América Latina tiene la tasa de urbanización más alta a nivel mundial (84%), donde el 32% de la población total vive en ciudades de más de 1 millón de personas que representan el 40% de la población urbana mundial (Mercader et al., 2022). Son pocos los países de la región que cuentan con un estimado de las tasas de generación de los RCD, entre ellos, Chile que genera 230,000 t/año, Colombia genera 25 millones de t/año y México genera 6.5 millones de t/año (Chen et al., 2022).

De acuerdo con datos de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca de México (SEMARNAT), de la cantidad total de RCD generados en el año 2018, el 16% corresponde a obras de edificaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Estimación de la generación de RCD en el 2018 en México por tipo de obra.

Tipo de obra	Generación (t)	% de generación
Edificación.	1,593,512.64	16
Agua, riego y saneamiento.	900,576.75	9
Electricidad y telecomunicaciones.	536,280.50	5
Transporte y urbanización.	3,880,234.01	38
Petróleo y Petroquímica.	1,049,782.31	10
Otras construcciones.	2,192,936.43	22
Total	10,153,322.63	100

Fuente: SEMARNAT 2020.

De acuerdo con la investigación realizada por Martel (2008) en relación con los RCD para 3 edificaciones de la Ciudad de México y 1 edificación en el Estado de México, se genera en mayor porcentaje cascajo (fragmentos de piedra, más gruesa que la grava y menos que los cantos rodados) con un 65% y madera con un 18.38% como consta en la Tabla 2.

Tabla 2. Generación de residuos en obras de construcción y demolición.

Material	%	Generación (kg/m ²)
Cascajo.*	65.17	140.4
Madera.**	18.38	39.6
Residuos sólidos urbanos.*	3.93	8.5
Chatarra.*	4.26	9.2
Mármol.**	3.76	8.1
Concreto.**	2.94	6.3
Paneles de yeso.**	0.98	2.1
Plástico.**	0.21	0.5
Vidrio.**	0.21	0.5
Residuos peligrosos.***	0.09	0.2
Otros.**	0.07	0.1
Total	100	215.4

*Volumen suelto. **Volumen compacto. ***Peso medido. Área construida = 22809 m².

Fuente: Martel, 2008.

La planta Concretos Reciclados, ubicada en la Ciudad de México, recibe y recicla una parte de los residuos pétreos producto de las actividades de construcción y demolición, sin embargo, existe una gran cantidad de agregados reciclados almacenados al interior de la misma, de estos, solo un pequeño volumen es vendido, los datos se evidencian en la Figura 8. A pesar de que el precio de los agregados reciclados es menor, por ejemplo: 1 m³ de concreto reciclado se vende en 1.250 MXN, mientras que, el mismo volumen de concreto hidráulico

con agregado de mina, se vende a un precio superior a 1.400 MXN, existe un factor que influye de manera significativa en el uso de agregados reciclados, y este es la creencia de que los materiales reciclados son de menor calidad (Concretos Sustentables Mexicanos [CSMX], 2021).

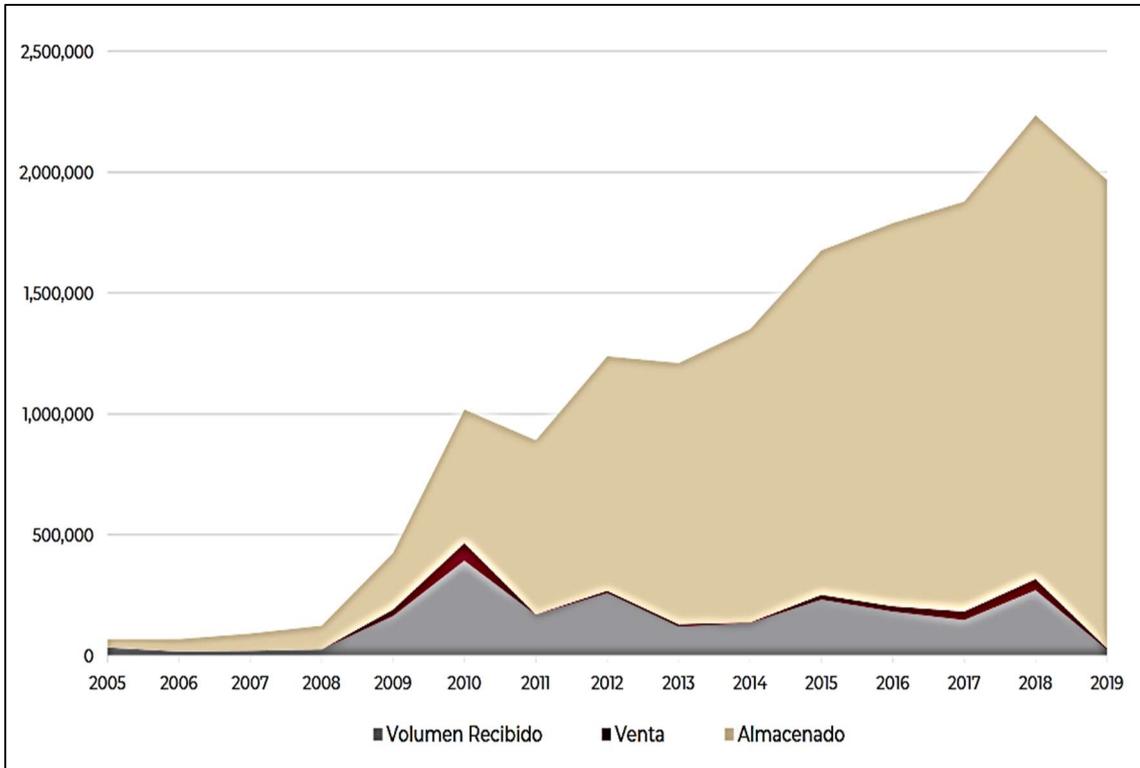


Figura 8. Volumen de residuos de construcción y demolición en Concretos Reciclados.

Fuente: SEMARNAT, 2020.

La elección de una adecuada vía de manejo de los RCD posterior a su generación en la obra (Figura 9), permite valorizar los materiales a fin de lograr que sea mínima la cantidad que se dispone en vertederos o rellenos sanitarios.

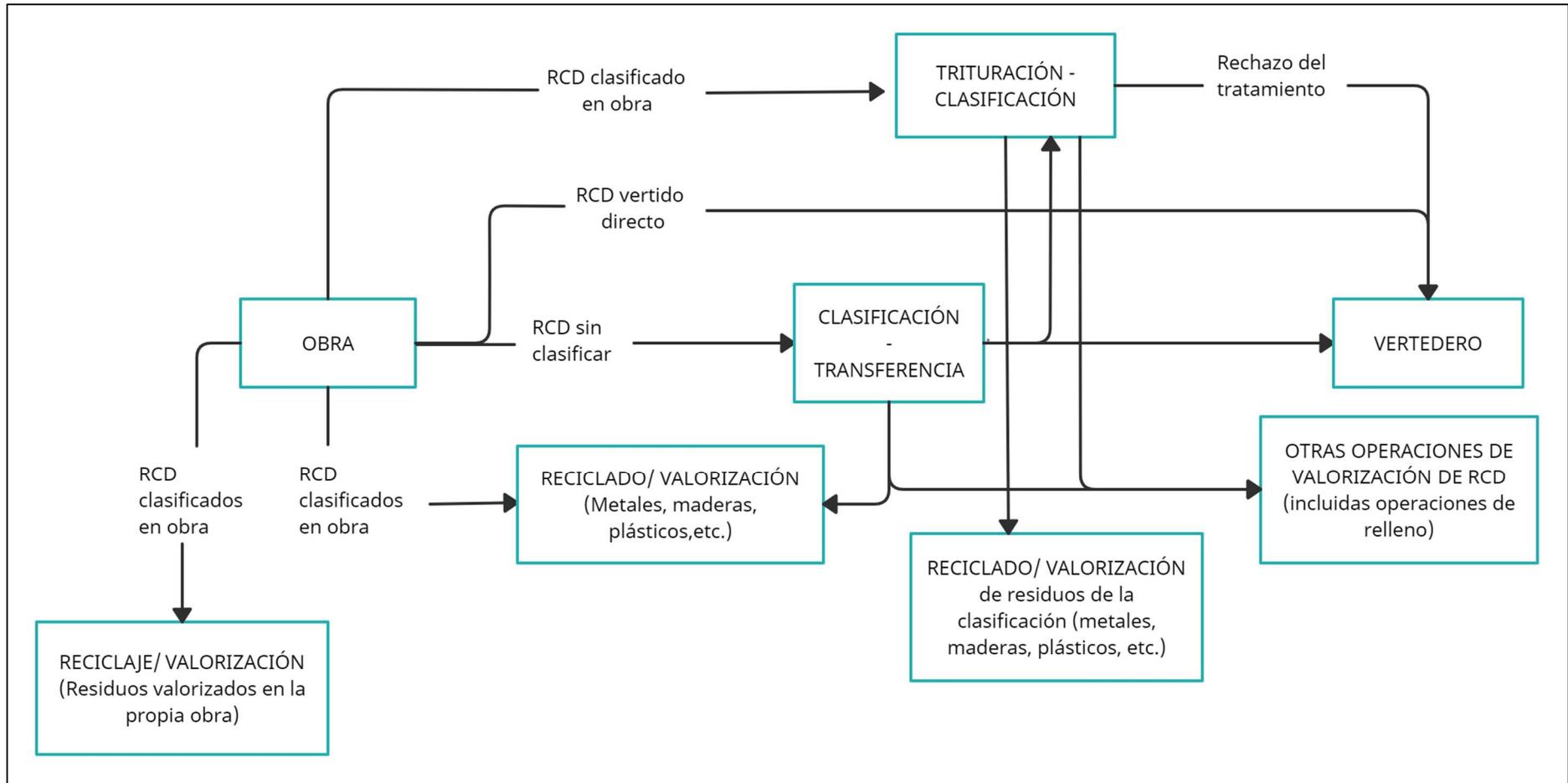


Figura 9. Alternativas de manejo de residuos generados en un proceso de construcción.

Adaptado de: Comunidad de Madrid, 2017.

4.3 Comparación de los aspectos técnicos entre la legislación de RCD en América Latina y España

En América Latina, los primeros países en implementar plantas de reciclaje de RCD y marcos normativos específicos para este tipo de residuos fueron México y Brasil. Debido al problema que representa el manejo inadecuado del creciente volumen de RCD, en el transcurso de los años se ha generado un impulso legislativo en otros países de la región, teniendo cada uno un diferente avance (Mercante et al., 2009).

Por otra parte, la Unión Europea (UE) ha recorrido un gran camino en la implementación de políticas y planes gubernamentales tanto regionales como locales para la gestión de los RCD, por lo que, países como España presentan un mayor desarrollo en este campo.

La Tabla 3 presenta los aspectos legislativos destacados en torno a la gestión de RCD en México, Brasil y España:

Tabla 3. Aspectos legislativos más relevantes en torno a la gestión de RCD.

País	Cuerpo legal	Objeto	Aspectos destacados
México	Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos LGPGIR (2003 última reforma 2015).	Reglamenta las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos.	Art. 19, numeral VII, clasifica a los RCD dentro de los residuos de manejo especial.
	Reglamento de la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, LGPGIR (2006 última reforma 2014).	Reglamenta la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos.	Art. 35 Incluye como residuos peligrosos a aquellos equipos y construcciones que hubiesen estado en contacto con residuos peligrosos y sean desechados. Art. 143 Establece las propuestas de remediación para emergencias y pasivos ambientales, se deberá tener el plan de desalojo de residuos sólidos urbanos, residuos de la construcción, residuos de manejo especial y residuos peligrosos presentes en el sitio en el caso de pasivos ambientales.

Tabla 3. Aspectos legislativos más relevantes en torno a la gestión de RCD
(continuación).

País	Cuerpo legal	Objeto	Aspectos destacados
México	NACMX-007-RNAT-2019 (2013 última reforma 2021).	Determina la clasificación de los residuos de la construcción y demolición, establecer las especificaciones y requisitos técnicos para su manejo integral; establecer los requisitos complementarios que deberán observarse en la formulación de los planes de manejo de RCD; así como establecer su procedimiento para la evaluación de la conformidad.	<p>5. Definiciones. Se define la responsabilidad compartida.</p> <p>Art. 5 Define a los residuos de construcción y demolición como: materiales, productos o subproductos generados durante las actividades de demolición, ampliación, remodelación, modificación o construcción tanto pública como privada; así como el producto proveniente de la excavación cuando este se haya alterado en sus condiciones físicas, químicas y biológicas originales.</p> <p>Art. 6.1 Presenta la clasificación de este tipo de residuos.</p> <p>Art. 6.3 Establece los residuos peligrosos generados en el proceso de construcción y demolición como asbestos, residuos de impermeabilizantes, aceites, solventes hidrocarburos y sus contenedores, así como todo aquel residuo contaminado por alguna sustancia con características peligrosas, deberán disponerse de acuerdo con la legislación y normatividad vigentes.</p> <p>Art. 8.1 Los generadores de este tipo de residuos deben cumplir las siguientes fases de manejo:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Separación de residuos. b) Almacenamiento. c) Recolección y transporte. d) Valorización. e) Disposición final. <p>8.5.1.2. Los prestadores de servicio de transporte de RCD deben estar autorizados por la Secretaría a través del RAMIR (Registro y Autorización de Establecimientos Mercantiles, de servicios y/o unidades de transporte relacionados con el manejo integral de residuos sólidos urbanos y/o de manejo especial de competencia local que operen y transiten en la CDMX).</p> <p>Art. 8.6.2.3. Presenta el aprovechamiento de agregados reciclados en elementos no estructurales.</p> <p>8.7.1.1. Las plantas de reciclaje deben contar con autorización RAMIR.</p>
México	NOM-161-SEMARNAT-2011 (2013).	Establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.	<p>Art. 9. Elementos para la formulación de los planes de manejo.</p> <p>Anexo: Listado de residuos de manejo especial sujetos a presentar plan de manejo:</p> <p>Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general, que se generen en una obra en una cantidad mayor a 80 m³.</p>

Tabla 3. Aspectos legislativos más relevantes en torno a la gestión de RCD
(continuación).

País	Cuerpo legal	Objeto	Aspectos destacados
Brasil	Resolución CONAMA No. 307 (2002).	Establece directrices, criterios y procedimientos para la gestión de los residuos de la construcción civil.	<p>Considera que los generadores de residuos de la construcción civil deben ser responsables de los residuos provenientes de la construcción, renovación, reparación y demolición de estructuras y caminos, así como de los que resulten de la remoción de vegetación y excavación del suelo.</p> <p>Art. 3 Establece la clasificación de los residuos de la construcción civil.</p> <p>Art. 4 Los generadores deberán tener como objetivo prioritario la no generación de residuos y, secundariamente, la reducción, reutilización, reciclaje, tratamiento de los residuos sólidos y la disposición final ambientalmente adecuada. Los residuos de la construcción civil no pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos, en áreas de "descarte", en taludes, cuerpos de agua, baldíos y en áreas protegidas por la ley.</p> <p>Art. 8 Los PM de residuos de la construcción civil serán elaborados e implementados por los grandes generadores y tendrán como objetivo establecer los procedimientos necesarios para el manejo y disposición ambientalmente adecuado de los residuos.</p> <p>Art. 9 Incluye los pasos a seguir para elaborar los planes de manejo de residuos de la construcción civil, entre ellos: caracterización, separación, embalaje, transporte y destino.</p> <p>Art. 10 Disposición de los residuos de construcción civil según su clase.</p>
España	Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los RCD.	Establece el régimen jurídico de la producción y gestión de los RCD, con el fin de fomentar, por este orden, su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, asegurando que los destinados a operaciones de eliminación reciban un tratamiento adecuado, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de construcción.	<p>Regula la producción y gestión de los RCD, que combina tres principios fundamentales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Responsabilidad del productor. - Prevención de residuos. - Corresponsabilidad entre todos los agentes que intervienen en la cadena de producción y gestión de los RCD (promotor, proyectista, dirección facultativa, constructor, gestor). <p>Dentro de las obligaciones del productor establece que este debe incluir en el proyecto de ejecución de la obra un estudio de gestión de residuos de construcción y demolición.</p> <p>Establece obligaciones para los gestores de RCD.</p>
España	Decisión de la Comisión 2000/532/CE.	Anexo – Lista de residuos a que se refiere el artículo 7 de la directiva 2008/98/CE.	Establece la clasificación de los RCD (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)

Tabla 3. Aspectos legislativos más relevantes en torno a la gestión de RCD
(continuación).

País	Cuerpo legal	Objeto	Aspectos destacados
España	Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2008) sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas.	Establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso.	Establece que antes de 2020, el 70% en peso de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y demolición (con exclusión de materiales naturales definidos en la categoría "17 05 04" del Listado Europeo de Residuos (LER)) sean destinados a operaciones de reutilización, reciclado y otras operaciones de valorización de materiales, incluidas las operaciones de relleno que utilicen residuos para sustituir otros materiales.
España	Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.	Instrumento para orientar la política de residuos en España, impulsando las medidas necesarias para mejorar las deficiencias detectadas y promoviendo las actuaciones que proporcionan un mejor resultado ambiental y que aseguren la consecución de los objetivos legales.	<p>Propone los siguientes objetivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cualitativos (derivados de la legislación vigente): <ul style="list-style-type: none"> • Establecer la recogida separada de los distintos materiales que integran los residuos generados en las obras y garantizar la retirada selectiva de los residuos peligrosos procedentes de RCD desde la obra. • Fomentar una mayor utilización de los materiales procedentes de la gestión de los RCD. Con esta finalidad se pueden utilizar instrumentos tales como el aumento de las tasas de vertido para desincentivar el depósito de residuos de RCD valorizables y el establecimiento de obligaciones adicionales al promotor o constructor si no separa correctamente en origen los RCD generados. Fomentar la utilización (valorización) de materiales naturales excavados en la construcción de obras de tierra (terraplenes, pedraplenes y rellenos todo-uno) así como en la restauración de espacios degradados y en obras de acondicionamiento o relleno y establecer criterios ambientales para el uso de otros materiales procedentes del tratamiento de RCD no peligrosos en esos destinos. • Establecer un Acuerdo Marco Sectorial para impulsar la utilización de áridos reciclados procedentes de RCD en obras de construcción. - Objetivos cuantitativos derivados de la aplicación de los Planes Autonómicos de Comunidades Autónomas: <ul style="list-style-type: none"> • % RCD no peligrosos destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otras operaciones de valorización (con exclusión de las tierras y piedras limpias), 70% mínimo hasta 2020. • Eliminación de RCD no peligrosos en vertedero, 20% máximo hasta 2020. • % de tierras y piedras limpias (LER 17 05 04) utilizadas en obras de tierra y en obras de restauración, acondicionamiento o relleno, 90 % mínimo hasta 2020. • Eliminación de tierras y piedras limpias (LER 17 05 04) en vertedero (en %) respecto del volumen total de materiales naturales excavados, 10% máximo hasta 2020.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3 se observa que en los países analizados se han establecido principios y criterios clave como: definición y clasificación de los RCD, responsabilidad del productor, prevención de la generación, corresponsabilidad de los agentes involucrados, separación de los residuos desde el origen, recogida selectiva, plan de gestión en obra, tratamiento por gestores autorizados, lo que obliga a los diferentes actores de la industria a realizar un mejor manejo de los RCD e incentivar su clasificación en obra, sin embargo, los países de América Latina presenta una tasa de recuperación media de los RCD del 7.4% (Segura et al., 2020), mientras que la tasa de recuperación media en la UE es del 46% (López et al., 2020).

Por otra parte, un aspecto fundamental en el que la legislación de América Latina difiere de la legislación europea, es el establecimiento de objetivos cuantitativos en cuanto al porcentaje de RCD no peligrosos destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otras operaciones de valorización, porcentaje de eliminación de RCD no peligrosos en vertedero, porcentaje de tierras y piedras limpias utilizadas en obras de tierra y en obras de restauración, acondicionamiento o relleno y porcentaje de eliminación de tierras y piedras limpias en vertedero respecto del volumen total de materiales naturales excavados, con ello se pretende mejorar la identificación, separación y recogida de los residuos en origen, así como la logística, tratamiento, y gestión de la calidad de los RCD, incluyendo las adecuaciones regulatorias para acelerar la transición hacia un modelo de economía circular [EC] (López et al., 2020).

El lento avance en materia de gestión de RCD de los países latinoamericanos radica en la falta de una efectiva aplicación del enfoque sistémico para gestionar los residuos sólidos donde interactúen los diferentes factores y componentes interconectados entre sí, para la gestión adecuada de los desechos, estos factores son de orden político, legal, técnico y cultural (Segura et al., 2020).

4.4 Efectos hacia el ambiente causados como consecuencia del manejo no técnico de residuos sólidos de las actividades de terminados y remodelaciones de edificaciones

Cuando los diferentes residuos generados por trabajos de remodelación y terminados de edificaciones son dispuestos de manera clandestina sin

separación ni tratamiento, generan una amplia gama de impactos ambientales relevantes. A consecuencia del manejo inadecuado de los RCD, principalmente en la disposición final, se han identificado diversos problemas ambientales, de imagen urbana y salud, destacando los siguientes (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción [CMIC], 2017):

- Obstrucción de arroyos, cañadas y barrancas.
- Afectación al drenaje natural.
- Azolve de las partes bajas e inundación de zonas aledañas en temporada de lluvias.
- Afectación al medio físico y medio biótico (flora y fauna).
- Focos de contaminación por mezcla de residuos, incluso peligrosos.
- Contaminación del suelo y subsuelo e incluso de acuíferos.
- Afectación de zonas de recarga de agua subterránea.
- Impacto visual del entorno.
- Proliferación de polvo (contaminación del aire) provoca enfermedades respiratorias.
- Proliferación de fauna nociva.

4.5 Experiencias del manejo de RCD en otros países de América Latina

4.5.1 Experiencia en Costa Rica

En Costa Rica, la empresa Holcim por medio de su empresa Servicios Ambientales Geocycle (SAG S.A.) realiza la gestión integral de los residuos de construcción, desde la generación, en las cantidades señaladas en la Tabla 4; hasta la disposición final (Morales y Villalta, 2011).

Se debe destacar que dicha empresa:

Maneja una amplia variedad de tipos de residuos de construcción incluyendo madera, escombros, concreto, hules, llantas, cartón, plásticos, equipo de protección personal en desuso, yeso, asfaltos, material eléctrico, láminas de plástico, trapos, textiles, metales y una amplia variedad de residuos peligrosos tales como tierras contaminadas, aceites, hidrocarburos, solventes, pinturas, aditivos cementicios, resinas, selladores, etc. (Morales y Villalta, 2011).

Tabla 4. Generación anual de escombros de construcción en Costa Rica.

Tipo de residuo	Toneladas/día
Escombros	660
Madera	660
Otros residuos de construcción	474
Total, residuos de la construcción	1,794

Fuente: Morales y Villalta, 2011.

Entre los residuos de acabados que se tienen están: tarros de pintura, madera de acabados, plásticos, yeso, estructura de hierro galvanizado, cerámica, cartón y papel (Morales y Villalta, 2011).

4.5.2 Experiencia en Ecuador

Para el caso del Ecuador, específicamente para la ciudad de Quito, el manejo de residuos de construcción y demolición lo realizan las respectivas empresas constructoras, para ello deben tener un almacenamiento temporal con su respectiva clasificación de residuos, que luego deben ser transportadas a las escombreras autorizadas. Para la disposición final las empresas constructoras deben firmar un contrato de pago anticipado con base en una proyección del material residual por parte del generador.

El Municipio de Quito cuenta con 2 escombreras autorizadas: El Troje 4 y San Antonio (Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos [EMGIRS], 2021).

Para la generación en menor escala de escombros o material de construcción, es decir de hasta 500 kg la Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito (EMASEO EP) realiza la disposición final sin ningún costo (EMASEO EP, 2017).

4.6 Alternativas de reducción y aprovechamiento

Las preocupaciones ambientales sobre la generación y acumulación de RCD aumentan cada año. En este contexto, el concepto de EC es una solución potencial en muchos sectores, ya que implica el uso más eficiente de los recursos y la energía (López et al., 2019). El marco de EC, cuando se analiza en su totalidad, es amplio, por lo tanto, este apartado se ha centrado en la revisión de alternativas para la reducción y el aprovechamiento de materiales dentro de la industria de la construcción.

El diseño para la prevención de residuos es una de las mejores oportunidades para reducir la generación de residuos y fortalecer las prácticas de reutilización y reciclaje desde la etapa inicial de la planificación de la construcción y a lo largo de toda la cadena de valor (López et al., 2019), en este sentido las certificaciones en edificaciones sostenibles constituyen una opción viable al problema de los RCD.

En lo que tiene que ver con el reciclaje, los materiales inertes, como el hormigón, la cerámica, los ladrillos, las tejas, la piedra y la tierra no contaminada, constituyen la mayor proporción de RCD, tanto en volumen como en peso, lo que refuerza la necesidad de reutilizarlo como agregado reciclado.

Por otra parte, Sormunen y Kärki (2019), en su investigación encontraron que los materiales de desecho de construcción reciclados más prometedores son los termoplásticos, lana mineral, yeso y madera.

Dado que una proporción muy pequeña de los RCD contiene sustancias que hacen que se clasifiquen como peligrosos, también es importante el establecimiento de alternativas para esta fracción de los RCD.

A continuación, se desarrollan de manera más amplia, las alternativas de reducción y reciclaje que se pueden aplicar a algunos de los RCD:

4.6.1 Edificaciones sostenibles

Existen varias certificaciones que evalúan las edificaciones sustentables, por ejemplo: BREEAM - Reino Unido, Verde - España, DGNB- Alemania, Liderazgo en energía y diseño ambiental (LEED) – Estados Unidos, algunas consideran todo el ciclo de vida del edificio, otras ponen más énfasis en los aspectos de diseño bioclimático, o en el entorno del edificio; mientras que otras, adicionalmente, ponderan los medios de transporte de los usuarios o la cercanía al transporte público. Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2020, estos sistemas aseguran un mecanismo objetivo de medición y evaluación del consumo de recursos del edificio.

4.6.1.1 Leadership in Energy and Environmental Design LEED

La certificación LEED es voluntaria y se obtiene mediante el cumplimiento de varios estándares energéticos y ambientalmente sostenibles, puede ser aplicada

para proyectos que van desde residencias hasta edificios comerciales y profesionales (Treviño, 2011), siendo esta la certificación de mayor implantación en el mercado de grandes edificios (Macías y García, 2010).

Las categorías generales asociadas con sistemas de clasificación LEED son:

Desarrollo y sostenibilidad

Se enfoca en la selección del lugar para la construcción del edificio, optando por áreas previamente desarrolladas y donde no se destruyan zonas naturales, siendo la mejor alternativa la recuperación de terrenos considerados como zonas contaminadas. La prioridad es la reutilización de edificios existentes, promoviendo estructuras verticales y construcción en zonas con alta densidad de población (USGBC, 2009).

Ahorro de agua

El propósito principal es minimizar el uso de agua potable, para lo cual se requiere evaluar los recursos de agua existentes, las oportunidades para reducir la demanda y los suministros de agua alternativos (USGBC, 2009).

Eficiencia energética y atmósfera

Promueve la reducción de la demanda energética, el aumento de la eficiencia energética y las ventajas de tener suministros más limpios de energía renovable (energía solar, eólica, propulsada por olas, de biomasa y geotérmica, o determinadas formas de energía hidroeléctrica) siendo la mejor opción la generación de energía renovable en sitio.

Promueve la no utilización de refrigerantes que contengan clorofluorocarbono (CFC) y hidroc fluorocarbono (HCFC) o seleccionar refrigerantes que equilibran las preocupaciones en torno al uso de estos gases (USGBC, 2009).

Selección de materiales

Considera la reutilización de desechos generados durante la construcción y rescatados de demoliciones para la renovación de edificaciones, así como el uso de materiales nuevos que contengan en su composición material reciclado.

Por otra parte, con el fin de disminuir la contaminación producida durante el transporte, incentivar el uso de materiales fabricados o cosechados

regionalmente, siendo de gran importancia el uso de materiales que sean generados usando fuentes renovables o materiales de rápida renovación (USGBC, 2009).

Calidad del ambiente interior

Abarca las condiciones en el interior del edificio (confort térmico, iluminación y vistas, acústica y ergonomía) y los efectos que producen en los ocupantes o residentes. Las estrategias incluyen aquellas que protegen la salud humana, mejoran la calidad de vida y reducen el estrés y las posibles lesiones (USGBC, 2009).

Innovación en diseño y operaciones

Promueve las iniciativas de proyectos para crear beneficios ambientales adicionales más allá de aquellos logrados a través de otras categorías antes indicadas, donde las estrategias innovadoras amplían la práctica de edificios ecológicos al incorporar técnicas de vanguardia, procesos y productos al desarrollo de un proyecto potenciando la práctica de edificios ecológicos (USGBC, 2009).

4.6.1.2 LEED en América Latina

En México y Latinoamérica el Centro Nacional de Negocios de Chihuahua fue la primera edificación en obtener la certificación LEED en el año de 2006, posteriormente le siguió el edificio HSBC en el año 2008, ubicado en el Paseo de la Reforma, en Colonia Cuauhtémoc, convirtiéndose en la edificación que obtuvo la primera certificación Oro en todo Latinoamérica (Dueñas del Río, 2013). Brasil es otro de los pioneros en construcciones verdes ya que viene implementando desde 2007 la certificación LEED. Para el año 2021, Brasil y México se ubicaron dentro de los diez países con mayor número de proyectos LEED certificados y registrados a nivel global sin incluir Estados Unidos, con 1.241.815,33 m² (89 proyectos) y 955.576,47 m² (47 proyectos) respectivamente (USGBC, 2022).

Las certificaciones voluntarias son utilizadas como catalizadores de la construcción verde para el sector privado y el desarrollo de códigos y normativas de construcción sostenible adaptados a las necesidades de cada país.

4.6.2 Uso de agregados reciclados como reemplazo de agregados naturales en la elaboración de concreto

Los RCD pueden ser reutilizados como materia prima en la elaboración de concreto, ya que, de estos se pueden extraer dos materiales que se utilizan comúnmente en el área de la construcción: residuos de mampostería y residuos de concreto.

Con el paso del tiempo han sido numerosas y extensas las investigaciones relacionadas con la fabricación de concreto mediante el uso de agregados reciclados, en ellas, se evalúan cada una de las características del concreto obtenido luego del proceso de sustitución de los agregados con diferentes porcentajes de reemplazo, así como la mejor combinación de estos (Muñoz et al., 2021).

Por ejemplo, respecto al concreto elaborado con agregados de ladrillos reciclados, Nepomuceno, Isidoro y Catarino (2018) observaron que características mecánicas como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y la resistencia a la tracción de los concretos disminuye conforme se incrementa el porcentaje de reemplazo de áridos gruesos naturales por áridos gruesos reciclados cerámicos, por lo que recomiendan precaución cuando se supere el 30% de reemplazo volumétrico absoluto, si el concreto es utilizado con fines estructurales.

Así mismo, Suárez, López, López-Colina, Serna y Serrano (2017) en su investigación utilizaron diferentes porcentajes de sustitución, concluyendo que el 35% del reemplazo de los agregados naturales por agregados reciclados de ladrillo permite obtener viguetas prefabricadas pretensadas con características mecánicas aceptables; también se observó que a medida que el porcentaje de reemplazo aumenta, impacta de manera negativa en el módulo de elasticidad.

Por otra parte, Puente, de Castro, Pepe y Toledo (2020), investigaron mezclas de concreto estructural que contienen agregado fino de concreto reciclado, afirman que, es posible utilizar contenidos de 25 y 50% de agregados de concreto reciclado fino en la producción de concretos de resistencia normal y alta sin comprometer el rendimiento mecánico debido a la adherencia de los

agregados, presentando propiedades mecánicas parecidas a una mezcla de referencia producida con agregados naturales.

En otro estudio relacionado al concreto elaborado combinando agregados reciclados, Silva, Robayo, Matthey y Delvasto (2016), probaron cinco tipos de mezclas de concretos autocompactantes, donde se sustituyó el agregado grueso virgen por agregado reciclado entre 0 y 100% en volumen. El cemento adicionado incluía 20% en peso de residuo de mampostería. Las propiedades mecánicas se redujeron con la incorporación del árido grueso reciclado, sin embargo, los resultados se encuentran dentro de las características admisibles para ser utilizado en varios elementos constructivos por sus aceptables propiedades mecánicas.

Actualmente, es frecuente el empleo de áridos procedentes del reciclado de concretos en la sub-base de carreteras o en la fabricación de barreras de contención rígidas, así como su adición como agregado en nuevos concretos, especialmente la fracción gruesa, ya que es esta la que mejores propiedades presenta.

4.6.3 Reciclaje de plástico en la elaboración de madera plástica

El plástico en sus inicios fue considerado un gran invento; al pasar las décadas su uso se extendió por todo el mundo, provocando el aumento de su fabricación por parte de las empresas (Caballero et al., 2019) para la producción de envases o envoltorios para diversas industrias entre ellas la de la construcción, con el paso de los años, se desencadenó una problemática relacionada a la acumulación de grandes cantidades de desechos plásticos en los rellenos sanitarios, debido a que son materiales orgánicos cuya degradación tarda entre 150 y 400 años (Posada, 2012). En el mundo se producen al año 300 millones de toneladas de desechos plásticos, equivalente al peso total de la población humana, de los cuáles sólo se recicla 9%, el resto llega a zonas como la selva, ríos, y el océano. Ahora inclusive se habla de la existencia de microplásticos y nanoplásticos que ocasionan serios problemas a la fauna marina (Foro Consultivo Científico y Tecnológico [FCCyT], 2019).

La madera plástica, elaborada a base de materiales reciclados, constituye entonces una alternativa para reducir el problema de la contaminación,

recuperando el material para su reincorporación al mercado. La mayoría de los productos de madera plástica en el mercado están hechos de polietileno (PE), pero se pueden obtener utilizando polímeros como polipropileno (PP), poliestireno (PS) y cloruro de polivinilo (PVC) o mezclas de diferentes residuos plásticos. Además, se pueden agregar rellenos y aditivos como fibras naturales, aserrín, rellenos minerales y fibra de vidrio a las formulaciones de madera plástica (Evingür et al., 2020).

A continuación, se describe de manera general, el proceso de elaboración de la madera plástica (Rincón et al., 2018):

- Separación del plástico usado desde los centros de acopio o plantas de reciclaje.
- Molienda del material plástico en molinos trituradores para obtener pellets de plástico.
- Homogenización del material a partir del aglutinado, aquí se mezclan todos los materiales e ingredientes para realizar una combinación equitativa de los diferentes plásticos. La máquina aglutinadora consiste en unas cuchillas rotativas que al girar calientan el plástico por medio de la fricción, condensando el material triturado.
- Finalmente, se realiza la extrusión, que transforma este material en diferentes productos. Durante la extrusión, el plástico es vertido, pasa a través de una tolva y posteriormente por un tornillo sin fin transportando los gránulos de plásticos hacia el molde y a su vez la temperatura aumenta para fundir el material que tomará la forma del molde elegido.

Las ventajas que se tiene al usar la madera plástica es que es resistente, durable, económica, reciclable, con poco mantenimiento. Adicionalmente, su instalación es fácil, no absorben contaminantes por ser impermeables y no tienen astillas a diferencia de la madera natural, lo que evita que se estropeen alimentos perecederos empacados en contenedores hechos con madera plástica (González, 2013).

4.6.4 Reciclaje de lámparas de mercurio

Debido a su eficiencia, menor costo en comparación con las luces LED y reducido consumo de energía (ahorran de un 60 % a 75 % de energía en

comparación con las incandescentes), el uso de las lámparas y bombillos fluorescentes se ha extendido en comunidades, industrias, comercios e instituciones de los países en desarrollo; en consecuencia, la generación de residuos una vez culminada su vida útil, también se ha incrementado (M. López et al., 2019).

El contenido de mercurio en una lámpara fluorescente puede estar entre 0.1 a 3.6 mg y solamente se puede llegar a separar el 4% de las lámparas. Según pruebas de liberación de vapor de mercurio, se comprobó que una vez que se rompen las lámparas liberan continuamente vapor de mercurio y la liberación puede durar más de 10 semanas hasta alcanzar aproximadamente 1 mg (Sánchez et al., 2018).

El mayor riesgo asociado a los millones de lámparas en desuso que son dispuestas de forma inadecuada en los sitios de disposición final, es la acumulación significativa de mercurio en ecosistemas acuáticos, donde se transforma en metilmercurio, este se biomagnifica al pasar a través de la cadena trófica, ocasionando efectos adversos en las comunidades marinas y en consecuencia al ser humano que consume estos organismos. Los efectos adversos del mercurio en peces, aves y mamíferos abarcan desde la disminución de la capacidad reproductiva, deterioro del crecimiento, anomalías de desarrollo y de conducta, hasta la muerte. Por otra parte, el metilmercurio en seres humanos puede provocar efectos perjudiciales en el cerebro, riñones y especialmente al sistema nervioso en desarrollo, fetos e infantes (M. López et al., 2019).

A través de una gestión adecuada, se puede recuperar el mercurio elemental de las lámparas de mercurio en desuso (Figura 10).

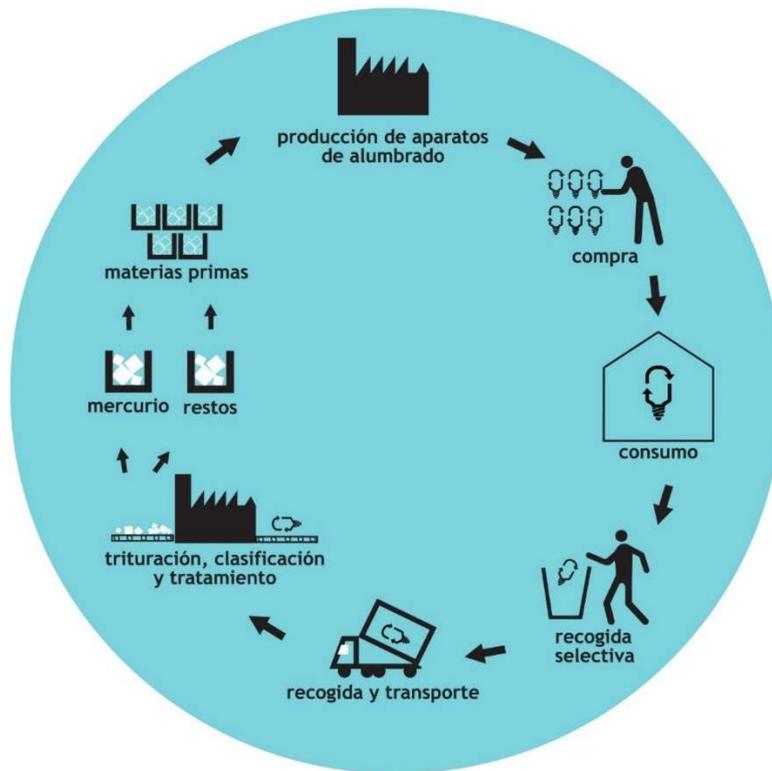


Figura 10. Gestión integral de lámparas de mercurio.

Fuente: Asociación Región de Murcia limpia, 2013.

Entre las alternativas que se tiene para el reciclaje de lámparas fluorescentes con mercurio están, por una parte, la investigación desarrollada por Hernández (2014) que propone un dispositivo compacto (Figura 11) cuyo proceso inicia con la trituración de las lámparas, seguido de un impactador (Figura 12) conformado por un sistema de refrigeración (intercambiador de calor consistente en celdas Peltier que cubren la superficie del tubo más cercano a los discos permitiendo que el mercurio cambie de estado gaseoso a líquido), discos de impacto donde se recogen las gotas de mercurio y un extractor de gases desde la cámara de triturado a través del impactador, los componentes separados se depositan en contenedores diferentes.

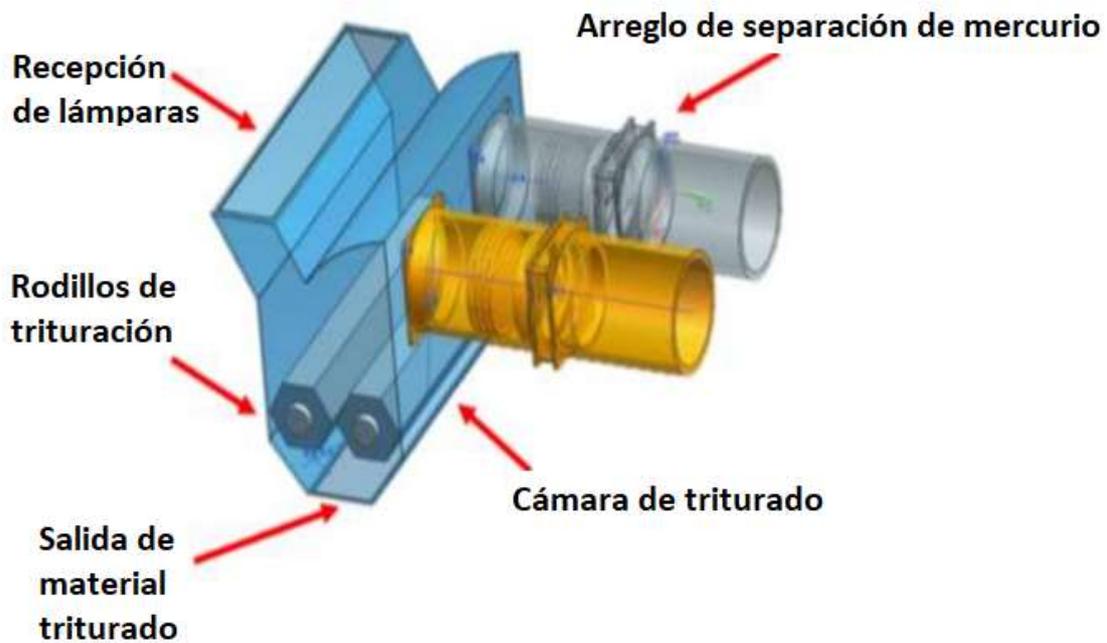


Figura 11. Triturador de lámparas con recuperación de mercurio.

Fuente: Hernández, 2014.

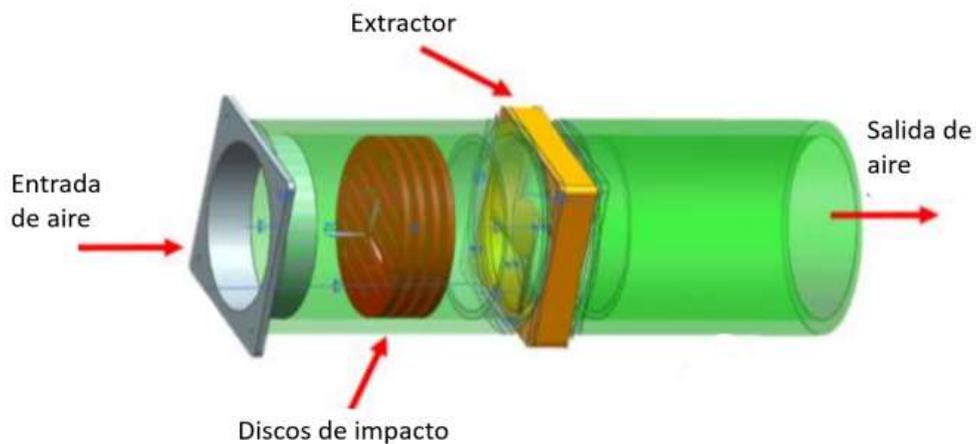


Figura 12. Impactador.

Fuente: Hernández, 2014.

Otro sistema más comercial para la recuperación del mercurio es el equipo Lamptroyer, que es portátil, desarrollado en Argentina, ver la Figura 13. El equipo trabaja por etapas, con bocas de entrada diferenciadas para diferentes diámetros de tubos fluorescentes y lámparas de forma no convencional como los bombillos ahorradores o de vapor de mercurio. Tiene un sistema de trituración que disminuye el volumen de lámparas fluorescentes en piezas muy pequeñas, y son

acumuladas en un cilindro estándar de metal de 208 litros. Al mismo tiempo, el vapor de mercurio y otras partículas contenidas de las lámparas son capturadas por el aspirador de mercurio, que consiste en el subsistema de aspiración constante con método de filtración de alta eficiencia. En la etapa final hay carbón activado especial que captura el vapor, encapsulando el mercurio (Glat, 2015)



Figura 13. Equipo Lamptroyer.

Fuente: Glat, 2015.

Una vez que las lámparas de mercurio son trituradas, los restos son depositados en los respectivos contenedores para su revalorización a través de los componentes recuperados como son: vidrio, cabezales de aluminio, fósforo, plástico y mercurio que puede regresar al ciclo de vida del producto o como materia prima de otros procesos productivos. El proceso de reciclado se evidencia en la Figura 14, se debe considerar que para poder cumplir con una efectiva implementación de aprovechamiento y valorización de residuos es necesario que se desarrolle una estructura de oferta y demanda donde puedan reinsertarse los materiales reciclados de las lámparas como residuo (Martínez et al., 2012).



Figura 14. Ciclo de reciclado de lámparas fluorescentes.

Fuente: Martínez et al., 2012.

Específicamente para el mercurio existen dos caminos, uno es la recuperación, antes mencionada, y la otra alternativa es la disposición final en celdas de seguridad. Esto dependerá de la capacidad del nivel de gestión para este tipo de residuo, además de la capacidad tecnológica y económica para disponer los mismos.

Respecto a la recuperación del mercurio con frecuencia es sometido a la destilación, es decir se lo calienta a temperaturas específicas para llegar a su vaporización y embotellarlo en frío, el mercurio elemental que se obtiene. Este proceso tiene variantes, pero en esencia son procesos que buscan evaporar y seguidamente enfriar el gas para obtener este elemento (Angulo y Romero, 2006).

En caso de no disponer de la capacidad operativa para recuperar el mercurio, se procede a colocar en celdas de seguridad tanto los restos de lámparas trituradas como todos los materiales que pudieron estar en contacto con el mercurio, (Angulo y Romero, 2006). Estas celdas de seguridad tienen características puntuales a fin de garantizar que no impliquen riesgo de contaminación para el

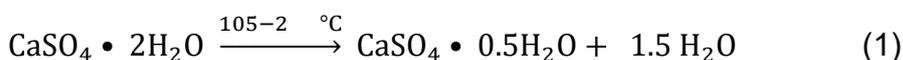
suelo o aguas subterráneas. Estas celdas de seguridad son parte de los rellenos sanitarios, y de esta manera se procede a la disposición final de este tipo de residuo.

4.6.5 Reciclaje de paneles de yeso

En el sector de la construcción y remodelación, ha crecido la tendencia del uso de productos aligerados puesto que presentan mejoras en propiedades como aislamiento térmico, acústico y protección contra el fuego (Rivero, 1997); sin embargo, los residuos prefabricados con materiales mixtos, como los paneles de yeso, no están siendo valorizados dentro de la industria de la construcción o por parte de empresas gestoras de residuos de construcción que en el mejor de los casos son transportados hacia sitios de disposición final.

Los paneles de yeso están conformados básicamente por sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en un porcentaje mayor que 90, celulosa en un porcentaje menor que 30 y fibra de vidrio de grado textil en un porcentaje menor que 10. Adicionalmente, están compuestos por sustancias inertes que acompañan al yeso natural desde su origen; así mismo, pueden contener aditivos especiales que se agregan en la manufactura de la placa laminada acorde con su uso previsto (Fernández, 2010; Rivero, 1997).

Por sus características químicas, los productos de yeso pueden ser reciclados como material aglutinante mediante un proceso de reciclaje simple, similar al proceso industrial para producir yeso comercial, ya que la materia prima, sulfato de calcio, se deshidrata mediante calcinación (1) y puede cambiar repetidamente sus propiedades a través de una reacción de hidratación reversible (2) (Jiménez y García, 2016).



En este sentido, Erbs, Nagalli, Mymrin, Passig, Carvalho y Mazer (2018), estudiaron las características del polvo de yeso reciclado y las propiedades físicas y mecánicas en estado fresco y endurecido para cinco proporciones de yeso reciclado y yeso comercial. A lo largo de ciclos de reciclaje que incluyeron calcinación e hidratación, se demostró que el reciclaje de yeso proveniente de

paneles de yeso y yeso comercial, es técnicamente factible hasta el tercer ciclo de reciclaje.

Por otra parte, en un estudio realizado por Pedreño, Flores, De Brito y Rodríguez (2019), se analizó la influencia del proceso de calentamiento en el aprovechamiento de residuos de yeso, usando sustitución del yeso comercial por residuos de desulfoyeso y residuos de yeso reciclado a partir de paneles de yeso para el desarrollo de nuevos compuestos. Las proporciones de sustitución fueron de 25, 50, 75 y 100 % en peso y sometidos a temperaturas de calentamiento de 0° 100° y 150 °C durante 3, 6 y 24 h. Con respecto a los residuos de paneles de yeso, los resultados confirmaron que era posible sustituir el 100% del yeso comercial con residuos de yeso de la producción industrial de paneles de yeso sin necesidad de hacer algún tratamiento térmico, al tiempo que se garantizaba un buen rendimiento físico-mecánico del producto final.

5 METODOLOGÍA

La investigación se llevó a cabo en 4 grandes fases, las cuales se presentan en la Figura 15:

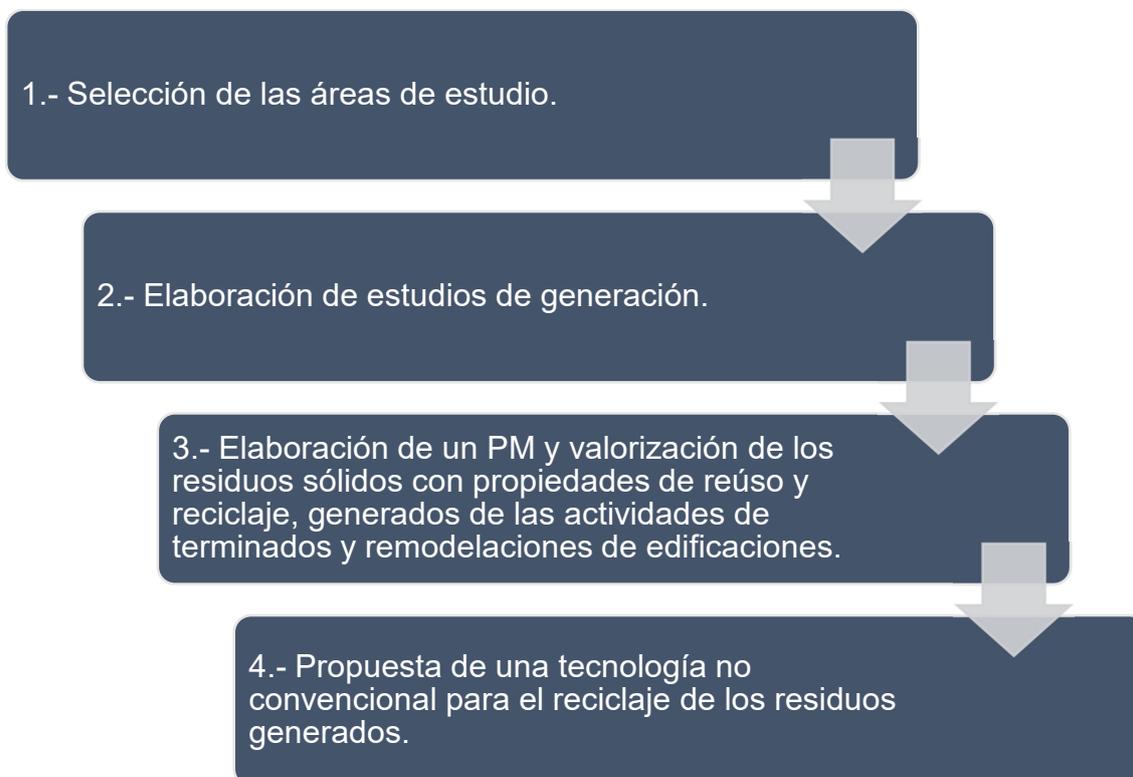


Figura 15. Fases de la investigación.

5.1 Selección de las áreas de estudio

La remodelación de edificaciones corresponde a un conjunto de actividades tendientes a modificar o transformar tanto los espacios interiores como los exteriores de una edificación, estas labores, según las necesidades de cada edificio, pueden abarcar desde pequeñas áreas de un corporativo, así como edificaciones conformadas por varias plantas, lo que implica que la cantidad y tipo de residuos generados variarán según el área de trabajo, el tipo de remodelaciones requeridas y la calidad de los materiales utilizados en un determinado proyecto. Por tanto, la selección de las áreas se realizó bajo los siguientes criterios:

- Las obras civiles estudiadas corresponden a un mismo tipo, en este caso se ha seleccionado edificaciones para oficinas.
- En las edificaciones se realizaron trabajos de remodelación y terminados.
- Las edificaciones se ubican en la misma zona geográfica.
- Facilidad de acceso al área de trabajo y a la información relacionada con los trabajos llevados a cabo en la obra.

Se seleccionaron los edificios 2 y 7 del Instituto de Ingeniería ubicados en Ciudad Universitaria (CU), como se observa en la Figura 16 y un área de oficinas de un corporativo, como áreas de estudio.

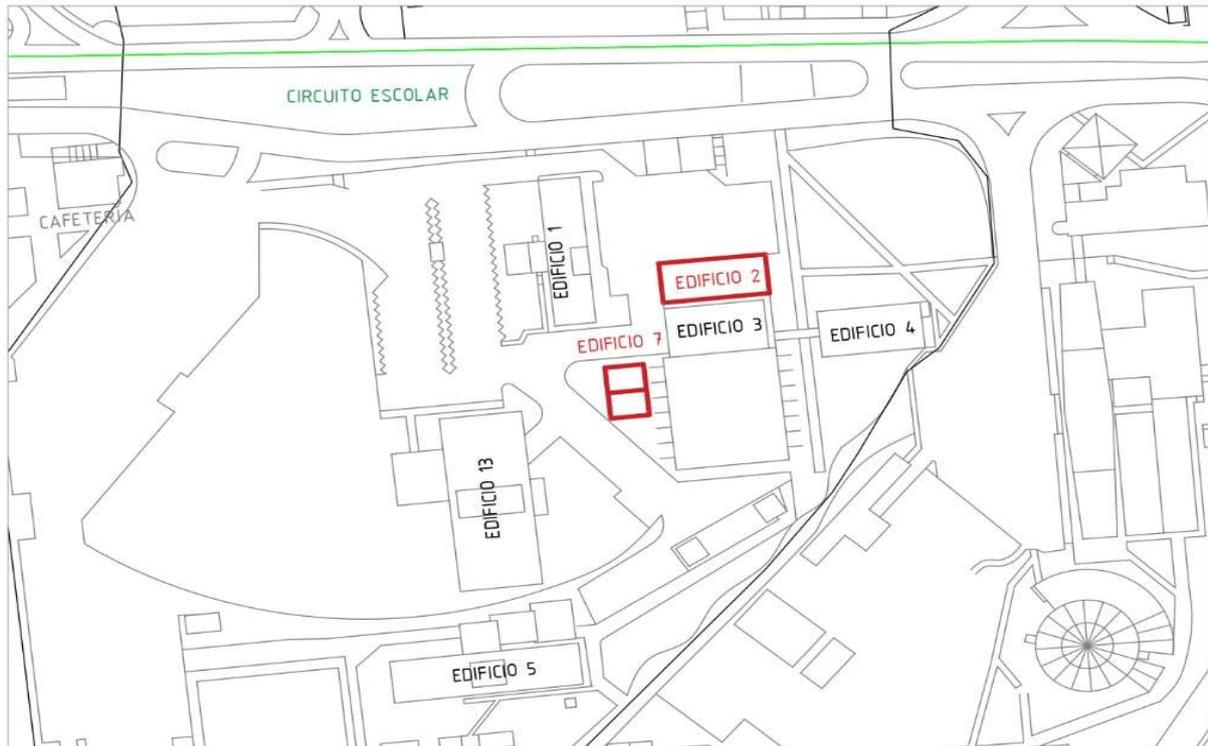


Figura 16. Áreas de estudio, Edificios 2 y 7 IINGEN – UNAM.

5.1.1 Descripción de las áreas de estudio y los trabajos realizados

Edificio 2.

En el Edificio 2, funciona la Subdirección de Estructuras y Geotecnia - Coordinación de Ingeniería Estructural, consta de tres plantas y un sótano, el área trabajada fue de 863.37 m² incluyendo la fachada, el período de ejecución de los trabajos de remodelación fue del 6 de julio de 2020 al 15 de febrero de 2021.

A continuación, se presenta el detalle de los trabajos realizados en el Edificio 2:

- Trabajos Preliminares:
 - Demolición de muro de tabique rojo recocido o block.
 - Desmontaje de puertas de madera, cancelería y muros de paneles de yeso.
 - Retiro de acabados en piso.
 - Desmontaje de las áreas de sanitarios incluyendo muebles sanitarios, lavabos y accesorios.
 - Desmontaje de luminarias.

- Desmontaje del sistema eléctrico: tuberías, conexiones, cableados y accesorios eléctricos.
- Desmontaje del sistema de comunicación, telefonía: tuberías, conexiones, cableados y accesorios.
- Retiro de prefabricados de concreto en fachada.
- Retiro de capa de impermeabilizante en azotea.
- Retiro de escalera de caracol existente.
- Cimentación del cubo del elevador.
- Levantamiento muros de concreto y paneles de yeso.
- Colocación de pisos, plafones y cubierta de azotea.
- Colocación de carpintería, cancelería y herrerías.
- Pintura de muebles y accesorios sanitarios.

Edificio 7.

En el Edificio 7, denominado como “Nabor Carrillo Flores”, funcionan los laboratorios de mecánica de rocas, enrocamientos y microscopía electrónica, el edificio consta de cuatro plantas. El área interior remodelada fue de 84.2 m², el período de ejecución de los trabajos de remodelación fue desde 6 de septiembre al 25 de octubre de 2021.

El detalle de los trabajos realizados en el Edificio 7 se presenta a continuación:

- Desmontaje y retiro de luminarias, muros interiores, pisos y mobiliario.
- Colocación de muros interiores y plafón de yeso.
- Colocación de piso epóxico.
- Colocación tubería de drenaje, rejillas y resanes necesarios.

Oficinas corporativas

En un área de 3,000 m² se realizaron trabajos de terminados de interiores para la colocación de oficinas en un corporativo, el período de ejecución de los trabajos de remodelación fue del 1 de marzo al 29 de junio de 2021. Los trabajos realizados fueron:

- Colocación de cableado eléctrico.
- Colocación de tubería para agua.
- Colocación de ductos de aire acondicionado.

- Instalación de paneles de yeso.

5.2 Elaboración de estudios de generación de residuos

5.2.1 Edificio 7

El método *in situ* utilizado para estimar la cantidad de residuos generados en el Edificio 7 fue el “Análisis numérico de cargas”, consistente en registrar durante un determinado período las “cargas”, es decir, el peso y el volumen de los residuos según su tipo (Tchobanoglous et al., 1994).

Las visitas de campo fueron planteadas en forma diaria con el fin de identificar los componentes de los residuos y proceder a la cuantificación de su peso respectivo de forma diaria; pero conforme se fue obteniendo la información de los residuos y las condiciones de avance de la obra, se reprogramó el periodo de visita a obra de 2 o 3 veces por semana preferentemente, ya que el retiro de los residuos generados en obra hacia el depósito para desechos de construcción del Instituto de Ingeniería, se realizaba de manera semanal o quincenal. Para realizar el pesaje de los residuos se utilizó una balanza de la marca Pocket Balance, con capacidad de 100 kg como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Pesaje de los residuos generados en la remodelación interior del Edificio 7.

En el caso de los residuos que por sus dimensiones no pudieron ser pesados con el instrumento indicado, su peso fue estimado a través de su volumen y densidad.

5.2.2 Edificio 2 y oficinas corporativas

En el caso del Edificio 2 y las oficinas del corporativo, la caracterización se basó en revisión de bitácoras de residuos, generadas en cada caso por el responsable del manejo de residuos en obra.

Los datos de interés en las 3 áreas estudiadas fueron las cantidades, volumen y tipos de residuos generados.

5.3 Elaboración del plan de manejo y valorización

Para la elaboración del PM, se tomó como insumo la información secundaria recolectada de fuentes bibliográficas e información de campo recopilada a través de los estudios de generación realizados en las áreas de estudio sometidas a actividades de remodelación y terminados, para establecer medidas efectivas de gestión para los residuos sólidos generados.

Los elementos bajo los cuales se formuló el plan se establecieron de acuerdo con a la norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011.

5.4 Propuesta de una tecnología no convencional para el reciclaje de los residuos generados.

La propuesta tecnológica se justificó en la investigación bibliográfica presentada en el numeral 4.6.5, así como, en los estudios de generación (numeral 6.1) y la situación actual de valorización (numeral 6.2.9) del presente documento. Adicionalmente, se enfocó en el aprovechamiento de una manera sencilla de los residuos de elementos prefabricados con materiales mixtos, específicamente en los paneles de yeso; para la fabricación revestimientos decorativos para interiores (losetas 3D artesanales).

Con el aprovechamiento de estos materiales se pretende incentivar la participación activa, conjunta y sustentable del sector de terminados y remodelación de edificaciones (artesanos y constructores) en las exigencias de construcciones sustentables establecidas en la norma para edificaciones sustentables NMX-AA-164-SCFI-2013.

La tecnología propuesta fue desarrollada en 4 fases como se observa en la figura 18:



Figura 18. Fases del desarrollo del material reciclado.

5.4.1 Extracción del material a reciclar

En la presente investigación, se emplearon residuos de paneles de yeso recolectados de una edificación en la cual se realizaron trabajos de remodelación en la CDMX, el material recolectado pertenece a uno de los productos de una misma marca comercial. Una vez en el laboratorio, se inició con la separación manual de materiales impropios como restos de plástico o clavos de los paneles de yeso, seguido, se redujo manualmente el tamaño de los residuos a un tamaño aproximado de 10 x 10 cm (Figura 19) con el fin de depositarlos en la tolva del molino de martillos marca Servex modelo P205, aquí, se redujo el residuo a un tamaño menor a 2 cm (Figura 20), posteriormente se utilizó una licuadora industrial marca Waring Blendor modelo CB-5 (Figura 21) para reducir el tamaño del residuo a un tamaño de partícula capaz de pasar a través de una malla No. 8 (2.36 mm) durante el primer tamizado (Figura 22). El papel retenido en el tamiz No. 8 fue retirado y el yeso retenido fue reincorporado a la licuadora industrial hasta que el material pasara a través de un tamiz con luz de malla de 1.4 mm (Figura 22), este último tamizado se realizó por tres ocasiones con el fin de retirar la mayor cantidad de papel triturado del yeso (Figura 23).

Es importante indicar que el proceso de extracción no consideró la calcinación del sulfato de calcio dihidratado a sulfato de calcio hemihidratado para evitar el consumo energético que la calcinación implicaría en caso de llevar este proceso a niveles de tratamiento de mayores volúmenes.



Figura 19. Reducción inicial del tamaño del residuo.



Figura 20. Molino de martillos marca Servex modelo P205 (3000 a 3400 rpm).



Figura 21. Licuadora industrial Waring Blendor modelo CB-5.



Figura 22. Tamizado malla 2.36 mm (izquierda) y tamizado malla 1.4 mm (derecha).



Figura 23. Residuos de papel posterior al tamizado.

5.4.2 Caracterización física del material

Se desarrollaron una serie de ensayos para identificar las propiedades físicas de la muestra de yeso extraída de los residuos de placas de yeso (sulfato de calcio dihidratado), los cuales se describen a continuación.

5.4.2.1 Análisis por malla del agregado fino

El ensayo se basó en el método ASTM (American Society for Testing and Materials) C136. Se secó en una estufa dos muestras de aproximadamente 150 g de yeso extraído a una temperatura de 60°C hasta masa constante. Los tamices seleccionados para el ensayo fueron No. 8 (2.36 mm), No. 10 (2.0 mm),

No.30 (0.595 mm), No. 100 (0.149 mm) y No. 200 (0.074 mm), se colocó el juego de tamices en orden de tamaño decreciente de las aberturas desde la parte superior a la inferior y se colocó la muestra en el tamiz superior (Figura 24). Se agitaron los tamices de forma manual durante el tiempo suficiente, para que en un minuto adicional después de terminado el tamizado no pase más de-1% en masa del material retenido. Se realizaron dos repeticiones del procedimiento y posteriormente se reportó el promedio de los valores obtenidos.



Figura 24. Análisis por tamizado.

5.4.2.2 Contenido de humedad (contenido de agua libre)

Para este ensayo, se tomó como referencia el método ASTM D2216, el cual se adaptó considerando que el yeso contiene agua de hidratación dentro de su composición química. Para iniciar el proceso, se tararon las cápsulas utilizadas en una mufla a 700 °C por 4 h. Seguido, en una balanza se determinó y registró la masa de la cápsula, posteriormente, se colocó en la cápsula una muestra de 10 g, esta muestra se colocó en la estufa a una temperatura de 60 °C por 2 h, las muestras se dejaron enfriar en un desecador. Finalmente se determinó la masa del contenedor y material seco (Figura 25).



Figura 25. Determinación del contenido de humedad.

Se calculó el contenido de humedad de la muestra, mediante la fórmula 3 (ASTM D2216):

$$\%H = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_t} \times 100 = \frac{m_A}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

H = es el contenido de humedad, (%).

m_A = Masa del agua ($m_A = m_1 - m_2$) (g).

m_s = Masa seco del material ($m_s = m_2 - m_t$) (g).

m_1 = la masa de tara más el yeso húmedo (g).

m_2 = la masa de tara más el yeso secado (g).

m_t = la masa de tara (g).

Se realizaron tres repeticiones del procedimiento y posteriormente se reportó el promedio de los valores obtenidos.

5.4.2.3 Determinación del contenido orgánico

Para hallar el porcentaje aproximado del papel remanente en la muestra de yeso se utilizó el siguiente procedimiento:

Se tararon las cápsulas a ser utilizadas en un horno de mufla a 550 ± 50 °C durante una hora, previo a su utilización se dejaron enfriar en un desecador y se pesaron. Se depositaron aproximadamente 2 g de yeso en la cápsula, la muestra se dejó en el horno a 105 °C por 24 h. Posteriormente la cápsula con la muestra se colocó en el desecador para enfriarse y se registró la masa. Durante esta parte del procedimiento se eliminó la humedad de la muestra y se perdió parte del agua de hidratación del sulfato de calcio. La segunda parte consistió en

transferir la muestra a un horno de mufla frío, éste hasta se calentó a 550°C durante una hora. Luego, se enfrió en el desecador para equilibrar la temperatura y se pesó. Esta parte del procedimiento permitió calcinar los sólidos volátiles (papel) presentes en la muestra del yeso así como el restante del agua de hidratación del sulfato de calcio (Baird y Bridgewater, 2017). Los materiales utilizados durante la realización del ensayo se observan en la Figura 26.



Figura 26. Materiales utilizados para la determinación del contenido orgánico.

Se calculó el porcentaje de sólidos volátiles (papel) mediante la fórmula 5 (Baird y Bridgewater, 2017):

$$\% \text{ sólidos volátiles} = \frac{A-C (100)}{A-B} \quad (5)$$

A es la masa de la muestra seca + cápsula (g).

B es la masa de la cápsula (g).

C es la masa de la muestra + cápsula después de la ignición (g).

Se realizaron tres repeticiones del procedimiento y posteriormente se reportó el promedio de los valores obtenidos.

5.4.2.4 Determinación de la relación agua/yeso por el método de amasado a saturación

Para la determinación de la relación agua/yeso se tomó como referencia la UNE-EN 13279-2, el procedimiento consistió en marcar un vaso de precipitado de 66 mm de diámetro interior y 66 mm de altura, a los 16 mm y a 32 mm de altura

sobre la superficie inferior, posteriormente, se vertieron 100 g de agua teniendo cuidado de no mojar la parte superior de las paredes del recipiente. En una balanza se determinó la masa m_0 con una precisión de ± 0.1 g. El tiempo para realizar el ensayo se estableció en 120 ± 5 s el cual fue medido con un cronómetro. Se espolvoreó el yeso uniformemente sobre la superficie del agua, de forma que al cabo de 30 s la pasta de yeso alcanzó la primera marca y la segunda al cabo de 60 s. Se continuó espolvoreando yeso hasta que al cabo de 90 ± 10 s la pasta de yeso alcanzó 2 mm por debajo de la superficie del agua. Durante los 20 a 40 s posteriores, la cantidad de yeso espolvoreada en la superficie del agua y por los bordes del recipiente fue la suficiente para que la capa de agua desapareciera. En el caso del yeso reciclado, se extendió el tiempo en el que se realizó el ensayo para asegurar que la cantidad de yeso espolvoreado desapareciera la capa de agua (Figura 27). Finalmente, se eliminó el exceso de yeso de los bordes del recipiente de vidrio y se determinó la masa m_1 con una precisión de $\pm 0,1$ g.



Figura 27. Determinación de la relación agua / yeso.

La relación agua - yeso se calculó mediante la ecuación 6 (UNE-EN 13279-2):

$$R_{A/Y} = \frac{100}{m_1 - m_0} \quad (6)$$

Donde:

$R_{A/Y}$ es la relación agua / yeso.

m_0 es la masa del vaso + la masa del agua (g).

m_1 es la masa del vaso + la masa del agua + la masa del yeso (g).

Se realizaron tres repeticiones del procedimiento y posteriormente se reportó el promedio de los valores obtenidos.

5.4.2.5 Determinación del tiempo de fraguado

El ensayo se basó en la norma UNE-EN 13279-2 (Método del cono de Vicat). Se colocó el molde de caucho con su parte más ancha en contacto con la placa de vidrio. Se amasó 150 g de yeso con la cantidad de agua determinada en la relación agua/yeso. Se anotó el momento en que se empieza a echar el yeso en el agua. Se rellenó el molde de caucho con un exceso de pasta de yeso. Se eliminó el exceso de material con la espátula plana. Se puso en contacto la aguja con la superficie de la pasta soltando el dispositivo de Vicat. Se abrió la barra guía utilizando el mecanismo de disparo. El tiempo transcurrido entre penetraciones se tomó cada 2 horas, debido a que el yeso reciclado tiene lento fraguado. Se limpió y secó el cono entre cada penetración, las distancias entre cada marca de penetración fueron de 5 mm (Figura 28). Se anotó el momento en que el cono penetró hasta una profundidad de (22 ± 2) mm sobre la placa de vidrio, este corresponde al tiempo de inicio del fraguado. El tiempo final de fraguado corresponde al tiempo en el que la penetración es 0 mm.



Figura 28. Determinación del tiempo inicial de fraguado.

5.4.3 Diseño y fabricación del producto reciclado

5.4.3.1 Dimensiones de fabricación

Las losetas 3D constituyen elementos decorativos que generan un espectáculo visual interesante en los ambientes de oficina y el hogar; de manera artesanal, este tipo de recubrimientos se fabrica a base de yeso en variedad de dimensiones y formas, por lo que se eligió el molde considerando la limitante del material extraído de la muestra de residuos de remodelación.

Con respecto a las normas técnicas nacionales, no se identificaron especificaciones técnicas referentes a losetas de yeso, por lo que, para esta investigación, se optó por la elaboración de las losetas 3D decorativas para interiores con el uso de moldes prefabricados de polietileno utilizados para fabricación artesanal.

5.4.3.2 Diseño de las mezclas

Las proporciones de los materiales empleados se definieron considerando el aprovechamiento de la mayor cantidad del material extraído y principios de la fabricación artesanal de losetas de yeso las cuales se realizan a base únicamente de yeso o una combinación de yeso con cemento, estableciendo así un parámetro en la dosificación que permitió aproximar los pesos de los materiales utilizados (Tabla 5).

Tabla 5. Diseño de las mezclas

Mezcla	% YE	%C
1	100	0
2	95	5
3	85	15
4	75	25

YE= yeso extraído, C= cemento.

5.4.3.3 Fabricación

A partir de la definición de las mezclas se continuó con la fabricación de las losetas cuyo proceso se detalla a continuación:

- a) Pesaje de los materiales: de acuerdo con la dosificación establecida, se realizó el pesaje de cada uno de los elementos que conforman la mezcla (Figura 29).



Figura 29. Pesaje de los materiales.

- b) Amasado y reposo: se realizó la mezcla de los materiales mediante amasado manual, en el caso de las mezclas que contenían cemento, se agregó en primer lugar el cemento y en segundo lugar se agregó el yeso (figura 30), posteriormente las mezclas se dejaron reposar por un minuto.



Figura 30. Amasado manual.

- c) Moldeo: Finalmente, la mezcla elaborada fue vaciada en moldes plásticos artesanales prefabricados (Figura 31) previo a la colocación de

antiadherente (aceite de cocina) en la superficie de vaciado. Una vez vertida la mezcla, se sacudió diez veces sobre la mesa para eliminar las burbujas de aire y asegurar que se rellenen las esquinas del molde.



Figura 31. Moldeo.

d) Extracción: Pasados 2 días se extrajeron las losetas de los moldes y se dejaron secar por un día adicional expuestas al sol (Figura 32).

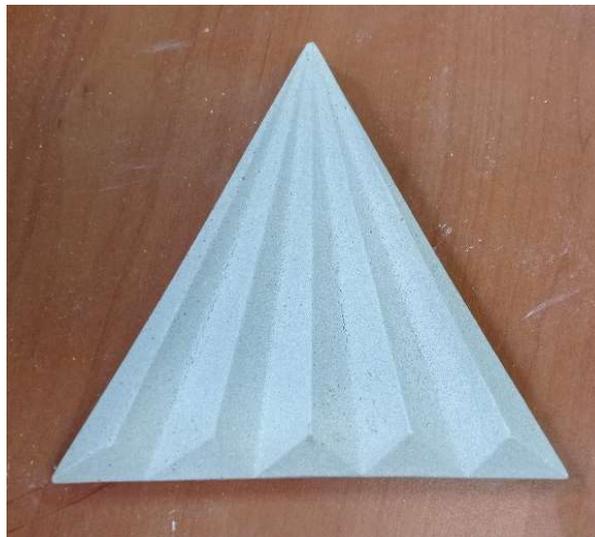


Figura 32. Extracción.

5.4.4 Evaluación de aspectos dimensionales

Debido a que a nivel nacional no se tiene una norma que evalúe la calidad de losetas elaboradas en base a yeso, se adaptaron los métodos establecidos en la

norma NMX-C-422-ONNCCE-2019 para “Losetas cerámicas esmaltadas y sin esmaltar para piso y muro” en lo referente a los métodos para evaluación de los aspectos dimensionales.

5.4.4.1 Método de ensayo para determinar las dimensiones de los lados y espesor de la loseta

Este método determina el ancho, largo y espesor de la loseta cerámica a partir de la medición de las losetas con un Calibrador Vernier con una precisión de medición de ± 0.1 mm (Figura 33), para esto se prepararon 10 losetas enteras.

A continuación, se presenta el procedimiento seguido:

- 1) Medir el largo de los lados de la loseta con el indicador calibrador vernier y registrar los resultados con una precisión en mm.
- 2) Medir los espesores, incluyendo cada esquina de la loseta, registrar los resultados con una precisión en mm.
- 3) Repetir el procedimiento con todas las losetas.

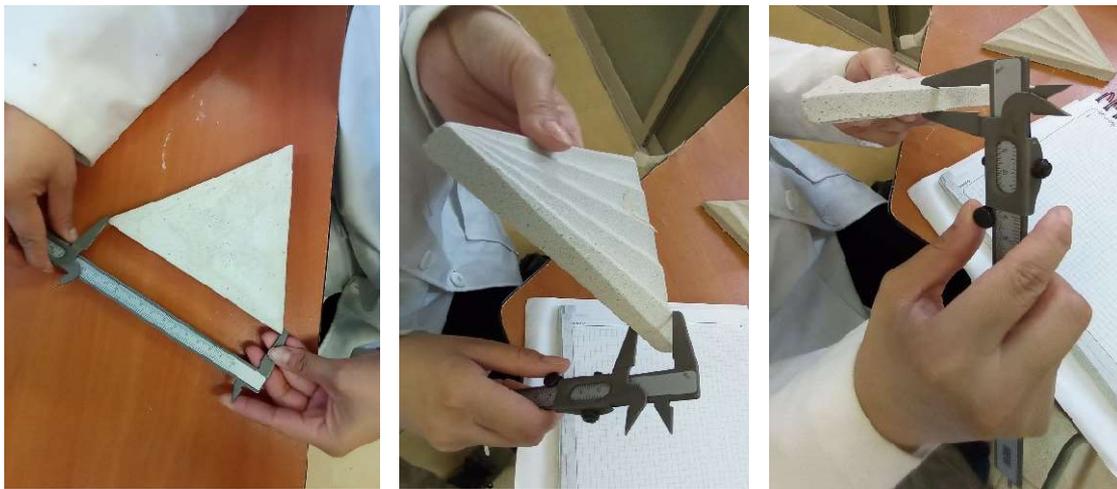


Figura 33. Determinación del largo, ancho y espesor de la loseta.

6 RESULTADOS

6.1 Estudios de generación

Edificio 7.

Producto de los trabajos de remodelación realizados en el Edificio 7 (Figura 34), se generó una variedad de residuos que fueron almacenados en 2 puntos al

interior del edificio (Figuras 35), para ser trasladados posteriormente al depósito exclusivo para desechos de construcción del Instituto de Ingeniería (Figura 36).



Antes.



Después.

Figura 34. Segunda planta del Edificio 7, antes y después de la remodelación.



Residuos de loseta vinílica.



Paneles metálicos.



Perfiles metálicos.



Plásticos.



Sobrantes de concreto.



Residuos de yeso.

Figura 35. Almacenamiento de residuos generados en el Edificio 7.



Figura 36. Depósito exclusivo para desechos de construcción del Instituto de Ingeniería.

La caracterización de los residuos generados en la remodelación del edificio 7 se presenta en la Tabla 6:

Tabla 6. Residuos generados en la remodelación del Edificio 7.

No.	Categoría	Residuo	Peso (kg)	Volumen (m ³)
1	A	Sobrantes de concreto.	92	0.130
2	C	Perfiles de aluminio.	200	7.200
3		Paneles de aluminio para luminarias.	56	0.560
4		Postes metálicos.	7	0.070
5	D	Loseta de porcelana.	10.2	0.003
6	E	Residuos de yeso.	40	0.034
7	H	Loseta vinílica.	321	0.350
8		Paneles de yeso.	12	0.020
9	I	Vidrio.	212	0.085
10		Paneles de madera.	77.8	0.328
11		Cables de diferentes calibres.	1.1	0.002
12		Residuos de retiro de impermeabilizante acrílico.	28	0.120
13		Puertas de madera.	8.7	0.037
14		Perfiles de madera.	8.5	0.036
15		Aserrín.	4	0.040
16		Empaques (cajas de cartón, sacos de cemento o yeso, etc.).	5	0.440
17		Envases plásticos (PET, poliestireno expandido, bolsas).	9	0.460
18		Peligrosos	Lámparas.	20
19	Envases vacíos contaminados con materiales peligrosos.		10	0.140
		Total	1,122.3	10.255

* Categoría asignada de acuerdo con la norma NACMX-007-RNAT-2019.

Debido al deterioro de los materiales interiores del Edificio 7 no se reutilizaron los materiales extraídos en obra, a excepción de las puertas de madera, las cuales fueron reutilizadas por encontrarse en buen estado.

Residuos reciclables como: material ferroso, maderas, cartón, plástico, fueron recolectados de manera informal por parte de pepenadores quienes posteriormente los vendieron para su reciclaje o reutilización.

El resto de los residuos fueron enviados para su disposición final.

Edificio 2.

La remodelación interior y exterior del Edificio 2 (Figura 37), en un área de 863.37 m² generó los residuos presentados en la Tabla 7.



Antes

Después

Figura 37. Fachada del Edificio 2 antes y después de la remodelación.

Tabla 7. Residuos generados en la remodelación del Edificio 2.

No.	Categoría	Residuo	Peso (kg)	Volumen (m ³)
1	A	Concreto de elementos prefabricados.	193,200	84.000
2		Sobrantes de concreto (reellenos área de foso elevador).	23,400	18.000
3	B	Concreto en traveses y castillos.	50,400	21.000
4	C	Acero de traveses y castillos de demolición.	250	0.781
5		Perfiles de acero como elementos de anclaje para prefabricados.	130	0.406
6		Perfiles de aluminio.	80	0.500
7		Tubería.	170	0.022
8		Acero sobrante del elevador.	108	0.028
9		Gabinetes de lámparas anteriores.	436	4.360
10		D	Tabique rojo recocido.	1,862
11	Tabique vitricota Santa Julia.		56	0.044
12	Piso porcelánico formato 60 x 60 cm.		125	63.000
13	Desperdicios de morteros.		56,000	35.000
14	H	Loseta vinílica.	153.9	0.168
15		Paneles de yeso.	40	0.067
16	I	Paneles de madera.	40.7	0.172
17		Vidrio.	68	0.002
18		Cables de diferentes calibres.	110	0.200
19		Maderas de diferentes medidas. tapiales y cimbras.	4,125	17.390
20		Empaques (cajas de cartón. sacos de cemento o yeso. etc.).	115	10.123
21		Envases plásticos (PET. poliestireno expandido. bolsas).	90	4.592
22		Residuos de retiro de impermeabilizante acrílico.	14,950	6.500
23		Peligrosos	Envases vacíos de thinner.	10

Tabla 12. Residuos generados en la remodelación del Edificio 2 (continuación).

No.	Categoría	Residuo	Peso (kg)	Volumen (m ³)
24	Peligrosos	Envases vacíos de pintura esmalte.	40	1.513
25		Adhesivo para cristales.	10	0.015
26		Envases vacíos de cartuchos de gas butano para soldar tuberías.	20	0.030
27		Tanque de 20 kg de GLP para fundir impermeabilizante.	19.5	6.724
Total			346,009,1	289.015

* Categoría asignada de acuerdo a la norma NACMX-007-RNAT-2019.

No se reutilizaron los materiales extraídos en obra debido a su deterioro, por otra parte, actualmente existen materiales más resistentes y modernos para obras de remodelación.

Oficinas corporativas.

La Tabla 8, presenta la cuantificación de residuos generados en las labores de terminados de un corporativo, correspondiente a un área de 3,000 m².

Tabla 8. Residuos generados en las labores de terminados de un corporativo.

No.	Categoría	Residuo	Peso (kg)	Volumen (m ³)
1	C	Tuberías de cableado eléctrico. Pedacería de canaleta metálica. Residuos de ductos de aire acondicionado.	640	6.75
2	I	Cartón.	61	5.4
3		Plástico PET.	13	0.36
Total			714.0	12.51

* Categoría asignada de acuerdo con la norma NACMX-007-RNAT-2019.

Todos los residuos generados en esta obra fueron entregados a empresas especializadas acreditadas para su reciclaje.

La Figura 38 presenta el porcentaje por categoría del total de los residuos generados en cada área de estudio.

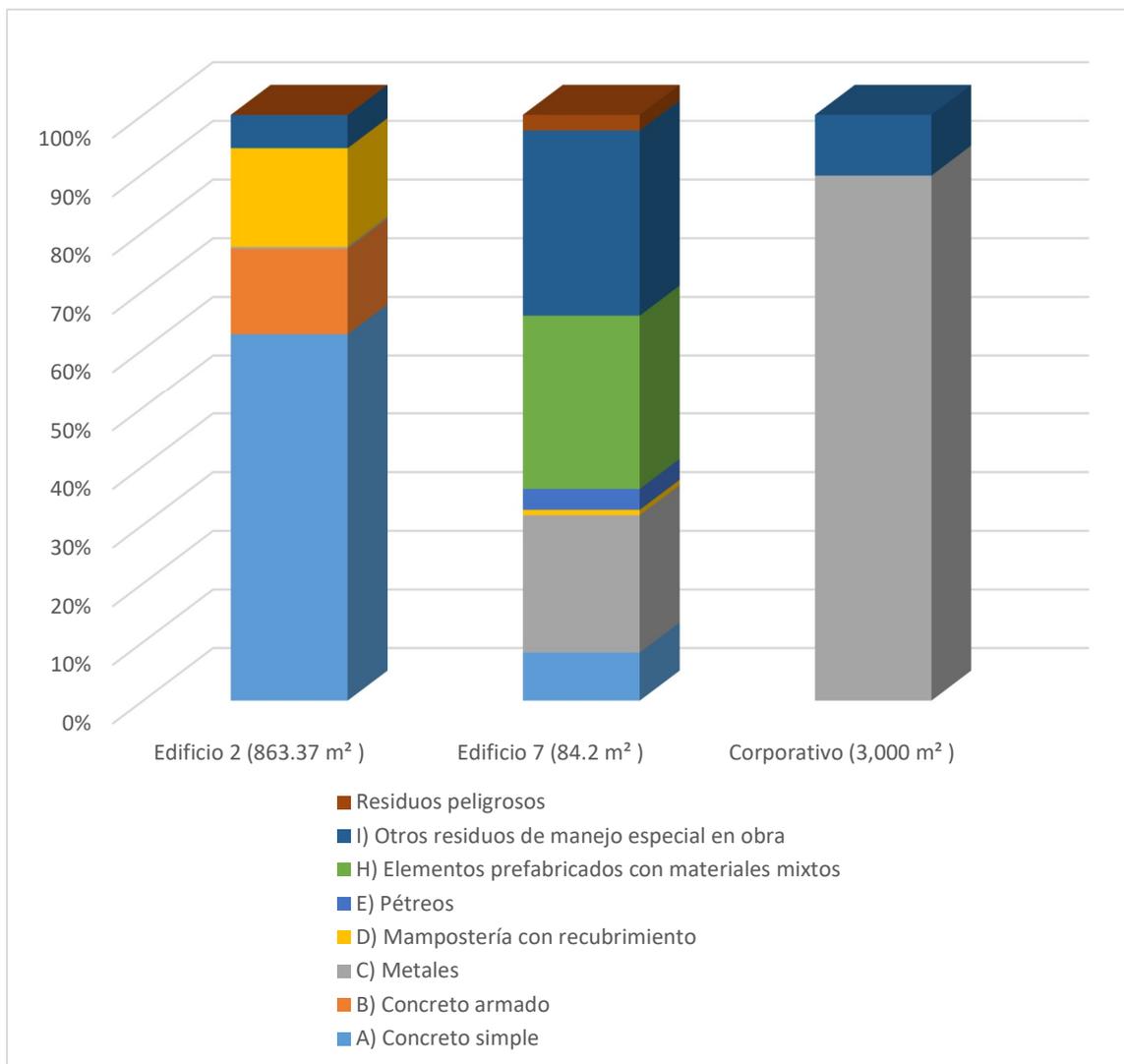


Figura 38. Porcentaje por categoría del total de RCD generados en cada área de estudio.

En la Figura 38 se observa que en el Edificio 2 se generó el mayor porcentaje de residuos (63%) en la categoría A (concreto simple) conformada por residuos de cemento de elementos prefabricados y sobrantes de concreto, seguido por el 17% que corresponde a la categoría D (mampostería con recubrimiento) conformada por residuos como: tabique rojo recocido, tabique vitricota Santa Julia, desperdicios de morteros, el tercer porcentaje más alto es 14% relacionado a la categoría B (concreto armado) conformada por concreto de trabes y castillos, en menor porcentaje (6%) se generaron residuos de la categoría I (otros residuos de manejo especial generados en obra) dentro de los que se encuentran: paneles de madera, vidrio, cables de diferentes calibres, maderas de diferentes medidas, tapias y cimbras, empaques (cajas de cartón, sacos de cemento o

yeso, etc.), envases plásticos (PET, poliestireno expandido, bolsas), residuos de retiro de impermeabilizante acrílico, un 0.34% representa la categoría C (metales), el 0.06% representa a la categoría H (elementos prefabricados con materiales mixtos) y el 0.03% corresponde a residuos peligrosos.

Por otra parte, con respecto al Edificio 7, se observó que los mayores porcentajes de generación se encuentran repartidos en diferentes categorías, siendo que el 31% pertenecen a la categoría I (otros residuos de manejo especial en obra) conformada por residuos variados como: vidrio, paneles de madera, cables de diferentes calibres, residuos de retiro de impermeabilizante acrílico, puertas de madera, perfiles de madera, aserrín, empaques (cajas de cartón, sacos de cemento o yeso, etc.), envases plásticos (PET, poliestireno expandido, bolsas), seguido por el 30% que correspondiente a la categoría H (elementos prefabricados con materiales mixtos) conformada por residuos de loseta vinílica y paneles de yeso, el tercer porcentaje más alto es 23% relacionado a la categoría C (metales) conformada por perfiles de aluminio, paneles de aluminio para luminarias y postes metálicos, en menor porcentaje (8%) se generaron residuos de la categoría A (concreto simple), un 4% representa la categoría E (pétreos), el 1% representa a la categoría D (mampostería con recubrimiento) y el 3% residuos peligrosos.

En el corporativo, se evidencia que el mayor porcentaje (90%) corresponde a la categoría C (metales) entre los que se encuentran: tuberías de cableado eléctrico, pedacería de canaleta metálica y residuos de ductos de aire acondicionado y el menor porcentaje (10%) está compuesto por cartón y plástico PET.

6.2 Plan de manejo y valorización

El PM permite establecer medidas efectivas de gestión para los residuos sólidos generados de procesos de remodelación y terminados, el mismo tomó como insumos para su elaboración la información secundaria recolectada de fuentes bibliográficas e información de campo recopilada a través de los estudios de generación realizados en dos edificaciones sometidas a actividades de remodelación y terminados.

6.2.1 Marco Normativo

En general la normativa e instrumentos de gestión de sustento son:

- Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, LGEPA (2018).
- Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, LGPGIR (2003).
- Reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos LGPGIR (2014).
- Norma Ambiental NACMX-007-RNAT-2019 que establece la clasificación y especificaciones de manejo integral para los residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México (2021).
- Norma oficial mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.
- NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE.

6.2.2 Modalidad del plan de manejo y su ámbito de aplicación territorial

El Plan de Manejo corresponde a ser individual y local. Busca fomentar su aplicación en procesos de remodelación y terminados de edificaciones en la Ciudad de México.

6.2.3 Residuos objeto del plan

Se consideró la clasificación de los residuos de construcción y demolición indicados en la norma NACMX-007-RNAT-2019:

- a) Concreto simple.
- b) Concreto armado.
- c) Metales.
- d) Mampostería con recubrimiento.

- e) Pétreos.
- f) Mezclas asfálticas.
- g) Material de excavación.
- h) Elementos prefabricados con materiales mixtos.
- i) Madera.
- j) Vidrio (flotado y templado).
- k) Residuos de instalaciones eléctricas.
- l) Plástico (PET, poliestireno expandido, bolsas HDPE).
- m) Cartón, sacos de papel.
- n) Residuos peligrosos.

6.2.4 Diagnóstico

En la Ciudad de México la información relacionada con la cuantificación de la generación de residuos de actividades de terminados y remodelación de edificaciones es muy escasa debido al bajo registro de planes de manejo por parte de esta industria. Sin embargo, en el 2018 se estimó una generación de residuos de construcción y remodelación de 1,593,512.64 t provenientes de edificaciones (no incluye residuos de demolición), lo que representó el 16% del total de 10,153,322.63 ton de RCD generados en ese año (Secretaría del medio Ambiente de la Ciudad de México [SEDEMA], 2020a). Por otra parte, de acuerdo con el Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2019 elaborado por SEDEMA, basada en datos declarados por los prestadores de servicios con Registro y Autorización de Establecimientos Mercantiles, de servicios y/o unidades de transporte relacionados con el manejo integral de residuos sólidos urbanos y/o de manejo especial de competencia local que operen y transiten en la CDMX (RAMIR), ese año se generaron 270,315.77 t/año de residuos de construcción y demolición, de estas, 34,076 fueron acopiadas y aprovechadas; y 126,985.12 fueron entregadas para disposición final, es importante indicar que estas cifras no consideran la cantidad de RCD que fueron dispuestos en tiraderos a cielo abierto y sitios no autorizados (SEDEMA, 2020). Aunque la generación es fluctuante ya que depende en gran medida de las características de las obras de construcción, remodelación o demolición que se estén efectuando, actualmente se estima que diariamente son generadas 14,000 t/día de RCD (Gutiérrez, 2021).

De manera general entre el 60 y 70% de los residuos RCD son altamente valorizables, puesto que están compuestos de materiales inertes, no peligrosos, con alto potencial de aprovechamiento (SEDEMA, 2021).

Existen materiales que pueden potencialmente ser recuperados o reciclados, pudiendo ser estos: cableado de cobre, tuberías de cableado eléctrico, tuberías de agua, pedacería de canaleta metálica, residuos de ductos de aire acondicionado, perfiles, residuos de charola eléctrica, chatarra, cartón y plástico; de estos, los materiales que se valorizan con mayor facilidad son la chatarra metálica, los envases de PET y el cartón. Además, existen residuos como paneles de yeso que se generan en gran cantidad durante los procesos de remodelación en oficinas y tienen potencial de ser valorizados, sin embargo, son entregados para su disposición final.

Una de las principales problemáticas identificadas en torno al manejo de los RCD es su incorrecta disposición, mayormente estos son transportados en vehículos de carga privados que en una mínima parte los entregan a rellenos sanitarios donde por su volumen disminuyen su tiempo de vida útil, y por otra parte, la gran parte de los RCD terminan en suelos urbanos como en predios abandonados o la vía pública y aún más preocupante, en áreas de valor ambiental, con el consiguiente efecto negativo sobre dichos ecosistemas (CMIC, 2017).

Con el fin de aprovechar estos residuos, la Ciudad de México a través de la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE) cuenta con dos plantas itinerantes para el tratamiento de estos residuos, logrando un reciclaje de 38.30 t/día, 97% de los residuos que ingresan a sus plantas, generando materia prima para nuevas construcciones (SEDEMA, 2021). Como parte de la iniciativa privada, existe desde 2004 la empresa Concretos Reciclados que tiene la capacidad de transformar alrededor 2000 ton/día de RCD en agregados pétreos para construcción. Sin embargo, el constante crecimiento de la ciudad y la cantidad de RCD generados, requirió la creación del Centro Integral de Reciclaje de Residuos de la Construcción, Demolición (CIREC-MH) ubicado en la Alcaldía Miguel Hidalgo, cuya primera etapa se inauguró en 2021 y usará la tecnología de la empresa Concretos Sustentables Mexicanos, para el reciclaje de 1200 ton/día de cascajo mezclado y 250 ton/h de cascajo limpio. Además, contará

con una planta de concreto para elaborar concreto hidráulico no estructural con agregado reciclado (Gutiérrez, 2021).

Actualmente en la Ciudad de México no existe un sitio autorizado para la disposición final de RCD por lo que estos deben ser transportados hacia sitios autorizados en el Estado de México.

6.2.5 Cadena de valor e integrantes

En el manejo de residuos de las actividades de terminados y remodelaciones de edificaciones, si bien las empresas que se encargan de realizar estos procedimientos son directamente las responsables del adecuado manejo de estos residuos, dentro de la cadena de producción intervienen otros actores que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Cadena productiva de la industria de terminados y remodelaciones.

Sector primario: materiales para terminados y remodelaciones	Sector secundario: Servicios relacionados	Sector Terciario: Actividades de soporte
Cerámica.	Electricidad.	Comercio al por mayor de materiales de terminados y remodelaciones.
Azulejos o losetas.	Instalaciones.	Comercio al por mayor de maquinaria y equipo.
Pinturas, barnices, lacas y similares.	Seguridad Ocupacional.	Servicio de transporte.
Adhesivos, impermeabilizantes y similares.		Servicio de alquiler de maquinaria y equipo.
PVC		Servicios de asesoría de terminados y remodelaciones.
Laminados decorativos.		Servicios financieros.
Vidrio.		
Puertas y otros objetos de herrería.		
Focos fluorescentes.		

Fuente: CMIC, 2017.

En el sector primario están los responsables de proveer la materia prima para el procesamiento y producto final de accesorios y demás materiales para terminados y remodelaciones de edificaciones.

En el sector secundario se encuentran los responsables de quienes están directamente en la industria de los terminados y remodelaciones de las edificaciones.

El sector terciario son todos los responsables de dar apoyo a la industria de terminados y remodelaciones como son los proveedores al por mayor y la asesoría personalizada de cada empresa.

6.2.6 Etapas del manejo

La LGPGIR señala al manejo integral como “las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social”, jerarquía que será considerada en el presente PM.

6.2.6.1 Reducción en la fuente

Algunas de las consideraciones básicas que ayudan para que en una obra de remodelación y terminados se reduzca el consumo de materiales y la generación de residuos son:

- Prevenir y minimizar el desperdicio en cada etapa del ciclo de vida de un edificio durante la fase de especificación y diseño mediante la identificación de oportunidades para el uso de elementos prefabricados, métodos modernos de construcción, alquiler y reutilización de auxiliares y uso reducido de recortes en el sitio. Para la demolición de edificios, esta técnica permite el desmontaje sistemático de los edificios para maximizar la reutilización y el reciclaje de los materiales recuperados (López et al., 2019). En este punto puede ser de utilidad del uso de un software que permita analizar, comparar y cuantificar mediante simulación los residuos generados en las etapas de preconstrucción y demolición de un proyecto (Gómez et al., 2014).
- Estimación precisa de los materiales antes de realizar el pedido, manejo adecuado de los materiales en el sitio de construcción, técnicas de clasificación en el sitio, etc. (Kabirifar et al., 2020).
- Disponer de los equipos y herramientas adecuadas para cada trabajo o actividad.

- Utilizar material normalizado y en las dimensiones ajustadas a las líneas arquitectónicas, ya que se reduce la producción de retazos.
- Organizar adecuadamente los sitios de trabajo en relación con sus condiciones físicas: acceso, iluminación y ventilación, para de esta forma evitar accidentes e impedir la generación de desperdicios.
- Ubicar los materiales al alcance del trabajador, para mejorar el rendimiento de la labor y disminuir pérdidas de material por accidente o error.
- Dotar a los trabajadores de elementos adecuados para el manejo de los materiales, con el fin de que no se produzcan pérdidas en su manipulación.
- Descargar de forma ordenada y apilar los materiales y elementos correctamente.
- En la medida de lo posible reparar y reacondicionar los elementos que puedan ser reutilizados en la misma obra.
- Coordinar los suministros y transportes con el ritmo de ejecución de la obra. No mantener niveles de “stock” muy altos en la obra, ya que con el tiempo producirán material inservible o desechable (Morales y Villalta, 2011).

6.2.6.2 Separación y almacenamiento diferenciado

Identificación de los materiales que se utilizarán en el sitio (por ejemplo, lista de materiales), y aquellos que generan residuos que pueden recuperarse, reutilizarse, reciclarse o enviarse a disposición.

Una vez que el plan de construcción está bien establecido, se debe especificar una ubicación específica para los contenedores de los diferentes residuos generados, si es posible, contenedores más pequeños como buzones cerca de los puntos de generación (Gálvez e Istriate, 2020).

Para facilitar su valorización, los residuos deben ser separados desde su origen de acuerdo con las categorías asignadas en la norma NACMX-007-RNAT-2019, Tabla 10:

Tabla 10. Clasificación de los residuos de construcción y demolición.

Categorías	Residuos
A) Concreto simple	Concreto de elementos prefabricados. Concreto de elementos estructurales y no estructurales. Sobrantes de concreto (sin elementos metálicos).
B) Concreto armado	Elementos de concreto armado prefabricados y colados en obra.
C) Metales	Residuos metálicos como: <ul style="list-style-type: none"> • Acero de refuerzo. • Metales ferrosos. • Metales no ferrosos (aluminio, cobre, etc.).
D) Mampostería con recubrimiento	Residuos de mampostería y pétreos con recubrimiento y mortero de juntas, como: blocks, tabicones, adoquines, block cerámico, prefabricados de arcilla recocida (tabiques, ladrillos, tejas, etc.), muros de piedra braza, etc.
E) Pétreos.	Materiales pétreos sin recubrimientos o sin juntas de mortero.
G) Excavación	Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales.
H) Elementos prefabricados con materiales mixtos	Paneles y sistemas prefabricados conformados por materiales mixtos (como panel de yeso, panel de tabla cemento y otros paneles en general).
I) Otros residuos de manejo especial generados en obra	Residuos con tratamiento y manejo especial, listados de manera enunciativa y no limitativamente: <ul style="list-style-type: none"> • Residuos de instalaciones eléctricas, residuos electrónicos, lámparas, balastras y baterías. • Llantas. • Textiles. • Madera. • Lodos bentoníticos. • Poliestireno expandido.

Fuente: NACMX-007-RNAT-2019.

El almacenamiento o apilamiento de residuos no peligrosos puede realizarse en envases o recipientes destinados a tal fin, dependiendo de su tamaño y volumen.

Dependiendo de la cantidad de niveles o pisos de un proyecto, así como de la distribución de la edificación, en ocasiones la opción más viable para el almacenamiento temporal de los residuos es en un área interna de la obra, la cual se movilizará de acuerdo con los avances en los trabajos.

Los residuos peligrosos deben identificarse (etiquetarse) y almacenarse en un área diferente al área destinada para residuos no peligrosos, por un período no

mayor a 6 meses, considerando sus características de peligrosidad e incompatibilidad conforme lo establecido en la NOM-054-SEMARNAT-1993.

El área de almacenamiento de residuos (peligrosos y no peligrosos) debe contar con la capacidad suficiente para almacenar todos los residuos generados, evitando su dispersión, emisión de polvos, escurrimiento, o de ser el caso, la obstrucción de vía pública y alcantarillado.

6.2.7 Recolección

La recolección de residuos peligrosos y no peligrosos se realizará de manera diferenciada.

Se deberá implementar durante el manejo interno de residuos en la obra el programa de seguridad e higiene para los trabajadores establecido por la empresa constructora, con el fin de evitar accidentes, considerando de manera general las siguientes acciones:

- Todos los trabajadores, independientemente de si provienen del contratista principal o de un subcontratista, conocen las técnicas de manejo de residuos en el sitio (Gálvez et al., 2018).
- Usar el equipo de protección individual adecuado.
- Contar con las hojas de seguridad de los residuos peligrosos manejados.
- Evitar la mezcla de residuos peligrosos con no peligrosos.

6.2.8 Transporte

El generador debe contratar prestadores de servicio de transporte autorizados por la Secretaría a través del RAMIR. Además, debe exigir al prestador del servicio el manifiesto de entrega - transporte - recepción de residuos de la construcción y demolición al destino final (centro de acopio, transferencia, planta de reciclaje o sitios de disposición final) debidamente sellado.

Para el transporte se debe tomar en consideración los siguientes puntos (CE, 2016):

- Intentar mantener distancias cortas.
- Optimizar el uso de las redes de carreteras y aprovechar las tecnologías de la información adecuadas.
- Cuando sea posible, utilizar centros de transferencia de residuos.

- Garantizar la integridad de los materiales desde el desmantelamiento hasta el reciclaje.

6.2.9 Valorización

La valorización es un eslabón importante dentro de la economía circular, cuyo concepto se ha venido desarrollado en los últimos años, y ha ganado un importante reconocimiento en el ámbito político, de negocios y academia, debido a que es considerada una alternativa innovadora aplicable a diversos sectores y que permite satisfacer necesidades de producción y consumo de forma más sostenible (López et al., 2020). La CDMX actualmente se encuentra lejos de tener una economía circular aplicada a la industria de la construcción, demolición y remodelación de edificaciones, sin embargo, ha dado sus primeros pasos exigiendo dentro de su normativa la incorporación de producto reciclado para las obras privadas y públicas de construcción tales como: construcción, modificación, remodelación, ampliación, adecuación, rehabilitación, restauración, reparación, sustitución de infraestructura, conservación, mantenimiento, instalación, demolición u otras.

Cuando la reutilización no es viable, se debe optar por el reciclaje o co-procesamiento de los residuos de construcción y demolición, estas estrategias dependen de los mercados de materiales individuales de los residuos, y de la correcta separación de cada material.

En la Tabla 11, se describen en general las alternativas de valorización actualmente existentes para los residuos generados, el reciclaje de los mismos se lleva a cabo por medio de empresas especializadas que cuentan con el registro y la autorización otorgada por la SEDEMA:

Tabla 11. Alternativas de valorización.

Categoría	Residuo	Alternativa de valorización	Uso
Concreto simple.	Concreto de elementos prefabricados. Concreto de elementos estructurales y no estructurales. Sobrantes de concreto (Sin elementos metálicos).	Reciclaje.	Uso como agregado reciclado en elementos no estructurales.

Tabla 11. Alternativas de valorización (continuación).

Categoría	Residuo	Alternativa de valorización	Uso
Concreto armado.	Elementos de concreto armado prefabricados y colados en obra.	Reciclaje.	Uso como agregado reciclado en elementos no estructurales.
Mampostería con recubrimiento.	Residuos de mampostería y pétreos con recubrimiento y mortero de juntas, como: blocks, tabicones, adoquines, block cerámico, prefabricados de arcilla recocida (tabiques, ladrillos, tejas, etc.), muros de piedra braza, etc.	Reciclaje.	Uso como agregado reciclado en elementos no estructurales.
Pétreos.	Materiales pétreos sin recubrimientos o sin juntas de Mortero.	Reciclaje.	Uso como agregado reciclado en elementos no estructurales.
Mezcla Asfáltica.	Provenientes de bases asfálticas o negras.	Reciclaje.	Uso como agregado reciclado en elementos no estructurales.
Excavación.	Materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales.	Reciclaje.	Uso como agregado reciclado en elementos no estructurales. Rellenos.
	Suelos no contaminados.	Reúso.	
Metales.	Acero de refuerzo y material ferroso Material no ferroso.	Reciclaje.	Uso como materia prima para convertirlos en
			productos como piezas de automóviles, electrodomésticos, maquinaria, puertas, barandas y contenedores de alimentos.
Elementos prefabricados con materiales mixtos.	Loseta vinílica. Paneles de yeso. Piso porcelánico.	--	--
Madera.	Paneles MDF. Maderas de diferentes medidas, tapiales y cimbras. Puertas de madera. Muebles de madera. Aserrín.	Reciclaje. Coprocesamiento. Reúso.	Reciclaje en la elaboración de: tableros aglomerados, compost.

Tabla 11. Alternativas de valorización (continuación).

Categoría	Residuo	Alternativa de valorización	Uso
			Producción de electricidad. Reúso para cimbras y tapias. Reparación o reacondicionamiento de muebles.
Vidrio.	Vidrio flotante y templado.	Reciclaje.	Fabricación de vidrio plano (se exceptúa el vidrio laminado ya que este no es reciclable).
Residuos de instalaciones eléctricas.	Cables de varios calibres.	Reciclaje.	Recuperación de metales para su reutilización en la industria.
Plásticos.	PET. Poliestireno expandido. Bolsas.	Reciclaje. Coprocesamiento.	Elaboración de nuevos productos Producción de electricidad.
Cartón, sacos de papel.	Cartón, sacos de papel.	Reciclaje. Coprocesamiento.	Elaboración de nuevos productos Producción de electricidad.
Residuos Peligrosos.	Lámparas fluorescentes.	Reciclaje.	Elaboración de nuevos productos a partir de los componentes recuperados.
	Envases vacíos contaminados con materiales peligrosos.	Aprovechamiento energético.	Aprovechamiento energético

Fuente: Elaboración propia.

Debido a la complejidad que supone la separación de los componentes de los elementos prefabricados de materiales mixtos no existen a nivel nacional empresas especializadas en su reciclaje.

Por otra parte, específicamente para residuos de las categorías A, B, D, E, y F la NACMX-007-RNAT-2019 (Tabla 12), establece que estos deberán ser aprovechados como agregados reciclados en elementos no estructurales.

Tabla 12. Aprovechamiento de agregados reciclados en elementos no estructurales.

Categoría origen del agregado	Usos del agregado reciclado	Porcentaje mínimo de contenido de agregado reciclado	Porcentaje de uso en la obra o edificación
A) Residuos de concreto	Bases y sub-bases.	100%	100%
B) Residuos de concreto armado	Bases hidráulicas en caminos y estacionamientos.	100%	100%
E) Residuos pétreos	Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones.	100%	100%
	Bases para ciclo pistas, firmes, guarniciones y banquetas.	100%	100%
	Construcción de andadores y trota pistas.	100%	100%
	Construcción de terraplenes.	35%	100%
	Construcción de pedraplenes.	35%	100%
	Material para relleno o para la elaboración de suelo – cemento.	35%	100%
	Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno total de cepas.	35%	100%
	Material para la conformación de terrenos.	35%	100%
	Rellenos en cimentaciones. Plantillas para cimentación. Concreto ciclópeo.	35%	100%
	Rellenos en jardines.	35%	100%
	Mobiliario urbano.	100%	100%
	Lechos, acostillamientos y relleno en tuberías.	100%	100%
	Conformación de parques y parterres.	100%	100%
Zanjas drenantes.	35%	100%	

Tabla 12. Aprovechamiento de agregados reciclados en elementos no estructurales (continuación).

Categoría origen del agregado	Usos del agregado reciclado	Porcentaje mínimo de contenido de agregado reciclado	Porcentaje de uso en la obra o edificación
D) Residuos de mampostería o pétreos con recubrimiento	Bases y sub-bases.	100%	100%
	Sub-bases en caminos y estacionamientos.	100%	100%
	Construcción de terraplenes.	35%	100%
	Cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios.	35%	100%
	Construcción de andadores y trota pistas.	100%	100%
	Bases para ciclo pistas, firmes, guarniciones y banquetas.	100%	100%
	Material para lecho, acostillamiento en tuberías y relleno de cepas.	35%	100%
	Construcción de pedraplenes.	35%	100%
	Material para la conformación de terrenos.	35%	100%
	Relleno en jardineras. Rellenos en cimentaciones. Caminos de jardines.	35%	100%
	Construcción de banquetas guarniciones.	35%	100%
	F) Asfálticos	Bases asfálticas o negras.	90%
Concretos asfálticos elaborados en caliente.		90%	100%
Concretos asfálticos templados o tibios.		90%	100%
Concretos asfálticos elaborados en frío.		90%	100%
Bases asfálticas espumadas.		35%	100%
Micro carpetas en frío (slurries).		35%	100%

Fuente: NACMX-007-RNAT-2019

6.2.10 Disposición final

La norma NACMX-007-RNAT-2019 exige a generadores y transportistas la entrega de RCD que se haya demostrado que no son factibles de reciclar, a sitios de disposición autorizados por la Secretaría de Ambiente. Debido a que al interior de la CDMX no existen sitios autorizados, este tipo de materiales deben ser transportados hacia sitios autorizados ubicados en el Estado de México, donde estos no son tratados sino utilizados para relleno de socavones. En muchas ocasiones los RCD no llegan hacia estos sitios debido al costo que implica su transporte desde CDMX, lo que conlleva su disposición de manera informal en áreas no autorizadas. En la Tabla 13, se presenta el listado de los sitios autorizados actualmente vigentes para recepción de RCD.

Tabla 13. Sitios autorizados de recepción de RCD.

Municipio	Empresa	Proyecto	Ubicación
Acolman	Martínez Villegas, SA. de C.V.	Proyecto Remediación Topográfica con Residuos de Excavación de la Mina San Rómulo.	Cerro Tlahuico, Ejido de San Miguel Totolcingo.
Atizapán de Zaragoza	Concretos Asfálticos Pirámide, S.A. de C.V.	Almacenamiento de Materiales Producto de la Demolición y Excavación en la Construcción de Nuevas Carreteras, Vialidades, Caminos Etc.	Carretera de Atizapán – Villa del Carbón S/N, Col. Ex Hacienda del Pedregal.
Chalco	María Teresa Mejía Rodríguez	Proyecto Denominado Rehabilitación de la Mina Banco de Tiro El Arenal.	Camino a Ayotzingo, S/N, Denominado el arenal, Santa Catarina Ayotzingo.
Cuautitlán Izcalli	Raymundo Pérez Martínez	Rehabilitación de Socavón, Mediante la Disposición de Material de Desplante, Residuos de la Construcción y de Excavaciones.	Parcelas 157, 158 y 161 del Ejido de San Francisco Tepojaco.
Cuautitlán Izcalli	Juan Matías Flores Ramírez	Banco de Tiro Aurora, Disposición de Residuos Provenientes de la Excavación Despalme y Construcción.	Parcela 336 Z – 5P1 del Ejido de Santa María Tianguistengo.
Ecatepec	Transportes Excamaq, S.A. de C.V.	Recepción y Disposición final de residuos de la construcción 20,602.2 m ² .	Paraje denominado La Magdalena, Pueblo de Santa María de Chiconautla.
Ixtapaluca	Promotora de Desarrollo Minero e Infraestructura S. de R.L. de C.V.	Recepción de Residuos de la Construcción Producto de Excavación y/o Demolición, Para Nivelación y Reciclaje Tezoyo.	Km 36 de la Carretera Federal México – Puebla.
La Paz	Gerardo Sánchez González	Remediación Topográfica de un socavón.	Ejido San Sebastián Chimalpa.
Lerma	Mina Pica Piedra S.A. de C.V.	Remediación Topográfica con residuos de excavación y demolición producto de la construcción.	Terrenos de los Bienes Comunales de Lerma, entre la Av. De las Garzas y Libramiento Amomoluco – El Llanito, a la altura del km 47 de la carretera México – Toluca.
Lerma	Mina Pica Piedra S.A. de C.V.	Remediación Topográfica con residuos de excavación y demolición producto de la construcción.	Terrenos de los Bienes Comunales de Lerma entre la calle Tule e Ignacio Zaragoza y Libramiento Amomoluco – El Llanito, a la altura del km 48 de la carretera México Toluca.

Tabla 13. Sitios autorizados recepción de RCD (continuación).

Municipio	Empresa	Proyecto	Ubicación
Naucalpan	Consejo de Administración de la Industria Ejidal San Francisco Chimalpa	Restauración de socavón de la Mina San Francisco Chimalpa.	Paraje el Capulín a un costado de la autopista Chamapa – Lechería, en la parte norte de una fracción del socavón ya existente de la mina.
Tecamac	Appleikarya Constructora e Inmobiliaria S.A. de C.V.	Nivelación de Socavón.	Camino S/N, compuesto por tres fracciones del Ejido de Ozumbilla.
Texcoco	Urbanum, S.A. de C.V.	Disposición de Material de Desplante, Residuos de Construcción y Excavaciones.	Carretera Chapingo – Tequexquahuac.
Texcoco	Oscar Flores Rodríguez y/o Ma. Feliz Espejel Páramo	Nivelación del Terreno Mediante la disposición de materiales de excavación y de obras de construcción.	Poblado de Tequexquahuac, a la altura de Paraje Santa Rosa en la porción sur de los terrenos Ejidales de Tequexquahuac.
Texcoco	Agregados de Cocoyoc, S.A de C.V.	Remediación Topográfica con residuos de la construcción.	Camino a Tequexquahuac S/N, localidad de San Luis Huexotla, Col. Tequexquahuac.
Texcoco	Ejidatarios del Ejido de San Miguel Tlaixpán	Rehabilitación de Tajos Minados a Cielo Abierto Mediante el Relleno con residuos de construcción.	Terreros de bienes Ejidales de San Miguel Tlaxpan.
Texcoco	Grupo Constructores Hachi, S.A. de C.V.	Depósito de material de excavación y materiales de las obras de construcción.	Carretera Santa María Nativitas S/N Col. Poblado de San Miguel Tlaizpán.
Texcoco	Urbanum, S.A. de C.V.	Tiro Tlaminca, nivelación con material de excavación y materiales de las obras de construcción.	Carretera Texcoco – San Nicolás Tlaminca S/N, Ejido Tlaminca de Texcotzingo.
Texcoco	Comisariado Ejidal de San Miguel Tlaixpán	Disposición de residuos de excavación y demolición.	Terreros de uso común del Ejido de San Miguel de Tlaixpán.
Texcoco	Business Services and Forest, S.A. de C.V.	Rehabilitación de Tajos minados mediante el relleno con residuos de la construcción.	Bienes Ejidales de Taminga de Texcotzingo.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente Estado de México, 2021.

En el caso de los residuos peligrosos o suelo contaminado, estos deben ser entregados a empresas especializadas que a su vez se encarguen de su entrega en sitios de disposición final autorizados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

6.2.11 Metas de cobertura del plan, de recuperación o aprovechamiento del residuo

Las metas de cobertura del plan establecido para actividades de remodelación y terminados de edificaciones dentro de la Ciudad de México se presentan en la Tabla 14, por etapa del manejo:

Tabla 14. Metas de cobertura del plan, recuperación o aprovechamiento.

Etapa de manejo	Meta
Reducción de la generación	Lograr paulatinamente la reducción de residuos generados mediante la aplicación de las medidas establecidas.
Separación	Separación del 100% de los residuos generados.
Transporte	Transporte del 100% de los residuos generados por parte de servicios especializados con autorización de la SEMARNAT.
Valorización	Reúso, reciclaje o co-procesamiento del 100% de los residuos reciclables.
Disposición final	100% de residuos no reciclables entregados en sitios de disposición final autorizados.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.12 Mecanismos de operación, control y monitoreo

6.2.12.1 Operación y control

La Tabla 15. presenta las estrategias para operación y control del PM planteado.

Tabla 15. Estrategias de operación y control.

Objetivos específicos	Estrategias aplicables		
	Definición	Pautas	Observación
ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL.	Enfoque transversal al interior de la empresa para la gestión de RCD.	Establecimiento de responsabilidades y compromisos.	Las distintas áreas al interior de la empresa, y LOS distintos niveles, tienen responsabilidades y compromisos igual de relevantes para su correcta implementación.
PREVENCIÓN Y MINIMIZACIÓN.	Promoción del registro de PM.	Cumplimiento normativo en cuanto a la presentación y aplicación del PM para generadores de residuos de manejo especial.	Permitirá a la autoridad ambiental recopilar información acerca del manejo integral de los residuos generados en la remodelación y terminados.
	Reducción en la fuente e implementación de planes de gestión integral.	Desarrollo de acciones por parte del generador.	Incluir estrategias de planificación en la etapa de preconstrucción (específicamente diseño) y eventual demolición, enfocadas en la cuantificación de residuos a generar, lo que permitirá mejorar la gestión de RCD y aumentar la reciclabilidad y el contenido de reciclado en los materiales de construcción. Identificación de procesos de mayor desperdicio de materiales.
		Adopción de compromisos orientados a la prevención y reducción en generación de residuos peligrosos.	Planificación de las actividades a ser ejecutadas con el fin de que se aproveche al máximo el material disponible. La generación y entrega de los diferentes residuos constará en las bitácoras de obra.

		Formulación de planes para promover la gestión integral de residuos peligrosos, no peligrosos y especiales.	Los generadores podrán acogerse a los programas desarrollados por las empresas de gestión externa, alentados al manejo integral de residuos peligrosos incluyendo las actividades de recolección, transporte y disposición final.
MANEJO INTERNO	Separación de residuos en obra.	Los materiales no peligrosos reciclables deberán separarse de acuerdo con su tipo.	Los generadores deberán valorizar su aprovechamiento en otras industrias de acuerdo con el volumen generado. En ningún momento se mezclarán con los residuos sólidos urbanos, ni con los residuos peligrosos.
RECICLAJE.	Potenciación del mercado de materiales reciclados.	Utilización de agregados reciclados en elementos no estructurales.	Aumentar la confianza en el uso de materiales reciclados en la industria de la construcción.
VALORIZACIÓN.	Promoción del aprovechamiento y valorización.	Desarrollo de instrumentos que facilitan el acceso a tecnologías de aprovechamientos viables. Contar con información actualizada acerca de los servicios especializados para la valorización de RCD.	Contar con un padrón de sitios especializados acreditados de valorización de RCD.
DISPOSICIÓN FINAL ADECUADA.	Promoción de la disposición final adecuada.	Cuando no sea posible el reúso o reciclaje de los residuos se deberán emplear únicamente los sitios autorizados para disposición final.	Contar con un padrón de sitios formales y especializados de disposición final, para su difusión masiva.
DIFUSIÓN.	Capacitación.	Contar con un plan de capacitación acerca del manejo integral de los residuos generados.	Se deberá realizar una capacitación mínimo 1 vez al año, su fin es preparar y concientizar a los trabajadores de la obra, con especial énfasis en aquellos que serán los encargados de segregar los residuos, previo a su traslado al lugar de acopio. Esta etapa permitirá identificar responsables, riesgos asociados a las actividades del plan y tareas que cumplirán cada uno.
TRAZABILIDAD Y EVALUACIÓN DEL PM.	Evaluación continua del PM.	Recolección de información con el fin de dar un seguimiento a la ejecución y cumplimiento del plan durante todo el proceso.	Mediante: documentación (certificados, facturas registros, etc.) e indicadores de desempeño (tasa de generación, valorización, etc.).

Adaptado de: CMIC, 2017.

6.2.12.2 Monitoreo

Deberá delegarse un responsable del manejo integral de los residuos quien realizará un informe de seguimiento del cumplimiento del PM. La periodicidad de

la elaboración del informe dependerá del período planificado para el desarrollo de la obra.

El responsable ambiental deberá verificar periódicamente que los residuos sean depositados en los sitios determinados y con la separación diferenciada establecida.

Registrar mediante bitácoras de generación y entrega la cantidad o volumen de residuos.

Por otra parte, es competencia del Gobierno de la Ciudad de México y de los estados a través de sus instancias ambientales de inspección y vigilancia, en el ámbito de sus respectivas jurisdicciones, la verificación y existencia de los planes de manejo.

6.3 Propuesta de tecnología no convencional para el reciclaje de paneles de yeso

6.3.1 Material extraído

El proceso de molienda y tamizado, permitió extraer un 78 % de yeso y generó un 22% de residuos correspondientes a restos de papel (Figura 39).

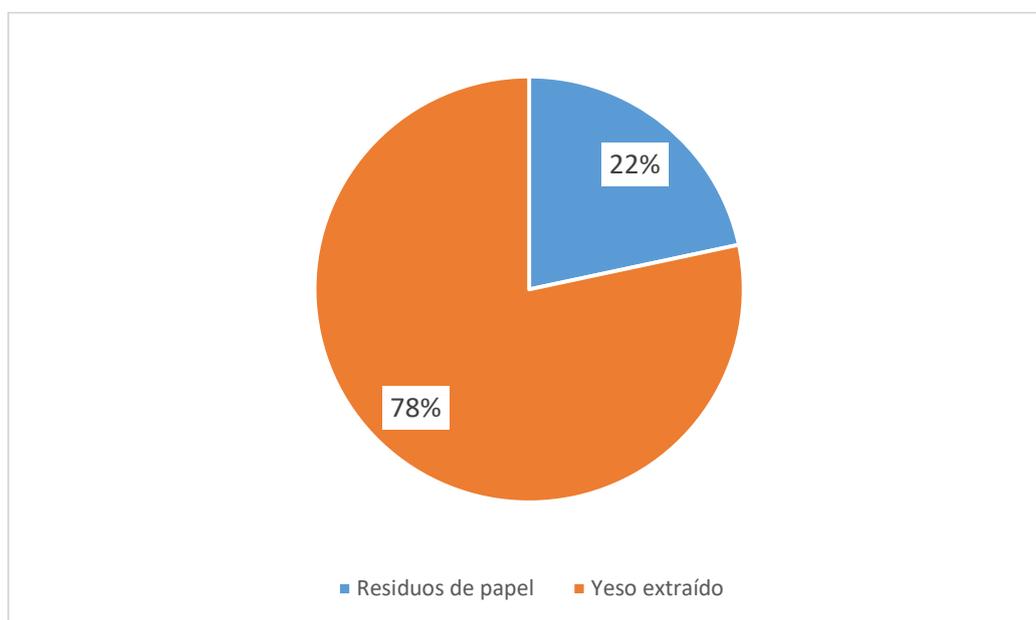


Figura 39. Porcentaje de yeso extraído de residuos de paneles de yeso.

6.3.2 Caracterización física del material

6.3.2.1 Análisis por malla del agregado fino

La Tabla 16 muestra los valores obtenidos posterior al proceso de tamizado.

Tabla 16. Granulometría del yeso extraído.

No. malla	Abertura (mm)	Repetición 1				Repetición 2				Prom. Pasa (%)	Desviación estándar
		Retenido (g)	% Parcial	% Acumulado	% Pasa	Retenido (g)	% Parcial	% Acumulado	% Pasa		
8	2.36	0	0	0	100	0	0	0	100	100.0	0.0
10	2	0	0	0	100	0	0	0	100	100.0	0.0
30	0.6	27.35	18.3	18.3	81.7	27.87	18.6	18.6	81.4	81.6	0.2
100	0.15	93.69	62.5	80.8	19.2	88.99	59.3	77.9	22.1	20.7	2.1
200	0.0075	22.39	14.9	95.7	4.3	26.01	17.3	95.2	4.8	4.5	0.4
Pasa No. 200	---	6.4	4.3	100.0	---	7.2	4.8	100.0		---	

En la Figura 40 se observa una reducción en el tamaño de partícula progresivo, produciéndose el salto más significativo en el tamiz de No. 100 (0.15 mm) con un porcentaje que pasa del 20.7% y en el tamiz No. 200 (0.0075 mm) con un porcentaje del 4.5% que pasa.

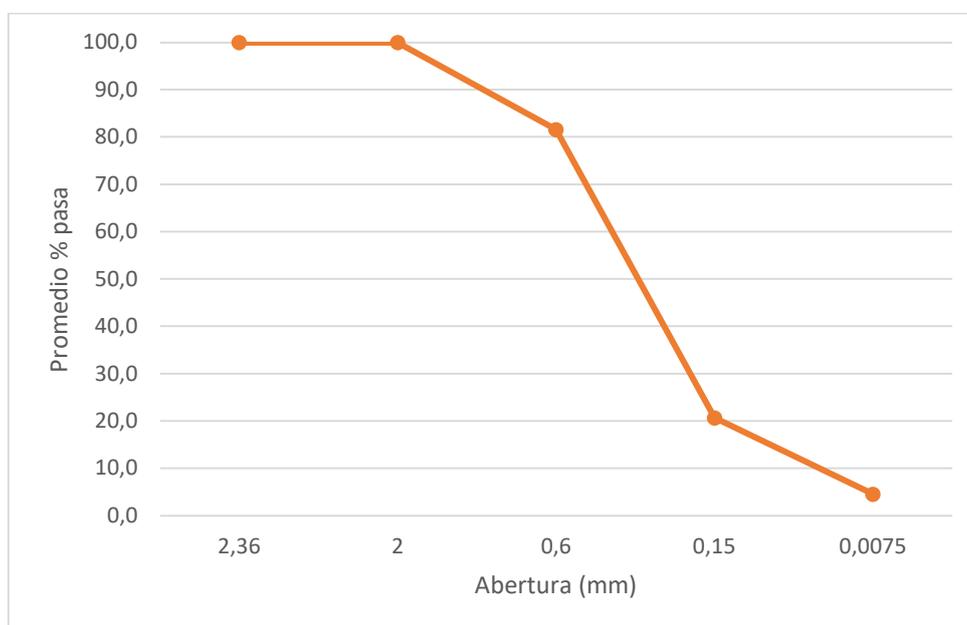


Figura 40. Granulometría del yeso extraído.

6.3.2.2 Contenido de humedad (contenido de agua libre)

Como se observa en la Tabla No. 17, el contenido de humedad de la muestra de yeso extraído es de 0.18%.

Tabla 17. Contenido de humedad.

Repetición	Masa de la cápsula (g)	Masa yeso húmedo (g)	Masa de la cápsula + yeso seco (g)	Masa yeso seco (g)	%H
1	47.5944	10.2015	57.7766	10.1822	0.19
2	47.2412	10.0686	57.2927	10.0515	0.17
3	44.7674	10.0025	54.7528	9.9854	0.17
Promedio					0.18
Desviación estándar					0.01

6.3.2.3 Determinación del contenido orgánico

La Tabla 18 muestra que existe menos del 4% de papel remanente en el yeso extraído. Es importante recalcar que este es un valor aproximado, ya que a las temperaturas trabajadas se logró eliminar tanto el agua libre, como el agua propia de la composición del yeso lo cual influye en el valor de la masa final.

Tabla 18. Contenido orgánico.

Repetición	Masa de la muestra seca + cápsula (g)	Masa de la cápsula (g)	Masa de la muestra + cápsula después de la ignición (g)	%Sólidos volátiles
1	53.2473	51.5416	53.1807	3.90
2	84.6850	82.9612	84.5964	5.14
3	58.8456	57.1289	58.7766	4.02
Promedio				4.35
Desviación estándar				0.68

Por tanto, se puede considerar que la cantidad de material orgánico (papel) remanente en el yeso extraído es en promedio 4.35%.

6.3.2.4 Determinación de la relación agua/yeso por el método de amasado a saturación

Según lo definido en el laboratorio, la relación agua/yeso encontrada para yeso extraído fue de 1.0764. Los valores del yeso requerido, el agua y el recipiente fueron: 146.0857 g, 147.089 g y 147.4023 g. La determinación de la relación agua/yeso encontrada se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19. Relación agua/yeso (Mezcla 1).

Repetición	Masa (g)			m _o (g)	R _{AY}
	Vaso	agua	agua + vaso + yeso (m ₁)		
1	50.1294	50.0729	146.0857	100.2023	1.0897
2	50.1294	50.5328	147.089	100.6622	1.0770
3	50.1294	50.2111	147.4023	100.3405	1.0624
Promedio					1.0764
Desviación estándar					0.0111

Mediante la aplicación del mismo método, se determinó la relación agua – polvo de las mezclas 2, 3 y 4, que contienen diferentes porcentajes de cemento como se observa en la Tabla 20.

Tabla 20. Relación agua/ polvo (Mezclas 2, 3 y 4)

Mezcla	% YE	%C	R _{A/P}
2	95	5	1.0
3	85	15	0.9
4	75	25	0.9

YE= yeso extraído, C= cemento, R_{A/P}= relación agua – polvo.

6.3.2.5 Determinación del tiempo de fraguado

Resultados para el ensayo de tiempo de fraguado con el yeso extraído:

Fecha y hora inicial del proceso 3/5/2022, 4:00 pm.

Fecha y hora inicial del fraguado 8/5/2022, 4:30 pm.

Fecha y hora final de fraguado 9/5/2022, 6:00 am.

Fraguado inicial: 5 días, 30 minutos.

Fraguado final: 5 días, 14 horas.

6.3.3 Diseño y fabricación del producto reciclado

Para la elaboración de las losetas recicladas, se utilizó un molde artesanal 3D de polietileno con las dimensiones indicadas en la Figura 41.

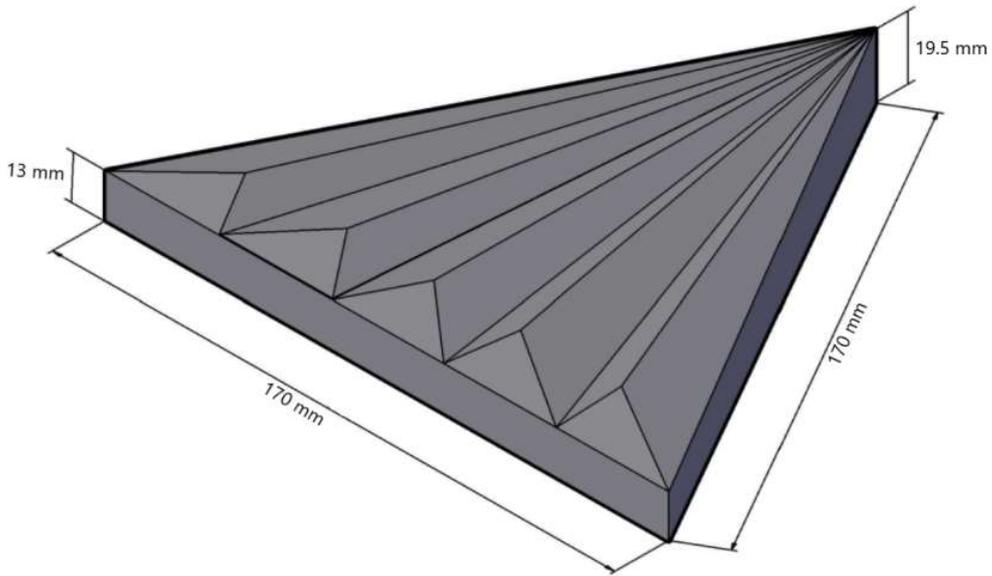


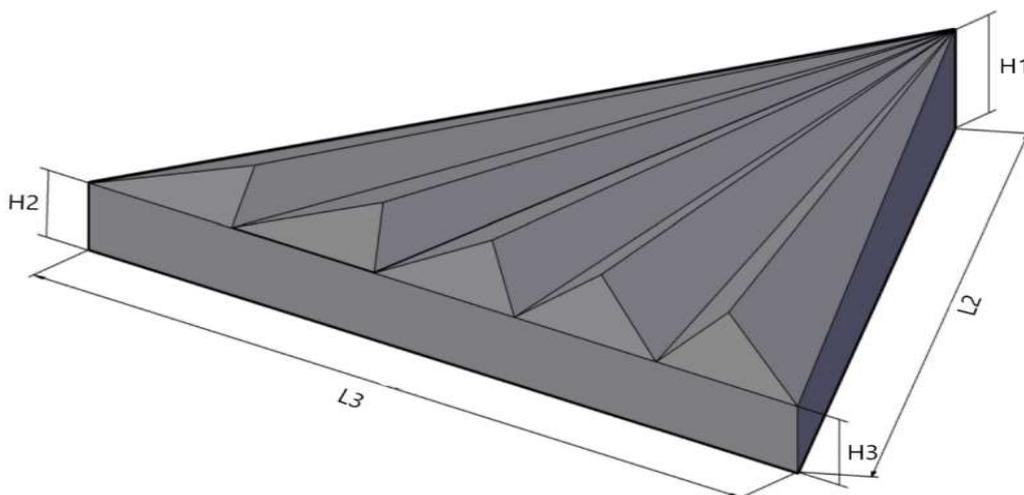
Figura 41. Dimensiones del molde.

Se elaboraron 10 repeticiones de cada mezcla, esto con el fin de evaluar posteriormente sus aspectos dimensionales y superficiales.

6.3.4 Evaluación de aspectos dimensionales

6.3.4.1 Método de ensayo para determinar la longitud de los lados y espesor de las losetas

Las dimensiones consideradas para cada una de las losetas se muestran en la Figura 42.



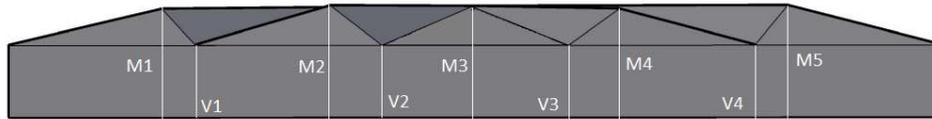


Figura 42. Dimensiones de la loseta.

6.3.5 Evaluación de aspectos dimensionales

6.3.5.1 Método de ensayo para determinar la longitud de los lados y espesor de las losetas

Las dimensiones consideradas para cada una de las losetas se muestran en la Figura 43.

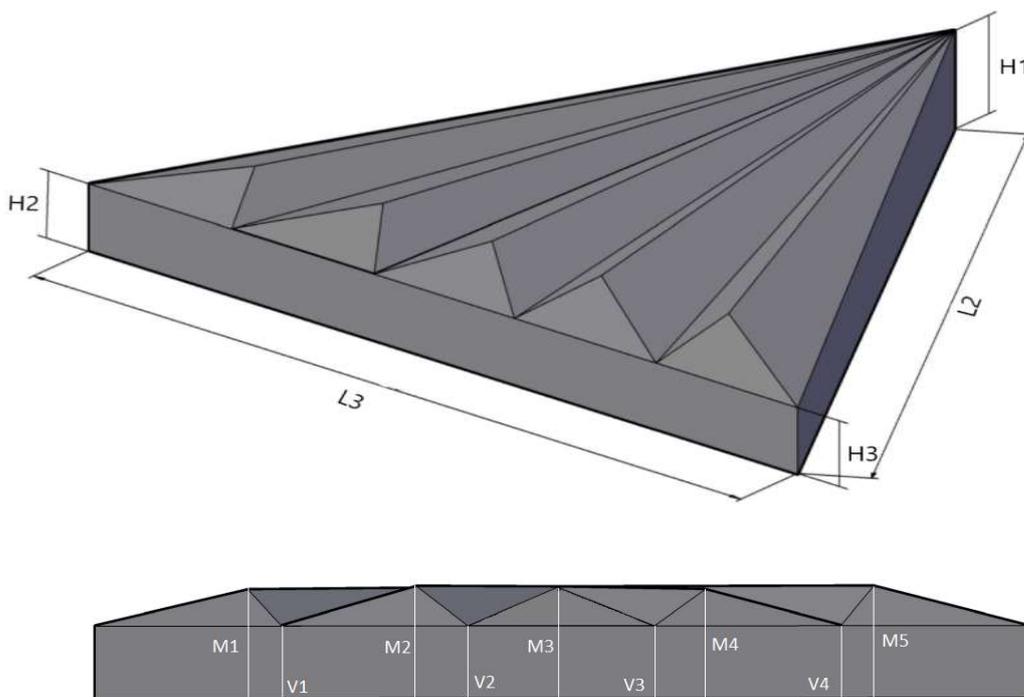


Figura 43. Dimensiones de la loseta.

La Tabla 21 muestra los valores promedio obtenidos para las dimensiones medidas las 10 losetas fabricadas con cada mezcla propuesta.

Tabla 21. Valores promedio de las dimensiones de las losetas.

Dimensión	Medida promedio (mm)			
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
	100% YE	95 YE 5% C	85 YE% 15% C	75% YE 25% C
L1	152.0	153.0	153.2	155.3
L2	152.0	153.6	153.0	155.4
L3	152.6	153.5	153.3	155.7
H1	16.3	16.0	16.1	16.8
H2	10.5	10.2	10.7	10.8
H3	9.8	10.1	10.3	10.3
M1	17.1	17.3	16.1	17.5
M2	17.2	17.3	16.3	17.5
M3	17.3	17.4	16.6	17.6
M4	17.4	17.4	16.2	17.7
M5	17.3	17.2	16.1	17.6
V1	10.9	10.6	11.0	11.3
V2	10.5	10.5	11.0	10.6
V3	10.4	10.7	10.8	10.8
V4	10.3	10.7	10.7	10.7

Con el promedio de las medidas realizadas y mediante la utilización del programa de diseño AutoCAD 3D se obtuvo el volumen promedio de las losetas de yeso reciclado siendo este 145 cm³. Por otra parte, se obtuvo el volumen del molde por medio del mismo programa de diseño dando como resultado un volumen de 215 cm³. Al comparar estos resultados, se observa una disminución de volumen del 31% en las losetas elaboradas de yeso reciclado y losetas elaboradas con la mezcla de yeso reciclado y cemento con respecto al molde utilizado.

Adicionalmente, las losetas elaboradas fueron pesadas con el fin de conocer la masa promedio por mezcla como se observa en la Tabla 22.

Tabla 22. Valores promedio de las dimensiones de las losetas.

Mezcla	Masa (g)	Desviación estándar
1	133.6	2.8
2	137.3	4.5
3	147.0	6.1
4	150.9	6.0

Se observa que mientras aumenta el contenido de cemento en la mezcla aumenta el valor promedio de la masa de la loseta.

Una vez elaborado el material se puede indicar que uno de los puntos importantes de las losetas decorativas 3D elaboradas a base de yeso extraído de paneles de yeso y su combinación con cemento, es el gran atractivo ambiental que tiene, teniendo en cuenta que su composición contiene un porcentaje mayoritario de YE y que no es necesario que el material pase por un proceso de calcinación previo a su mezcla con agua, además, el producto final es reciclable. También se puede considerar el atractivo de las formas decorativas en 3D, que brindan un espacio visual interesante en ambientes interiores. Por otra parte, se debe considerar la alta durabilidad de las losetas en ambientes controlados de humedad y exposición a agentes generadores de manchas. En cuanto a sus dimensiones y peso se simplifica su montaje aun para las mezclas que contienen un porcentaje de cemento.

En cuanto a ventajas ambientales se refiere, la fabricación y uso de losetas 3D elaboradas con totalidad de YE o con mezclas con cemento, evitan que este material sea depositado en lugares de disposición final alargando así la vida útil de los mismos y evitando el agotamiento de este recurso no renovable (piedra de yeso).

7 CONCLUSIONES

- Se determinó la composición de los residuos de las 3 áreas seleccionadas, observando que la complejidad de las labores realizadas influye en la variabilidad de los residuos generados, en el Edificio 2 los residuos correspondieron a las categorías: concreto simple, concreto armado, metales, mampostería con recubrimiento, elementos prefabricados con materiales mixtos, otros residuos de manejo especial en obra y residuos peligrosos, en el Edificio 7 los residuos se ajustaron a las categorías: concreto simple, mampostería con recubrimiento, metales, elementos prefabricados con materiales mixtos, otros residuos de manejo especial en obra y residuos peligrosos, mientras que en el corporativo los residuos generados fueron de las categorías: metales y otros residuos de manejo especial en obra.
- Los estudios de generación permitieron observar que en el Edificio 2 el mayor porcentaje de residuos 62% (216,600 kg) corresponden a concreto, mismo que tiene un alto potencial de valorización dentro de la industria de

la construcción. Sin embargo, el 100% de los residuos generados en la obra se enviaron a disposición final.

- En el Edificio 7 se observó que los mayores porcentajes de generación correspondieron a residuos de manejo especial 31% (354.12 kg) siendo estos: vidrio, paneles perfiles y puertas de madera, cables, residuos de retiro de impermeabilizante acrílico, aserrín, cartón y plástico, también a elementos prefabricados con materiales mixtos 30% (333 kg) como paneles de yeso y losetas vinílicas y residuos metálicos con el 23% (263 kg). De la totalidad de los residuos 52% (7, 584 kg) fueron valorizados y el 48% restante fue enviado a disposición final.
- En el caso del corporativo, el mayor porcentaje de residuos 640 kg (90%) corresponde a materiales metálicos. Por otra parte, el 100% de los residuos generados fueron valorizados mediante empresas acreditadas por la autoridad ambiental.
- La aplicación de las medidas contenidas en el plan de manejo aportará a la reducción paulatina de los residuos dentro de las obras y mejorará los procesos de separación en la fuente lo que permitirá aprovechar el 100% de los materiales reciclables y disponer de manera ambientalmente adecuada los residuos peligrosos y materiales no reciclables.
- La propuesta del PM y los resultados obtenidos en los estudios de generación, permitieron visualizar que actualmente no se cuenta con alternativas de valorización para residuos de elementos prefabricados con materiales mixtos en la misma industria de remodelación y terminados de edificaciones, por lo cual, se realizó la propuesta de reciclar uno de estos materiales en la fabricación de un producto con fines decorativos.
- Se fabricó una tecnología viable para ser tomada como alternativa de valorización para los residuos de paneles de yeso, corresponde a la elaboración de losetas 3D en base a 100% yeso reciclado o mezclas de yeso reciclado y cemento, las cuales pueden ser utilizadas para decoración de interiores.

8 RECOMENDACIONES

- El generador de RCD debe exigir que el contratista realice una gestión de los residuos apegados al PM, lo cual debe estar estipulado dentro del contrato de trabajo.
- Los residuos generados de las actividades de terminados y remodelación de edificaciones tienen gran potencial de valorización siempre y cuando estos no se mezclen con residuos peligrosos, por lo que, es importante difundir en el personal de obra la importancia de la separación adecuada de los residuos.
- En caso de remodelaciones en edificios públicos es importante que se considere dentro del presupuesto el costo de la gestión a través de gestores autorizados de aquellos residuos que no pueden ser valorizados.

9 REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials. (2019). *Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass* (D2216). <https://www.astm.org>

American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse* (C136). <https://www.astm.org>

Angulo Abreo, L., y Romero Restrepo, M. (2006). *Análisis de alternativas para el manejo de lámparas fluorescentes de tubo desechadas—Área metropolitana del Valle de Aburrá* [Tesis, Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1561&context=ing_ambiental_sanitaria

Asociación Española de Normalización. (2014). *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo* (UNE-EN 13279-2). <https://tienda.aenor.com>

Asociación Región de Murcia limpia. (2013). *Reciclar Bombillas y Fluorescentes, ¿para qué?* <http://regiondemurcialimpia.es/fracciones-reciclaje/reciclar-alumbrado>

- Baird, R., y Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition*. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (28 de febrero de 2020). *La certificación de edificios verdes es cada vez más accesible en América Latina y el Caribe*. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/la-certificacion-de-edificios-verdes-es-cada-vez-mas-accesible-en-america-latina-y-el-caribe/>
- Boletín Oficial del Estado No. 297 de 2015. Por el cual se aprueba el Plan Estatal Marco de Residuos (PEMAR 2016-2022). 16 de noviembre de 2015.
- Caballero, S., Dueñas, O., y Rolón, B. (2019). El plástico y sus dos caras. *Revista Convicciones*, 6(12), 49-52. <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/convicciones/article/view/522>
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2017). *Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición*. <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>
- Chen, Z., Feng, Q., Yue, R., Moselhi, O., Soliman A., Hammad A., y An C. (2022). Construction, renovation, and demolition waste in landfill: a review of waste characteristics, environmental impacts, and mitigation measures. *Environmental Science and Pollution*, 29, 46509–46526. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s11356-022-20479-5>
- Comisión Europea. (2016). Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE. <https://ec.europa.eu>
- Comunidad de Madrid. (2017). *Plan de gestión de residuos de construcción y demolición*. <https://www.comunidad.madrid/servicios/urbanismo-medio-ambiente/residuos-construccion-demolicion-rcd>
- Decisión de la Comisión de 3 de mayo de 2000. Sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece

una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos. C (2000) 1147.

Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008. Sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

Dueñas del Río, A. (2013). Reflexiones sobre la arquitectura sustentable en México. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, (14),77-91. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477947373007>

Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito. (18 de abril de 2017). *Tierra y escombros dentro de contenedor*. <http://www.emaseo.gob.ec/tierra-escombros-dentro-contenedor/>

Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos. (2021). *Escombrera San Antonio*. <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/setup/setup-3/escombrera-san-antonio>

Eralte, A. (20 de diciembre de 2017). *Los acabados de construcción*. Arquigráfico. <https://arquigrafico.com/los-acabados-de-construccion/>

Erbs, A., Nagalli, A., Querne de Carvalho, K., Mymrin, V., Passig, F. H., y Mazer, W. (2018). Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1314–1322. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.189

Evingür, G. A., Pekcan, Ö., y Achilias, D. S., (Eds.). (2020). *Thermosoftening Plastics*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83323>

Fernández, L. R. (1997). Fabricación de productos de base yeso y sus aplicaciones industriales. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36, 591-598. <http://boletines.secv.es/upload/199736591.pdf>

Fernández, S. (2010). *Reciclaje interno de los residuos en las fábricas. Reutilización del yeso reciclado para la fabricación de placas de yeso laminado*. Congreso Nacional del Medio Ambiente.

<http://www.conama10.conama.org/conama10/download/files/CT%202010/1335816526.pdf>

Foro Consultivo Científico y Tecnológico. (2019). *Plásticos en los Océanos*. https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_19-034.pdf

Gálvez Martos, J. L., y Istrate, I. R. (2020). Construction and demolition waste management. *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*, 51–68. DOI:10.1016/b978-0-12-819055-5.00004-8

Gálvez Martos, J. L., Styles, D., Schoenberger, H., y Zeschmar-Lahl, B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 166–178. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.04.016

Glat, O. (diciembre 2015). Lamptroyer, un equipo para reciclar lámparas con mercurio. *Revista Ingeniería Eléctrica*. https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/305/centro_basura_cero_lamptroyer

Gómez Soberón, J. M. V., Gómez Soberón, M. C., Cabrera Covarrubias, F. G., Almaral Sánchez, J. L., Gómez Soberón, L. A., Ortega Rastrojo, M., y Arredondo Rea, S. P. (2014). Simulation and comparative analysis of waste in concrete slabs. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1(3), 98-103. <http://hdl.handle.net/2117/166880>

González Sosa, J.V. (2013). *Desarrollo de un material compuesto a través del análisis funcional para aplicaciones en ingeniería* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6056/Tesis.pdf?sequence=1>

Gutiérrez, G. [Streaming IINGEN] (15 de octubre de 2021). *1er Encuentro Latinoamericano de residuos de construcción y demolición*. <https://www.youtube.com/watch?v=aCQNry7mMxQ&t=1126s>

Ibáñez, J. R., y Corroccoli, M. D. (2002). Anuario 2002. En C. Rivadavia. (Ed.), *Valorización de residuos sólidos urbanos* (pp. 43-74). UNPSJBI.

- Jiménez Rivero, A., y García Navarro, J. (2016). Indicators to Measure the Management Performance of End-of-Life Gypsum: From Deconstruction to Production of Recycled Gypsum. *Waste and Biomass Valorization*, 7(4), 913–927. DOI:10.1007/s12649-016-9561-x
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., y Tam, V. W. Y. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, 121265. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121265
- Kirchherr, J., Reike, D., y Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
- Leandro, A. (2007) *Administración y manejo de los desechos en proyectos de construcción. Etapa 2. Alternativas de manejo*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/2238/492>
- Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos de 2015. Reglamentaria de las disposiciones que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. Última reforma 22 de mayo de 2015. DOF 22-05-2015.
- López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., y Gassó Domingo, S. (2020). *Economía circular en el sector de los residuos de construcción y demolición: análisis de iniciativas en España*. En Proceedings from the 24th International Congress on Project Management and Engineering (Alcoy, July 2020) (pp. 1320-1334). Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO).
- López, M., Hernández, J., Villanueva, S., y Henríquez, M. (2019). Dissemination Article: Technologies for the recycling of fluorescent lamps and bulbs. *Ciencia en Revolución*, 5(15), 53-55.
- López Ruiz, L. A., Ramón, X. R., y Domingo, S. G. (2019). The circular economy in the construction and demolition waste sector – a review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119238. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119238

- MAAT. (2019). *Excavación, demolición selectiva*. <https://www.maat.com.co/>
- Macías, M., y García Navarro, J. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de la Construcción*, 62(517), 87–100. <https://doi.org/10.3989/ic.08.056>
- Mercader Moyano, P., López aproche, J., y Camporeale, P.E. (2022). An Environmental Construction and Demolition Waste Management Model to Trigger Post-pandemic Economic Recovery Towards a Circular Economy: The Mexican and Spanish Cases. En: Muthu, S.S. (Eds), *Environmental Footprints of Recycled Products. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*. Springer, Singapore. https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/978-981-16-8426-5_4
- Manoharan, E., Norazli Othman, R. M., Chelliapan, S., y Tobi, S. U. M. (2021). A Review of Hazardous Compounds Present in Construction Waste Materials. *Environment and Ecology Research*, 9(5):224-234, DOI: 10.13189/eer.2021.090503
- Martel Vargas, G. J. (2008). *Caracterización de residuos de la construcción y demolición de edificaciones para su aprovechamiento* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2009/enero/0638506/Index.html>
- Martínez, C., Ayrala, M., y Zurbriggen, N. (2012). *Lineamientos para la gestión integral de lámparas con contenido de mercurio como residuo peligroso en la república argentina. 7mo Congreso de medio Ambiente. VII Congreso de Medio Ambiente /AUGM*. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26691/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martínez, C., y Tomé, M. (1-5 de diciembre de 2008). *Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDS): Importancia de la recogida para optimizar su posterior valorización*. Congreso Nacional del Medio Ambiente. http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/2633_CMartinez.pdf

- Mercante, I., Bovea, M., Arena, P., Martinengo, P. (24 - 25 de septiembre de 2009). *Estudio comparativo de los aspectos técnicos entre la legislación de RCD en España y América Latina*. II Simposio Iberoamericano de ingeniería de residuos. Universidad del Norte. Barranquilla. Colombia.
- Morales Alpízar, M., y Villalta Flórez Estrada, M. (2011). *Guía de manejo de escombros y otros residuos de la construcción*. San José, Costa Rica. Editorial: Oficina Regional para Mesoamérica y la Iniciativa Caribe, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza UICN. https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/guia_de_manejo_de_escombros.pdf
- Muñoz Pérez, S. P., Díaz Sánchez, D. M., Gamarra Capuñay, E. E., y Chaname Bustamante, J. A. (2021). La Influencia de los RCD en reemplazo de los agregados para la elaboración de concreto: Una revisión de la literatura. *Ecuadorian Science Journal*, 5(2), 107-120. <https://doi.org/10.46480/esj.5.2.111>
- NACMX-007-RNAT-2019 de 2021. Por la cual se establece la clasificación y especificaciones de manejo integral para los residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México. Última reforma 20 de julio de 2021.
- Nepomuceno, M. C. S., Isidoro, R. A. S., y Catarino, J. P. G. (2018). Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. *Construction and Building Materials*, 165, 284–294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.052
- NOM-161-SEMARNAT-2011 de 2013. Por la cual se establecen los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. DOF 01/02/2013.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2019). *Losetas cerámicas esmaltadas y sin esmaltar para piso y muro—Especificaciones y métodos de ensayo (NMX-C-422-ONNCCE-2019)*. <https://www.onncce.org.mx>

- Organización de las Naciones Unidas. (2014). *Urbanización*. Fondo de Población de las Naciones Unidas. <https://www.unfpa.org/es/acerca-del-unfpa>
- Organización de las Naciones Unidas. (7 de febrero de 2019). *Caso 4: Residuos*. Taller regional Instrumentos para la implementación efectiva y coherente de la dimensión ambiental de la agenda de desarrollo. San José, Costa Rica.
https://www.cepal.org/sites/default/files/presentations/gestion_de_residuos_-_jordi_pon.pdf
- Orozco Gutiérrez, C., Gómez Rodríguez, F., Severiche Ramírez, J., Rico Gómez, K., Pinto Fajardo, N., Zambrano Echeverría, V., Alarcón W., Elorza López, Y., y Figueroa García, Y., (2014). *Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD) en obra*. Alcaldía Mayor de Bogotá.
http://ambientebogota.gov.co/es/c/document_library/get_file?uuid=22b72324-272b-44a6-ba9a-48a4b8be7226&groupId=586236
- Pedreño Rojas, M. A., Flores Colen, I., De Brito, J., y Rodríguez-Liñán, C. (2019). Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 215, (444-457). DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.053
- Posada Bustamante, B. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 30(94), 67–86.
<https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2011). *Decoupling natural resource use and environmental Impacts from economic growth, a report of the working group on decoupling to the international resource panel*. Fischer-Kowalski, M., Swilling, M., von Weizsäcker, E.U., Ren, Y., Moriguchi, Y., Crane, W., Krausmann, F., Eisenmenger, N., Giljum, S., Hennicke, P., Romero Lankao, P., Siriban Manalang, A., Sewerin, S.
<https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/onu/349-sum.pdf>

- Puente de Andrade, G., de Castro Polisseni, G., Marco, P., y Días Toledo Filho, R. (2020). Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model. *Construction and Building Materials*, 252, 119091. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119091>
- Real Decreto 105/2008 de 1 de febrero. Por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. 13 de febrero de 2008. BOE-A-2008-2486.
- Reglamento de la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos de 2014, LGPGIR. Última reforma 31 de diciembre 2014. DOF 31-12-2014.
- Resolución No. 307 de 2002 CONAMA. Por la cual se establecen los lineamientos, criterios y procedimientos para la gestión de los residuos de la construcción civil. 5 de julio de 2002.
- Rincón Garzón, L., Rodríguez Carmona, E., y Espitia Cubillos, A. (2018). Madera plástica. Un producto amigo del planeta. *Semilleros*, 3(5), 41. <https://revistas.fio.unam.edu.ar/index.php/semillero/article/view/71>
- Rivero Fernández, L. (1997). Fabricación de productos de base yeso y sus aplicaciones industriales. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(6), 591–598. <http://boletines.secv.es/upload/199736591.pdf>
- Roussat, N., Méhu, J., Abdelghafour, M., y Brula, P. (2008). Leaching behaviour of hazardous demolition waste. *Waste management (New York, N.Y.)*, 28(11), 2032–2040. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.019>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2021). *Programa de gestión integral de residuos para la Ciudad de México*. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025_N_ago21.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/555093/DiagnosticoBasicoGestionIntegralResiduosF.pdf.pdf>

- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2020). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México 2019*. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/InventarioDeResiduosSolidosDeLaCiudadDeMexico_2019.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente Estado de México. (2021). *Sitios autorizados de recepción de residuos de manejo especial*. https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/IPOMEX/Ejercicio2021/Articulo_92/17/UIPPE/0009%20SMA%202021.pdf
- Segura, A. M., Rojas, L. A., y Pulido, Y. A., (2020). Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. *Revista Espacios*. 41(17), 1-9. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p22.pdf>
- Sieffert, Y., Huygen, J. M., y Daudon, D. (2014). Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering–architecture collaboration. *Journal of Cleaner Production*, 67, 125–138. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.018
- Silgado, S. S. S., Molina, J. D. A., Mahecha, L., y Calderón, L. (2018). Diagnóstico y propuestas para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 21(1), 9-21.
- Silva, Y. F., Robayo, R. A., Matthey, P. E., y Delvasto, S. (2016). Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 639-644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057>
- Sormunen, P., y Kärki, T. (2019). Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. *Journal of Building Engineering*, 24, 100742. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100742
- Suárez González, J., Gayarre, F. L., Pérez, C. L.-C., Ros, P. S., y López, M. A. S. (2017). Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams. *Construction and Building Materials*, 149, 507-514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.147>

- Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S.A. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. (Volumen I). McGraw-Hill.
- Treviño, C. (2011). *Certificación LEED en México y el mundo* [Webinar]. Consejo Mexicano de Edificación Sustentable. <https://cleanenergysolutions.org/sites/default/files/documents/trevinoMexicoWebinar20111130.pdf>
- US Green Building Council. (2009). *Guía de Estudio de LEED AP Diseño y Construcción de Edificios del USGBC*. Washington, DC: US Green Building Council.
- US Green Building Council. (febrero de 2022). *USGBC announces Top 10 Countries and Regions for LEED in 2021. LEED*. <https://www.usgbc.org/articles/usgbc-announces-top-10-countries-and-regions-leed-2021>