

Circularidad de residuos de madera maciza en la deconstrucción. Optimización para su reaprovechamiento en cascada

Alejandro Rodea Chávez⁽¹⁾

Resumen: Reciclar es un deber ser de nuestros tiempos. Refleja conciencia ambiental y busca reducir el consumo de materias primas vírgenes y generación de residuos, alineándose con el diseño enfocado en la economía circular. Sin embargo, la recuperación, limpieza y reprocesamiento de materiales enfrentan barreras que dificultan cadenas de reaprovechamiento eficientes. La calidad de los materiales recuperados, particularmente de la madera maciza, disminuye al contaminarse, envejecer o dañarse por factores mecánicos o biológicos. Además, la mayoría de productos actuales, al diseñarlos, difícilmente se consideró facilitar su futura recuperación material; los distintos actores suelen actuar de forma fragmentada. Premisa del proyecto es la indispensable caracterización del decaimiento de los elementos de madera, previo a la deconstrucción para desbloquear su potencial revalorización eficiente. El objetivo de la investigación busca establecer técnica y organizacionalmente estrategias de gestión fundamentadas en conceptos de economía circular regenerativa, que guíen hacia la recuperación de madera maciza de construcciones actuales para su alta revalorización (upgrade). Como resultados se espera evidenciar barreras y oportunidades, y desarrollar herramientas y logísticas de gestión que habiliten mercados de madera recuperada mediante minería urbana, reteniendo o mejorando sus cualidades materiales y objetuales, y ralentizando el decaimiento de calidades del material en los cambios de ciclos de vida.

Palabras clave: Deconstrucción selectivo - recuperación de madera maciza - valorización en cascada - degradación de materiales - economía circular.

[Resúmenes en inglés y portugués en la página 75]

(1) Ver CV en pág. 76

Introducción

De entre los múltiples materiales utilizados para la edificación, la madera ha sido primordial en distintas latitudes y momentos a lo largo de la historia. Las características de este material son muy apreciadas no solo por la amplia disponibilidad o relativa facilidad de transformación, sino por sus múltiples cualidades estéticas, funcionales y medioambientales.

Aspectos relevantes para el diseño tanto de objetos como edificaciones en madera, al igual que con otros materiales, conllevan el conocimiento y comprensión de sus especificidades, tales como presentaciones, dimensiones, resistencia a la acción del medio ambiente, luz, calor, humedad, etc., que permitan diseñar acorde con ellos, previendo la duración y las prestaciones y limitaciones que dará para cada objeto.

Por su procedencia biológica resulta muy particular el caso de la madera, o maderas, pues son muy variadas las especies arbóreas aprovechables y consecuentemente sus cualidades específicas. Más aún, su habilitación y uso conlleva diversos procesos y uso de compuestos desde el aprovechamiento del árbol hasta el producto o elemento de madera, que puede ser utilizado para mobiliario, pisos y acabados o estructuras en construcciones para viviendas u otros usos. Es claro que tales conceptos directamente afectan al producto que se esté desarrollando, su costo y prestaciones, pero ¿qué pasará después de su vida útil?

Enfoques de diseño para objetivos específicos

Diversos enfoques metodológicos han abordado puntuales estrategias, englobadas en los Diseño para X (DfX) (Fiksel, 2009; Radziwill y Benton, 2017) El Diseño para el desensamblable (DfD) (Couto y Couto, 2010; Zoghi et al, 2022), Diseño para Deconstrucción y Reuso (DfDR), Diseño para Adaptabilidad (DfA) (Sandin et al., 2022), Diseño para Reciclaje (Abdolmaleki et al. 2025), Diseño Modular (Bechert et al, 2025) u otras enfocadas en aspectos medioambientales, que buscan se facilite reaprovechar la materialidad de esos objetos al final de la vida útil del producto o cuando deba repararse, facilitando su reincorporación a la cadena de valor de nuevos productos. Si bien la finalidad específica de dichas estrategias varía, son constantes la búsqueda de prolongar la vida útil de los productos, la recuperación de valor mediante su reparación, o por el reaprovechamiento de la materialidad de productos antiguos para nuevos usos (Ungureanu et al., 2025) minimizando así efectos adversos al medioambiente¹ o la sociedad.

En ese sentido, al momento de tomar decisiones de recuperación o gestión de residuos de la construcción y demolición (RCD) se requiere información sobre cada producto o elemento, su materialidad, energía incorporada, toxicidad, y una serie de valores útiles para caracterizarlos. La trazabilidad², como herramienta de seguimiento de cada componente material a lo largo de la cadena de suministro, incluye la gestión de datos.

Así, los procesos más avanzados de diseño y fabricación de múltiples componentes han ido incorporando su trazabilidad, mediante el uso de sistemas de gestión de información cada vez más robustos y complejos (BIM, Gemelos Digitales, IoT, Big Data, Blockchain) donde, además, son diversos actores en momentos y lugares distintos, quienes ingresan y actualizan la información que se utiliza a lo largo de diversas fases de la vida útil de los materiales y de los productos, y quizá se espera trascienda la vida útil de aquello que se diseñó³. Sin embargo, la trazabilidad de los materiales de la construcción aún es incipiente campo de desarrollo⁴ no habiéndose generalizado en muchos países o localidades.

Hasta este punto, la visión del ciclo de vida de los productos de madera había sido abordada con un inicio conocido, controlable, es decir, con materiales provenientes del aserradero como materia prima nueva, que suelen ser estandarizadas o conocidas. Posteriormente se esperaba que, cuando finalice la vida útil de lo que ahora se está diseñando, lo que puede suceder en días o semanas o como varias décadas después de diseñados, “alguien” se encargue de desensamblar o reciclar la materialidad, o en su caso, recupere energía. La madera es altamente valorada por su poder calórico al ser incinerada, siendo una práctica ubicua en el planeta utilizarla para calefacción, cocción de alimentos e incluso iluminación tanto en procesos industriales como de manera personal.

Tal facilidad para obtener energía calórica, así como para reducir los volúmenes de residuos de madera hacen que tarde o temprano gran parte de la madera utilizada pasa por procesos de combustión, no siempre de manera eficiente, siendo muchas veces la primera opción antes de buscar el reuso o reaprovechamiento para nuevos productos.

Tras el proceso de incineración, el carbono contenido en la madera es liberado nuevamente a la atmósfera, de la que en algún momento será recapturado por un nuevo árbol. Los ciclos de plantación y aprovechamiento forestal suelen ser periodos de no menos de 20 años, pudiendo rebasar los 100 años dependiendo de múltiples factores. Sobra decir que esos ciclos son amplios comparados con la vida humana, por lo que solo intergeneracionalmente la humanidad puede gestionarlos. Similar situación ocurre con las edificaciones de madera, cuya vida útil, si bien depende de múltiples factores, puede superar con facilidad los 50 años.

Cabría preguntarse si es deseable emprender la recuperación de todas o solo ciertas piezas o componentes de edificaciones para su reuso o aplicación en otro tipo de producto⁵ o, por lo contrario, es más práctico⁶ “y sustentable” directamente proceder a recuperar la energía de su biomasa (degradación directa) y recurrir a fuentes de madera nueva (plantaciones forestales) para futuros productos. Tal cuestionamiento, además, debería considerar las restricciones y características materiales técnicas necesarias que son requeridas para la edificación, y si dichos elementos de madera recuperada postconsumo las cumplen.

Procurar migrar de visiones lineales (de la cuna a la tumba, hacer-usar-disponer) del ciclo de vida de los productos de madera a economías circulares (reusar, reciclar) y que vincule distintos ciclos de vida (de la cuna a la cuna), es tarea fundamental para eficientar el uso de los recursos forestales, minimizar la huella de carbono y ecológica, prolongar los ciclos de aprovechamiento del bosque, entre otros beneficios.

Deconstrucción selectiva

Como se ha indicado, el diseño para la deconstrucción (DfD), es una estrategia que prevé cómo se retirará/deshará aquello que se está diseñando tras su fase de uso para preservar en buen estado los materiales recuperados (Ungureanu et al., 2025). No obstante, dada la relativamente reciente instauración de estrategias tales como el DfD, es plausible que las construcciones que actualmente serán retiradas no considerasen tales supuestos (Kanters, 2018). Visto así, deconstruir o demoler una edificación que cumplió su vida útil requiere diseñar cómo hacerlo desde el lado opuesto, o sea, a partir de la edificación existente y en las condiciones en que se encuentre (fig. 1). No sólo importa demoler o retirar el inmueble para liberar el predio, sino gestionar los grandes volúmenes de residuos para su disposición final o, idealmente, evitando su downcycling⁷, es decir, hacer viable el reaprovechamiento de los componentes y materiales en las mejores condiciones posibles para nuevas aplicaciones (Bertino et al., 2021; Niu et al., 2021; Cramer y Sandin, 2021).

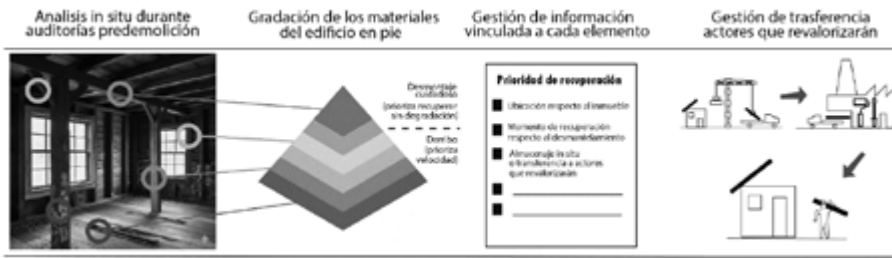


Figura 1. Esquematización del proceso de deconstrucción selectiva de edificaciones preexistentes

Aquello que se construyó décadas atrás fue planeado con distintos estándares dimensionales, materiales, procesos y acabados que en la actualidad seguramente han cambiado. Igualmente, es de esperarse que la información plasmada en los proyectos (planos, bitácoras o demás archivos que pudieran aún ser accesibles) no especifique con tal precisión la información que ahora se busca contengan, por ejemplo, los pasaportes de materiales. Más aún, tras una larga vida útil es plausible que los elementos de madera se encuentren en diversos estados de conservación⁸; pudrición, ataque de xilófagos, y degradación por acción de la luz o humedad, que podrían haber afectado (o no) en distintos grados la integridad material de la madera⁹. Cada elemento de cada edificación tendrá una historia única y específica.

Las construcciones antiguas representan una oportunidad de recuperación de madera maciza de grandes dimensiones y de características muy valoradas hoy en día (además de contar quizá con una historia digna de narrarse¹⁰). Los elementos estructurales, más masivos en general respecto a recubrimientos, pisos, u otras aplicaciones, pudieran “contener”

maderas ahora inexistentes o vedadas para su comercialización, especies nativas o protegidas, dimensionalmente mayores a las comercialmente existentes, más densas, resistentes por haber sido obtenidas de árboles más maduros¹¹.

Así, recuperar elementos de madera mediante deconstrucción (total o selectiva) puede proveer al mercado actual un recurso escaso y que de otra forma sería inaccesible; medioambientalmente, amplios beneficios en materia de prolongar el secuestro de carbono en la materialidad de la madera han sido referidos por diversas investigaciones (Ovando et al., 2025; Zeng y Hausmann, 2022). No obstante tales oportunidades, no todos los componentes de una edificación estarán en condiciones de ser reusados o reutilizados, por lo que los costos, tiempo, energía y recursos invertidos en recuperarlos pudiera no ser comercialmente competitivos ni medioambientalmente sustentable (Volk et al., 2018). Para ello (y otros múltiples fines) las auditorías predemolición valoran la posibilidad de recuperación material y objetual de las edificaciones, muchas veces, en el caso de elementos de madera, apoyadas en técnicas visuales¹² para identificar el grado de preservación y posibilidades de reuso. Por sí mismo complejo, este proceso incluye la consideración de seguridad de los trabajadores, los sistemas de unión que tengan con los elementos contiguos, entre otras importantes consideraciones¹³.

Reaprovechar adecuadamente los materiales además de recuperarlos de las edificaciones donantes necesita la información de sus características con el nuevo ciclo de vida del producto a desarrollarse desde sus etapas iniciales de diseño. Tales cambios de ciclo difícilmente son abordados por la misma empresa, diseñador o proyecto. El vacío intermedio requiere el desarrollo de infraestructura tecnológica, sistemas informativos, coordinación entre diversos actores y en momentos diferentes para hacerlo factible, y en última instancia, que el resultado sea sustentable¹⁴.

Para los nuevos diseños, lo más lógico sería procurar utilizar el material con las características requeridas; desde la recuperación de materiales y componentes de las edificaciones donantes, la lógica se centra en retener sus cualidades remanentes (integridad física, dimensional y configuración sistémica¹⁵, evitar rupturas o magulladuras, contaminación con otros materiales, etc.) durante el desmantelamiento, manejo y almacenaje, haciendo factible se integren a nuevos productos en las mejores condiciones posibles.

Gestionar los materiales entre múltiples ciclos de vida (por ejemplo, pasando de una edificación a otra, a muebles, quizá artesanías, y finalmente al fuego) de manera lógica en la búsqueda de prolongar la vida útil del material es el objetivo de la valorización en cascada¹⁶. Tal concepción no solo aborda el material como tal, sino como componente de estructuras hechas de varios tramos de madera trabajando en conjunto, como en un mueble, y los residuos de sus procesos. La fabricación de tableros aglomerados a partir de aserrín o partículas, principalmente provenientes de fuentes controladas como los residuos industriales, es un ejemplo del aumento de valor (upcycle).

Es de destacarse la baja tasa de aprovechamiento del árbol en pie en relación a la madera maciza sólida de uso estructural¹⁷ producida tras los procesos de aserrado, escuadría y secado¹⁸ donde, sin considerar las llamadas maderas de ingeniería, que permitan unir segmentos para componentes de mayores dimensiones¹⁹, resulta evidente la importante huella forestal relacionada con la edificación, mientras que el reaprovechamiento directo

para los mismos fines proveniente de la recuperación de edificaciones donantes enfrenta múltiples barreras, entre las que destaca normatividad²⁰ de la localidad, que muchas veces implican evaluaciones realizadas en laboratorio; por otro lado, aunque se han desarrollado modelos predictivos del decaimiento de la madera, los mismos están acotados a especies arbóreas específicas, y toman en cuenta aspectos tales como las técnicas constructivas aplicadas, la humedad y factores de ubicación sobre o bajo la tierra, por lo mismo, la aplicabilidad de los modelos es para específicas zonas geográficas (Anastasiades et al., 2024). El proyecto InFutURWood abordó el desafío de reutilizar la madera de edificios existentes, centrándose específicamente en su viabilidad como material estructural²¹.

Optimización para el reaprovechamiento en cascada de elementos, componentes y estructuras de madera

Los enfoques de diseño para el desensamble, así como las estrategias de deconstrucción de actuales edificaciones buscan que sea factible la recuperación de los materiales, elementos y componentes. La finalidad de su optimización tiene vertientes medioambientales (minimizar la aparición de sitios de disposición, reducir la presión sobre las fuentes de recursos primarios, evitar contaminación por mala disposición²² e incineración²³), sociales (creación de empleos locales, reducción de vertederos ilegales, reducción de riesgos laborales), económicas (recuperación y aumento de valor²⁴, fortalecimiento de cadenas de suministros²⁵, diversificación de recursos materiales), tecnológicas (mayor eficacia y eficiencia de procesos de gradación de su calidad²⁶, diversificación de tecnologías para el reaprovechamiento de residuos, facilidad de desensamble)²⁷.

Reciclar, reutilizar y demás Rs²⁸ implica la reducción de presión sobre recursos primarios, pero en el proceso suelen disminuir las propiedades materiales, es decir, no siempre es viable que en términos cualitativos se apliquen los materiales recuperados para finalidades con similares requerimientos, sea por cuestiones regulatorias, disminución técnica de su resistencia, integridad dimensional o riesgo de contaminación.

Recuperar madera de construcciones para su reaprovechamiento en nuevas edificaciones, particularmente piezas de grandes escuadrías, debería establecer desde etapas muy tempranas, previas a la deconstrucción, las condiciones físicas de su estado y establecer escenarios (fig. 2) para las mejores prácticas para su gestión hacia nuevos ciclos de uso en cascada, enfatizando²⁹ el suprarreciclaje (upcycling), donde se mejoren las cualidades materiales en el proceso en vez de disminuirlas (downcycling) ((Kophina, 2018), o considerando puntos intermedios como el reuso “así como se encuentre” (Mayer, 2024) conservando su larga dimensionalidad para idealmente, en subsiguientes ciclos de vida, puedan igualmente ser reaprovechados y en el proceso, prolongar la retención de carbono en su materialidad por sucesivas reutilizaciones.

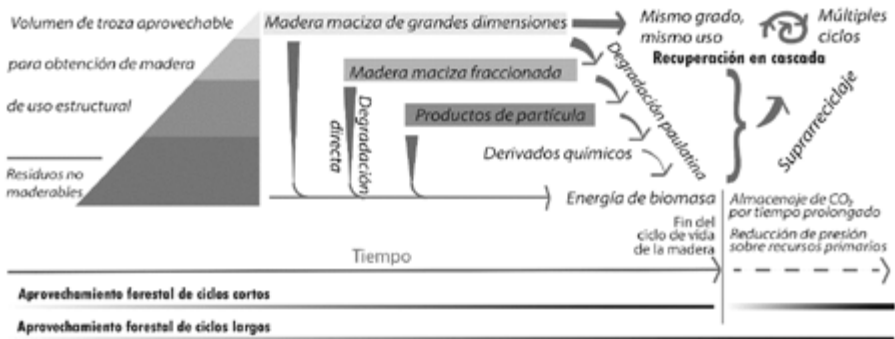


Figura 2. Escenarios para el final de ciclo de vida de la madera, según las estrategias de reaprovechamiento por degradación directa o en cascada

Obstáculos recurrentes en la recuperación y reuso de elementos de madera es la exposición a diferentes condiciones ambientales al ser recuperada y por periodos de tiempo prolongados, inducidos en gran parte, por la falta de comunicación entre quien deconstruye y quien reutilizará los elementos recuperados. De entre los más acuciantes son el cambio de humedad y temperatura, lo que podría inducir cambios dimensionales, torceduras rajaduras en las cabezas de tabloncillos ocurridos entre el momento de desensamble y el retrabajo para integrarlo a nuevos diseños. Aun controlando la exposición a los elementos, el futuro uso podría implicar diferente ambiente y, por consiguiente, cambios dimensionales que, en caso de estructuras armadas podría, por ejemplo, apretar o aflojar las uniones o torcer elementos o componentes. Trasladar la madera hacia otros sectores, por ejemplo, de ser recuperada de edificaciones a uso en mobiliario, pudiera solventar la necesidad de pasar regulaciones muy estrictas o requerir quizá traslados de menor distancia, o menor procesamiento general para su reutilización. Conocer con antelación hacia dónde se dirigirá la madera recuperada, evitaría periodos largos de almacenaje en el sitio, reduciendo no solo costos vinculados, sino riesgos de contaminación con otros elementos y dando cabida a mayor espacio para las maniobras de desmantelamiento.

Consideraciones finales

Los objetivos de recuperación de residuos de la construcción y demolición están establecidos como indispensables. Es necesario identificar qué estructuras sociales, redes de actores, tecnologías apropiadas para contextos específicos, así como el potencial de recuperación en la minería urbana, tanto en cantidades como calidades.

Las tecnologías actuales empleadas para reconstituir segmentos de madera en secciones de mayores dimensiones mediante su unión a canto, cabeza o cara reducen ampliamente las restricciones para lograr elementos de grandes dimensiones; no obstante, requieren adhesivos especiales, herramental y personal que lo realice en condiciones controladas. Por su parte, múltiples tecnologías para aprovechar residuos de madera usan procesos químicos y térmicos para extraer diversos compuestos, útiles para la formulación de compuestos biobasados con aplicaciones en extenso desarrollo. Ello pone sobre la balanza un factor más para valorar la recuperación de madera maciza de las edificaciones, los procesos adecuados, gestiones necesarias entre actores, y en última instancia, su impacto social, económico y medioambiental a corto y largo plazo.

Es indispensable tener un nivel de certeza razonable respecto a la factibilidad de lograr determinados productos tras todo el ciclo de recuperación, rehabilitación y nuevo inicio de ciclo de vida, mismo que inicia previo a la demolición. A mayor certeza en el diagnóstico, mayor oportunidad de lograr alta revalorización, gestionando los esfuerzos, recursos y riesgos acorde con la priorización basada, entre otros aspectos, en la calidad remanente de los elementos, componentes y estructuras de las edificaciones.

Notas

1. Generalmente, 50% de todo el residuo generado por la industria de la construcción es causado en actividades que ocurren al final de la fase útil del edificio, siendo la más común la demolición (Akanbi et al., 2019).
2. Los sistemas de trazabilidad recaen en la capacidad de rastrear un producto un paso adelante y un paso atrás en cualquier cadena de suministro, permitiendo eventualmente la implementación rápida y efectiva de acciones correctivas donde y cuando se requieran. (Figorilli et al., 2018)
3. Markou et al. (2025) señalan la naturaleza estática de los pasaportes de materiales, que requieren una entrada manual sustancial y no proporcionan actualizaciones en tiempo real para reflejar los cambios en el ciclo de vida de un edificio, sugiriendo entonces la creación de pasaportes de material dinámicos.
4. Como conclusiones de su investigación, Xu et al., (2023) indican que el sector de la construcción está poniéndose al día, pero sus características, como la fragmentación, la discontinuidad y la temporalidad basada en proyectos, plantean desafíos.
5. Residuos de madera de muy diversa procedencia, sean podas, residuos municipales o industriales, en formatos como ramas sueltas, aserrín y partículas de madera son ampliamente utilizados para fabricación de tableros aglomerados, así como para la generación de energía de proceso.
6. En su investigación llevado a cabo en el Reino Unido, Cramer y Sandin (2021) se plantearon la deconstrucción y recuperación de una vivienda escocesa con estructura de madera ligera, analizando posibles ventajas relacionadas con diversos aspectos: la tipología de la misma, los porcentajes de madera recuperable esperados, la tecnología y conocimientos

requeridos respecto al sistema constructivo en particular, la estandarización de los componentes de la misma, los incentivos, el modelo de negocio, los sistemas de unión, la amplitud de variabilidad de componentes, la congruencia con las regulaciones locales y de aseguramiento financiero. Por su parte, Yang et al. (2025) estudian los procesos de desensamble en paralelo o secuenciales de unidades modulares mientras que del proceso de reutilización estiman éste consta de cuatro subprocesos: recogida, seguimiento de materiales, inspección de calidad y retoques. Identifican como factores cruciales para facilitar el reuso de materiales de edificaciones la facilidad de desensamble, la propiedad del cliente, seguimiento digital de materiales y la facilidad de retención de valor.

7. Helbig et al. (2022) definen el downcycling [reciclaje descendente] como el fenómeno de reducción de la calidad de los materiales reprocesados a partir de residuos, en relación con su calidad original. Además, identificamos que esta reducción de calidad puede manifestarse termodinámica, funcional y económicamente, abarcando todas las perspectivas del reciclaje descendente.

8. Durante su ciclo de vida, los edificios se modifican y adaptan a las necesidades de generaciones de usuarios, residentes y propietarios a lo largo de varias décadas. Al final de su vida útil, se someten a procesos de rehabilitación o demolición (y sustitución). Sin embargo, las modificaciones y desviaciones de la estructura original, el equipamiento y los accesorios, así como el deterioro y la contaminación, a menudo no están bien documentados o solo se dispone de información obsoleta y desorganizada. Por lo tanto, en muchos edificios existentes, predomina la información incompleta, obsoleta o fragmentada, lo que dificulta la planificación de proyectos de rehabilitación y demolición. (Volk et al., 2018)

9. La biodegradación de la madera ha sido foco de interés científico y de especial interés para biólogos enfocados en la durabilidad, tratamientos preservadores y vida de servicio de los productos de madera (Ximenes et al., 2015).

10. Ejemplo de ello es cómo, en el ámbito del reconocimiento cultural patrimonial, Saelzer et al. (2022) destacan el creciente reconocimiento de los atributos de la actividad narrativa (oral, escrita, fotografía, cartografía y áreas históricas construidas y protegidas) alrededor de lo que llaman ciudades de madera que, particularmente al sur de Chile, indican dependen de maderas nativas desde la segunda mitad del siglo XIX hasta la segunda mitad del siglo XX.

11. Los altos volúmenes de madera requeridos en el mercado suelen apresurar los turnos de aprovechamiento o corta de las plantaciones, si son comparados con las lógicas previas, donde se aprovechaban árboles selectos, de prolongado crecimiento, que proveerán maderas de calidad superior.

12. Técnicas visuales macroscópicas, microscópicas, así como técnicas moleculares han sido referidas por Rojas, C. (2019) para la identificación de deterioro tanto superficial como internamente en muestras de madera de edificaciones expuestas al intemperismo, hallando agentes bióticos como hongos e insectos xilófagos, tanto superficialmente como internamente. Igualmente se utilizan instrumentos y técnicas avanzadas para la medición de resistencia al barrenado, de fuerza de penetración, entre otros posibles parámetros vinculados con diversos tipos de degradación. No obstante, tradicionalmente la gradación de madera se realiza en laboratorio, donde las máquinas de clasificación funcionan doblando la madera y

evaluando su rigidez. Hoy en día, la clasificación automatizada también incluye tecnologías como la frecuencia de resonancia flexional, mediciones con rayos X, velocidad de las ondas ultrasónicas (Klinge et al., 2019) y espectroscopia.

13. La auditoría previa a la deconstrucción implica la recopilación de información sobre los materiales y elementos que se recuperarán, los flujos de residuos y recomendaciones para su posterior manejo y reutilización. Un objetivo central de la auditoría previa a la deconstrucción es crear un inventario exhaustivo de los materiales y componentes recuperables dentro del edificio donante, maximizando el potencial de reutilización y minimizando los residuos. Durante la fase previa a la deconstrucción, fue esencial recopilar datos sobre las dimensiones físicas, la forma y los posibles daños de todos los elementos. Si la información ya estaba disponible en los archivos, era esencial verificar su exactitud. (Ungureanu et al., 2025)

14. El Instituto de Ciencia y Tecnología de Luxemburgo documentó en la serie Digital Deconstruction el amplio sistema desarrollado alrededor de la deconstrucción de una estación de trenes, particularizando en diversos aspectos por resolverse, entre los que destaca la vinculación con el mercado de lo recuperado.

15. Diversos elementos de madera organizados en armaduras o estructuras que trabajan en conjunto pudieran ser recuperables sin desarmarse, reaprovechándose más allá de su materialidad individual, como componentes estructurales más complejos que, dependiendo de la edificación donante, pudiese contarse con múltiples unidades de dichas estructuras factibles de integrar a nuevos diseños.

16. Es importante contar con métodos de evaluación rigurosos para demostrar el impacto total del efecto cascada, evidenciando su contribución a la sostenibilidad (ambiental, social y económica), así como a la circularidad dentro del sector de la construcción. (Ungureanu et al., 2025)

17. Madera aserrada de uso estructural (Gysling et al. 2020)

18. Aunque diversos factores afectan ampliamente la eficiencia de aprovechamiento, un caso de estudio en un aserradero en Colombia estimó que del volumen comercial total de los árboles en pie la madera transformada a madera procesada fue menor al 10% (Medina et al. 2007).

19. El proyecto CascadeUp, presentado en Londres durante 2024, mostró una estructura de madera laminada encolada (glulam) y madera laminada cruzada (CLT) creada íntegramente con madera de desecho procedente de demoliciones (Gutierrez, J., 2024).

20. Muestra de tal problemática se expresa en el Work Package 5 del proyecto Infuturewood, donde se expresa cómo el problema de que las normas actuales para el diseño de edificios y la fabricación de productos de madera exigen una clasificación de resistencia basada en criterios incompatibles con la madera recuperada y la madera nueva, igualmente variada, procedente de fuentes menos habituales. El objetivo es que esta nueva clasificación sea totalmente equivalente a la de la madera nueva de las principales especies comerciales.

21. <https://www.infuturewood.info>

22. Como resultado de su investigación realizada en la ciudad de Santiago, Chile, Véliz et al., (2025) Subrayan “la necesidad de un enfoque integral para la gestión de los residuos de

construcción y demolición que integre las dimensiones socioambientales, técnicas, financieras y regulatorias para promover la sostenibilidad tanto a nivel regional como mundial”.

23. Tighnavard et al. (2025) analizan ocho posibles escenarios para el reuso, reciclaje e incineración de los residuos de madera en la Construcción y Demolición, procurando evitar su envío a sitios de disposición final.

24. Estudios como el realizado por Arora et al., (2021) en el contexto de Singapur arroja resultados optimistas sobre el futuro de la minería urbana, tanto en términos de relación costo-beneficio económico, como medioambiental, con expectativas de incremento tras la mayor habilitación del personal e involucramiento de otros actores del sector de la construcción. Por su parte, la Federación Europea de Páneles (European Panel Federation) anota cómo en 2023 la Legislación Europea integró la Directiva de Energía Renovable (REDIII) en la que destaca del artículo 3(3), que estipulan “...los Estados miembros adoptarán medidas para garantizar que la energía procedente de la biomasa se produzca de forma que se minimicen los efectos distorsionadores indebidos en el mercado de la materia prima de biomasa (...) con miras a garantizar que la biomasa leñosa se utilice de acuerdo con su mayor valor añadido económico y medioambiental”.

25. La Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA) auspicia el programa Wood-2Wood (2024-2027) con el objetivo de reducir los residuos e impulsar el uso de materias primas secundarias mediante tecnología digital, fomentando cadenas de valor circulares y de bajas emisiones a través de cuatro pilares clave de innovación.

26. Aunque importantes avances en el proceso de graduación de la calidad de la madera se han alcanzado, tanto para gradación visual como por máquina (Aira et al., 2019), están dirigidos a maderas de primer uso, en el proceso de aserrío y escuadría, no así para elementos destinados a un segundo ciclo de vida.

27. Durante su presentación Future Skills for Circular Wood Waste Solutions: Why Foresight Matters for Industrial Transitions, en el Webinar Workforce Upskilling and Talent Retention in the Industrial Sector, Jorge Martins enuncia 6 puntos del Marco STEEPV, que además consideran aspecto políticos (Políticas, regulaciones y estructuras de gobernanza global) y valores (normas culturales y consideraciones éticas).

28. Lima et al. (2024) listan distintas estrategias “Rs” que se abordan a escala de laboratorio e industrial: rechazar, reducir, repensar, reparar, reutilizar, remanufacturar, reacondicionar, reconvertir, reciclar y recuperar. De éstas, las primeras tres aplican primordialmente a la concepción de nuevos productos, mientras que las subsecuentes a productos en uso, para un subsiguiente ciclo de vida de producto u obtención de energía de su biomasa.

29. El proyecto europeo CaReWood (acrónimo de Cascade Reuse Wood) trabajó hasta 2017

Referencias Bibliográficas

Abdolmaleki, H., Ahmadi, Z., Hashemi, E., & Talebi, S. (2025). *A review of the circular economy approach to the construction and demolition wood waste: A 4 R principle perspective*. CLEANER WASTE SYSTEMS, 11, Article 100248. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100248>

- Aira, J. R., Villanueva, J. L., & Lafuente, E. (2019). *Visual and machine grading of small diameter machined round Pinus sylvestris and Pinus nigra subsp. salzmannii wood from mature Spanish forests*. MATERIALS AND STRUCTURES, 52(2), Article 32. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1330-4>
- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Omoteso, K., Bilal, M., Akinade, O. O., Ajayi, A. O.,...Owolabi, H. A. (2019). *Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy*. Journal of Cleaner Production, 223, 386-396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.172>
- Anastasiades, K., Bielen, H., Cantré, G., Audenaert, A., & Blom, J. (2024). *In-ground and above-ground service life prediction for timber reusability - Progressing towards circular construction*. Journal of Cleaner Production, 434. <https://doi.org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/j.jclepro.2023.139898>
- Arora, M., Raspall, F., Fearnley, L., & Silva, A. (2021). *Urban mining in buildings for a circular economy: Planning, process and feasibility prospects*. Resources, Conservation and Recycling, 174, 105754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105754>
- Bechert, S., Aicher, S., Gorokhova, L., Balangé, L., Göbel, M., Schwieger, V.,...Knippers, J. (2025). *Segmented Timber Shells for Circular Construction: Relocation, Structural Assessment, and Robotic Fabrication of a Modular, Lightweight Timber Structure*. BUILDINGS, 15(11), Article 1857. <https://doi.org/10.3390/buildings15111857>
- Bertino, G., Kisser, J., Zeilinger, J., Langergraber, G., Fischer, T., & Österreicher, D. (2021). *Fundamentals of building deconstruction as a circular economy strategy for the reuse of construction materials*. Applied Sciences (Switzerland), 11(3), 1–31. <https://doi.org.pbidi.unam.mx:2443/10.3390/app11030939>
- Couto, J., & Couto, A. (2010). *Analysis of Barriers and the Potential for Exploration of Deconstruction Techniques in Portuguese Construction Sites*. Sustainability, 2(2), 428-442. <https://doi.org/10.3390/su2020428>
- Cramer, M., & Sandin, Y. (2021). *More than the sum of their parts - How UK Timber Houses can be Deconstructed and Reused. Proceedings of the 17th meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE 2021)* (pp. 108-110). Kaunas University of Technology. <https://doi.org/10.5755/e01.9786090217627>
- European Panel Federation (EPF). (2023/oct/12). <https://europanel.org/press-release-epf-applauds-cascading-use-of-wood-in-eu-legislation/>
- Figorilli, S., Antonucci, F., Costa, C., Pallottino, F., Raso, L., Castiglione, M., Pinci, E., Del Vecchio, D., Colle, G., Proto, A. R., Sperandio, G., & Menesatti, P. (2018). *A Blockchain Implementation Prototype for the Electronic Open Source Traceability of Wood along the Whole Supply Chain*. Sensors (14248220), 18(9), 3133. <https://doi.org.pbidi.unam.mx:2443/10.3390/s18093133>
- Fiksel, J., & Arquiga, C. (1997). *Ingeniería de diseño medioambiental. DFE: desarrollo integral de productos y procesos ecoeficientes*. McGraw-Hill.
- Gutierrez, J. (2024/sep/09). *From 'waste wood' to 'mass timber'. CascadeUp pilot to premiere at London Design Festival*. Timber Development UK. <https://timberdevelopment.uk/cascadeup-pilot/>

- Gysling Caselli, J., Kahler González, C., Soto Aguirre, D., et al (2020). *El mercado de la madera aserrada para uso estructural en Chile*. Santiago, Chile: INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/29220>
- Helbig, C., Huether, J., Joachimsthaler, C., Lehmann, C., Raatz, S., Thorenz, A.,...Tuma, A. (2022). *A terminology for downcycling*. JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY, 26(4), 1164-1174. <https://doi.org/10.1111/jiec.13289>
- InFuUReWood Project. (s.f.) www.infuturewood.info
- International Solid Waste Association (ISWA) (s.f.) <https://www.wood2wood-project.eu/>
- Kanters, J. (2018). *Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art*. Buildings, 8(11), 150. <https://doi.org/10.3390/buildings8110150>
- Kopnina, H. (2018). *Circular economy and Cradle to Cradle in educational practice*. JOURNAL OF INTEGRATIVE ENVIRONMENTAL SCIENCES, 15(1), 123-138. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2018.1471724>
- Lima, A. T., Kirkelund, G. M., Lu, Z., Mao, R., Kunther, W., Rode, C., . . . Simoes, S. G. (2024). Mapping circular economy practices for steel, cement, glass, brick, insulation, and wood – A review for climate mitigation modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114697. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114697>
- Markou, I., Sinnott, D., & Thomas, K. (2025). *Current methodologies of creating material passports: A systematic literature review*. *Case Studies in Construction Materials*, 22. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/j.cscm.2025.e04267>
- Martins, Jorge. [wood2Wood Project]. (2025/abril/08) *REACT Cluster Webinar #1: Workforce Upskilling and Talent Retention in the Industrial Sector* [Video] <https://www.youtube.com/watch?v=1s7VHOBetrE>
- Mayer, M. (2024). *Recycling Potential of Construction Materials: A Comparative Approach*. CONSTRUCTION MATERIALS, 4(1), 238-250. <https://doi.org/10.3390/constrmater4010013>
- Medina, A. A., Baucis, A. G., Catalán, M. A., Andía, I. R., Trangoni, F., Razquin, M.,... Vuillermet, A. (2018). *Characteristics and physical properties of poplar woods from Rio Negro, Patagonia Argentina*. MADERA Y BOSQUES, 24(1), Article UNSP e2411434. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411434>
- Niu, Y., Rasi, K., Hughes, M., Halme, M., & Fink, G. (2021b). *Prolonging life cycles of construction materials and combating climate change by cascading: The case of reusing timber in Finland*. Resources, Conservation and Recycling, 170, 105555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105555>
- Ovando, P., Olivera, S. M., Rodea-Chavez, A., García-Franco, L., Heard, C. L., & Rozas-Vásquez, D. (2025). From forest to building: Enhancing the use of lower grade wood for climate-responsive construction. *Trees, Forests and People*, 22, 101022. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.101022>
- Radziwill, N. M., & Benton, M. C. (2017). Design for X (DfX) in the Internet of Things (IoT).
- Rojas, C. (2019). *Determinación de agentes de deterioro de madera obtenida desde las ex Oficinas Salitreras Peña Chica, Keryma y Ramírez en la Región de Tarapacá*. [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad de Valparaíso.

- Saelzer-Canouet, G., Campusano-Brown, D., & Gómez-Alvial, P. (2022). *Edificios históricos de madera, restaurados con fines públicos en el Sur de Chile*. Un análisis crítico y un enfoque hacia el paisaje cultural. *ARQUITECTURAS DEL SUR*, 40(62), 94–123. <https://doi.org/10.22320/07196466.2022.40.062.06>
- Tighnavard Balasbانه, A., Sher, W., & Ashour, A. (2025). *Combining the circular economy and bio-based materials for alternative waste wood applications for the construction industry*. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2024-0033>
- Tzoulis, I., & Andreopoulou, Z. (2013). *Emerging Traceability Technologies as a Tool for Quality Wood Trade*. *Procedia Technology*, 8, 606-611. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.087>
- Ungureanu, V., Fohl, F., Yang, J., Hechler, O., Rajčić, V., & Buzatu, R. (2025). Recovery and Reuse of Salvaged Products and Building Materials from Existing Structures. In L. Bragança, P. Griffiths, R. Askar, A. Salles, V. Ungureanu, K. Tsikaloudaki, D. Bajare, G. Zsembinski, & M. Cvetkovska (Eds.), *Circular Economy Design and Management in the Built Environment: A Critical Review of the State of the Art* (pp. 93-120). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73490-8_5
- Véliz, K. D., Busco, C., Walters, J. P., & Esparza, C. (2025). *Circular Economy for Construction and Demolition Waste in the Santiago Metropolitan Region of Chile: A Delphi Analysis*. *SUSTAINABILITY*, 17(3), Article 1057. <https://doi.org/10.3390/su17031057>
- Volk, R., Luu, T. H., Mueller-Roemer, J. S., Sevilmis, N., & Schultmann, F. (2018). *Deconstruction project planning of existing buildings based on automated acquisition and reconstruction of building information*. *AUTOMATION IN CONSTRUCTION*, 91, 226-245. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.017>
- Ximenes, F., Björdal, C., Cowie, A., & Barlaz, M. (2015). *The decay of wood in landfills in contrasting climates in Australia*. *Waste Management*, 41, 101-110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.032>
- Xu, J., Lou, J., Lu, W., Wu, L., & Chen, C. (2023). *Ensuring construction material provenance using Internet of Things and blockchain: Learning from the food industry*. *Journal of Industrial Information Integration*, 33. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/j.jii.2023.100455>
- Yang, Y., Luk, C., Zheng, B. W., Hu, Y. F., & Chan, A. P. C. (2025). *Disassembly and Reuse of Demountable Modular Building Systems*. *JOURNAL OF MANAGEMENT IN ENGINEERING*, 41(1), Article 05024012. <https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-6243>
- Zeng, N., & Hausmann, H. (2022). *Wood Vault: remove atmospheric CO2 with trees, store wood for carbon sequestration for now and as biomass, bioenergy and carbon reserve for the future*. *Carbon Balance and Management*, 17(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00202-0>
- Zoghi, M., Rostami, G., Khoshand, A., & Motalleb, F. (2022). *Material selection in design for deconstruction using Kano model, fuzzy-AHP and TOPSIS methodology*. *WASTE MANAGEMENT & RESEARCH*, 40(4), 410-419, Article 0734242x211013904. <https://doi.org/10.1177/0734242X211013904>

Abstract: Recycling is a must in our times. It reflects environmental awareness and seeks to reduce the consumption of virgin raw materials and the generation of waste, aligning with circular economy design. However, the recovery, cleaning, and reprocessing of materials face barriers that hinder efficient reuse chains. The quality of recovered materials, particularly solid wood, decreases when become contaminated, age, or are damaged by mechanical or biological factors. Furthermore, most current products are designed with little regard for facilitating their future material recovery; the various stakeholders tend to act in a fragmented manner. The premise of this project is the essential characterization of the deterioration of wooden elements prior to deconstruction in order to unlock their potential for efficient reuse. The objective of this research is to establish technical and organizational management strategies based on regenerative circular economy concepts, guiding the recovery of solid wood from existing buildings for high-value upgrading. The expected results will highlight barriers and opportunities, and develop management tools and logistics that enable markets for wood recovered through urban mining, retaining or improving its material and object qualities, and slowing down the decay of material qualities while changing among lives cycles.

Key words: Selective deconstruction - solid wood recovery - cascading valorization - material decay - circular economy.

Resumo: A reciclagem é imprescindível nos dias de hoje. Ela reflete a consciência ambiental e busca reduzir o consumo de matérias-primas virgens e a geração de resíduos, alinhando-se ao conceito de economia circular. No entanto, a recuperação, limpeza e reprocessamento de materiais enfrentam barreiras que dificultam cadeias de reutilização eficientes. A qualidade dos materiais recuperados, principalmente da madeira maciça, diminui quando estes são contaminados, envelhecem ou são danificados por fatores mecânicos ou biológicos. Além disso, a maioria dos produtos atuais é projetada com pouca consideração pela facilitação da recuperação futura de seus materiais; os diversos atores envolvidos tendem a agir de forma fragmentada. A premissa deste projeto é a indispensável caracterização da deterioração dos elementos de madeira antes de sua desconstrução, a fim de desbloquear seu potencial para uma reutilização eficiente. O objetivo desta pesquisa é estabelecer estratégias de gestão técnica e organizacional baseadas em conceitos de economia circular regenerativa, orientando a recuperação de madeira maciça de edifícios existentes para sua valorização. Os resultados esperados destacarão barreiras e oportunidades, e desenvolverão ferramentas de gestão e logística que permitam a comercialização da madeira recuperada por meio da mineração urbana, mantendo ou melhorando suas qualidades materiais e de objeto, e retardando a deterioração dessas qualidades durante as mudanças dos ciclos de vida.

Palavras-chave: Desconstrução seletiva - recuperação de madeira maciça - valorização em cascata - decomposição de materiais - economia circular.

[Las traducciones de los abstracts fueron supervisadas por el autor de cada artículo.]

Alejandro Rodea Chávez. Licenciado y Magister en Diseño Industrial (UNAM). Profesor-investigador de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana en México. Becario SECIHTI para realizar estudios en el Doctorado en Arquitectura y Urbanismo, de la Universidad del Bío-Bío. Experiencia en investigación en Diseño, Ergonomía, Sustentabilidad, Circularidad de materiales.