

Projections of 3D-printed construction in Chile

Proyecciones de la construcción impresa en 3D en Chile

R. García-Alvarado ^{1*}, **, ***, A. Martínez ***, L. González **, F. Auat**

* Universidad del Bío-Bío – Concepción, CHILE

** Universidad Técnica Federico Santa María – Valparaíso, CHILE

*** Universidad de Sevilla – Sevilla, ESPAÑA

Fecha de Recepción: 13/10/2019

Fecha de Aceptación: 10/01/2020

PAG 60-72

Abstract

3D printed construction has recently emerged as a new building technology, with various experiences disseminated around the world. This paper reviews existing documents and examples of this technology to characterize its potential projections, particularly those oriented towards improving productivity and sustainability of construction in Chile. Scientific and conference papers, technical reports and thesis are analyzed, as well as the dissemination of executed constructions on the Internet, in order to understand the developments and attributes of this building system. Also, the current conditions and challenges of the construction sector in Chile are summarized, and consultations to stakeholders about their knowledge and expectations of this technology are included. The results from this review highlight the trending topics in different countries, which mostly consist of experimental houses built with cementitious mixes deposited with cranes or robots. According to documents and practitioners from Chile, the interest of applying this technology in our country could be mainly focused on the industrialization of residential envelopes with high thermal and seismic capacities.

Keywords: 3D-Printed Construction, Digital Fabrication, Industrialization, Robotic Construction, Chile

Resumen

La construcción impresa en 3D ha surgido recientemente como una nueva tecnología constructiva, a través de experiencias diseminadas alrededor del mundo. Este artículo revisa la documentación existente y los ejemplos de esta tecnología para caracterizar sus proyecciones potenciales, en particular, aquellas orientadas a mejorar la productividad y sustentabilidad de la construcción en Chile. Artículos científicos, de conferencias, informes técnicos y tesis son analizados, junto con difusión en internet de construcciones ejecutadas, para comprender los desarrollos y atributos de este sistema constructivo. Además, se resumen las condiciones actuales y los desafíos de la construcción en Chile, y se realizan consultas a participantes del sector sobre el conocimiento y las expectativas de esta tecnología. Los resultados de esta revisión destacan la tendencia en diferentes países, que consisten, principalmente, en casas hechas con mezclas cementosas depositadas con grúas o robots. De acuerdo con la documentación y los profesionales en Chile, el interés de aplicación de esta tecnología en nuestro país podría orientarse, principalmente, a la industrialización de envoltorios con altas capacidades térmicas y sísmicas para viviendas.

Palabras clave: Construcción Impresa en 3D, Fabricación Digital, Industrialización, Construcción Automatizada, Chile

1. Introducción

La construcción impresa en 3D es una nueva tecnología constructiva que ha ganado presencia en los últimos años gracias a la difusión de experiencias llevadas a cabo en diversas partes del mundo, como las expuestas por (Ghaffar et al., 2018); (Ma et al., 2018); (Perkins y Skitmore, 2015). Estas experiencias muestran el uso de distintos equipos automatizados para ejecutar elementos constructivos o edificaciones pequeñas mediante fabricación aditiva a través de extrusión del material; los ejecutores y documentos mencionan diversos beneficios posibles de esta tecnología para la industria de la construcción en la reducción de tiempos y costos, así como en la promoción de una industrialización personalizada.

Chile es un país emergente de Latinoamérica, con una creciente y ejemplar industria de la construcción en el continente (Prom Perú, 2015). Sin embargo, se han identificado deficiencias significativas en el desempeño energético de los edificios existentes, calidad del aire urbano, e impacto ambiental de los procesos constructivos (CDT, 2010); (CNE, 2017), así como estancamiento del desempeño laboral, fragmentación de sus actividades, y poca gestión digital e industrialización (CORFO y PMG, 2016); (Loyola y López, 2018).

¹ Autor de correspondencia:

Universidad del Bío-Bío – Concepción, CHILE

E-mail: rgarcia@ubiobio.cl



Las instituciones nacionales del sector de la construcción, con el apoyo de organizaciones comerciales y académicas, han asumido la necesidad de mejorar la sustentabilidad y productividad. El gobierno chileno, recientemente, ha promovido un plan público-privado para introducir nuevas tecnologías y avances a la industria de la construcción, en particular para impulsar la automatización de los procesos (CORFO, 2014). Así, nuevos sistemas y aplicaciones potenciales deben ser desarrollados, de acuerdo con el progreso tecnológico y los requisitos e intereses locales. Con este fin, este artículo busca identificar el estado actual de la construcción impresa en 3D, y, en particular, sus posibilidades y potencial de introducción en Chile, para establecer un vínculo entre los avances logrados y las condiciones de la industria de la construcción nacional, así permitir la identificación de avances específicos que podrían desarrollarse en el futuro cercano. Para esto, se lleva a cabo una revisión de artículos sobre el tema, experiencias iniciales en el mundo y un breve análisis de la industria nacional y la percepción de los interesados.

2. Estado del arte

Diversas publicaciones que revisan iniciativas usando construcción impresa en 3D identifican diferentes sistemas, como (Lim et al., 2012), quienes reportan tres técnicas: impresión de concreto, elaboración de contornos, e impresión D-Shape, con aplicaciones en arquitectura, arte, u obras públicas. Estas técnicas consisten en general en la deposición de mezclas fluidas de rápido endurecimiento, en cordones horizontales que se añaden verticalmente (Figura 1). (Doely, 2014) presenta el uso de diferentes tecnologías de construcción impresa en 3D, y describe algunas experiencias, comentando los eventuales beneficios para generar formas no tradicionales y reducir tiempos y costos de ejecución, además de discutir los desafíos de pérdida de trabajadores y riesgos. (Malé Alemany, 2016) revisa varios procedimientos de fabricación aditiva utilizados para elaborar elementos arquitectónicos, destacando su potencial para diseños de forma libre, variabilidad, personalización, complejidad, optimización, eliminación de necesidades de montaje y el uso de diversos materiales de impresión. (Perkins y Skitmore, 2015) también presentan los tres procesos principales mencionados anteriormente y revisan las posibles ventajas y limitaciones relacionadas con la reducción de desechos, integración digital, reducción de mano de obra, aumento de velocidad de construcción, industrialización y costos. (Bos et al., 2016) examinan experiencias y características tecnológicas de ésta tecnología, reconociendo diferentes estrategias y sus implicancias, como la optimización de la producción o desempeño, ya sea en obra o en fabrica.



Figura 1. Tecnologías de construcción impresa en 3D (arriba: impresión de concreto, abajo-izquierda: elaboración de contornos, abajo-derecha: impresión D-Shape). Fuente: (Ghaffar et al., 2018) y (Ma et al., 2018)

Otros investigadores, como (Hager et al., 2016) mencionan las condiciones de trabajo, y comentan las posibles ventajas ofrecidas por esta tecnología con respecto a bajos costos, compatibilidad ambiental, reducción de desechos, accidentes laborales y tiempos de trabajo. (Labonnote et al., 2016) presentan una revisión de 165 artículos científicos relacionados con la construcción impresa en 3D, que incluye experimentos con materiales, diversas tecnologías (grúas, suspensión por cables, equipo de enjambre, robots, plegado), propuestas de diseño de edificios y aplicaciones, y plantea diferencias entre su uso en construcciones en entornos riesgosos y comunes. En su revisión, también resúmen algunas experiencias y requerimientos de procesos de diseño arquitectónico usando esta tecnología. (Wangler et al., 2016) se enfocan, especialmente, en la descripción de la fabricación aditiva con concreto y brazos robóticos, identificando ventajas y desafíos técnicos. (Anjum et al., 2017) estudian las posibilidades de la construcción impresa en 3D en India a través de una encuesta a 186 profesionales, identificando conocimiento creciente y amplias expectativas como también las principales ventajas, pero escaso desarrollo de regulaciones y material técnico como la principal desventaja. (Duballet et al., 2017) clasifican los sistemas de impresión 3D según su tamaño y condiciones de trabajo, incluyendo grandes sistemas de grúas y brazos robóticos para trabajar en y fuera de la obra.

Por otro lado, algunos documentos recientes apuntan a posibles aplicaciones de construcción impresa en 3D como (Mathur, 2016), quien sugiere ventajas en costo, mano de obra, productividad, seguridad y combinación de tareas; y lo propone para producir viviendas asequibles y de emergencia en grandes países en vías de desarrollo. (Tay et al., 2017) revisan más de 4000 artículos en diferentes temas relacionados a la industrialización de la construcción, detallando técnicas y desafíos de la impresión 3D de componentes de edificios, en particular, el desarrollo de materiales para imprimir y la inclusión de refuerzos. (Al Jaasmi et al., 2018) revisan varios procedimientos, identificando los requisitos materiales y limitaciones para imprimir elementos constructivos. (Bogue, 2018) presenta diversas tecnologías de impresión 3D y destaca sus potenciales contribuciones a la productividad en los procesos constructivos. (Delgado Camacho et al., 2018) notan los desafíos y potenciales beneficios en el desarrollo de materiales y el diseño optimizado de elementos constructivos. (Ma et al, 2018) comentan las posibles ventajas de la construcción impresa en 3D (en flexibilidad, impacto social, costos), los desafíos tecnológicos (en equipamiento, materiales, refuerzos, coordinación, evaluación) y aplicaciones (en diversidad de materiales, formas irregulares, integración con BIM, construcción planetaria). (Álvarez Elipe y Anaya, 2018) destacan el vigor de las nuevas tecnologías de construcción para la arquitectura. En general, estos trabajos mencionan diferentes sistemas y potenciales ventajas, mostrando el desarrollo emergente de esta tecnología.

3. Metodología

Según lo mencionado anteriormente, esta revisión analiza la tecnología de construcción impresa en 3D y sus eventuales proyecciones en Chile, a través de 2 líneas: por un lado a través de la revisión de la literatura científica y experiencias prácticas internacionales, y por otro mediante la presentación de las condiciones y expectativas locales según la información observada a nivel nacional, presentaciones y actividades informativas relacionadas a esta tecnología y encuestas a los participantes de estas actividades.

Para comenzar, se recopiló un conjunto exhaustivo de artículos científicos, a través de bases de datos globales, y se identificaron experiencias prácticas relacionadas a esta tecnología en internet y medios de difusión profesional. La compilación de documentos científicos se basó en la revisión de índices y revistas del tema, junto con conferencias, informes técnicos y tesis publicadas. Se dio una atención especial a las revistas de alto impacto como "Automation in Construction", y a conferencias como ISARC, organizada por la asociación internacional para la automatización y robótica en construcción; FABRICATE, dedicada a la fabricación digital en arquitectura, que se llevó a cabo en 2011, 2014 y 2017; y Robótica en Arquitectura, organizada en 2012, 2014 y 2018. Los sitios web de los eventos enfocados en la construcción impresa en 3D, recientemente realizados en Dinamarca, Australia y Singapur, también se revisaron, aunque no tuvieron publicaciones asociadas. Los textos revisados se clasificaron por año de publicación, tipo de documento, país de afiliación del primer autor, tema y tecnología, siendo estos dos últimos los de mayor variabilidad entre publicaciones. Además, estos contenidos se revisaron, buscando otras características, similitudes y eventuales convergencias con los intereses locales o características específicas de la industria de la construcción chilena.

Respecto a las experiencias prácticas alrededor del mundo, búsquedas usando "construcción impresa en 3D" y términos en español o inglés llevaron a sitios que reportaban la ejecución directa de elementos de construcción impresos en diferentes países. Sólo las fuentes directas que presentaban evidencia gráfica de componentes completos fueron consideradas, excluyendo las presentaciones y referencias indirectas. Edificios completamente ejecutados, entidades e instalaciones que han elaborado elementos fueron registrados, identificando sus autores o participantes, instituciones, locación, año de ejecución, tecnología y materiales usados.



Sin embargo, se observó que, en la mayoría de las experiencias reveladas, la descripción de los equipos involucrados y recursos utilizados se limitaron para proteger desarrollos de patentamiento y futuras posibilidades comerciales.

Posteriormente, para revisar la situación actual de la industria de la construcción en Chile en relación con la construcción impresa en 3D, se recopilaron los reportes recientes y las declaraciones de los programas públicos, junto con estudios privados y estadísticas generales. Se identificaron, también, las condiciones y expectativas nacionales vinculadas a la introducción de nuevas tecnologías.

Con el fin de proyectar intereses específicos en el país, relacionados a esta tecnología, los autores llevaron a cabo conferencias para presentar la construcción impresa en 3D en tres eventos nacionales e internacionales (Congreso Expohormigón, Conferencia BIM-Chile, y Congreso de las Facultades de Arquitectura Latino Americanas) durante el segundo semestre de 2018. También, se enviaron notas técnicas a la prensa general y sectorial, y se organizó un workshop de construcción impresa en 3D en enero 2019, incluyendo una conferencia y una mesa redonda con los desarrolladores de la primera casa impresa en España, y otras presentaciones, visitas a laboratorios y reuniones de trabajo. Las actividades se difundieron en medios profesionales y académicos, y se aplicó una encuesta durante el proceso de inscripción, que incluyó una identificación del área de trabajo y de las funciones desempeñadas por el participante, conocimientos previos de la tecnología, percepción de los diferentes tipos de equipos, y posibles beneficios y aplicaciones. Diversas opciones fueron propuestas en las respuestas a cada pregunta, que se definieron según lo revisado en la bibliografía, más un espacio en blanco para respuestas libres. Además, los comentarios expresados durante las actividades se recolectaron y analizaron.

4. Resultados

4.1 Publicaciones

La revisión de publicaciones científicas sobre construcción impresa en 3D permitió identificar 144 documentos dedicados específicamente al análisis de esta tecnología y la presentación de experiencias y evaluaciones. Según sus fechas de publicación, se detectó una creciente actividad de investigación en el tema, con un 84% de ellas publicadas en los últimos 5 años. Estas publicaciones fueron escritas, principalmente, por investigadores de universidades ubicadas en Estados Unidos (28%), Reino Unido (10%), y otros 22 países, mayormente, en Europa y Asia. Considerando los tópicos principales de los estudios, estos se enfocan en describir actividades específicas (25%), y otros estudios panorámicos (22%) con menciones a diversas experiencias y discusión de las potencialidades de esta tecnología. La revisión de procesos particulares (21%) o de materiales usados (15%) son también temas comunes, mientras que equipos, elementos impresos, y aplicaciones industriales tienen menos atención.

Respecto a las tecnologías impresión, la mayoría de los estudios describe procesos de deposición de material con sistemas robóticos (33%), o soportados por grúas (15%), mientras que el resto presenta otras configuraciones, como robots suspendidos por cables o sistemas de múltiples robots. Finalmente, 53% de los documentos son artículos publicados en revistas indexadas, destacando "Automation in Construction" como la principal revista con contribuciones en este tema, y 41% de los documentos son presentados en conferencias, especialmente ISARC y "Robots in Architecture", mientras que el porcentaje restante corresponde a tesis de posgrado e informes técnicos. Ver (Figura 2).



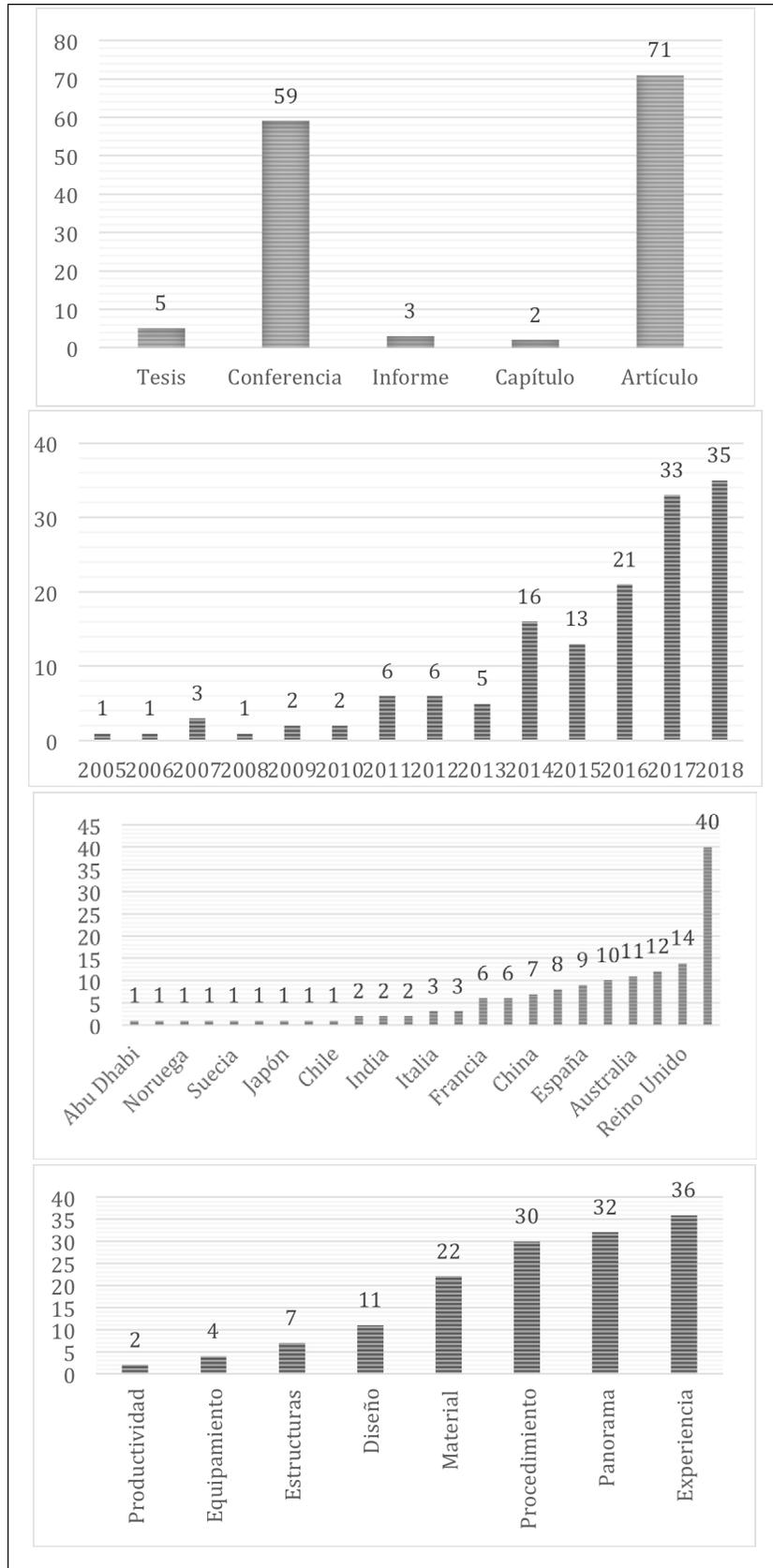


Figura 2. Cantidad de publicaciones sobre construcción impresa en 3D (arriba: por tipo, al centro-arriba: por año, al centro-abajo: por país, abajo: por tema). Fuente: Elaboración propia



4.2 Casos

De la búsqueda de edificios ejecutados, se identificaron 68 experiencias, mayormente, a través de sitios de internet con piezas gráficas y textos presentando la ejecución de elementos constructivos o edificios completos, usando sistemas de impresión automatizados. De acuerdo con las categorías registradas, la mayoría de las experiencias declaradas se ubican en China (23) o Estados Unidos (11), y el resto en otros países, principalmente europeos. La mayor parte de ellos han sido desarrollados por empresarios privados y otros por investigadores de universidades con apoyo de grandes compañías de construcción o programas nacionales de I+D. Estas actividades se presentan, comúnmente, a través de sitios web y reportes de prensa, como experiencias iniciales o primeras construcciones impresas en 3D en la región, apuntando a destacar los potenciales beneficios de esta tecnología para extender su aplicación. Entre las experiencias identificadas, hay un pequeño refugio para catástrofes ejecutado en Milán en 2010 por la compañía D-Shape; diversos elementos constructivos desarrollados por el IAAC en Barcelona; una Casa Canal en Amsterdam en 2015; un hotel en Filipinas y una oficina en Dubái en 2016, ambos erigidos por la compañía estadounidense Total Kustom; una casa en Rusia por Apis-Cor en 2017; una casa de emergencia en Austin, Texas, por la compañía ICON; una casa de alta eficiencia energética en Nantes por la compañía Batiprint en colaboración con universidades locales, y la primera casa impresa en España por BeMore3D, en 2018.

En Latinoamérica, se registraron un total de siete iniciativas, cuatro de ellas ubicadas en Chile, y las otras tres en otros países: una liderada por la compañía constructora Conconcreto en Colombia, quien construyó una casa con piezas prefabricadas con hormigón impreso en 3D; otra experiencia de empresarios vinculados a la Universidad Federal de Rio Grande do Norte en Brasil; y otra en la Universidad Nacional de Córdoba en Argentina (Figura 3). En Chile, las experiencias identificadas incluyen una gran compañía de paneles prefabricados de hormigón con procesos automatizados que declaraban “imprimir casas”, aunque la ejecución es principalmente mecánica en fábrica y a mano en sitio, y la producción de pequeñas piezas con impresoras 3D o brazos robóticos de investigadores o estudiantes de la Universidad de Chile en Santiago, la Universidad Federico Santa María de Valparaíso, y la Universidad del Bío-Bío en Concepción (Figura 4).

La gran mayoría de estas actividades se han llevado a cabo en los últimos cuatro años, aunque los registros cronológicos varían (Figura 5). Del total, un 65% se refiere a edificios completos, y el resto son piezas o mobiliario. La mayoría de las construcciones ejecutadas combinan elementos impresos con otros componentes convencionales o no detallan las partes elaboradas. De los casos identificados de edificios completos, 24 se refieren a casas; 9, a pabellones de exhibición y 11, a edificios con otros usos. 66% de las iniciativas han declarado usar sistemas de grúas y 18%, brazos robóticos, mientras que el resto usa otros sistemas o no los declaran. Respecto a los materiales, la gran mayoría aplicó mezclas cementosas, y solo en tres casos usaron otros materiales. Gran parte de los edificios ejecutados son experimentales, para demostración, y sólo unos pocos son encargados u ocupados después.

La compañía WinSun, de Shanghái, declara quince edificios hechos con tecnologías de impresión 3D, algunos compuestos de diversas construcciones (conjuntos de casas o mobiliario urbano), mientras que otros son edificios de varios niveles. Sin embargo, no detallan los componentes que fueron ejecutados, ni los procesos utilizados. Las compañías Cybe (Países Bajos), ApisCor (de Rusia, también ubicada en Estados Unidos), Printhuset (Dinamarca, actualmente, parte de COBOD), y el Cuerpo de Ingeniería de el Ejército de Estado Unidos declaran edificios hechos en diferentes ubicaciones, así como la comercialización de edificios, equipos y/o mezclas. Además, diversas instituciones han hecho piezas para concursos de la NASA sobre construcción extraterrestre. Los edificios ejecutados son variados, generalmente, de pequeño tamaño (alrededor de 50 m²) y de un piso, con algunas características comunes, como el uso de impresión 3D, principalmente, en muros, con esquinas curvas y una textura rugosa que, en algunos casos, es revestida, y complementada con elementos como puertas, ventanas, instalaciones, y diferentes tipos de techumbres. Ocasionalmente, estas construcciones usan componentes impresos prefabricados que, eventualmente, se giran para ser montados en el sitio verticalmente. Algunas piezas ejecutadas son declaradas como elementos constructivos, pero sus aplicaciones o detalles técnicos no se presentan.





Figura 3. Experiencias de construcción impresa en 3D en Latinoamérica y España (Arriba-izquierda: Construcción de Casa 3D, Brasil; arriba derecha: Conconcreto, Colombia; abajo-izquierda: HausDrucker, Argentina; abajo-derecha: BeMore3D, España). Fuente: sitios web (<https://www.facebook.com/pages/3D-Home-Construction>, <https://conconcreto.com/impresora-3d/>, <https://www.youtube.com/watch?v=ASTwJgs7jKw>, <https://bemore3d.com/>)

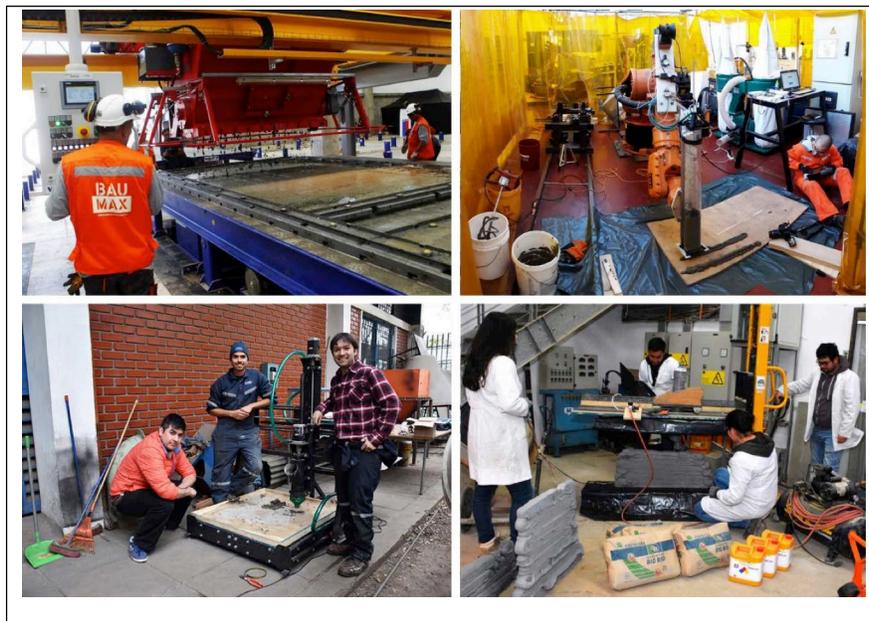


Figura 4. Experiencias en construcción impresa en 3D en Chile (Arriba-izquierda: Baumax; arriba-derecha: U. Santa María; abajo-izquierda: U. de Chile; abajo-derecha: U. del Bío Bío). Fuente: Sitios web (http://www.cchc.cl/uploads/evento/archivos/1600_a_1630_Pablo_Kuhlenthal_-_BAUMAX_-_Construccion_robotizada_en_hormigon.pdf, <http://arquitectura.usm.cl/nuestro-departamento-realiza-primer-experimento-en-chile-de-construccion-impresa-utilizando-robot-industrial/>, <http://www.uchile.cl/noticias/144274/estudiantes-crean-prototipo-de-impresora-3d-de-concreto>, <http://noticias.ubiobio.cl/2018/10/31/alumnos-ubb-ejecutan-primer-muro-impreso-en-3d-del-pais/>)



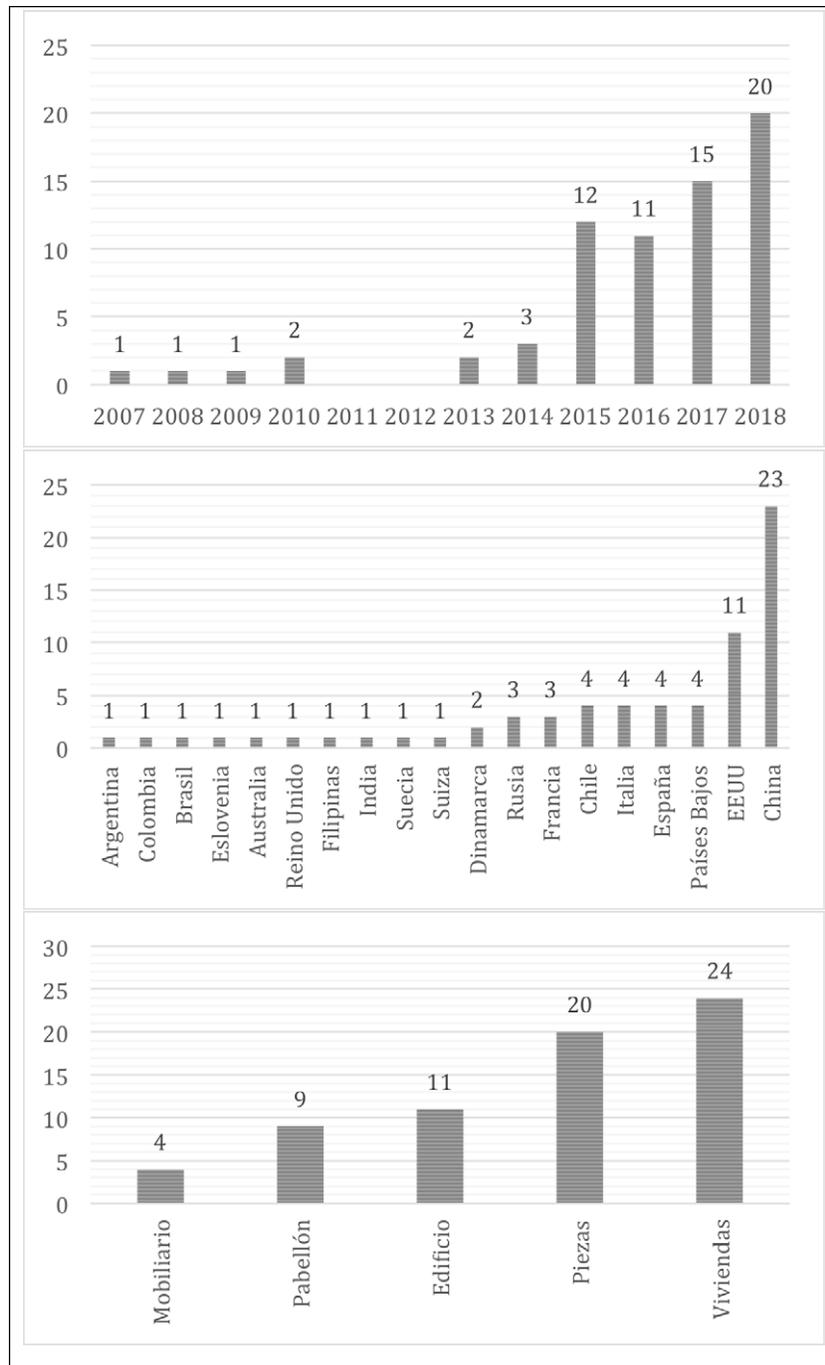


Figura 5. Revisión de casos (arriba: por año; centro: por país; abajo: por tema). Fuente: Elaboración propia

Es necesario mencionar algunas diferencias entre las actividades descritas en los artículos científicos y las experiencias recopiladas. Los autores principales de las publicaciones están relacionados con países más diversos que los casos prácticos, que se concentran más en Asia y Europa. También, los documentos generalmente mencionan la elaboración de elementos menores y el uso de sistemas de impresión robóticos, mientras que los casos presentan más desarrollos de construcciones completas impresas con grúas, pudiendo indicar que el uso de sistemas de grúas es más fácil (o más práctico) para implementar en obra que los basados en brazos robóticos.

4.3 Industria de la construcción

Respecto a la revisión de la industria de la construcción en Chile, se debe notar primero que el país está caracterizado por su ubicación en el borde suroeste de Latinoamérica, con un clima más templado que el resto de

los países de la región. Muestra una estabilidad política en las últimas cuatro décadas, lo que ha facilitado un crecimiento económico continuo para su relativamente pequeña población (actualmente, alrededor de 17 millones de habitantes). El país ha sido reconocido por su desarrollo económico ejemplar, a pesar de sus grandes diferencias sociales y débil producción interna. La estrategia prematura de liberalización y apertura a mercados globales desde 1980 ha producido una profunda transformación económica, principalmente, aumentando los servicios y la exportación de productos básicos, en su mayoría de los sectores mineros, pesqueros, agrícolas y forestales.

El sector de la construcción en Chile ha tenido un rol importante en el desarrollo del país en las últimas décadas, en particular debido a la implementación de diversos programas de vivienda e infraestructura, junto con iniciativas privadas y acciones recientes para mejorar la sustentabilidad e industrialización. La construcción chilena, actualmente, involucra alrededor de un 8% de los empleos y del producto interno bruto, con un monto anual de, aproximadamente, 37 billones de dólares, de los cuales 35% corresponde a edificios (CChC, 2018). Los programas de viviendas han generado una variedad de instrumentos financieros, motivando una amplia participación de compañías constructoras. Estas iniciativas han permitido cubrir una demanda diversa de viviendas, erigiendo cerca de 150000 unidades por año (INE, 2018). La infraestructura pública y privada también ha sido dirigida por la combinación de esfuerzos estatales y privados con programas en curso de obras civiles, educacionales y recintos hospitalarios.

En edificios, el material predominante es el hormigón (53%), con alrededor de 10.000.000 m² por año (INE, 2018), en estructuras monolíticas, incluyendo vigas, columnas, fundaciones y pisos reforzados con barras de acero, debido a las condiciones sísmicas del país. La estructura de los edificios involucra alrededor de un 43% del presupuesto en edificaciones de gran altura, y un 30% en las de baja altura (CChC, 2018). El impacto ambiental de la construcción en Chile es más grande en la operación de los edificios, seguido por la energía contenida en los materiales, donde los productos estructurales representan cerca del 80%, mientras que la ejecución se reduce (Muñoz et al., 2012). La ocupación de los edificios consume alrededor del 25% de la energía nacional y genera 35% de las emisiones y residuos (aprox. 20 millones de toneladas de CO₂ por año). En particular, las viviendas tienen un alto consumo de operación (aproximadamente 150 kWh/m² por año), dada las necesidades de calefacción, producto de el bajo desempeño térmico e infiltraciones de las envolventes verticales (CDT, 2010); (CNE, 2017). La productividad del sector de la construcción nacional se estima en aproximadamente 35.000 dólares/año por trabajador (equivalente al 50% de la productividad del mismo sector en Estados Unidos), sin ningún crecimiento en las últimas dos décadas, mientras que el resto de los sectores avanza 1,7% al año. Esta deficiencia se adjudica a la falta de capacitación, estandarización, planificación, e integración del sector, además de la baja inversión en investigación e innovación, con un uso reducido de tecnologías digitales, prefabricación y energías renovables.

Así, se han propuesto como metas nacionales la reducción del 20% de costos, reducción del 30% de las emisiones de gases invernaderos, y un aumento de 20% en investigación sobre construcción, junto con alcanzar un consumo energético de 85kWh/m² en viviendas con un total nacional de 6,4 TWh, y estimando alcanzar edificios de energía cero en 2050 (MINVU, 2015). Además, se espera alcanzar un crecimiento anual de 2,6% en productividad de la industria de la construcción. Para esto, se han propuesto pautas nacionales para reducir el consumo de materiales y generación de residuos, soluciones prefabricadas rentables para viviendas sociales, uso eficiente de agua, aislación térmica sustentable, manejo de inventario, control de residuos, manejo de presupuestos, y la introducción de energías renovables (CORFO y PMG, 2016).

Diversas acciones de normalización de procedimientos y condiciones constructivas comenzaron en los años ochenta, y en los años noventa, se desarrollaron regulaciones sobre el control térmico de las viviendas y estudios de la sustentabilidad de edificios, motivados por el creciente costo y las deficiencias de los recursos energéticos nacionales (CDT, 2010). En particular, se establecieron requisitos de 1,6 a 1,9 W/m²K de transmitancia térmica de muros en las zonas más pobladas del país, implicando agregar aislación térmica interior o exterior a las envolventes en hormigón armado y albañilería. Después, se han aplicado certificaciones y programas de energía renovable, pioneros en Latinoamérica. Iniciativas de prefabricación en viviendas, educación y edificios de hospitales han sido promovidas, recientemente, motivando el uso de plataformas BIM para la coordinación de los profesionales en construcciones públicas y la introducción de gestión digital en municipalidades. Además, se han fomentado los acuerdos entre universidades y compañías privadas para promover la instalación de nuevos centros tecnológicos, motivando así la introducción de la construcción impresa en 3D, entre otras capacidades experimentales (CORFO, 2014).



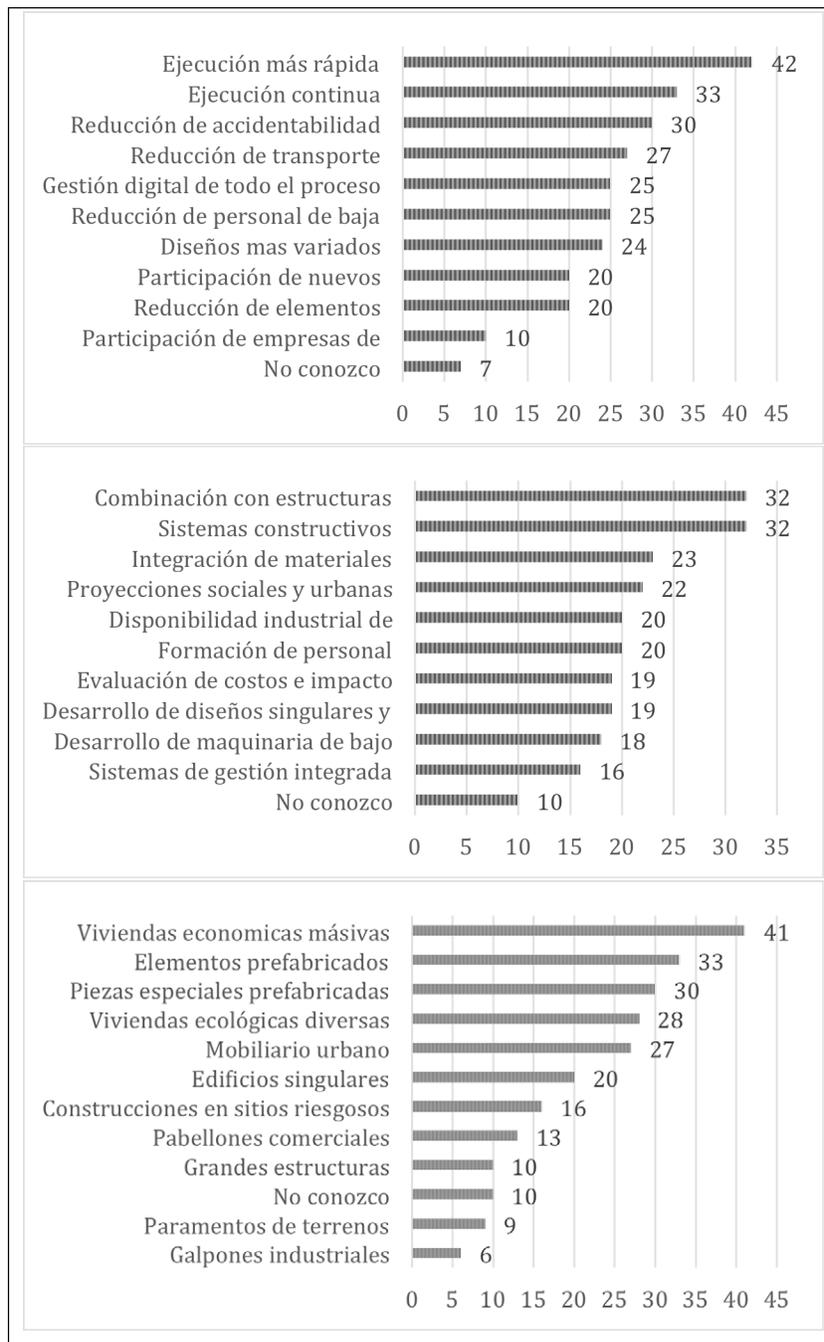


Figura 6. Gráficos de las respuestas a cuestionarios en eventos sobre construcción impresa en 3D (arriba: beneficios esperados; centro: desafíos; abajo: aplicaciones). Fuente: Elaboración propia

4.4 Difusión

En las presentaciones y comunicaciones hechas sobre construcción impresa en 3D en el país en los últimos seis meses del 2018 e inicios del 2019, se ha alcanzó un alto impacto. Todas las actividades y notas propuestas fueron aceptadas o, en algunos casos, solicitadas por los organizadores, cuando, usualmente, solo una parte de las actividades o comunicaciones enviadas sobre desarrollos tecnológicos en la industria son aceptados. Se ha observado una concurrencia adecuada y reconocimiento de los participantes o lectores, demostrado a través de comentarios directos en las conferencias realizadas. Esto reveló un interés creciente en esta tecnología de académicos, profesionales y público en general, pero también la expresión de preocupaciones similares sobre las perspectivas, en particular, recibiendo comentarios recurrentes sobre el posible reemplazo de la mano de obra existente y de la resistencia sísmica de los edificios ejecutados con esta tecnología.



El sitio de registro para la actividad llevada a cabo en enero 2019 estuvo disponible con un mes de anticipación y fue difundido por medios digitales. La cantidad de participantes estaba limitada a 65 personas, debido a la capacidad del lugar, y se completó una semana antes, indicando un alto interés en comparación con otras actividades organizadas y difundidas de forma similar. Se completaron 64 cuestionarios antes de la actividad, declarando que la principal área de trabajo de los asistentes era la construcción (63%), seguido por la ingeniería (40%) y la arquitectura (34%), considerando que se podía marcar más de una opción (Figura 6). Además, 60% pertenecía a organizaciones privadas, y el resto a instituciones públicas o académicas, más de la mitad de fuera de la ciudad. La mayoría de los participantes declaró ser profesional (66%), seguido por educadores e investigadores (24%).

Respecto al conocimiento previo de la tecnología, 53% expresó haber visto ejemplos de construcción impresa en 3D, y 17% declaró no conocerla; el resto indicó haber revisado, participado o analizado en experiencias. En relación con los tipos de equipos, 31% declaró que no conocía ninguno, 41% identificó robots y 36% reconoció las grúas con rieles. Entre los beneficios, 71% valoró la velocidad de ejecución, 56%, la continuidad de los procesos, y 51%, la reducción en la tasa de accidentes. En la consulta sobre los desafíos de la construcción impresa, se indicaron una variedad de alternativas, destacando el desarrollo de mezclas apropiadas (63%), los sistemas constructivos y estructuras sismorresistentes (54%). En las aplicaciones, las preferencias fueron más concentradas, especialmente en viviendas económicas masivas (69%) y elementos prefabricados (56%). Durante la realización del evento, hubo una asistencia relevante, demostrando interés en el desarrollo y preocupaciones sobre las posibilidades tecnológicas y el desarrollo de productos.

5. Discusión

La construcción impresa en 3D es una nueva tecnología para fabricar elementos constructivos – como lo demuestran los diferentes experimentos expuestos globalmente – a través de procesos que sugieren ventajas substanciales sobre los procedimientos de construcción tradicionales. Las experiencias descritas se enfocan, generalmente, en la extrusión del material en cordones apiladas verticalmente, formando piezas de diferentes formas, como muros con doble contorno y un vacío interno, a veces completando una vivienda o pequeño edificio de uno o dos pisos. También, la mayoría de los documentos que presentan esta tecnología se orientan, exclusivamente, a la revisión de mezclas, comentando experiencias o ejecutando elementos aislados, sin instalarlos en edificios reales. Según lo descrito en los documentos, las propiedades de los materiales extruidos y las capacidades productivas de los equipos se han evaluado, pero aún hay poca información de costos o procedimientos aplicados actualmente en la industria de la construcción, lo que permitiría verificar los beneficios sugeridos. Así, esta tecnología debe ser considerada como incipiente, sin difusión masiva todavía y con diversos desafíos técnicos, industriales y comerciales.

La construcción en Chile presenta un dinamismo y objetivos caracterizados por demandas para mejorar la productividad y la calidad ambiental, con un rol importante del gobierno en la promoción de los avances tecnológicos, motivando el desarrollo conjunto de compañías y universidades. Esto ha levantado expectativas sobre la introducción de nuevas tecnologías, como los sistemas de construcción impresa en 3D, aunque parece necesario que se deben enfocar en iniciativas y logros específicos. La necesidad de reducir el alto consumo energético debido a las pérdidas térmicas e infiltraciones en la envolvente vertical y los intereses de aumentar la productividad a través de la gestión digital y la prefabricación pueden combinarse en sistemas industrializados de muros con mejores características técnicas. La demanda constante de viviendas asequibles sugiere la necesidad por un enfoque especial en la aplicación de nuevas tecnologías en edificios residenciales de tamaño pequeño, pero las preocupaciones expresadas por los inversores y profesionales en la consecuente reducción de mano de obra involucrada y de los requisitos sismorresistentes para las estructuras en Chile genera desafíos particulares en el país respecto a la introducción de tecnologías de construcción innovadoras.



6. Conclusiones

Esta perspectiva de documentos y experiencias internacionales en construcción impresa en 3D, junto con las expectativas nacionales sobre el tema, revela un desarrollo e interés emergente, con una creciente cantidad de estudios y ensayos en los años recientes alrededor del mundo, y una visión expectante de la industria. No obstante, se debe reconocer que esta tecnología todavía es incipiente, que no ha consolidado o industrializado productos, equipos o características.

Las publicaciones estudiadas exponen diversas experiencias y desafíos técnicos, con una variedad de líneas de desarrollo y poca vinculación entre ellas, además de una diversidad de beneficios potenciales. Esto expresa el surgimiento de una tecnología que debe gradualmente decantar procedimientos, aplicaciones y ventajas precisas. Los casos revisados exponen la factibilidad de las técnicas usadas, la capacidad productiva y el interés público en esta tecnología. Sin embargo, se reportan iniciativas muy específicas que no sugieren todavía una introducción significativa de esta tecnología en el sector de la construcción. En relación con las posibilidades de esta tecnología en Chile y las motivaciones de los profesionales en la construcción impresa en 3D, se reconoce una correlación relevante con sus capacidades predichas respecto a las posibilidades de un aumento en la productividad, al reducir tiempos y recursos, junto con la digitalización y control de los procesos, o las posibilidades de mejorar la sustentabilidad de los materiales, las actividades constructivas y los edificios al disminuir el consumo energético. No obstante, dadas las condiciones actuales de esta tecnología, se requiere de una inversión substancial en investigación. Un interés particular se reconoce en la elaboración de muros envolventes para vivienda con mejor desempeño térmico, además de resolver los aspectos sismorresistentes y su integración con procesos de construcción locales para definir sistemas constructivos apropiados para el contexto chileno. La introducción de nuevas tecnologías, como la construcción impresa en 3D, deben incorporar la participación académica, comercial y estatal, junto con diferentes disciplinas, como robótica, ingeniería estructural, arquitectura y construcción, entre otros, enfocados en logros específicos para los edificios.

Esta revisión de la nueva tecnología de la construcción impresa en 3D y su conexión con los desafíos nacionales es también un ejemplo del análisis estratégico para guiar las perspectivas de la educación universitaria, el gobierno y la industria en la búsqueda de avances innovadores para mejorar el rol de la construcción en el desarrollo social.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de CONICYT a través del proyecto de investigación Fondecyt 1181015, CIPYCS (Centro Interdisciplinario para la Productividad y Construcción Sustentable) financiado por el programa Construye 2025 de Corfo y CITEC-UBB para la organización del evento de Construcción impresa en 3D y al VI Plan Propio de Investigación y Transferencia de la Universidad de Sevilla (VI PPIT-US).

8. Referencias

- Al Jassmi, H.; Al Najjar, F. and Mourad, A. H. I. (2018).** Large-Scale 3D Printing: The Way Forward. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 324(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/324/1/012088>.
- Álvarez Elipe, M. D. and Anaya Díaz, J. (2018).** Review of contemporary architecture projects based on nature geometries. Revista de La Construcción, 17(2), 215–221. <https://doi.org/10.7764/rdlc.17.2.215>.
- Anjum, T.; Dongre, P.; Misbah, F. and Nanyam, V. P. S. N. (2017).** Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector. Procedia Engineering, 196(June), 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.194>.
- Bogue, R. (2018).** What are the prospects for robots in the construction industry? Industrial Robot: An International Journal, 45(1), 1–6. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2017-0194>
- Bos, F.; Wolfs, R.; Ahmed, Z. and Salet, T. (2016).** Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping, 11(3), 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.
- CChC. (2018).** Informe MACH 48 - Macroeconomía y Construcción. Recuperado de <https://www.cchc.cl/centro-de-informacion/publicaciones/publicaciones-mach/informe-mach-48>.
- CDT. (2010).** Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial. Santiago de Chile, Chile. Recuperado de http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/Usos_finales_y_curva_de_oferta_de_conservacion_de_la_energia_en_el_sector_de_residencial_de_Chile.pdf.
- CNE. (2017).** Anuario Estadístico de Energía 2017. Santiago de Chile, Chile. Recuperado de <https://www.cne.cl/nuestros-servicios/reportes/informacion-y-estadisticas/>.
- CORFO. (2014).** Programa Estratégico Nacional de Productividad y Construcción Sustentable. Santiago de Chile, Chile. Recuperado de



<http://construye2025.cl/>.

- CORFO, and PMG. (2016).** Hoja de ruta de Programa Nacional de Productividad y Construcción Sustentable. Santiago de Chile, Chile. Recuperado de <https://www.aoa.cl/wp-content/uploads/2016/03/PMG-Informe-final-Hoja-de-Ruta-Construye-2025.pdf>.
- Delgado Camacho, D.; Clayton, P.; O'Brien, W. J.; Seepersad, C.; Juenger, M.; Ferron, R. and Salamone, S. (2018).** Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89(August 2017), 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>.
- Doely, P. K. (2014).** 3D Printing: A New Dimension in Construction. Recuperado de <http://fwhtlaw.com/briefing-papers/3d-printing-new-dimension-construction/>.
- Duballet, R.; Baverel, O. and Dirrenberger, J. (2017).** Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*, 83(August), 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.018>.
- Ghaffar, S. H.; Corker, J. and Fan, M. (2018).** Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, 93(October 2017), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>.
- Hager, I.; Golonka, A. and Putanowicz, R. (2016).** 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, 151, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>.
- INE. (2018).** Estadísticas de edificación 2017. Santiago de Chile, Chile. Recuperado de <https://www.ine.cl/docs/default-source/publicaciones/2018/portadaedificaci3n-2018.pdf?sfvrsn=12>.
- Labonnote, N.; Rønquist, A.; Manum, B. and Rütther, P. (2016).** Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>.
- Lim, S.; Buswell, R. A.; Le, T. T.; Austin, S. A.; Gibb, A. G. F. and Thorpe, T. (2012).** Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21(1), 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.
- Loyola, M. & López, F. (2018).** An evaluation of the macro-scale adoption of Building Information Modeling in Chile: 2013–2016. *Revista de La Construcción*, 158–171. <https://doi.org/10.7764/rldc.17.1.158>.
- Ma, G. W.; Wang, L. and Ju, Y. (2018).** State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. *Science China Technological Sciences*, 61(4), 475–495. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>.
- Malé Alemany, M. (2016).** El potencial de la fabricación aditiva en la arquitectura: hacia un nuevo paradigma para el diseño y la construcción. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de <https://www.tdx.cat/handle/10803/387812#>.
- Mathur, R. (2016).** 3D Printing in Architecture. *IJSET -International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(7), 583–591. Recuperado de www.ijiset.com.
- MINVU. (2015).** Sistema de Calificación Energética de Viviendas. Recuperado May 2, 2019, de <https://www.calificacionenergetica.cl/>.
- Muñoz, C.; Zaror, C.; Saelzer, G. and Cuchí, A. (2012).** Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de una construcción. *Revista de La Construcción*, 11(3), 125–145. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000300011>.
- Perkins, I. and Skitmore, M. (2015).** Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, 15(1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1012136>.
- Prom Perú. (2015).** El sector construcción en los países de Latinoamérica. Lima, Perú. Recuperado de [http://www.siicex.gob.pe/siicex/recursos/sectoresproductivos/El sector construcción en los países de Latinoamérica 2015.pdf](http://www.siicex.gob.pe/siicex/recursos/sectoresproductivos/El%20sector%20construcci3n%20en%20los%20pa%C3%ADses%20de%20Latinoam%C3%A9rica%202015.pdf).
- Simian, J. M. and Niklitschek, V. (2017).** La industria inmobiliaria en Chile. Evolución, desafíos y mejores prácticas. Santiago de Chile, Chile: Pearson.
- Tay, Y. W. D.; Panda, B.; Paul, S. C.; Noor Mohamed, N. A.; Tan, M. J. and Leong, K. F. (2017).** 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>.
- Wangler, T.; Lloret, E.; Reiter, L.; Hack, N.; Gramazio, F.; Kohler, M., Flatt, R. (2016).** Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Technical Letters*, 1, 67–75. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>.

