



**Viabilidad de la Construcción de Vivienda Nueva en Colombia Bajo el Sistema de
Impresión 3D**

Nicolás Pinzón Torres

Código: 20611823964

Arq. Tomás Orlando Paternina Cruz

Universidad Antonio Nariño

Programa de Arquitectura

Facultad de Artes

Bucaramanga, Colombia

2 023

**Viabilidad de la Construcción de Vivienda Nueva en Colombia Bajo el Sistema de
Impresión 3D**

Nicolás Pinzón Torres

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Arquitecto

Director (a):

Arquitecto Tomás Orlando Paternina Cruz

Línea de Investigación:

Hábitat arquitectónico – Medio ambiente y hábitat popular

Universidad Antonio Nariño

Programa de Arquitectura

Facultad de Artes

Bucaramanga, Colombia

2 023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
_____, Cumple con
los requisitos para optar
Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Resumen

Este trabajo explora y evalúa la tecnología de impresión 3D como una nueva alternativa constructiva, ofreciendo una visión general de sus beneficios y retos en distintos aspectos. El objetivo principal es desarrollar un estudio de viabilidad sobre la construcción de vivienda en Colombia bajo este sistema. El estudio se basa en la revisión de la literatura relacionada con su aplicación en la construcción, además de un análisis detallado de proyectos de vivienda que han implementado este sistema. Los resultados demuestran que la tecnología tiene el potencial de contribuir a la disminución de la brecha de vivienda en Colombia, sus principales ventajas están relacionadas con el aumento de la rentabilidad y la reducción de los costos e impactos ambientales. Por último, este documento también incluye un estudio empírico mediante una encuesta cualitativa para conocer la percepción que tienen las personas sobre una vivienda impresa en 3D.

Abstract

This work explores and evaluates 3D printing technology as a new construction alternative, offering an overview of its benefits and challenges in different aspects. The main objective is to develop a feasibility study on housing construction in Colombia under this system. The work is based on the review of literature related to its application in construction, in addition to a detailed analysis of housing projects that have implemented this system. The results demonstrate that technology has the potential to contribute to reducing the housing gap in Colombia; its main advantages are related to increasing profitability and reducing costs and environmental impacts. Finally, this document also includes an empirical study using a qualitative survey to understand people's perception of a 3D printed home.

Tabla de Contenido

1.	Marco Preliminar	18
1.1	Problema de Investigación	18
1.2	Objeto de Estudio	24
1.2.1	Aspectos Técnicos	24
1.2.2	Aspectos Ambientales.....	25
1.2.3	Aspectos de Costo y Tiempo	25
1.2.4	Aspectos Sociales.....	25
1.2.5	Aspectos Estructurales	25
1.3	Población Objetivo.....	25
1.4	Pregunta de Investigación	26
1.5	Justificación.....	27
1.6	Objetivos.....	27
1.6.1	Objetivos General	27
1.6.2	Objetivos Específicos.....	28
1.7	Alcance	28
1.8	Hipótesis	28
1.9	Metodología	29
1.9.1	Método	30
1.9.2	Fases de Investigación	31
2.	Marco Teórico.....	34
2.1	Estado del Arte	34

2.1.1	Aspectos Técnicos	34
2.1.2	Aspectos Ambientales.....	42
2.1.3	Aspectos de Costo y Tiempo	51
2.1.4	Aspectos Sociales.....	54
2.1.5	Aspectos Estructurales	58
2.2	Construcción del Objeto de Estudio	64
2.2.1	Reducción de la brecha de vivienda.....	64
2.3	Análisis de Referentes	65
2.3.1	Proyectos Empresa SQ4D.....	66
2.3.2	Proyectos Empresa Grupo PERI – Tecnología COBOD	73
2.3.3	Proyecto Empresa ICON.....	84
2.3.4	Proyecto Empresa WASP	88
3.	Marco Normativo.....	95
3.1	Título A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente	95
3.2	Título C – Concreto Estructural	95
3.2.1	Aprobación de Sistemas Especiales de Diseño o de Construcción.....	96
3.2.2	Obligatoriedad de las Normas Técnicas Citadas en el Título C	96
4.	Marco Contextual.....	97
4.1	Contexto Político – Económico.....	97
4.1.1	Vivienda de Interés Social (VIS)	98
4.1.2	Vivienda de Interés Prioritario (VIP).....	98

4.1.3	Vivienda No VIS.....	98
4.2	Contexto Socio – Cultural	98
4.2.1	Según el Tipo de Construcción y el Modelo de Distribución.....	98
4.2.2	Características de las Viviendas en Déficit.....	99
4.3	Análisis Multiescalar	100
4.3.1	Escala Macro.....	100
4.3.2	Escala Meso	103
4.3.3	Escala Micro	105
5.	Marco Proyectual	107
5.1	Aspectos Técnicos.....	107
5.1.1	Alcance de la Impresión 3D para Elaborar los Elementos de una Vivienda	107
5.1.2	Tipos de Impresoras	110
5.1.3	Características del Concreto de Impresión	113
5.1.4	Aportes de las Empresas en el Desarrollo de la Tecnología.....	114
5.1.5	Ventajas de la impresión 3D en Aspectos Técnicos	117
5.1.6	Desventajas de la Impresión 3D en Aspectos Técnicos.....	118
5.1.7	Requerimientos y Recomendaciones Técnicas.....	119
5.1.8	Balance Final de Viabilidad Técnica	119
5.2	Aspectos Ambientales	120
5.2.1	Ventajas Ambientales de la Impresión 3D.....	120

5.2.2	Percepción de la Importancia de la Reducción de la Contaminación Según Encuesta 121	
5.2.3	Desventajas Ambientales de la Impresión 3D	122
5.2.4	Requerimientos de la Impresión 3D en Aspectos Ambientales.....	122
5.2.5	Balance Final de la Viabilidad Ambiental	123
5.3	Aspectos de Costo y Tiempo	123
5.3.1	Reducción de Costos Según Revisión Documental	123
5.3.2	Análisis de Rentabilidad de la Impresión 3D Frente a Métodos Tradicionales....	124
5.3.3	Costo de Construcción por Metro Cuadrado en COP	127
5.3.4	Costo de Venta por Metro Cuadrado en COP.....	127
5.3.5	Comparación del Costo de Construcción Según el Tipo de Vivienda – COP	128
5.3.6	Comparación del Costo de Venta Según el Estrato Socioeconómico – COP.....	129
5.3.7	Percepción de la Importancia de la Reducción de Costos Según Encuesta	130
5.3.8	Porcentaje de Reducción del Tiempo de Construcción	131
5.3.9	Ventajas Económicas de la Impresión 3D	132
5.3.10	Desventajas Económicas de la Impresión 3D.....	132
5.3.11	Avance de la Fabricación Aditiva en Concreto en Colombia.....	132
5.3.12	Balance Final de la Viabilidad Económica en Colombia	136
5.4	Aspectos Sociales	137
5.4.1	Reducción del déficit habitacional en países en desarrollo	137
5.4.2	Proyectos de vivienda social con impresión 3D	137

5.4.3	Encuesta Sobre la Percepción de la Tecnología en Colombia.....	142
5.4.4	Ventajas Sociales de la Impresión 3D	149
5.4.5	Desventajas Sociales de la Impresión 3D	150
5.4.6	Balance Final de la Viabilidad Social en Colombia	150
5.5	Aspectos Estructurales.....	153
5.5.1	Resistencias de Concretos de Impresión.....	153
5.5.2	Desventajas Estructurales de la Impresión 3D en concreto	154
5.5.3	Requerimientos y Recomendaciones Estructurales.	155
5.6	Análisis Económico y Social en Escala Micro – Bucaramanga.....	155
5.6.1	Comparación del costo de venta en Bucaramanga	155
5.6.2	Conclusión de Análisis en Bucaramanga.....	156
6.	Conclusiones Generales	157
6.1	Viabilidad de la Tecnología en Colombia.....	157
6.2	Análisis Socio-Económico	157
6.3	Construcción Aditiva para la Reducción de la Brecha de Vivienda.....	158
7.	Bibliografía	159

Lista de Figuras

Figura 1	19
Figura 2	20
Figura 3	21
Figura 4	22
Figura 5	23
Figura 6	34
Figura 7	38
Figura 8	39
Figura 9	42
Figura 10	48
Figura 11	49
Figura 12	51
Figura 13	52
Figura 14	53
Figura 15	58
Figura 16	59
Figura 17	60
Figura 18	61
Figura 19	62
Figura 20	63
Figura 21	66
Figura 22	67

Figura 23	67
Figura 24	68
Figura 25	69
Figura 26	70
Figura 27	70
Figura 28	71
Figura 29	72
Figura 30	73
Figura 31	74
Figura 32	75
Figura 33	75
Figura 34	76
Figura 35	77
Figura 36	79
Figura 37	79
Figura 38	80
Figura 39	81
Figura 40	81
Figura 41	82
Figura 42	83
Figura 43	84
Figura 44	85
Figura 45	86

Figura 46	86
Figura 47	87
Figura 48	89
Figura 49	90
Figura 50	90
Figura 51	91
Figura 52	92
Figura 53	92
Figura 54	93
Figura 55	99
Figura 56	100
Figura 57	102
Figura 58	103
Figura 59	105
Figura 60	107
Figura 61	109
Figura 62	110
Figura 63	111
Figura 64	112
Figura 65	113
Figura 66	114
Figura 67	115
Figura 68	115

Figura 69	116
Figura 70	121
Figura 71	124
Figura 72	125
Figura 73	126
Figura 74	128
Figura 75	129
Figura 76	130
Figura 77	133
Figura 78	133
Figura 79	134
Figura 80	137
Figura 81	138
Figura 82	139
Figura 83	140
Figura 84	141
Figura 85	142
Figura 86	143
Figura 87	143
Figura 88	144
Figura 89	145
Figura 90	146
Figura 91	147

Figura 92	147
Figura 93	148
Figura 94	151
Figura 95	156

Lista de Tablas

Tabla 1.....	26
Tabla 2.....	29
Tabla 3.....	38
Tabla 4.....	69
Tabla 5.....	72
Tabla 6.....	83
Tabla 7.....	88
Tabla 8.....	94
Tabla 9.....	97
Tabla 10.....	123
Tabla 11.....	131
Tabla 12.....	154

Introducción

En Colombia, durante los últimos años se ha planteado la necesidad de aumentar la producción de vivienda. A. Saiz, afirma que para disminuir la brecha actual es necesaria la construcción de 393 000 viviendas anuales; esto se debe a factores como el déficit habitacional cuantitativo, el crecimiento poblacional y la depreciación anual (Saiz, 2 022, pág. 43). No obstante, la producción de los últimos años sigue siendo insuficiente para llegar a estas cifras; según Camacol, durante el año 2 021 hubo 240 309 lanzamientos de unidades de vivienda (Ramírez, 2 022). Por lo anterior, se plantea la necesidad de implementar métodos o tecnologías que permitan mejorar la eficiencia de los proyectos de construcción.

Tal es el caso de la construcción bajo el sistema de impresión 3D, una alternativa desarrollada por distintas empresas en el mundo para la construcción de vivienda de manera automatizada. Los proyectos de vivienda que implementan esta tecnología han sido más eficientes en comparación con métodos de construcción tradicional. Principalmente, se ha encontrado que esta tecnología puede reducir significativamente el tiempo, el costo y los desperdicios de un proyecto.

Este trabajo busca evaluar la viabilidad de la tecnología para su posible aplicación en Colombia en la construcción de vivienda nueva (social o comercial). El análisis se divide en cinco categorías principales: aspectos técnicos, ambientales, costo-tiempo, sociales y estructurales. Esta división permitió establecer que la población de estratos 3-4 tiene una mejor proyección para su implementación. Y, por otra parte, suplir la demanda de vivienda nueva depende de la capacidad de cada departamento para adaptarse a nuevos mercados o recibir nuevas tecnologías.

1. Marco Preliminar

1.1 Problema de Investigación

La vivienda es uno de los elementos más importantes de una sociedad, ya que permite resolver las necesidades básicas de las personas; además de ser la base de la seguridad de un individuo o familia. Según Naciones Unidas, es el centro de nuestra vida social y económica (ONU, 2 023).

A pesar de su importancia, en el mundo aún existen muchos problemas en torno a la provisión de vivienda; en 2 010, alrededor de 980 millones de hogares no tenían una vivienda digna, además de otros 600 millones de hogares proyectados para 2 030 (ONU, 2 020). Por otra parte, en los Objetivos de Desarrollo Sostenible se ha establecido que las ciudades y áreas metropolitanas representan más del 60% del gasto de recursos y el 70% de las emisiones de carbono del mundo (ONU, 2 023). Es decir, que en el mundo no solo se necesita aumentar la producción de vivienda nueva, sino que las viviendas producidas deben ser más accesibles y sostenibles.

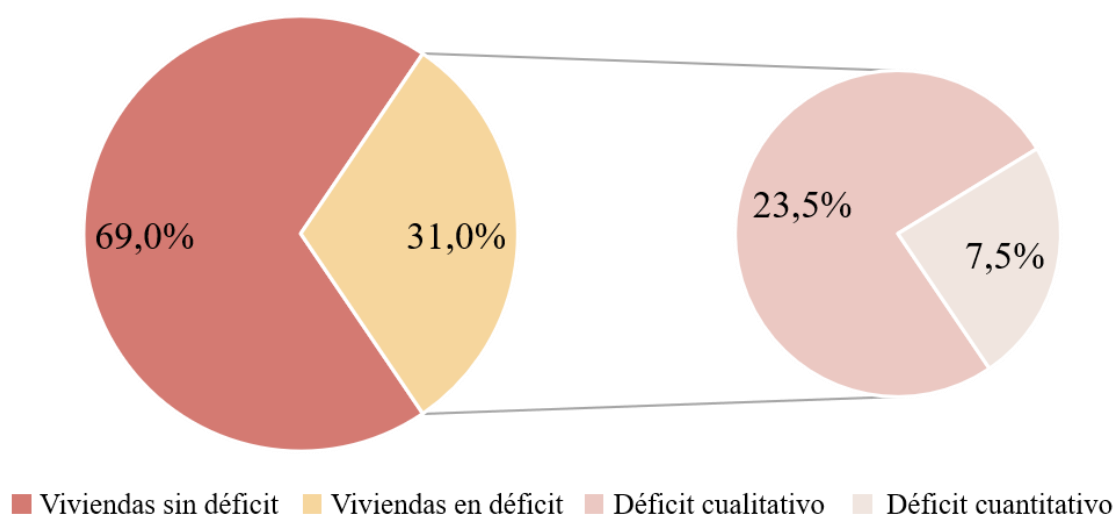
En el caso de Colombia, existen dos principales factores que influyen en la demanda de vivienda nueva, los cuales son: el crecimiento poblacional y el déficit habitacional cuantitativo.

En relación al primer factor, como se muestra en la Figura 1, en Colombia, el 31% de los hogares habita en déficit habitacional. Según el Departamento Nacional de Estadística (DANE) este se divide en dos tipos: el déficit cualitativo, que se refiere a viviendas con deficiencias no estructurales, las cuales pueden lograr condiciones dignas de habitabilidad con mejoramientos o ajustes; y el déficit cuantitativo, que abarca a las viviendas con deficiencias estructurales o de espacio, las cuales no se pueden mejorar para lograr condiciones dignas de habitabilidad. Por

esta razón, los hogares que hacen parte del déficit cuantitativo son los que traen demanda directa de vivienda nueva en el país. Según el gráfico mostrado en la Figura 1, el 7,5% de las viviendas a nivel nacional se encuentran en déficit cuantitativo, esto representa la necesidad de construir 1'268.000 viviendas durante los próximos años (DANE, 2 022, pág. 3).

Figura 1

Porcentaje de viviendas en déficit habitacional – DANE 2021



Nota. Elaboración propia. (DANE, 2 022, pág. 4)

Por otra parte, en relación al factor del crecimiento poblacional; en 2 019, Camacol estableció que durante la presente década este será de 7,4 millones de personas, lo cual representa la necesidad de construir 320 000 viviendas por año (La República, 2 019).

Por su parte, en el estudio *Vivienda, reto en América Latina*, realizado por LaHaus y el Laboratorio de Economía Urbana del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), se estableció que debido a factores como el crecimiento poblacional, el déficit habitacional cuantitativo y la depreciación anual, en Colombia se deben construir 393 000 viviendas anuales

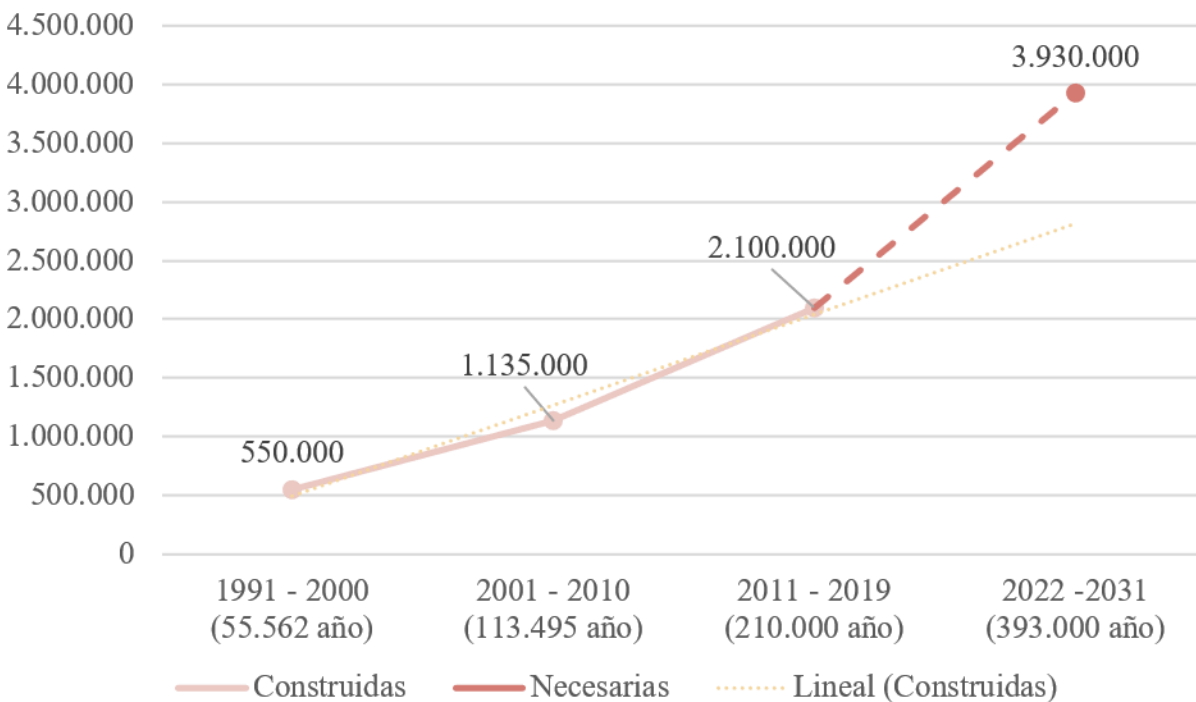
durante las siguientes dos décadas, además de ser necesaria una inversión extra de aproximadamente el 0,5% del PIB nacional (Saiz, 2 022).

Ampliando lo anterior, Saiz, afirma que de las 393 000 viviendas necesarias anualmente, 278 000 son exclusivamente para satisfacer el crecimiento de los hogares, 64 000 para disminuir el déficit habitacional cuantitativo y 50 000 debido a la depreciación anual (2 022, pág. 44). Este último factor se refiere a viviendas que se vuelven obsoletas con el paso de los años y deben ser reemplazadas; lo cual, puede deberse a factores como: la antigüedad, la calidad de la construcción, las regulaciones sísmicas o los materiales. Desafortunadamente, en Colombia no existen estudios acerca de la tasa de reemplazo de viviendas, por lo que se tomó un caso de estudio de Estados Unidos como única fuente confiable para tener una cifra acertada; así pues, se estableció una tasa del 0,25% del stock de viviendas (Emrath, 2018 citado por Saiz, 2 022, pág. 34).

En relación a las cifras expuestas, en la Figura 2 se muestra una comparación entre el número de viviendas producidas en el país durante las últimas tres décadas y las 393.000 planteadas por Saiz (2 022, pág. 43) para acabar con la brecha de vivienda en Colombia durante las siguientes dos décadas.

Figura 2

Viviendas construidas en Colombia en comparación con las necesarias



Nota. Elaboración propia. (Forero, 2 019). (Saiz, 2 022, pág. 43).

Como resultado de esta comparación, se puede concluir que en Colombia se debe aumentar la producción de vivienda en casi el doble. Esto representa un reto muy grande, ya que aumentar la producción de vivienda de esta manera traerá muchos desafíos, como por ejemplo, la demanda de suelo; en el país se necesitarán más de 50 000 hectáreas de tierra parcelada en las ciudades de Medellín, Bogotá, Barranquilla, Cartagena y Cali durante los próximos 20 años; así mismo, si estas viviendas se producen en suelos donde no existen construcciones, habrá que pavimentar calles y habilitar espacios públicos, infraestructuras públicas e inmuebles comerciales (Saiz, 2 022, pág. 56).

Figura 3

Déficit habitacional en Colombia

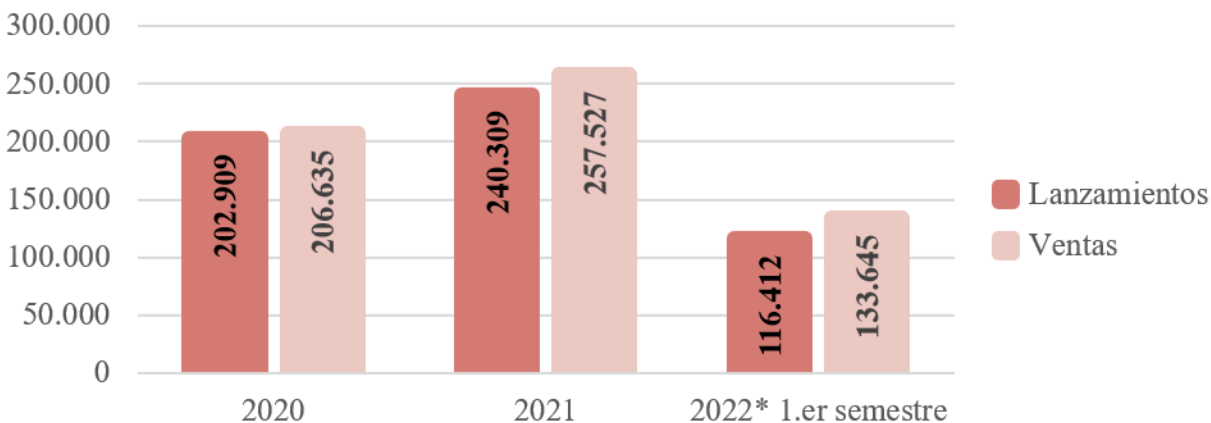


Nota. Adaptado de *En Medellín la oferta de vivienda de interés social se ha deteriorado en los últimos años* [Fotografía], por Medellín Cómo Vamos, 2 020, (<https://www.medellincomovamos.org/en-medellin-la-oferta-de-vivienda-de-interes-social-se-ha-deteriorado>). Todos los derechos reservados [2 021] Medellín Cómo Vamos.

A continuación, en la Figura 4 se muestra la producción de vivienda en la presente década, donde se observa que ha crecido considerablemente en comparación a la década anterior, pero aún sigue estando lejos de la meta planteada para acabar con la brecha actual.

Figura 4

Viviendas construidas y vendidas por año en la década actual

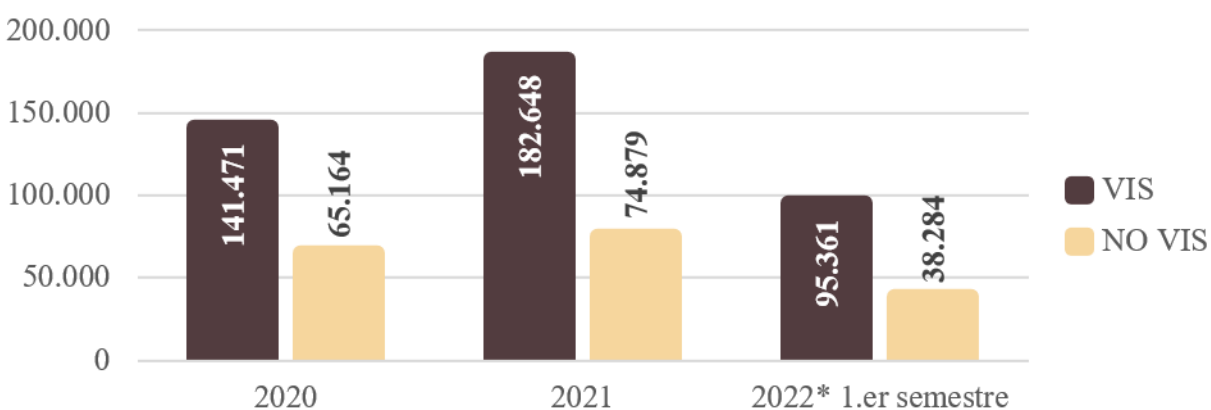


Nota. Adaptado de *Informe de Gestión Camacol 2 021 - 2 022* (p. 14), por S. Forero, 2 022, Camacol. Todos los derechos reservados [2 021] Camacol.

Además, en la Figura 5 se muestra la venta de viviendas según el rango de precio, donde se observa que el 70% de estas viviendas son de interés social.

Figura 5

Viviendas vendidas según rango de precio en la década actual



Nota. Adaptado de *“Informe de Gestión Camacol 2 021 - 2 022”* (p. 14), por S. Forero, 2 022, Camacol. Todos los derechos reservados [2 021] Camacol.

Debido a que la producción actual de vivienda sigue siendo insuficiente para acabar con la problemática planteada, se hace necesaria la búsqueda de métodos alternativos que permitan mejorar la eficiencia de los proyectos de vivienda. Tal es el caso de la construcción bajo el sistema de impresión 3D, una tecnología que a gran escala funciona bajo el modelado por deposición fundida (FDM), que consiste en fabricar objetos tridimensionales a través de la superposición de capas, lo cual permite la elaboración de estructuras de manera automatizada.

Hoy en día se han llevado a cabo múltiples proyectos que utilizan esta tecnología, los cuales han tenido muy buenos resultados. Según E. Camarena, las empresas constructoras pueden tener una rentabilidad del 39%, logrando reducir los tiempos de construcción hasta en un 30% y las emisiones de carbono hasta en un 85% (2 022, pág. 5).

Por último, este documento muestra los aportes que puede generar la tecnología en la solución de los problemas de vivienda en Colombia, evaluando su viabilidad en aspectos de costo-tiempo, ambientales, sociales, técnicos y estructurales. De esta manera, se pudo establecer la población y el tipo de vivienda con mejor proyección para implementar la impresión 3D.

1.2 Objeto de Estudio

Como se mencionó anteriormente, el objeto de estudio para este trabajo será la construcción de vivienda bajo el sistema de impresión 3D; se estudiará su viabilidad en cada uno de los siguientes aspectos:

1.2.1 Aspectos Técnicos

Estos permiten conocer el funcionamiento de la tecnología, las características del material, tipos de mezcla, tipos de impresoras, las posibilidades de diseño, entre otros temas.

1.2.2 Aspectos Ambientales

Se muestran las ventajas que presenta la impresión 3D respecto a la reducción de las emisiones de CO₂, el gasto energético y los residuos en comparación con métodos de construcción tradicional. Además, se conocen las ventajas y los retos de la utilización de mezclas de impresión alternativas.

1.2.3 Aspectos de Costo y Tiempo

Se expone de manera teórica el costo por metro cuadrado de una vivienda impresa en 3D, el cual es comparado con viviendas VIS y No VIS. De igual manera, este precio también es comparado con viviendas en diferentes estratos socioeconómicos. Lo anterior permitió conocer la población y el tipo de vivienda con mejor proyección para implementar la tecnología.

1.2.4 Aspectos Sociales

Se evalúan los resultados de investigaciones sobre la construcción de viviendas sociales con impresión 3D. Además, se mostrarán los resultados de una encuesta realizada sobre la percepción que tienen las personas de esta tecnología.

1.2.5 Aspectos Estructurales

Se estudian algunas mezclas concreto y su resistencia a la compresión. Del mismo modo, se compara la resistencia del concreto impreso respecto al concreto fundido convencionalmente.

1.3 Población Objetivo

Debido a la problemática planteada, la población objetivo establecida es la que hace parte de la demanda de vivienda. Es decir, los hogares que habitan en déficit cuantitativo y los nuevos

hogares que se formarán durante la década actual. De esta manera, el estudio analiza la proyección de la tecnología de dos diferentes maneras.

En primer lugar, se analiza la viabilidad según el tipo de vivienda; se compara el costo teórico de construcción de una vivienda impresa en 3D con el costo por metro cuadrado establecido para las viviendas VIS, VIP y No VIS.

En segundo lugar, se hace una comparación del costo de venta de una vivienda impresa en 3D en comparación con el costo de venta según el estrato socioeconómico (Tabla 1). Lo anterior, permite establecer la población más adecuada para la implementación de la tecnología.

Tabla 1

Estratos socioeconómicos DANE

Estrato	Pertenece a
Estrato 1	Bajo-Bajo
Estrato 2	Bajo
Estrato 3	Medio-Bajo
Estrato 4	Medio
Estrato 5	Medio-Alto
Estrato 6	Alto

Nota. Elaboración propia. (DANE, 2 023).

1.4 Pregunta de Investigación

Se plantearon dos preguntas de investigación con base en el objeto de estudio y la problemática planteada: ¿Cuál es la viabilidad de la construcción de vivienda bajo el sistema de impresión 3D para disminuir la brecha de vivienda en Colombia? ¿La proyección de la tecnología puede cambiar en un departamento como Santander?

1.5 Justificación

Como se mencionó al inicio, en Colombia es necesaria la construcción de 393 000 viviendas anuales durante las próximas dos décadas (Saiz, 2 022, pág. 43). Esta cifra fue establecida de acuerdo al crecimiento poblacional y al déficit habitacional cuantitativo, el cual se refiere a viviendas con deficiencias estructurales o de espacio. Es por esto que atender estos dos factores se hace prioritario, ya que la formación de nuevas familias puede conllevar un aumento del déficit si no se cuenta con la oferta suficiente.

En consecuencia, se hace necesaria la implementación de tecnologías que permitan optimizar los procesos constructivos, con el fin de aumentar el stock de viviendas en el país. Este trabajo explora y analiza la construcción de vivienda mediante el sistema de impresión 3D; una tecnología que a nivel mundial ha traído grandes ventajas en relación a la construcción más rápida y eficiente.

Debido a que no se cuenta con suficientes estudios acerca de la implementación de esta tecnología en Colombia, el presente trabajo es conveniente para generar un mayor conocimiento sobre la construcción con impresión 3D. Se conocerán las ventajas que puede tener para disminuir la brecha de vivienda, así como las limitaciones que se presentan en algunas zonas apartadas del país.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivos General

Desarrollar un estudio de viabilidad sobre la construcción de vivienda bajo el sistema de impresión 3D que permita conocer su proyección para ser implementada en Colombia.

1.6.2 *Objetivos Específicos*

- Generar un balance comparativo de la impresión 3D frente a métodos tradicionales en los siguientes aspectos: sociales, ambientales, costo-tiempo, sociales y estructurales.
- Conocer la perspectiva que tienen las personas frente a una vivienda impresa en 3D; los aspectos que preocupan y los que generan mayor interés frente a su implementación.
- Establecer la viabilidad de la impresión 3D según el tipo de población y el tipo de vivienda, exponiendo los factores que pueden afectar su implementación.
- Comparar los resultados de costos obtenidos en la ciudad de Bogotá con la ciudad de Bucaramanga.

1.7 Alcance

El alcance del estudio será descriptivo, el cual, “tiene como principal función especificar las propiedades, características, perfiles de grupos, comunidades, objeto o cualquier fenómeno. Se recolectan datos de la variable de estudio y se miden” (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018 citado por Arias Gonzáles, 2022)

De esta forma, en este trabajo se describen cada uno de los aspectos relacionados con la construcción con impresión 3D, con el fin de tener resultados y generar comparaciones con los métodos de construcción tradicional. Por último, también se generan conclusiones sobre la viabilidad que tiene la implementación de esta tecnología en Colombia, así como sus ventajas y desventajas.

1.8 Hipótesis

La construcción bajo el sistema de impresión 3D, representa una buena alternativa para suplir la demanda actual de vivienda, ya que permite construir estructuras de concreto u otros

materiales de manera automatizada, con reducción de costos, tiempo y desperdicios. De esta manera, es viable construir viviendas sociales y comerciales en Colombia, ajustándose a las necesidades de cada región y cada tipo de población.

Además, en comparación con métodos de construcción tradicional, la impresión 3D se constituye como una tecnología más eficiente, presentando ventajas en aspectos ambientales y, de costo-tiempo. Así mismo, sus principales ventajas arquitectónicas son la libertad de diseño, la posibilidad de utilizar materiales diferentes al concreto y la automatización de procesos.

1.9 Metodología

En este apartado se describe el procedimiento utilizado para formular el problema, la hipótesis y su posterior validación. En primer lugar, en la Tabla 2 se muestran los objetivos específicos del trabajo y las técnicas utilizadas para su cumplimiento.

Tabla 2

Objetivos específicos, lo que se busca y las técnicas utilizadas

Objetivos	Lo que se busca	Técnicas Utilizadas
Generar un balance comparativo de la impresión 3D y métodos tradicionales	Conocer las ventajas y desventajas de la impresión 3D en distintos aspectos	Revisión documental y de la web
Conocer la perspectiva que tienen las personas frente a una vivienda impresa en 3D	Entender la aceptación que genera la tecnología	Encuesta con enfoque cualitativo
Generar un análisis comparativo en la ciudad de Bucaramanga	Tener una comparación de costo y tiempo más acertada	Análisis teóricos y revisión de la web
Evaluar la viabilidad de la tecnología de impresión 3D	Conocer la población y el tipo de vivienda con mejor proyección	Revisión documental y análisis comparativos

1.9.1 Método

Uno de los principales instrumentos utilizados para el análisis fue la revisión de artículos obtenidos a través de la base de datos bibliográfica Scopus. El estudio de estos documentos permitió establecer los cinco aspectos en que se puede dividir el análisis de la construcción con impresión 3D. Los artículos recopilados se caracterizan por ser investigaciones propias de las instituciones que los desarrollan, las cuales utilizan la teoría y la práctica. Otros, estudian los resultados obtenidos por otras investigaciones y proyectos de impresión 3D.

Cada una de estas investigaciones genera una serie de resultados, los cuales que pueden ser recopilados y comparados con resultados de métodos de construcción tradicional, lo cual, permite desarrollar un análisis de viabilidad final de esta tecnología. Algunos ejemplos de estas comparaciones pueden ser: resistencia del concreto impreso en 3D frente al concreto fundido convencionalmente, disminución de las emisiones de CO₂ de la impresión 3D en comparación con métodos tradicionales, reducción del tiempo de construcción de una vivienda impresa en comparación con una vivienda tradicional, entre otras.

Por otra parte, la revisión de la web permite analizar los resultados de las empresas constructoras que implementan la fabricación aditiva, estas describen las características de sus materiales, resistencias, funcionamiento de las impresoras, alcances, tipos de diseño, requerimientos, etc. Lo anterior permite recopilar información valiosa para cada uno de los aspectos estudiados, pero especialmente para los aspectos técnicos.

Por último, existen limitaciones en cuanto a los artículos estudiados, debido a que algunos temas se encuentran en fase de investigación y no han sido implementados en proyectos reales. Esto ocurre principalmente con las investigaciones sobre materiales alternativos, las

cuales buscan disminuir el uso concreto de impresión 3D desarrollado con cemento Portland. Si bien, los resultados obtenidos han seguido un proceso riguroso de prueba y ensayo, aun es necesario desarrollar más investigaciones, para poder tener conclusiones más acertadas.

1.9.2 Fases de Investigación

Para conocer la viabilidad de la construcción de vivienda bajo el sistema de impresión 3D, se siguieron estos pasos:

1.9.2.1 Descripción del problema. En Colombia, existe una demanda de vivienda nueva que la producción actual no puede suplir. En este trabajo se identificaron los tres factores que traen esta demanda, los cuales son: el crecimiento poblacional, la depreciación anual y el déficit habitacional cuantitativo. Por lo cual, se plantea la necesidad de investigar sobre una tecnología que permita mejorar la eficiencia de los proyectos de construcción y pueda, además, contribuir con la producción de 393 000 viviendas anuales durante las próximas dos décadas; lo cual permitirá disminuir gradualmente la brecha de vivienda.

1.9.2.2 Revisión de Literatura. En este punto se estudiaron los artículos de investigación relacionados al objeto de estudio; complementando esta información con revisión de la web. Esto permitió conocer su funcionamiento, avances tecnológicos, patentes y proyectos realizados hasta el momento. Por otra parte, se pudo establecer las cinco categorías en las que puede ser estudiada la tecnología, logrando así una comparación más acertada con los métodos de construcción tradicional.

1.9.2.3 Formulación de Hipótesis y Pregunta de Investigación. Después de revisar la literatura, se formuló la pregunta de investigación y la hipótesis, las cuales se enfocan en la viabilidad de la impresión 3D para la construcción de vivienda nueva en Colombia.

1.9.2.4 Diseño de Investigación.

Enfoque. El análisis de la impresión 3D para este trabajo tiene un enfoque mixto. En primer lugar, los aspectos estudiados tienen un enfoque cualitativo, ya que se busca describir y comprender el objeto de estudio. En segundo lugar, el estudio tuvo resultados cuantificables que fueron comparados con métodos de construcción tradicional, algunos ejemplos pueden ser: porcentaje de reducción de emisiones de carbono, porcentaje de aumento de la productividad, costo por metro cuadrado de una vivienda impresa en 3D, entre otros. Por otra parte, otro aspecto cuantitativo una sobre la percepción que tienen las personas respecto a la tecnología.

Población. Este trabajo busca conocer los beneficios que puede traer la construcción de vivienda bajo el sistema de impresión 3D y además conocer la población con mejor proyección para implementarla; esta se divide en estrato bajo, medio y alto, los cuales se clasifican del 1 al 6. Por otra parte, se generan unos análisis comparativos en las ciudades de Bogotá y Bucaramanga.

Muestra. La encuesta realizada tiene un enfoque cualitativo, se busca conocer la aceptación que tienen las personas de esta tecnología. Para esto, se encuestaron 201 personas.

Métodos de recolección de información. Los tres principales métodos para este trabajo son la revisión documental, la búsqueda en la web y la encuesta.

1.9.2.5 Recopilación de Datos. En primer lugar, se organizan los datos obtenidos mediante la revisión de documentos y la búsqueda en la web; además de los datos obtenidos en la encuesta de percepción. Por último, estos se dividen en cada uno de los cinco aspectos estudiados.

1.9.2.6 Análisis de Datos. Teniendo los resultados, se generan contextos comparativos de la impresión 3D frente a métodos de construcción tradicional con el fin de obtener conclusiones significativas en cada categoría estudiada.

1.9.2.7 Interpretación de Resultados. Complementando la fase anterior, se interpretan los resultados comparándolos con la hipótesis y la pregunta de investigación. Con esto se busca conocer si los resultados respaldan los planteamientos iniciales, además de identificar hallazgos inesperados que deben entrar en consideración.

1.9.2.8 Conclusiones y Recomendaciones. Aquí, se exponen las conclusiones generales, así como las ventajas, desventajas y recomendaciones en cada aspecto estudiado. Lo cual permitirá generar un balance final sobre la viabilidad que tiene la implementación de la tecnología de impresión 3D en la construcción de vivienda en Colombia.

1.9.2.9 Redacción de Artículo. Por último, se redactará un artículo que incluya introducción, revisión de literatura, metodología, resultados, discusión y conclusiones del análisis detallado de la tecnología. Lo anterior, con el fin de compartir los resultados con la comunidad académica, la industria de la construcción y personas interesadas en el tema, esto permitirá impulsar nuevas investigaciones en relación a la tecnología de impresión 3D y contribuirá a su posible implementación en el país.

2. Marco Teórico

2.1 Estado del Arte

Aquí se describen los aportes de los documentos estudiados para realizar el estudio, estos se dividen en cinco aspectos: técnicos, ambientales, costo-tiempo, sociales y estructurales.

2.1.1 Aspectos Técnicos

2.1.1.1 Funcionamiento.

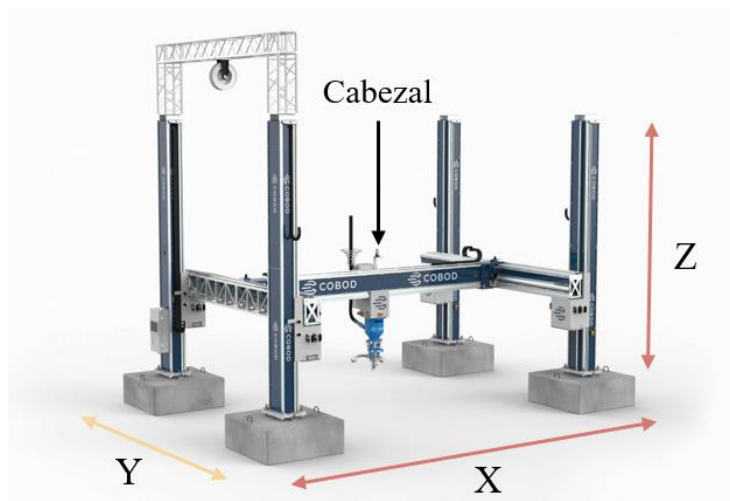
C. Menna describe la impresión de la siguiente manera (2018, pág. 220):

Preparación. Configuración de la máquina y preparación del área de impresión. Además, previamente se prepara rigurosamente la mezcla de concreto para que cumpla con tres características principales: bombeabilidad, extrusión y edificabilidad.

Movimiento del Cabezal de Impresión. Se muestra en la Figura 6 una impresora de gran formato, la cual se compone mecánicamente de estructuras en los ejes X, Y y Z; el cabezal de impresión se mueve horizontal y verticalmente (ejes X y Z). Este es controlado por distintos tipos de software que procesan archivos de tipo STL, los cuales funcionan como rutas mediante la transmisión de datos.

Figura 6

Ejes X, Y y Z en una impresora de gran formato



Nota. Adaptado de *Especificaciones BOD2* [Fotografía], por COBOD, 2 022, (<https://cobod.com/solution/bod2/specifications/>). Todos los derechos reservados [2 022] COBOD International.

Extrusión del Hormigón. Los tres factores que caracterizan la extrusión del concreto son la trayectoria plana para cada capa, la altura relativa de capa y la velocidad del cabezal de impresión. Además, los parámetros deben ser óptimos para garantizar la adhesión adecuada de las capas y el apilamiento.

Deposición de Capas. El concreto se deposita capa por capa de manera sucesiva.

Velocidad de Impresión. Esta depende directamente de las propiedades reológicas del material (deformación-fluidez) y de las características mecánicas que sean requeridas para la estructura impresa.

2.1.1.2 Características del Concreto de Impresión.

Como se mencionó anteriormente, un concreto de impresión 3D debe contar con tres características principales, bombeabilidad, extrusión y edificabilidad. G.H. Ahmed las define de la siguiente manera (2 022, págs. 511-514):

Bombeabilidad. Esta característica se refiere a la capacidad del concreto de ser bombeado sin problemas como obstrucciones o separación de componentes. Este proceso ocurre desde la mezcladora hasta el cabezal de impresión a través de una manguera hidráulica.

Extrusión y Edificabilidad. En primer lugar, el material debe tener la capacidad de ser extruido a través de la boquilla del cabezal de impresión sin interrupciones ni deformaciones. Por otra parte, la edificabilidad se refiere a la capacidad del hormigón impreso para soportar su propio peso y las capas posteriores sin colapsar ni pandearse.

Por otra parte, el autor también define otros factores que son importantes en una mezcla de impresión (Ghafur H. Ahmed, 2 022):

Comportamiento Reológico. Las propiedades de flujo de material deben ser adecuadas: ser extruido a través de la boquilla y conservar su forma después de ser depositado en el sitio.

Adhesión de Capas. El tiempo de fraguado y el tiempo entre capas debe ser el adecuado para permitir la correcta adhesión de estas.

Desarrollo de resistencia. El material debe soportar la carga propia de la estructura y al mismo tiempo mantener su integridad estructural.

Durabilidad. Las condiciones ambientales no deben afectar el comportamiento estructural con el paso del tiempo.

Personalización. La dosificación de la mezcla debe poder adecuarse a requisitos de diseño específicos.

Es importante mencionar que el agua es un elemento esencial para lograr la viscosidad óptima del concreto fresco; controlar cuidadosamente el contenido de agua ayudará a conservar

las propiedades reológicas necesarias para la impresión 3D. La relación agua/cemento influye en la resistencia del concreto impreso al igual que ocurre con el concreto tradicional. Por lo general, una relación agua/cemento más baja aumenta la resistencia, por lo que también es un factor importante para mejorar la adhesión entre capas (Menna, 2 018, pág. 221).

Por otra parte, también respecto a la influencia del agua, G.H. Ahmed afirma lo siguiente: “The quantity of water in the mix is directly proportional to the mix flowability, whereas it acts inversely with the buildability and the hardened strength, and it could lead to a high void content” [La cantidad de agua en la mezcla es directamente proporcional a la fluidez de la mezcla, mientras que actúa inversamente con la edificabilidad y la resistencia al endurecimiento, y podría conducir a un alto contenido de vacíos] (Ghafur H. Ahmed, 2 022, pág. 512). Los problemas de fluidez se resuelven con aditivos super plastificantes, los cuales hacen que parte del agua se libere con la dispersión de partículas.

2.1.1.3 Racionalidad de un Modelo de Impresión.

Según Z. Zuo, cualquier tipo de impresión 3D bajo modelado por deposición fundida tiene los mismos principios fundamentales, los cuales consisten en: la creación de un modelo 3D, generación de un archivo STL, corte y planificación de trayectorias, escritura de código de máquina y proceso de impresión (2 019, pág. 351).

En este tipo de proyectos, es necesaria una planificación rigurosa para evitar errores y accidentes. En relación a esto, una investigación desarrollada en China pudo encontrar que la impresión a escala puede ayudar a evaluar la racionalidad de un modelo de impresión, además de tener una buena aproximación a los parámetros que pueden afectar la impresión a escala real.

Por ejemplo, de acuerdo al método planteado por Z. Zuo, en la Tabla 3 se muestran los factores que afectan la impresión y la eficiencia de la estructura (Zuo, 2 019, pág. 351):

Tabla 3

Factores que afectan la impresión 3D

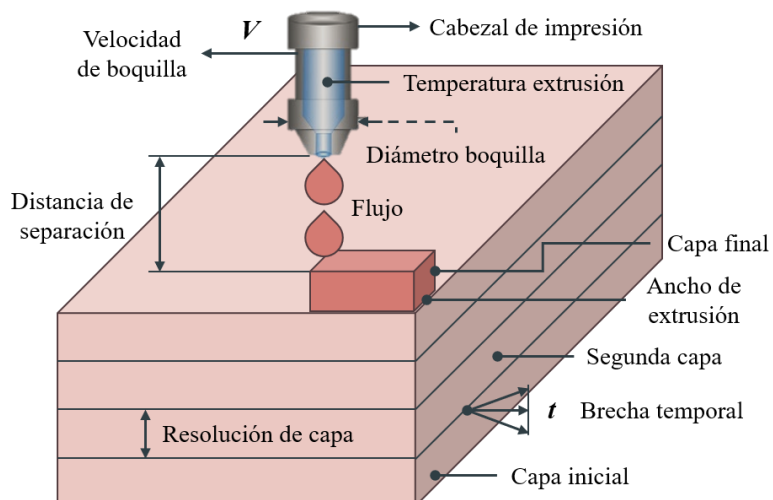
Símbolo	Descripción en el proceso de impresión	Influencia en el proceso de impresión		
		Tiempo total	Peso material	Calidad
t_0	Tiempo de preparación			
t_f	Tiempo de postprocesado			
V	Volumen del modelo			
C	Complejidad del modelo			
A	Precisión			
I	Intensidad			
P	Patrón			
O	Orientación			

Nota. Elaboración propia. (Zuo, 2 019, pág. 351).

Así mismo, en la Figura 7 se describen los elementos de una impresión, los cuales son influenciados por los parámetros mencionados anteriormente y son los que definen las propiedades mecánicas de las estructuras impresas.

Figura 7

Partes de un elemento impreso en 3D

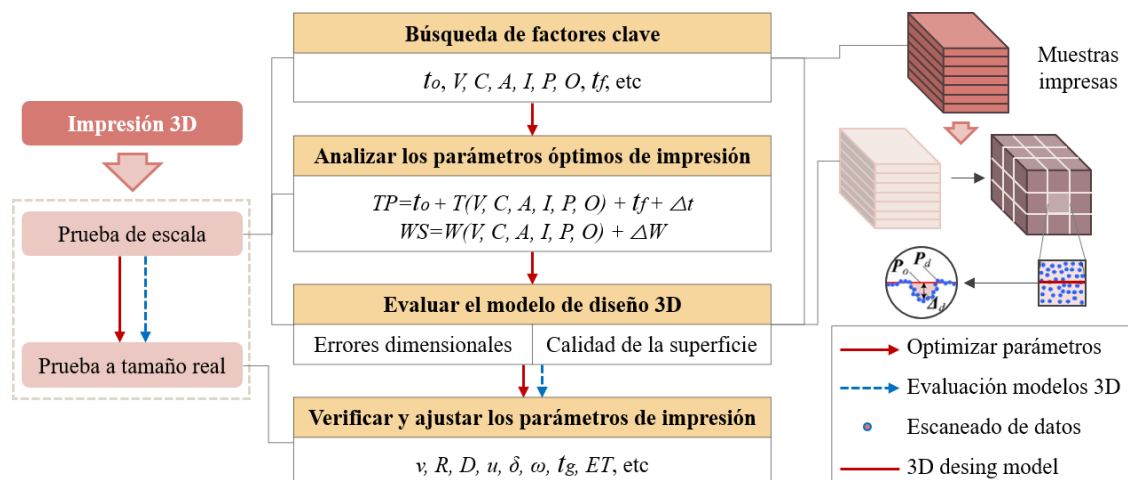


Nota. Adaptado de *Experimental research on transition from scale 3D printing to full-size printing in construction* (p. 352), por Z. Zuo, 2 019. Todos los derechos reservados [2 019] Elsevier Ltd.

El método planteado consistió en seis pruebas a escala, las cuales fueron escaneadas para conocer como afectaban los parámetros en los acabados y las propiedades de las piezas. Luego de esto, se pudo establecer relaciones cuantitativas de los parámetros de impresión para el puente en escala real; en la Figura 8 se muestra una descripción general del método propuesto por Z. Zuo (2 019, pág. 352).

Figura 8

Método para evaluar la racionalidad de un modelo de impresión



Nota. (TP) Tiempo total de impresión, (Δt) tiempo de impresión necesario para otros factores, (WS) Relación del peso total de suministros, (ΔW) Peso de suministros para otros factores.

Adaptado de *Experimental research on transition from scale 3D printing to full-size printing in construction* (p. 352), por Z. Zuo 2 019. Todos los derechos reservados [2 019] Elsevier Ltd.

Los resultados de las pruebas revelaron que es factible implementar esta metodología para evitar pérdidas debido a errores de modelo o parámetros, esto puede verse reflejado especialmente en modelos muy complejos de impresión o elementos prefabricados, ya que la orientación de la impresión afectará el tiempo total y las características mecánicas.

Por último, es importante aclarar que las relaciones cuantitativas establecidas en esta investigación no son totalmente aplicables a la construcción con impresión 3D. Si bien, es un método de gran ayuda, sus funcionamientos son diferentes; la impresión a escala real funciona mediante la extrusión por bombeo y utiliza materiales como concreto y geopolímeros, mientras que la impresión a escala pequeña funciona mediante una extrusión por presión a altas temperaturas, utilizando materiales como resinas o termoplásticos (Zuo, 2 019, pág. 358).

2.1.1.4 Parámetros de impresión y comportamiento de la mezcla.

Velocidad de boquilla. Este es el principal factor que influye en el tiempo total de impresión, además afecta el tiempo entre capas, por lo que juega un papel importante en la adhesión. Es importante tener en cuenta la capacidad de la impresora y las características del material, así como los aditivos que mejoran las capacidades de la mezcla (Ghafur H. Ahmed, 2022).

Tiempo de Fraguado y Contracción. Debe ser lo suficientemente largo para la continuidad del flujo y la extrusión del material, y además, ser lo suficientemente corto para desarrollar resistencia antes de recibir la capa contigua. Principalmente, este aspecto es modificado a través de aditivos retardantes y acelerantes (Ghafur H. Ahmed, 2022).

En cuanto a la contracción, esta ocurre durante el tiempo de fraguado, afectando la precisión dimensional y la calidad de impresión. Algunas presentadas por G.H Ahmed para resolver este problema son la adición de fibras de refuerzo y optimización de la mezcla de concreto (2022).

Densidad y Porosidad. Debido a la falta de vibración del concreto impreso en comparación con el fundido convencionalmente, este puede presentar mayor porosidad, lo cual puede afectar la resistencia y durabilidad de la estructura impresa. Aun así, se ha encontrado que una menor densidad del concreto impreso en comparación con el concreto convencional puede reducir esta porosidad (Ghafur H. Ahmed, 2022).

2.1.2 Aspectos Ambientales

En los aspectos ambientales existen muchos factores que pueden ser analizados; según lo observado en los documentos estudiados, esta categoría es la que presenta mayores ventajas frente a métodos de construcción tradicional. A continuación, se describirán los principales aportes ambientales encontrados en la revisión documental.

2.1.2.1 Beneficios Ambientales de la Fabricación Aditiva.

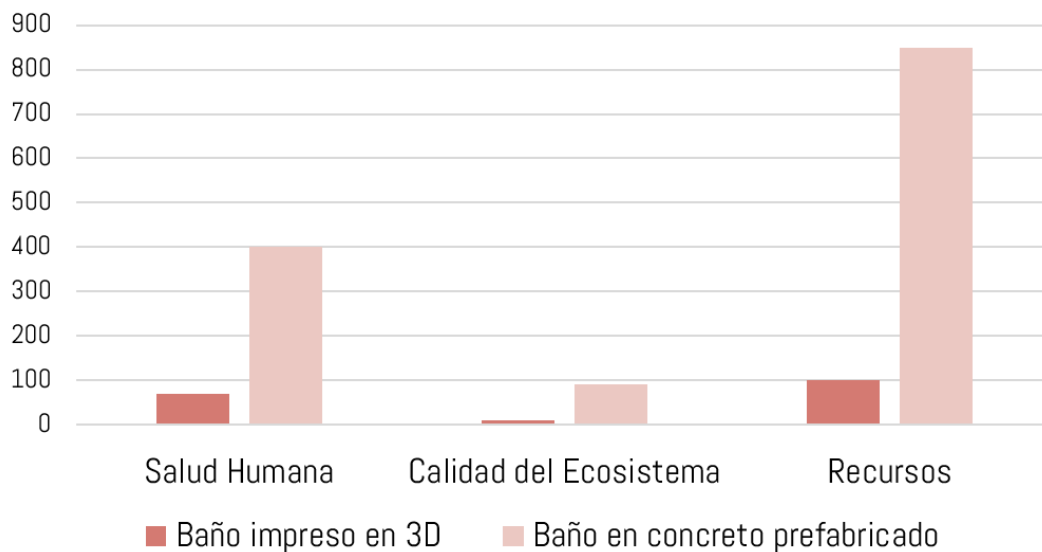
Según E. Camarena, los principales beneficios ambientales de la construcción con impresión 3D están relacionados con su funcionamiento; se necesita menos material y la eficacia del sistema de extrusión permite reducir los desperdicios, ya que solo se deposita material en los lugares deseados con gran precisión (2 022, pág. 5).

La fabricación aditiva en la construcción logra una reducción de hasta el 85,9% de las emisiones de CO₂ y una disminución de hasta el 87,1% del consumo de energía en comparación con estructuras en concreto prefabricado, esto se debe principalmente a la eliminación del encofrado (S. Ruan & S. Qian, 2 020, citado por E. Camarena, 2 022, pág. 2).

En la Figura 9 se muestra el balance propuesto por S. Ruan & S. Qian, donde se muestra la afectación que genera el concreto prefabricado y el concreto de impresión 3D (2 020, pág. 10).

Figura 9

Categorías de daños comparativas del concreto prefabricado y el concreto impreso



Nota. Tomado de *Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach* (p. 10), por S. Ruan & S. Qian, 2 020. Todos los derechos reservados [2 020] Elsevier Ltd.

Por último, diversos estudios han permitido evaluar el potencial que tiene la impresión 3D para implementar residuos industriales como material de fabricación (Chávez Camarena, 2 022, pág. 5), además de la implementación de mezclas a base de elementos naturales.

2.1.2.2 Cemento para Impresión 3D a Base de Geopolímeros.

Una investigación realizada en Singapur sobre un cemento alternativo para impresión 3D, encontró muy buenos resultado en aspectos ambientales y estructurales. Específicamente, se explora el uso de un cemento geopolímero que puede contribuir al medio ambiente, ya que reduce las emisiones de carbono en comparación al cemento Portland (Panda, 2 017).

Entre los componentes de la mezcla se encuentra la ceniza volante, un subproducto que es resultado de la combustión del carbón en centrales eléctricas. Es una sustancia fina en polvo compuesta por sílice, alúmina y óxido de hierro (Panda, 2 017).

Además de la ceniza volante, se utilizaron componentes como: escoria granulada como material cementoso suplementario; humo de sílice como aditivo fino; aditivos tixotrópicos para lograr un geopolímero extruible que no se deforme; silicato de potasio como reactivo alcalino y por último, arena de río y agua para lograr la trabajabilidad deseada (Panda, 2 017, pág. 282)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por B. Panda en las pruebas realizadas con el geopolímero de impresión en comparación con pruebas convencionales (2 017):

Resistencia a la Compresión. Las muestras de geopolímero impresas fueron un 5% menos resistentes en las direcciones X y Z, pero un 2% más resistentes en la dirección Y.

Resistencia a la Flexión. En esta prueba ocurrió lo contrario, el geopolímero tuvo mayor resistencia en las direcciones X y Z, pero una menor resistencia en la dirección Y debido a la fuerza de tracción que actúa perpendicular a la dirección de la capa.

Resistencia de la Unión a la Tracción. Esta fue muy afectada por la brecha de tiempo entre capas, la resistencia de la unión disminuyó a medida que la brecha de tiempo era mayor.

Este estudio permitió establecer las ventajas y desventajas de implementar este tipo de mezcla para la construcción con impresión 3D.

En primer lugar, relacionado con el aspecto ambiental, esta mezcla permite utilizar residuos industriales como la ceniza volante, lo cual ayuda en gran manera a reducir las emisiones de carbono en comparación con métodos tradicionales. Además, se reduce el consumo de recursos naturales y se disminuye la generación de residuos por la automatización de procesos (Panda, 2 017).

Complementando estas ventajas ambientales, se encontró cemento geopolímero estudiado por B. Panda puede tener una alta resistencia y durabilidad incluso mayor a la del cemento tradicional. Además, los resultados permitieron conocer otras ventajas como: alta resistencia química para entornos hostiles, resistencia al fuego y una contracción menor a la del cemento tradicional que ayuda a reducir el agrietamiento y mejora la durabilidad (Panda, 2017, pág. 287)

Por último, según B. Panda, las principales ventajas del cemento geopolímero fueron las siguientes (2017):

Disponibilidad de materias primas. Componentes como la ceniza volante y la escoria no son de fácil acceso, por lo que el uso generalizado de la mezcla propuesta puede limitarse.

Mayor tiempo de curado. En comparación con el concreto tradicional, el geopolímero requiere un tiempo de curado más largo, lo que puede aumentar el tiempo de construcción.

Costo Inicial Más Alto. Debido a los materiales especializados y a los procesos de fabricación, el geopolímero puede tener un costo inicial más alto en comparación con el cemento tradicional.

Falta de Normativa. Este tipo de mezcla aún no se ha implementado en proyectos de construcción, por lo que no existe normativa específica para este tipo de componentes.

En conclusión, el cemento a base de geopolímeros presenta un gran potencial en aspectos ambientales; a pesar de estar todavía en fase de investigación, los resultados en resistencia estructural han sido comparables al cemento tradicional. En el futuro cercano, puede ser un material innovador para los proyectos de impresión 3D a gran escala (Panda, 2017, pág. 287).

2.1.2.3 Otros Cementos Alternativos para Impresión 3D

Por su parte, un estudio realizado por la Universidad de Manchester en Reino Unido, hizo una revisión de los avances, ventajas y retos en el desarrollo de aglutinantes alternativos para impresión 3D a gran escala. Como, por ejemplo: Geopolímeros, aluminatos, cementos a base de MgO (Óxido de magnesio), además de materiales a base de yeso o arcilla calcinada con piedra caliza. En el estudio de Y. Peng & C. Unluer, se evalúan las propiedades de cada uno y su rendimiento para uso en la construcción con impresión 3D, obteniendo los siguientes resultados (2 022):

Cementos a Base de MgO. Fueron estudiados el cemento reactivo a base de MgO y el cemento de fosfato de magnesio. Se observó que estos tienen una alta resistencia a la compresión, fraguado rápido y buena trabajabilidad. Aun así, los componentes necesitan aditivos para mejorar sus propiedades mecánicas y se debe controlar la hidratación durante el fraguado para evitar agrietamientos. Por último, se requieren más investigaciones con este tipo de componentes para poder evaluar su rendimiento a largo plazo (Unluer, 2 022, pág. 7).

Cementos de Aluminato. Al igual que en el anterior, se estudiaron dos tipos de cemento, el sulfoaluminato de calcio (CSA) y el cemento de aluminato de calcio (CAC). El primero presenta buenas características para el uso en la construcción debido a que tiene emisiones mínimas de CO₂ y alta resistencia a la permeación por agua, la carbonatación y la contracción por secado. De forma similar, el CAC también tiene bajas emisiones de CO₂, además de alta resistencia a la corrosión, pero su uso se ha limitado a casos especiales debido a su fragilidad en las primeras etapas del curado y su alta temperatura de hidratación. En conclusión, los dos tipos de cementos de aluminato presentan características aptas para la impresión 3D, ya que las debilidades de cada material se pueden mejorar de con aditivos químicos (Unluer, 2 022, pág. 9).

Materiales a Base de Yeso. Los materiales a base de yeso presentaron buen comportamiento elástico y un alto coeficiente de absorción de sonido. Al igual que todos los materiales estudiados, estos a base de yeso también pueden ser mejorados con aditivos químicos (Unluer, 2 022, pág. 9).

Cemento a Base de Arcilla Calcinada con Piedra Caliza. Su fabricación se define básicamente en la calcinación de una mezcla de arcilla con piedra caliza. Al utilizarse materiales locales y residuos industriales para su elaboración, se presentan grandes ventajas como reducción de costos y bajo contenido de CO₂. Por otra parte, una serie de aditivos permitió mejorar la mezcla en aspectos como viscosidad, retención de la forma, capacidad de construcción y resistencia a la compresión (Unluer, 2 022, pág. 11).

En conclusión, Y. Peng y C. Unluer afirman que el desarrollo de aglutinantes alternativos puede mejorarse mediante el reconocimiento de sus capacidades únicas en condiciones específicas. Para esto debe establecerse un vínculo entre la investigación de laboratorio y los programas a gran escala para que los aglutinantes alternativos se puedan implementar en el desarrollo de estructuras impresas en 3D. Si se desarrolla este vínculo, se pueden resolver cuestiones técnicas que limitan su uso en grandes proyectos de impresión (Unluer, 2 022, pág. 17).

2.1.2.4 Impresión 3D a Base de Tierra con Fécula de Papa y Fibras de Sisal

Según R. Aguilar, el mortero y el concreto son los materiales más utilizados en la construcción aditiva. El autor menciona que existen empresas que han podido patentar sus propias mezclas de impresión a base de cemento convencional; algunas de estas han sido estudiadas en este trabajo. Además, empresas productoras de cemento como LafargeHolcim y Cemex han desarrollado morteros comerciales para impresión 3D. (2 022, pág. 2)

El cemento convencional es un importante generador de gases de efecto invernadero y no es de fácil acceso en zonas remotas. Debido a esto, las mezclas para impresión 3D basadas tierra cruda y materiales orgánicos pueden ser una buena alternativa ambiental y social.

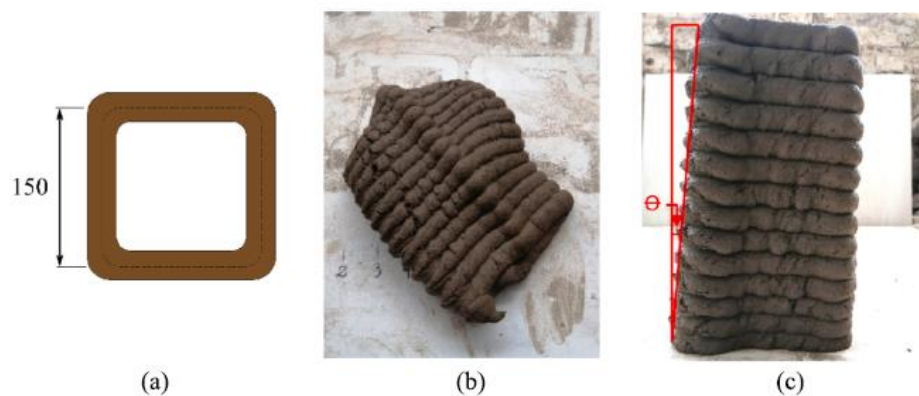
Específicamente, la mezcla estudiada por R. Aguilar se compone de tierra cruda, gel de almidón de papa y fibras de sisal. El suelo base fue obtenido de una cantera en Lima, Perú, las partículas tienen forma subredondeada y un tamaño máximo de 0,84mm. Por otra parte, el gel de almidón se utiliza como aglutinante y las fibras de sisal se añaden como refuerzo (Aguilar, 2022, pág. 4).

Teniendo en cuenta el rango de tamaño de partículas recomendado por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el tamaño promedio de estas fue de 0,02mm. Dando como resultado una mezcla con las siguientes proporciones: un 4% en peso de arena, un 30% de arena fina, un 41% de sedimentos y un 25% de arcilla (Aguilar, 2022, pág. 4).

En la Figura 10 se muestran las pruebas de apilamiento, la mezcla utilizada pudo mejorar su capacidad de impresión y sus propiedades mecánicas debido al gel de almidón de papa, el cual actúa como estabilizador químico natural.

Figura 10

Pruebas de apilamiento

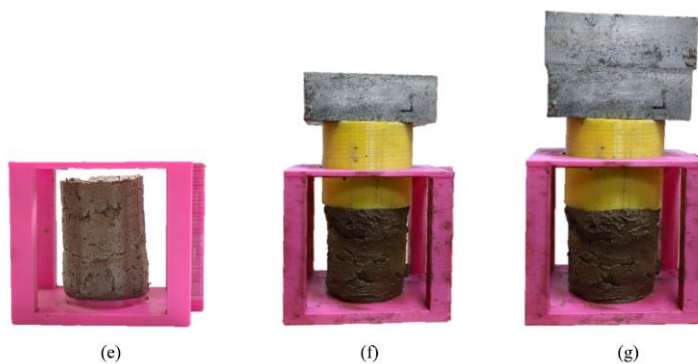


Nota. Tomado de *Eco-friendly additive construction: Analysis of the printability of earthen-based matrices stabilized with potato starch gel and sisal fibers* (p. 10), por R. Aguilar, 2 022. Todos los derechos reservados [2 022] Elsevier Ltd.

Por otra parte, en la Figura 11 se muestran las pruebas de estabilidad de cilindros.

Figura 11

Pruebas de estabilidad en cilindros



Nota. Tomado de *Eco-friendly additive construction: Analysis of the printability of earthen-based matrices stabilized with potato starch gel and sisal fibers* (p. 11), por R. Aguilar, 2 022. Todos los derechos reservados [2 022] Elsevier Ltd.

Por último, en relación a las ventajas, R. Aguilar expone lo siguiente:

Reducción del Impacto Ambiental. La tierra cruda como material de construcción tiene un menor impacto ambiental en comparación con los materiales tradicionales. También utiliza componentes locales, lo que reduce los costos de transporte y material. (2 022, pág. 2).

Bajo consumo de energía. La construcción con este tipo de mezclas disminuye el impacto ambiental hasta en un 82%, además de requerir solo entre el 18 y 38% de energía en comparación con métodos de construcción tradicional (2 022, pág. 2).

Disponibilidad de materiales. En lugares apartados se encuentran fácilmente tierra cruda y aditivos ecológicos, como gel de almidón de papa y fibras de sisal, lo que reduce la necesidad de materiales importados (2 022, pág. 2).

Mejora de la capacidad de construcción y durabilidad. Existen componentes naturales que sirven como estabilizadores químicos ecológicos, lo que hace posible mejorar la calidad de las mezclas a base de tierra cruda, especialmente en su capacidad de extrusión, bombeabilidad y edificabilidad (2 022, pág. 2).

Absorción de dióxido de carbono. Además de tener un impacto ambiental muy bajo, los componentes terrestres pueden absorber grandes cantidades de dióxido de carbono durante su ciclo de vida; pudiendo ser desechados como tierra una vez este termine (2 022, pág. 2).

En conclusión, la impresión 3D con estos componentes puede usarse para la construcción rápida de unidades de vivienda en lugares apartados. Esto debido a que los materiales se pueden conseguir localmente. Sin embargo, es importante aclarar que, a pesar de sus buenos resultados, esta mezcla aún se encuentra en fase de investigación, por lo que no ha sido implementada en proyectos de gran escala. Así mismo, estas mezclas pueden presentar las siguientes desventajas: imprimibilidad limitada, rigidez y agrietamiento por factores como la luz solar directa o la

perdida de agua; así como una resistencia mecánica menor en comparación con otros materiales de construcción (Aguilar, 2 022, pág. 14).

2.1.3 Aspectos de Costo y Tiempo

2.1.3.1 Rentabilidad y Reducción del Costo de Construcción

En un estudio sobre la viabilidad de la impresión 3D en concreto para construir viviendas sociales en Perú, E. Camarena afirma que esta tecnología es hasta un 39% más rentable en comparación con métodos de construcción tradicional. El estudio mencionado realizó un análisis de viabilidad de 200 viviendas sociales impresas en 3D, dando como resultado un valor actual neto de USD 717.202,08 para impresión 3D y USD 433.563,24 para el método tradicional, obteniendo una diferencia de USD 283.638,84 (39%) (2 022, pág. 5).

A continuación, en la Figura 12 se muestra la evaluación final de la rentabilidad planteada por E. Camarena en el estudio, donde también se observa que la tasa interna de retorno, la cual se refiere al porcentaje de beneficio o pérdida que conlleva una inversión, fue del 12% para la impresión 3D y un 5% para el método tradicional.

Figura 12

Evaluación de la Rentabilidad para la Construcción de Viviendas Sociales

EVALUACIÓN DE LA RENTABILIDAD - USD			
ITEM	IMPRESIÓN 3D	MÉT. TRADICIONAL	DIFERENCIA
Valor Actual Neto	717.202.08	433.563.24	39,5%
Tasa interna de retorno	12%	5%	7%
Utilidad sin impuestos	3.162.961.581,09	1.912.074.587,25	39,5%

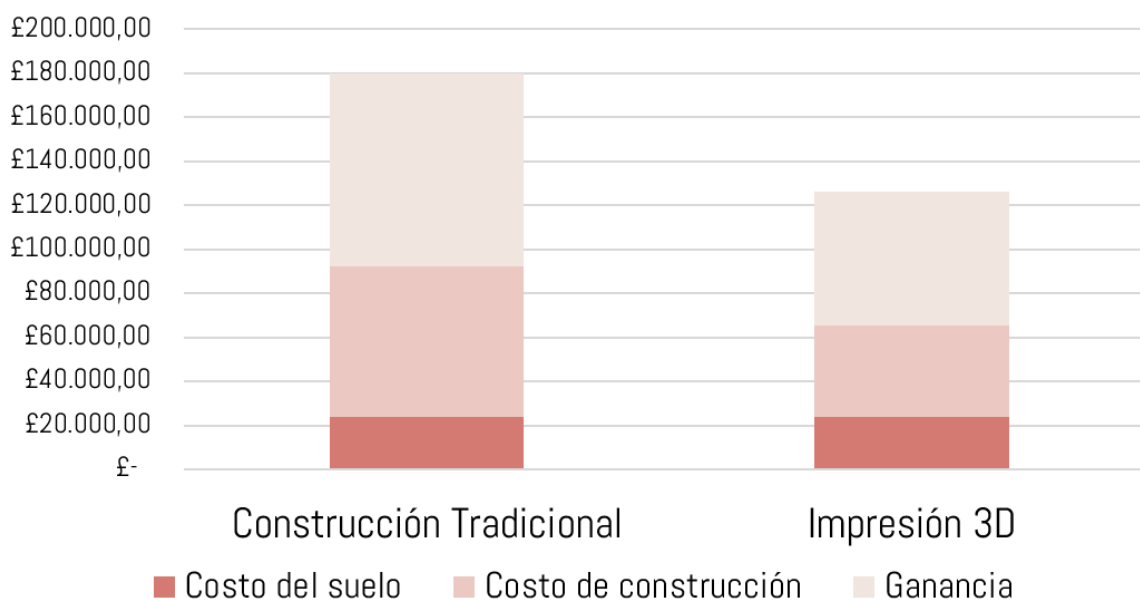
Nota. Elaboración propia. (Chávez Camarena, 2 022, pág. 5).

Otros aspectos mencionados por E. Camarena son la disminución de los costos de mano de obra en un 35%, además de la reducción de costos por la eliminación del encofrado y el proceso de vibración (2 022, pág. 1).

También, existe otro caso de estudio sobre la viabilidad económica de una vivienda impresa en Reino Unido. Aquí, A. L. Mohd Tobi proporcionó información sobre la distribución porcentual de los costos de una vivienda impresa y una vivienda tradicional. Lo anterior se hizo utilizando información obtenida de estudios sobre los costos de una vivienda tradicional adosada en Reino Unido, además de datos presentados por empresas de impresión 3D sobre el ahorro de costos en aspectos como mano de obra y materiales. En síntesis, la Figura 13 muestra el balance comparativo obtenido por el autor (2 018, pág. 5).

Figura 13

Costo de una vivienda tradicional y una vivienda impresa en 3D para el caso de Reino Unido



Nota. Adaptado de *Cost viability of 3D printed house in UK* (p. 5), por A. L. Mohd Tobi, 2 018.

Todos los derechos reservados [2 018] Elsevier Ltd.

Este balance comparativo se hizo con una misma relación costo-beneficio para ambos casos, además del mismo valor en el costo del terreno. De esta manera, se observa que una vivienda impresa en 3D puede tener una reducción de costos del 30%. Sin embargo, es importante aclarar que no se tuvo en cuenta el costo de la tecnología de impresión 3D debido a su difícil acceso; esta inversión es un coste único de instalación que se reducirá con la cantidad de casas construidas, es decir, que el 30% de reducción de costos planteado se vería afectado por este factor (Mohd Tobi, 2 018, pág. 6).

Por último, en otro estudio donde se compara la construcción de una unidad de baño de 2,4m² impresa en 3D con una unidad de baño prefabricada, S. Ruan & S. Qian afirman que la impresión 3D logró una reducción del 34,1% del costo total de fabricación (2 020, pág. 7).

2.1.3.2 Reducción del Tiempo de Construcción

Automatizar los procesos de construcción mejora significativamente el tiempo necesario para elaborar estructuras arquitectónicas, especialmente los muros. Según el estudio realizado por E. Camarena sobre la construcción de 200 viviendas sociales en Perú, la impresión 3D logra una reducción de 11 días, lo que equivale al 30% del tiempo total. Este se hizo con la comparación de un cronograma de obra para la construcción de un módulo de vivienda de 35m², donde la impresión 3D presentó ventajas frente al método tradicional debido se reducen las interrupciones y la extrusión de la mezcla es continua en todo momento (2 022, pág. 4).

Además de automatizar procesos, la impresión 3D permite construir los contornos de las columnas (encofrado) como parte del muro impreso (Chávez Camarena, 2 022, pág. 4), un ejemplo de esto se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Impresión de muros junto con el contorno de columnas



Nota. Adaptado de *Dubai Municipality to Become the World's Largest 3D-Printed Building* [Fotografía], por Apis Cor, 2 019, ArchDaily (<https://www.archdaily.com/930857/dubai-municipality-to-become-the-worlds-largest-3d-printed-building>). Todos los derechos reservados [2 022] Apis Cor Inc.

Por último, S. Ruan & S. Qian en su estudio de comparación del concreto impreso con el concreto prefabricado, afirman que la productividad la impresión 3D presenta una mejora del 48,1% (2 020, pág. 11).

2.1.4 Aspectos Sociales

2.1.4.1 Construcción de viviendas sociales

Anteriormente, se mencionó un estudio sobre la viabilidad de la impresión 3D para la construcción de 200 viviendas sociales en Perú. El déficit habitacional en este país alcanza una

brecha del 75%, siendo uno de los tres más altos de Latinoamérica. Frente a esta situación, E. Camarena afirma que la tecnología trae las siguientes ventajas (2 022, págs. 1, 9):

Reducción de Costos. En comparación con métodos tradicionales, la implementación de esta tecnología permite la reducción de los costos de construcción, lo cual es esencial para que las viviendas sociales sean más viables económicamente (2 022, pág. 5).

Mayor Eficiencia. La tecnología de impresión 3D acelera el proceso de construcción, la elaboración de la estructura se hace de manera más rápida y eficiente (2 022, pág. 1).

Menor impacto ambiental. Se reducen las emisiones de CO₂ y la generación de residuos (2 022, pág. 5).

Seguridad laboral. Se minimizan las situaciones de riesgo y los errores humanos debido a la automatización de procesos, es decir, que los trabajadores tienen empleos más seguros (2 022, pág. 6).

Por último, en cuanto a las desventajas y requerimientos, E. Camarena plantea lo siguientes puntos (2 022):

Falta de Normatividad. Si bien, la tecnología de impresión 3D es empleada por muchas empresas alrededor del mundo desde hace muchos años, aún falta normativa específica y estándares para su implementación en la construcción de viviendas sociales, Especialmente en países de Latinoamérica (2 022, pág. 3).

Limitaciones en Altura. Es conocido que las estructuras impresas en concreto pueden cumplir con los requerimientos normativos. Sin embargo, la resistencia en altura puede ser limitada (2 022, pág. 3).

Capacidad Especializada. Puede requerirse una inversión adicional para la formación y contratación de personal especializado (2 022, pág. 4).

2.1.4.2 Construcción de viviendas remotas

Como se ha mencionado anteriormente, la implementación de mezclas a base de tierra cruda y componentes locales puede ser una muy buena alternativa para la construcción de viviendas en lugares apartados, donde los costos de la tecnología de impresión 3D pueden ser muy altos. Sin embargo, pueden tener limitaciones en cuanto a sus capacidades mecánicas, por lo que es necesario que se sigan realizando investigaciones al respecto.

Por otra parte, M. Bazli, en un estudio sobre el uso de la impresión 3D para la construcción de viviendas remotas en Australia, estableció que esta puede presentarse adecuada para mejorar las condiciones de vida de las comunidades que no cuentan con una vivienda adecuada. Algunas de las ventajas presentadas por el autor ya han sido mencionadas en este trabajo, como la reducción de costos, flexibilidad de diseño, automatización y seguridad. Aun así, se mencionan otros beneficios como la participación y compromiso de la comunidad; esto mediante la impresión de elementos en fábrica y el ensamblaje en sitio con personal local previamente capacitado. Además, la tecnología permite la impresión de elementos no estructurales, por ejemplo, muebles a base de materiales locales como madera o tierra (2 023, págs. 7, 9, 15).

Por último, M. Bazli también afirma que existen consideraciones importantes en la fabricación de viviendas remotas, estas están relacionadas con adaptaciones culturales, diseños flexibles a los cambios y calidad de los materiales. Estos factores varían de acuerdo al lugar donde se implemente (Bazli, 2 023, págs. 8-9).

2.1.4.3 Reducción del Déficit Habitacional

Actualmente, la impresión 3D es vista como una buena alternativa para la reducción del déficit habitacional en países en desarrollo. Además del estudio presentado anteriormente, acerca de la construcción de viviendas sociales en Perú, también se presentan los resultados de otra investigación respecto a la reducción del déficit habitacional en Nigeria.

Nigeria. Inicialmente, A. O. Afolabi describe la situación de este país respecto al déficit de vivienda, el cual, en 2012 se calculó entre 17 y 20 millones de unidades. Por esta razón, el autor expone las ventajas que puede traer esta tecnología para la construcción en serie de viviendas sociales (2 019, pág. 1).

Específicamente, el estudio evalúa las áreas críticas donde la impresión 3D puede traer buenos resultados, ya que, Nigeria es un país con un alto índice de déficit habitacional, además de tener otros problemas como contaminación, desplazamientos y trabajos inseguros.

Con base en la revisión de investigaciones anteriores y los resultados obtenidos por empresas de construcción con impresión 3D, A. O. Afolabi plantea que la impresión 3D puede implementarse para la construcción de viviendas sociales esperando buenos resultados. Las principales ventajas encontradas fueron las siguientes: reducción de residuos de la construcción, aumento de la seguridad laboral, reducción de errores y reducción de costos de construcción (2 019, págs. 4-5).

Por último, se discute sobre como los problemas de vivienda en este país también influyen en temas de salubridad, hacinamiento y pobreza. Por esta razón, el autor afirma que resolver el déficit de vivienda de Nigeria depende de la rapidez en la entrega. En un país que sólo puede producir como máximo 100.000 unidades de viviendas al año, se hace necesaria la

integración de la impresión 3D a través de un marco público-privado para aumentar el stock de viviendas producidas anualmente y así contribuir a la reducción del déficit habitacional (Afolabi, 2019, pág. 5).

2.1.5 Aspectos Estructurales

2.1.5.1 Efecto de la impresión 3D sobre estructuras en concreto

La fabricación aditiva con concreto o mortero trae muchos retos en cuanto a la resistencia estructural. Como se mencionó en el apartado de aspectos técnicos, una mezcla para impresión 3D debe cumplir con características específicas, como bombeabilidad, extrusión y edificabilidad (Menna, 2018, pág. 220). Además de estas características, el concreto de impresión debe tener suficiente resistencia estructural para superar las normas técnicas del lugar donde sea implementada la tecnología.

En relación a esto, A. Aramburu en la investigación *Efecto de la impresión 3D en la resistencia a la compresión de estructuras de hormigón*, busca conocer cómo afecta este proceso de fabricación en el comportamiento estructural. La mezcla utilizada para la investigación está dosificada de la siguiente manera: 28 - 31% de cemento CEM I 52.5R, 2,7 – 3,1% de humo de sílice, 50 – 55% de arena, 6 – 7 de relleno de piedra caliza y entre el 9 – 10,5% de agua y aditivos químicos (2022, pág. 2).

Se realizaron muestras de cilindros utilizando impresión 3D, algunos con un anillo de contorno y otros con doble anillo; estos se muestran en la Figura 15:

Figura 15

Muestras impresas con uno y dos anillos



Nota. A la izquierda, ejemplares impresos cilíndricos y ejemplares impresos de un solo anillo. A la derecha, moldes de fundición para probetas sólidas y probetas impresas de doble anillo.

Tomado de *3D printing effect on the compressive strength of concrete structures* (p. 3), por A. Aramburu, 2 022. Todos los derechos reservados [2 022] Elsevier Ltd.

Estos dos tipos de muestra fueron sometidos a las siguientes pruebas:

Inspección de la superficie. Esta permitió detectar faltas de homogeneidad, poros y defectos. Los resultados mostraron que no había faltas de homogeneidad o poros en la dirección vertical. Sin embargo, se presentaron algunos poros pequeños en la unión de la pared interior y exterior de los cilindros de doble anillo (Aramburu, 2 022, págs. 6, 11, 12).

Análisis de plano de ruptura. Este permitió mostrar que las muestras de dos anillos funcionaban monolíticamente, las dos capas funcionaban como un solo elemento (2 022, pág. 12).

Resistencia a la compresión. En la Figura 16 se muestran los cilindros de concreto prefabricado y los cilindros impresos después de fallar por la carga de compresión.

Figura 16

Prueba de resistencia a la compresión de las muestras



Nota. A la izquierda, una muestra de cilindro impreso de un solo anillo, a la derecha, una muestra de concreto prefabricado. Tomado de *3D printing effect on the compressive strength of concrete structures* (p. 5-6), por A. Aramburu, 2 022. Todos los derechos reservados [2 022] Elsevier Ltd.

En comparación con los cilindros fundidos convencionalmente, los cilindros impresos en 3D fueron un 21% menos resistentes. Sin embargo, la dispersión de valores fue menor debido a que es un proceso automatizado que elimina el factor humano durante el proceso de fabricación (Aramburu, 2 022, pág. 7).

A continuación, en la Figura 17 se muestra la resistencia a la compresión de las muestras impresas en comparación con el concreto prefabricado (Aramburu, 2 022, pág. 6):

Figura 17

Comparación de la resistencia a la compresión

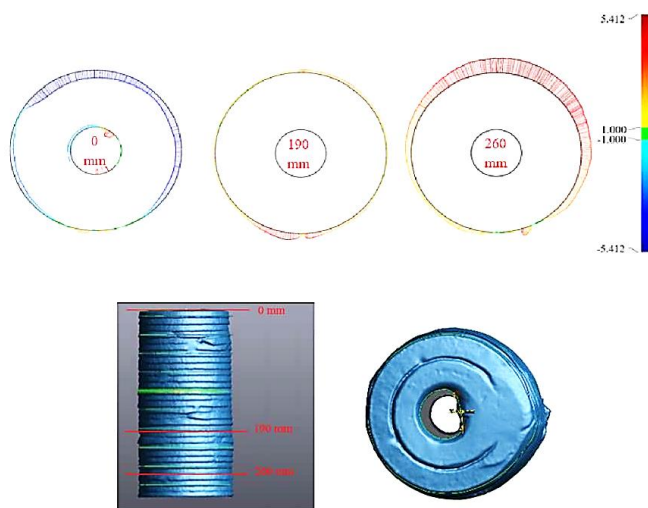
Resistencia a la compresión según el tipo de mezcla			
Muestra	Resistencia MPa	Resistencia PSI	DIFERENCIA
Concreto prefabricado	71,5	10.370,2	---
Impresión con 1 anillo	56,26	8.159,82	- 21%
Impresión con 2 anillos	66,98	9.714,62	- 6%

Nota. Elaboración propia. A. Aramburu (2 022, pág. 6).

Análisis morfológico. Por último, mediante el escaneo 3D se pudo comparar la morfología real de las muestras impresas con la morfología teórica. De esta manera, se pudo analizar las discontinuidades y defectos inherentes del proceso de deposición de capas. Así mismo, se evidenció el efecto de diente de sierra, el cual se refiere al aumento del diámetro de las capas inferiores debido al peso de las capas contiguas (Aramburu, 2 022, pág. 11). A continuación, se muestra en la Figura 18 las diferencias del diámetro de una muestra impresa.

Figura 18

Efecto de diente de sierra en los cilindros de doble anillo



Nota. Adaptado de *3D printing effect on the compressive strength of concrete structures* (p. 11), por A. Aramburu, 2 022. Todos los derechos reservados [2 022] Elsevier Ltd.

Por último, A. Aramburu afirma el efecto de diente de sierra es un factor muy importante a tener en cuenta. La distribución desigual de la carga puede provocar una disminución de la resistencia a la compresión y afectar de manera general su comportamiento mecánico, esto debido a que genera variaciones en la geometría y puede resultar en puntos más débiles de la estructura impresa (Aramburu, 2 022, pág. 13).

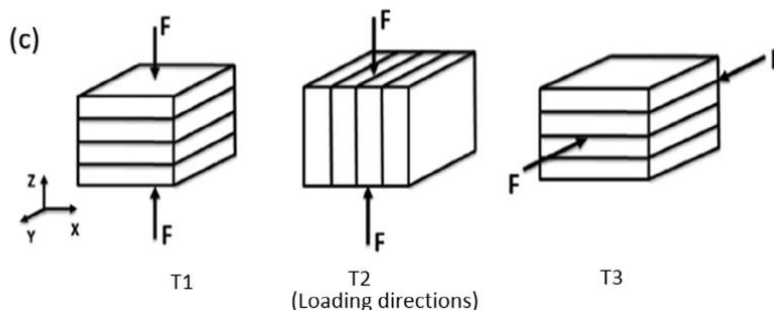
2.1.5.2 Comportamiento Mecánico de Geopolímero de Impresión Reforzado con Fibras

Como fue expuesto en el apartado de aspectos ambientales, existen mezclas de impresión a base de un cemento geopolímero. En el estudio *Rendimiento mecánico anisotrópico de un material de construcción sostenible reforzado con fibra impreso en 3D*, B. Panda estudia como las fibras de vidrio pueden mejorar la resistencia estructural de este material de impresión sostenible (2 017).

Como se observa en la Figura 19, la investigación experimental realizó tres tipos de pruebas mecánicas para evaluar la flexión y compresión.

Figura 19

Descripción gráfica de los tres tipos de prueba realizada

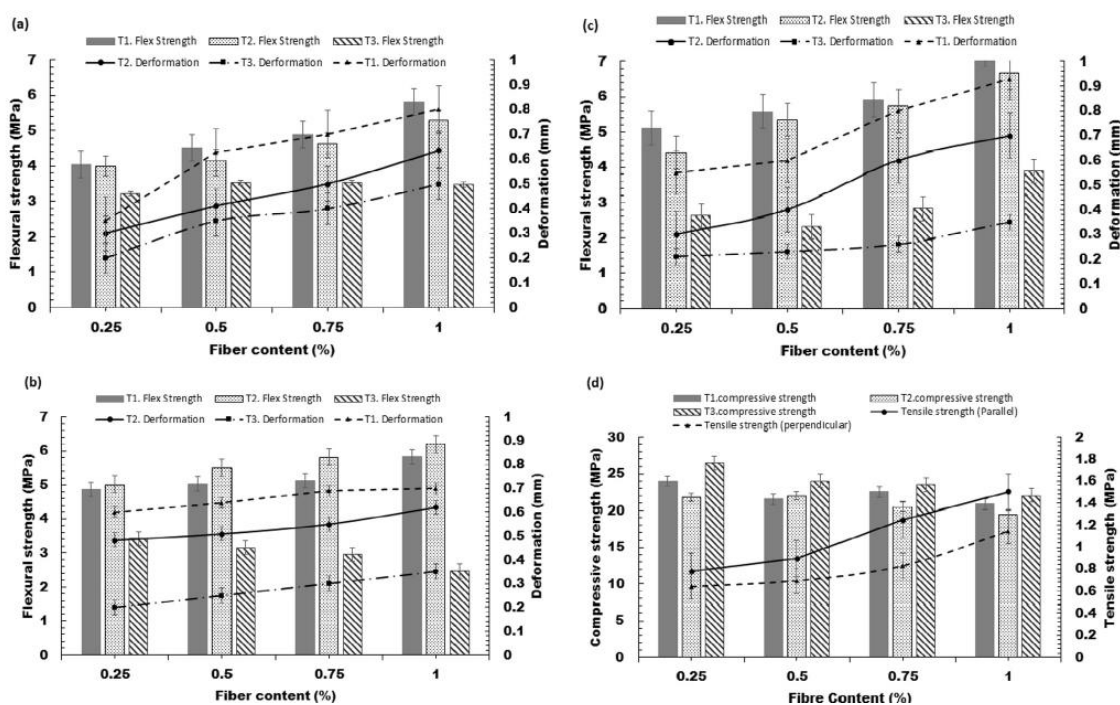


Nota. Se nombran T1, T2 y T3 según la dirección de la fuerza aplicada. Tomado de *Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material* (p. 147), por B. Panda, 2 017. Todos los derechos reservados [2 017] Elsevier Ltd.

Además de los tres tipos de prueba mecánica, las muestras de geopolímero fueron reforzadas con fibra de vidrio corta de diferentes longitudes (3mm, 6mm y 8mm) y tuvieron variaciones de porcentaje entre 0,25 y 1%. La Figura 20 muestra los resultados obtenidos.

Figura 20

Resultados según el tipo de prueba, el tipo de fibra y la cantidad añadida.



Nota. Adaptado de *Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material* (p. 148), por B. Panda, 2 017. Todos los derechos reservados [2 017] Elsevier Ltd.

La principal conclusión de los resultados fue el comportamiento anisotrópico de las muestras, es decir, que algunos valores cambiaron según la dirección en que fueron evaluados. Específicamente, B. Panda afirma que la resistencia varía según la dirección de la carga y el contenido de fibra. Esta modificación redujo ligeramente la resistencia a la compresión, sin embargo, la resistencia a la tensión y tracción si aumentó (2 017, págs. 147 - 148).

2.2 Construcción del Objeto de Estudio

2.2.1 Reducción de la brecha de vivienda

A continuación, se presentan algunos aspectos estudiados por distintos autores, estos describen las principales ventajas de la impresión 3D, lo cual permite afirmar que es una buena alternativa para la reducción de la brecha de vivienda.

2.2.1.1 Mayor rentabilidad para las empresas

E. Camarena afirma que en un proyecto 200 módulos de vivienda social sería un 39% más rentable con impresión 3D en comparación con métodos tradicionales (2 022, pág. 5)

2.2.1.2 Reducción del Costo de Construcción

S. Ruan & S. Qian afirman que el concreto impreso en 3D puede disminuir el costo de construcción en un 34% en comparación con el concreto prefabricado (2 020, pág. 7).

2.2.1.3 Construcción más rápida

Según E. Camarena, la impresión 3D puede reducir el tiempo de construcción en un 30% (2 022, pág. 4). Mientras que S. Ruan & S. Qian encontraron que la productividad aumenta en un 48% cuando se utiliza la tecnología (2 020, pág. 11).

2.2.1.4 Solución de vivienda permanente y temporal

A. O. Afolabi afirma que la tecnología de impresión 3D puede ser una buena alternativa para los problemas de vivienda que ocurren en países como Nigeria, donde además del déficit habitacional, existen desplazamientos internos, contaminación y trabajos inseguros (2 019).

2.2.1.5 Construcción de viviendas remotas

Para reducir el déficit habitacional también es necesario garantizar el derecho a la vivienda a comunidades apartadas. M. Bazli afirma que la impresión 3D puede presentarse adecuada para la construcción de viviendas en zonas remotas. Esto mediante la impresión de elementos en fábrica y el ensamblaje en sitio con personal local (2 023).

Por otra parte, también ha sido estudiada una mezcla a base de tierra cruda y almidón de papa. Esta sigue en fase de investigación, pero tiene una buena proyección para ser implementadas en proyectos de gran escala. La implementación de una mezcla de este tipo también puede mejorar la accesibilidad de la tecnología en lugares apartados (Aguilar, 2 022).

2.3 Análisis de Referentes

En este apartado se expondrán distintos proyectos de viviendas impresas en 3D que se han construido alrededor del mundo. Cada proyecto se analizará en los siguientes aspectos: cimentación, muros, columnas, entrepiso y cubiertas. De esta manera, se pueden establecer los alcances que tiene la tecnología para elaborar la estructura de una vivienda.

2.3.1 Proyectos Empresa SQ4D

Empresa ubicada en Nueva York, Estados Unidos, se enfoca en la construcción de casas con impresión 3D. Utiliza la impresora ARCS y un mortero patentado que tiene una resistencia a la compresión que supera el estándar de la industria por el doble (SQ4D, 2 023).

Vivienda Unifamiliar en Islandia, Nueva York. Se muestra en la Figura 21, construida en 2 022, cuenta con 185.8 metros cuadrados. Toda la estructura de muros de la casa, incluyendo los encofrados de cimentación, se imprimieron en 15 días de trabajo (SQ4D, 2 023).

Figura 21

Vivienda Unifamiliar en Islandia, Nueva York



Nota. Adaptado de *Largest 3D printed house as of August, 2022* [Fotografía], por SQ4D, 2 022, (<https://www.sq4d.com/islandia-print/>). Todos los derechos reservados [2 023] SQ4D LLC.

Cimentación. El proceso de excavación se hizo convencionalmente para imprimir los encofrados de la cimentación como se muestra en la Figura 22. Luego fueron fundidos; se eliminaron las actividades de encofrado y desencofrado, debido a que el encofrado impreso trabaja en conjunto con el material fundido.

Figura 22

Encofrado de muros de cimentación impreso – SQ4D



Nota. Adaptado de *The 3D Printing Is Complete On SQ4D'S 3D Printed House* [Fotografía], por Charles Weinraub, 2 022,

(https://www.youtube.com/watch?v=zOV3DOqe3zU&t=3s&ab_channel=CharlesWeinraub).

Todos los derechos reservados [2 023] HandsomeHomebuyer.

Muros. Estos son impresos en su totalidad, los refuerzos de acero y los dinteles son puestos manualmente. Además, los muros cuentan con un relleno de espuma en aerosol que funciona como aislante térmico (Charles Weinraub, 2 022).

Figura 23

Muros impresos vivienda en Islandia, Nueva York



Nota. Adaptado de *Largest 3D printed house as of August, 2022* [Fotografía], por SQ4D, 2 022, (<https://www.sq4d.com/islandia-print/>). Todos los derechos reservados [2 023] SQ4D LLC.

Figura 24

Relleno aislante de espuma en aerosol



Nota. Adaptado de *How to Install Insulation in a 3D Printed Home* | SQ4D Academy [Fotografía], por Mr. Crete Davidson, 2 022, SQ4D (https://www.youtube.com/watch?v=Q_k4-KVumfU&ab_channel=SQ4D). Todos los derechos reservados [2 023] SQ4D LLC.

Columnas y Entrepiso. No se implementaron columnas, solo muros portantes. Además, la vivienda no cuenta con entrepiso debido al diseño en una sola planta.

Cubierta. Cubierta tradicional con elementos en madera prefabricados.

Figura 25

Cubierta tradicional en madera



Nota. Adaptado de *The 3D Printed House in Islandia is So Close To Being Finished* [Fotografía], por Charles Weinraub, 2 022,

(https://www.youtube.com/watch?v=uemuaPx2zjQ&t=58s&ab_channel=CharlesWeinraub).

Todos los derechos reservados [2 023] HandsomeHomebuyer.

A continuación, se presenta en la Tabla 4 todo el balance de este proyecto, con el análisis de cada uno de los elementos de la vivienda.

Tabla 4

Análisis de utilización de la impresora 3D – Islandia, Nueva York

Área	Impresora	t Impresión	Material	Ubicación
185.8m ²	ARCS de SQ4D	[15 días]	Concreto patentado 9000psi	Nueva York, EE. UU.
Cimentación	Muros	Columna	Entrepiso	Cubierta
Encofrado impreso	Impresos en sitio	Muros portantes	Solo tiene un piso	Prefabricada en madera

Nota. Elaboración propia.

Vivienda Unifamiliar en Calverton, Nueva York. Construida en 2 020, cuenta con 176 metros cuadrados. Toda la estructura de muros de la casa se imprimió en solo 48 horas. Por otra parte, Esta empresa ofrece una garantía de mínimo 50 años de durabilidad de una vivienda impresa en 3D (SQ4D, 2023).

Figura 26

Vivienda Unifamiliar en Calverton, Nueva York



Nota. Adaptado de *Largest permitted 3D printed home* [Fotografía], por SQ4D, 2 020, (<https://www.sq4d.com/largest-3d-printed-home/>). Todos los derechos reservados [2 023] SQ4D LLC.

Cimentación. Como se muestra en la Figura 27, el proceso de excavación se hizo convencionalmente, luego se fundió el concreto utilizando la impresora.

Figura 27

Proceso de cimentación en vivienda impresa en 3D – SQ4D

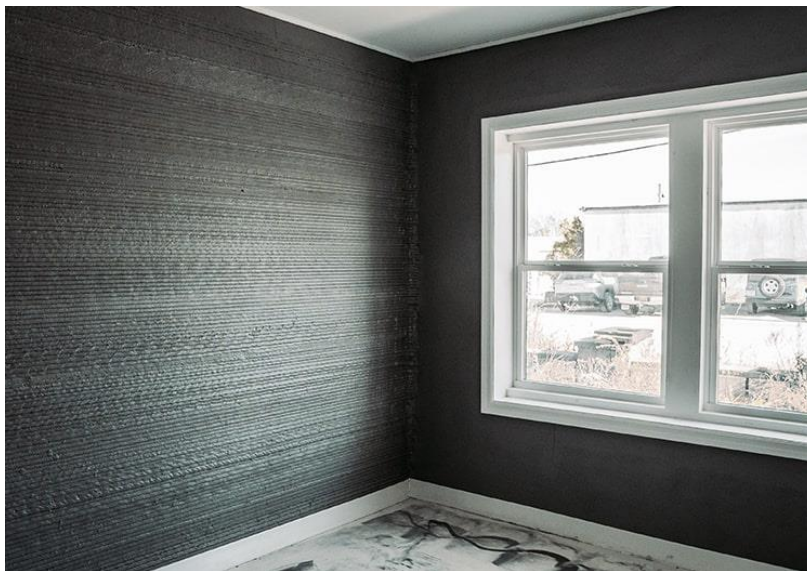


Nota. Adaptado de 3D Printing a House in Different Weather | SQ4D Academy [Fotografía], por Mr. Crete Davidson, 2 023, SQ4D (https://www.youtube.com/watch?v=JDxJG5jQL-0&ab_channel=SQ4D). Todos los derechos reservados [2 023] SQ4D LLC.

Muros. Se muestran en la Figura 28, estos son impresos en su totalidad, sin embargo, los refuerzos de acero y los dinteles son puestos manualmente.

Figura 28

Proceso de impresión de muros en vivienda – SQ4D



Nota. Adaptado de *Largest permitted 3D printed home* [Fotografía], por SQ4D, 2 020, (<https://www.sq4d.com/largest-3d-printed-home/>). Todos los derechos reservados [2 023] SQ4D LLC.

Columnas y Entrepiso. Este segundo proyecto tampoco cuenta con estos elementos.

Cubierta. Se implementó una cubierta tradicional en madera mostrada en la Figura 29.

Figura 29

Cubierta Prefabricada en Madera para Vivienda Impresa en 3D – SQ4D



Nota. Adaptado de *Largest permitted 3D printed home* [Fotografía], por SQ4D, 2 020, (<https://www.sq4d.com/largest-3d-printed-home/>). Todos los derechos reservados [2 023] SQ4D LLC.

A continuación, se presenta en la Tabla 5 el balance de esta segunda vivienda.

Tabla 5

Análisis de uso de la impresora 3D – Calverton, Nueva York

Área	Impresora	t Impresión	Material	Ubicación
176m ²	ARCS	48 horas [8 días]	Concreto patentado	Nueva York, EE. UU.
Cimentación	Muros	Columna	Entrepiso	Cubierta
Fundida con impresora	Impresos en sitio	Muros portantes	No aplica	Prefabricada en madera

Nota. Elaboración propia.

2.3.2 *Proyectos Empresa Grupo PERI – Tecnología COBOD*

Empresa con sede en Weissenhorn, Alemania, fabricante mundial de sistemas de encofrado y andamio en más de 70 países. También se enfoca en la construcción de viviendas con impresión 3D en Alemania y otros países de Europa (PERI 3D, 2 023). Esto lo hace utilizando impresoras de la empresa COBOD, una empresa danesa, líder mundial de la tecnología de impresión 3D en concreto

Vivienda Unifamiliar en Renania del Norte-Westfalia, Alemania. Se muestra en la Figura 30, construida durante 2 021, en la ciudad de Beckum, es una vivienda unifamiliar de 160m² divididos en 2 pisos. Se construyó en conjunto con la empresa Mense Korte en un tiempo total de 8 meses (PERI 3D, 2 020).

Figura 30

Vivienda unifamiliar en Beckum, Renania del Norte, Alemania



Nota. Adaptado de *A milestone for 3d concrete printing* [Fotografía], por Mense-Korte, 2 021, (<https://mense-korte.de/en/3d-printed-house/>). Todos los derechos reservados [2 022] Mense-Korte GbR.

Cimentación. Primero se fundió una placa de cimentación convencionalmente; luego se hizo la placa base de la casa imprimiendo el encofrado. En la Figura 31 se observa todo el contorno impreso y los respectivos refuerzos de acero, así como las instalaciones.

Figura 31

Encofrado de placa base impreso



Nota. Adaptado de *Accompany the construction process* [Fotografía], por Mense-Korte, 2 021, (<https://mense-korte.de/en/3d-printed-house/photos-videos/#3dfotos>). Todos los derechos reservados [2 022] Mense-Korte GbR.

Por otra parte, en la Figura 32 se muestran las bases de apoyo de la impresora, los cuales fueron impresas en fábrica.

Figura 32

Bases prefabricadas – PERI



Nota. Adaptado de *Why This BOD2 3D Printed House Will Change The World* [Fotografía], por B1M, 2 021, COBOD (https://www.youtube.com/watch?v=PugWGjXS3Bc&t=17s&ab_channel=COBOD). Todos los derechos reservados [2 021] por The B1M.

Muros. Para este proyecto se elaboraron dos tipos de muros, de dos y tres capas como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Muros de dos y tres capas para vivienda unifamiliar



Nota. Adaptado de *Accompany the construction process* [Fotografía], por Mense-Korte, 2 021, (<https://mense-korte.de/en/3d-printed-house/photos-videos/#3dfotos>). Todos los derechos reservados [2 022] Mense-Korte GbR.

Columnas. Solo se elaboraron muros portantes con refuerzos de acero.

Entrepiso. La impresión 3D se utilizó únicamente para imprimir el encofrado lateral de la losa de entrepiso. Como se muestra en la Figura 34, se utilizan techos intermedios entre los pisos, estos son prefabricados en concreto y son soporte para fundir la placa, luego se instalan los refuerzos de acero y se funde la placa utilizando una bomba convencional.

Figura 34

Armado de losa de entrepiso con encofrado impreso



Nota. Adaptado de *Accompany the construction process* [Fotografía], por Mense-Korte, 2 021, (<https://mense-korte.de/en/3d-printed-house/photos-videos/#3dfotos>). Todos los derechos reservados [2 022] Mense-Korte GbR.

Cubierta. En este caso, la cubierta pudo utilizar la impresión 3D debido a que es una cubierta plana, esto se hizo de manera similar al entrepiso como se observa en la Figura 35, con la impresión del encofrado lateral, además de elementos prefabricados para la elaboración de voladizos.

Figura 35

Elementos de voladizo prefabricados



Nota. Adaptado de *The Most Innovative 3D Printed House In The World* [Mense-Korte] [Fotografía], por Jarett Gross, 2 021, (https://www.youtube.com/watch?v=qWBA-6NgIJg&ab_channel=JarettGross). Todos los derechos reservados [2 021] Jarett Gross.

A continuación, se presenta en la Tabla 6 todo el balance de esta segunda vivienda de la empresa PERI, con el análisis de cada uno de los elementos de la vivienda.

Tabla 6

Análisis de utilización de la impresora 3D – Beckum, Alemania

Área	Impresora	t Impresión	Material	Ubicación
160m ² [2 pisos]	COBOD BOD 2	36 horas	Concreto Heidelberg	Beckum, Alemania
Cimentación	Muros	Columna	Entrepiso	Cubierta
Encofrado impreso	Impresos en sitio	Sin columnas	Encofrado impreso	Encofrado impreso

Nota. Elaboración propia.

Vivienda Multifamiliar en Wallenhausen, Alemania. Se muestra en la Figura 36, construida durante 2 021 en el estado de Baviera, es un gran edificio residencial de 380m², el cual, cuenta con 5 apartamentos divididos en tres pisos (PERI 3D, 2 023). Se construyó en conjunto con la empresa RUPP y utilizando tecnología de la empresa COBOD.

Figura 36

Vivienda Multifamiliar en Wallenhausen, Alemania



Nota. Adaptado de *3D Construction Printing increasing affordability and reducing carbon embodiment in the construction industry* [Fotografía], por PERI, 2 021, IGBC (<https://www.igbc.ie/3d-construction-printing/>). Todos los derechos reservados [2 021] por PERI GmbH.

Cimentación. Esta vivienda cuenta con un sótano, y una placa base de impresión, como se muestra en la Figura 37, estos elementos fueron construidos con métodos convencionales.

Figura 37

Cimentación, sótano y placa base de vivienda multifamiliar – PERI



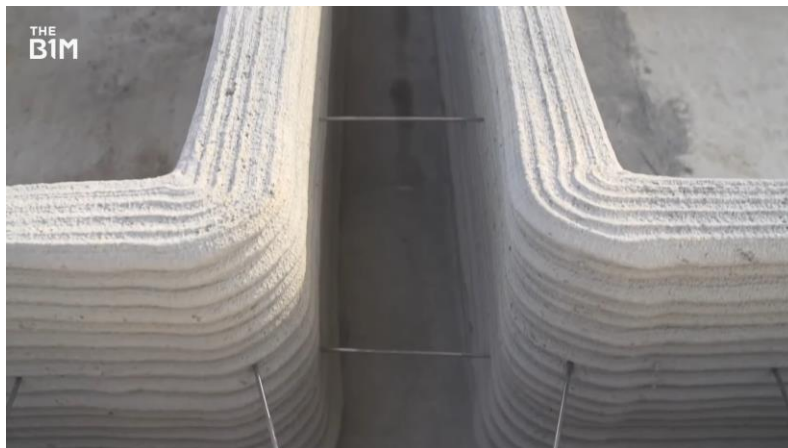
Nota. Adaptado de *Why This BOD2 3D Printed House Will Change the World* [Fotografía], por B1M, 2 021, COBOD

(https://www.youtube.com/watch?v=PugWGjXS3Bc&t=17s&ab_channel=COBOD). Todos los derechos reservados [2 021] por The B1M.

Muros. La vivienda cuenta con dos tipos de muros, unos con dos capas exteriores y otros con tres capas, los cuales tienen barras de acero de refuerzo que conectan los extremos como se muestra en la Figura 38 y Figura 39.

Figura 38

Barras de refuerzo en muros de la empresa PERI



Nota. Adaptado de *Why This BOD2 3D Printed House Will Change the World* [Fotografía], por BIM, 2 021, COBOD

(https://www.youtube.com/watch?v=PugWGjXS3Bc&t=17s&ab_channel=COBOD). Todos los derechos reservados [2 021] por The BIM.

Figura 39

Muros impresos de dos y tres capas - PERI



Nota. Adaptado de *Why This BOD2 3D Printed House Will Change the World* [Fotografía], por BIM, 2 021, COBOD

(https://www.youtube.com/watch?v=PugWGjXS3Bc&t=17s&ab_channel=COBOD). Todos los derechos reservados [2 021] por The BIM.

Columnas. No se implementan columnas.

Entrepiso. Se imprimió el encofrado de la losa de entrepiso. Como se observa en la Figura 40, se realizó de la misma manera que el proyecto anterior.

Figura 40

Armado de placa de entrepiso con encofrado impreso y elementos prefabricados



Nota. Adaptado de *Time-lapse / Zeitraffer Europe's largest 3D-printed apartment building*

[Fotografía], por PERI, 2 021,

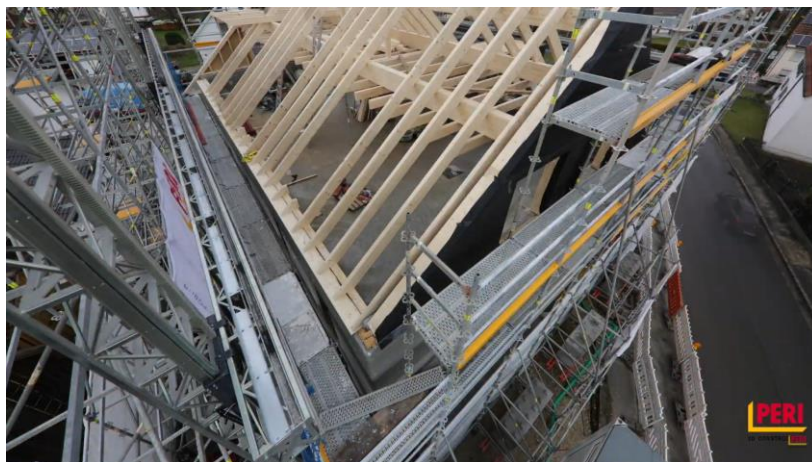
(https://www.youtube.com/watch?v=3g5N8uiiQmQ&ab_channel=PERI3DConstruction). Todos

los derechos reservados [2 021] PERI SE.

Cubierta. Para este edificio multifamiliar, la cubierta fue prefabricada en madera junto con otros elementos también prefabricados en concreto.

Figura 41

Cubierta prefabricada en madera para vivienda multifamiliar



Nota. Adaptado de *Time-lapse / Zeitraffer Europe's largest 3D-printed apartment building* [Fotografía], por PERI, 2 021,

(https://www.youtube.com/watch?v=3g5N8uiiQmQ&ab_channel=PERI3DConstruction). Todos los derechos reservados [2 021] PERI SE.

Aportes. La mezcla de concreto utilizada, permite ahorro de acabados en la fachada exterior, aunque en el interior se optó por cubrir el acabado de la impresión, pero dejando aberturas como ornamentos de las paredes como se observa en la Figura 42.

Figura 42

Acabados de impresión de muros como elementos decorativos de pared



Nota. Adaptado de *5 Apartment Units 3D Printed On Site in Germany | Late Stage Construction Tour* [Fotografía], por Jarett Gross, 2 021,

(https://www.youtube.com/watch?v=Zisu_vIJ5Uw&t=551s&ab_channel=JarettGross). Todos los derechos reservados [2 021] Jarett Gross.

A continuación, se presenta en la Tabla 7 todo el balance de esta vivienda.

Tabla 7

Análisis de uso de la impresora 3D – Wallenhausen, Alemania

Área	Impresora	t Impresión	Material	Ubicación
380m ² [3 pisos]	COBOD BOD 2	72 horas	Concreto Heidelberg	Wallenhausen, Alemania
Cimentación	Muros	Columna	Entrepiso	Cubierta
Convencional	Impresos en sitio	Sin columnas	Encofrado impreso	Tradicional en madera

Nota. Elaboración propia.

2.3.3 Proyecto Empresa ICON

Con sede Austin, Texas, fundada en 2 017, es una empresa constructora que utiliza la impresión 3D como parte fundamental para el desarrollo de sus proyectos. La robótica que utiliza para el proceso de impresión es patentada y se complementa con software y materiales avanzados.

Vivienda Unifamiliar en Austin, Texas. Se muestra en la Figura 43, construida en 2 022, es una vivienda unifamiliar de 185.8 metros cuadrados con una sola planta. Diseñada por Lake Flato fue construida utilizando la impresora Vulcan y la mezcla de concreto Lavacrete, ambas cosas patentadas por ICON (ICON Technology, 2 022).

Figura 43

Vivienda unifamiliar en Austin, Texas



Nota. Adaptado de *Construcción Residencial House Zero* [Fotografía], por Casey Dunn, 2 022, ICON (<https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

Cimentación. En este caso la cimentación fue hecha de manera convencional, con vigas y una losa fundida en sitio siguiendo la forma de los muros y con los respectivos refuerzos de acero. Esta se muestra en la Figura 44.

Figura 44

Cimentación vivienda unifamiliar de ICON



Nota. Adaptado de *ICON's House Zero - 3D-printed Home Pushing Boundaries of Sustainable Architecture & Design* [Fotografía], por ICON, 2 022, (https://www.youtube.com/watch?v=c4X_tT5syCA&t=1s&ab_channel=ICON-3DTech). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

Muros. Se muestran en la Figura 45, los muros de esta vivienda son su mayor potencial, no solo porque necesitan muy pocos procesos de acabados, sino porque su forma muestra las posibilidades de la impresión 3D, estos tienen formas curvas y patrones muy atractivos a la vista.

Fueron impresos en sitio, tienen dos capas con un patrón de relleno rectangular, además de refuerzos de acero verticales y horizontales.

Figura 45

Muros vivienda unifamiliar de ICON



Nota. Adaptado de *ICON's House Zero - 3D-printed Home Pushing Boundaries of Sustainable Architecture & Design* [Fotografía], por ICON, 2 022, (https://www.youtube.com/watch?v=c4X_tT5syCA&t=1s&ab_channel=ICON-3DTech). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

Columnas y Entrepiso. No se implementan columnas, solo muros portantes con refuerzos de acero. Además, la vivienda solo cuenta con un piso debido a que la impresora ARCS tiene un límite de tres metros de altura; todos los proyectos son diseñados en una planta.

Figura 46

Cubierta en madera de la vivienda unifamiliar – ICON



Nota. Adaptado de *Construcción Residencial House Zero* [Fotografía], por Casey Dunn, 2 022, ICON (<https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

Aportes. Los principales aportes de esta vivienda están en el alto diseño, los patrones y las formas que, combinadas con acabados en madera, aportan un alto diseño al proyecto. Se muestra en la Figura 47 el atractivo visual de la vivienda, algunos elementos decorativos como macetas exteriores fueron impresas junto con los muros.

Figura 47

House Zero – Atractivo visual



Nota. Adaptado de *Construcción Residencial House Zero* [Fotografía], por Casey Dunn, 2 022, ICON (<https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

A continuación, se presenta en la Tabla 8 todo el balance de esta vivienda.

Tabla 8

Análisis de uso de la impresora 3D – Austin, Texas

Área	Impresora	t Impresión	Material	Ubicación
185.8m ² [1 piso]	Vulcan	[8 días]	Lavacrete	Texas EE. UU.
Cimentación	Muros	Columna	Entrepiso	Cubierta
Convencional	Impresos en sitio	Sin columnas	No aplica	Tradicional en madera

Nota. Elaboración propia.

2.3.4 Proyecto Empresa WASP

Con sede Massa Lombarda, Italia, es una empresa especializada en diferentes tipos impresoras 3D para fabricación aditiva, las cuales se utilizan en industrias o sectores como las artes, salud, construcción, impresión de alimentos, entre otras.

Prototipo de Vivienda en Massa Lombarda, Italia. Se muestra en la Figura 48, construida en 2 021, es un prototipo de vivienda de 60m² con una sola planta. Tiene un diseño orgánico y un enfoque 100% sostenible, para la impresión de los muros se utilizó una mezcla a base de elementos naturales extraídos del mismo sitio, esta se compone específicamente en un 25% tierra extraída del sitio, 40% arroz picado con paja, 25% cascarilla y 10% cal hidráulica (WASP, 2 023).

Figura 48

Casa Tecla



Nota. Adaptado de *This is the first house to be 3D printed from raw earth* [Fotografía], por Iago Corazza, 2 021, It's Nice That (<https://www.itsnicethat.com/news/tecla-house-mario-cucinella-wasp-architecture-270421>). Todos los derechos reservados [2 021] Mario Cucinella Architects & WASP.

Cimentación. Como se muestra en la Figura 49, se imprimió el encofrado de la cimentación en concreto con todos los refuerzos de acero y tuberías.

Figura 49

Encofrado de cimentación impreso en concreto para la casa Tecla



Nota. Adaptado de *\$0 HOUSE | How One Startup Aims To Produce Homes at Null Cost*

[Fotografía], por Jarett Gross, 2021, (https://www.youtube.com/watch?v=p_ZbTD-2keo&ab_channel=JarettGross). Todos los derechos reservados [2021] Jarett Gross.

Muros. Para este prototipo de vivienda se utilizó un patrón de impresión muy diferente a todos los proyectos analizados anteriormente, como se observa en la Figura 50, no solo la mezcla utilizada es a base de elementos naturales tomados del sitio, sino que se utilizó un patrón de relleno muy complejo. Además, se observa en la Figura 51 como se agrega una mezcla seca como relleno para tener mejores características acústicas y térmicas.

Figura 50

Muros impresos por la empresa WASP



Nota. Adaptado de *The first 3D printed House with earth | Gaia* [Fotografía], por Alberto Chiusoli, 2 018, WASP (<https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/#:~:text=GAIA%20was%20designed%20to%20be,structure%20which%20supports%20the%20roof.>). Todos los derechos reservados [2 018] WASP Srl.

Figura 51

Relleno de muro con mezcla seca



Nota. Adaptado de *Earthen Architecture Consultants* [Fotografía], por WASP, 2 018, Arquitectura de terra (<https://arquitecturadetera.cat/2021/10/13/imprimir-en-3d-con-tierra/>). Todos los derechos reservados [2 018] WASP Srl.

Columnas. No se implementan columnas y la vivienda tiene una sola planta.

Cubierta. Como se observa en las Figuras 52 y 53, la vivienda tiene un diseño orgánico que hace que los muros cubran parte de la cubierta al tener forma de domos, por esto se ahorra material al necesitarse una cubierta más pequeña.

Figura 52

Cubierta casa Tecla



Nota. Adaptado de *This is the first house to be 3D printed from raw earth* [Fotografía], por Iago Corazza, 2 021, It's Nice That (<https://www.itsnicethat.com/news/tecla-house-mario-cucinella-wasp-architecture-270421>). Todos los derechos reservados [2 021] Mario Cucinella Architects & WASP.

Figura 53

Forma orgánica de muros y cubierta vista desde el exterior



Nota. Adaptado de *This is the first house to be 3D printed from raw earth* [Fotografía], por Iago Corazza, 2 021, It's Nice That (<https://www.itsnicethat.com/news/tecla-house-mario-cucinella-wasp-architecture-270421>). Todos los derechos reservados [2 021] Mario Cucinella Architects & WASP.

Aportes. Sin duda alguna, el principal aporte de esta vivienda fue la implementación y creación de una mezcla a base de elementos naturales que cumpliera con las resistencias estructurales y a su vez tuviera las características necesarias para ser imprimible. Así mismo, esta vivienda tiene muy buenas características térmicas y acústicas gracias a la mezcla utilizada. En la Figura 54 se muestran otros aportes como la impresión de elementos interiores: mesones de cocina y bases de muebles.

Figura 54

Impresión de mesones de cocina



Nota. Adaptado de *This is the first house to be 3D printed from raw earth* [Fotografía], por Iago Corazza, 2 021, It's Nice That (<https://www.itsnicethat.com/news/tecla-house-mario-cucinella-wasp-architecture-270421>). Todos los derechos reservados [2 021] Mario Cucinella Architects & WASP.

A continuación, se presenta en la Tabla 9 el balance de este prototipo de vivienda.

Tabla 9

Porcentaje de utilización de la impresora 3D – Massa Lombarda, Italia

Área	Impresora	t Impresión	Material	Ubicación
60m ² [1 piso]	CRANE WASP	200 horas [8.3 días]	Mezcla natural	Massa Lombarda, Italia
Cimentación	Muros	Columna	Entrepiso	Cubierta
Encofrado impreso	Impresos en sitio	Sin columnas	No aplica	Tipo domo

Nota. Elaboración propia.

3. Marco Normativo

En Colombia aún no existe una normativa para la fabricación aditiva en concreto, por lo que la principal norma a tener en cuenta es El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Este establece las características que deben tener las edificaciones para que su comportamiento estructural sea favorable frente a sismos y además estas puedan soportar sus propias cargas.

En cuanto a esto, los títulos que pueden arrojar mejor información respecto a esta tecnología son los títulos A: Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente, y C: Concreto Estructural.

3.1 Título A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente

En este apartado se especifican las modificaciones más importantes de la NSR-10 con respecto a algunas normas anteriores y normativas internacionales como el International Building Code (IBC-2 009) (AIS, 2 010, pág. 2).

Por otra parte, se describen los requisitos generales de aspectos como: el diseño sismo resistente, método de la fuerza horizontal equivalente, método de análisis dinámico, interacción suelo-estructura y requisitos de elementos no estructurales (AIS, 2 010, págs. 6 - 7). Además, este apartado menciona recomendaciones sísmicas para algunas estructuras que salen del alcance del reglamento, como puede ser el caso de la impresión 3D.

3.2 Título C – Concreto Estructural

En este título se establecen los requisitos mínimos para el diseño y la construcción de estructuras en concreto estructural, siendo el principal requerimiento la resistencia específica a la compresión, la cual no debe ser inferior a 17MPa (aprox. 2 500 psi) (AIS, 2 010, pág. C.39).

Además, este capítulo se complementa con el documento *Requisitos esenciales para edificios de hormigón reforzado*, diseñado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec), y el American Concrete Institute (ACI). En este se especifican aspectos en temas como: información general del concreto reforzado, cargas, muros, columnas, requisitos de diseño sismo resistente, cimentaciones, entre otros (AIS, 2 010, pág. C.1).

3.2.1 Aprobación de Sistemas Especiales de Diseño o de Construcción

Respecto a esto, el documento menciona lo siguiente: “pueden emplearse en el concreto estructural sistemas alternos de diseño y construcción cuando se cumplan los requisitos establecidos en el Capítulo 2 del Título II de la Ley 400 de 1 997” (AIS, 2 010, pág. C.4).

3.2.2 Obligatoriedad de las Normas Técnicas Citadas en el Título C

Por último, es importante mencionar que las Normas Técnicas Colombianas (NTC), citadas en este título hacen parte de él. De igual manera, se permite el uso de normas de la Sociedad Americana de Ensayo y Materiales (ASTM) para los casos donde no exista una norma NTC, como puede ser el caso de la impresión 3D con concreto (AIS, 2 010, pág. C.4).

4. Marco Contextual

En Colombia las viviendas se pueden clasificar dependiendo de varios factores; según su valor, según sus características o según su ubicación. Sin embargo, la principal clasificación será según el estrato socioeconómico, ya que está relacionada directamente con la población objetivo establecida para este trabajo.

Según InfoPa'lante, los criterios para clasificar el estrato de una vivienda “no dependen de los ingresos que tenga una persona o familia, sino que se basan en las condiciones de la vivienda en la que habita el grupo familiar y el entorno o zona en la se encuentra dicha vivienda. En la Tabla 10 se muestra la clasificación por estratos según el Departamento de Planeación Nacional (2 023).

Tabla 10

Clasificación por estratos socioeconómicos

Estrato	Clasificación
Estrato 1	Bajo-Bajo
Estrato 2	Bajo
Estrato 3	Medio-Bajo
Estrato 4	Medio
Estrato 5	Medio-Alto
Estrato 6	Alto

Nota. Elaboración propia. (DANE, 2 023).

4.1 Contexto Político – Económico

Una de las principales clasificaciones de la vivienda es según su rango de precio, estas se dividen en tres tipos:

4.1.1 Vivienda de Interés Social (VIS)

Como se observó anteriormente, este es el tipo de vivienda con mayor producción en el país. Esta busca garantizar el derecho a la vivienda de los hogares con ingresos más bajos. Su valor no puede exceder los 135 Salarios Mínimos Legales Mensuales Vigentes (SMLMV) (Minvivienda, 2 023).

4.1.2 Vivienda de Interés Prioritario (VIP)

“Es aquella vivienda de interés social cuyo valor máximo es de 90 Salarios Mínimos Legales Mensuales Vigentes (SMLMV)” (Minvivienda, 2 023). Para los dos tipos de vivienda social es posible acceder a subsidios, ya que está dirigida a personas o familias con ingresos menores a cuatro SMLMV (Velandia, 2 022).

4.1.3 Vivienda No VIS

Este tipo de vivienda es la que supera el rango de 135 SMLMV de las viviendas sociales y no supera los 500 SMLMV (Velandia, 2 022).

4.2 Contexto Socio – Cultural

Aquí se describen los demás tipos de vivienda en Colombia.

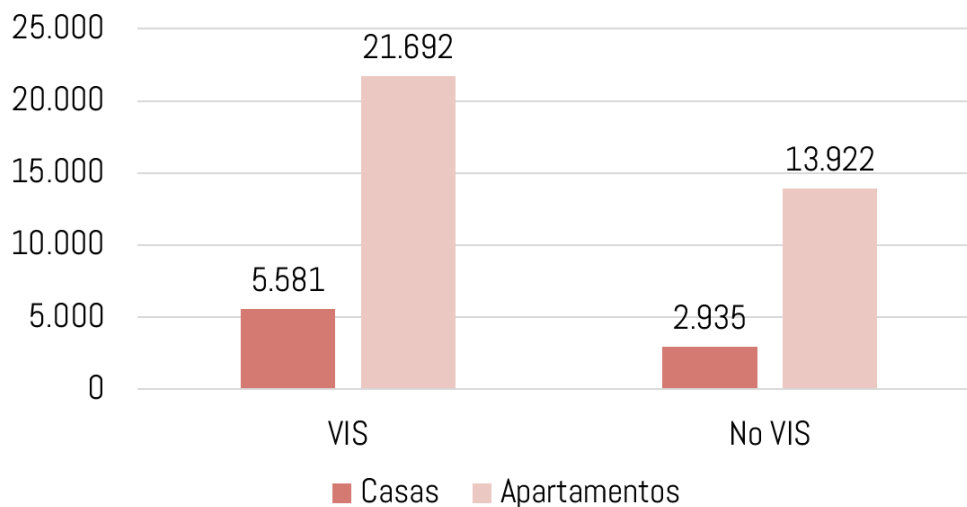
4.2.1 Según el Tipo de Construcción y el Modelo de Distribución

Según el tipo de construcción las viviendas se pueden clasificar en casas, apartamentos, vivienda tradicional indígena, vivienda tradicional étnica, entre otras. Así mismo, según el modelo de distribución se dividen en unifamiliares (casas), multifamiliares (apartamentos), bifamiliar y compartida (Sierra, 2 023). En la Figura 55 se muestra la cantidad de unidades de vivienda culminadas durante el primer trimestre de 2 023. Se observa una producción de

apartamentos superior, lo cual puede ser una desventaja para el sistema de impresión 3D, debido a que es una tecnología mayormente implementada para la construcción de casas.

Figura 55

Unidades culminadas según el tipo de construcción – I-2023



Nota. Tomado de *Boletín técnico Vivienda VIS y No VIS - II trimestre de 2 023* (p. 33) por DANE. Todos los derechos reservados [2 023] Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

4.2.2 Características de las Viviendas en Déficit

Debido a que los hogares en déficit habitacional cuantitativo hacen parte de la población objetivo, es necesario describir como se caracterizan estas y así conocer cuáles son las condiciones en las que habitan estos hogares. Según el DANE, estas viviendas se pueden dividir de acuerdo a estas características:

Estructura o Tipo de Vivienda. Viviendas tipo contenedor, carpa, embarcación, vagón, cueva o refugio natural.

Material de las Paredes Exteriores. Viviendas con muros en madera burda, tabla o tablón; caña, esterilla, materiales de desecho o simplemente viviendas sin muros.

Cohabitación. Viviendas donde habitan tres o más hogares.

Hacinamiento No Mitigable. Viviendas en las que hay más de cuatro personas por cuarto para dormir. Este aplica para viviendas en centros poblados y cabeceras, no aplica para viviendas rurales dispersas (DANE, 2 022).

4.3 Análisis Multiescalar

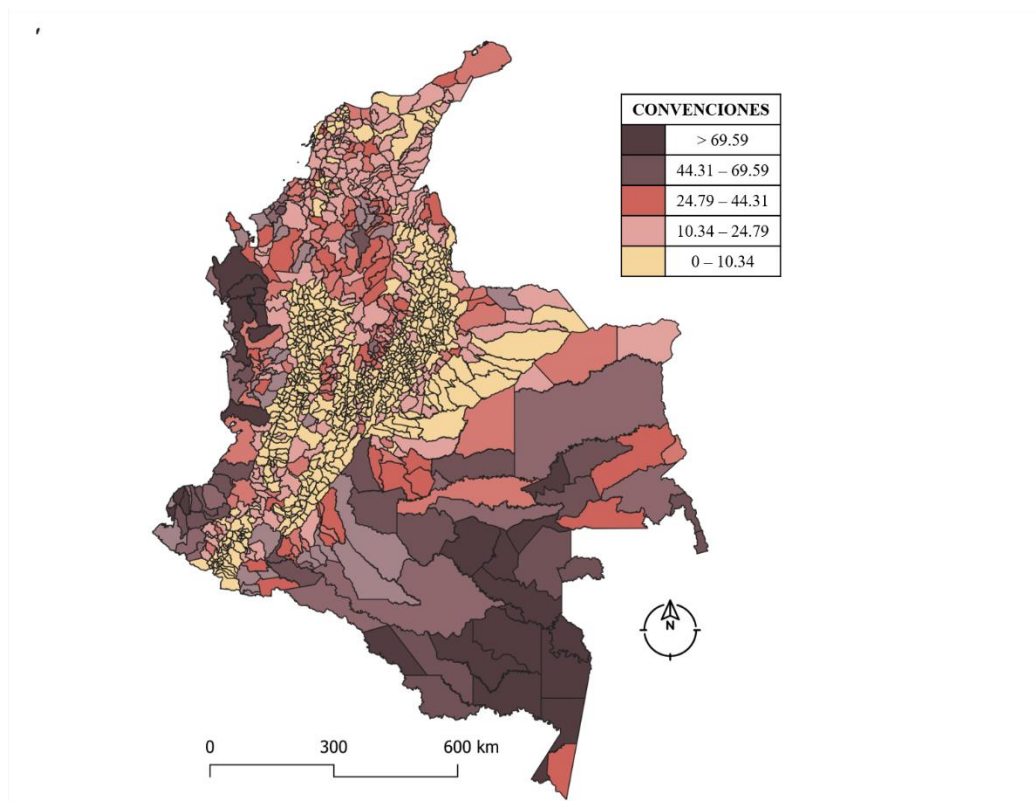
Este análisis se divide en tres tipos: macro, meso y micro. Siendo Colombia, Santander y Bucaramanga respectivamente. Además, se presentará un análisis de las cifras de déficit habitacional cuantitativo y los retos frente a estas cifras.

4.3.1 Escala Macro

Como se mencionó al inicio del trabajo, el déficit habitacional cuantitativo en Colombia representa el 7.5% del total nacional de viviendas, lo que se traduce en 1 268 000 viviendas. En la Figura 56 se muestra el mapa de Colombia según el déficit cuantitativo por departamento.

Figura 56

Mapa departamental de Colombia por déficit habitacional cuantitativo 2 021



Nota. Elaboración propia. (DANE, 2 018).

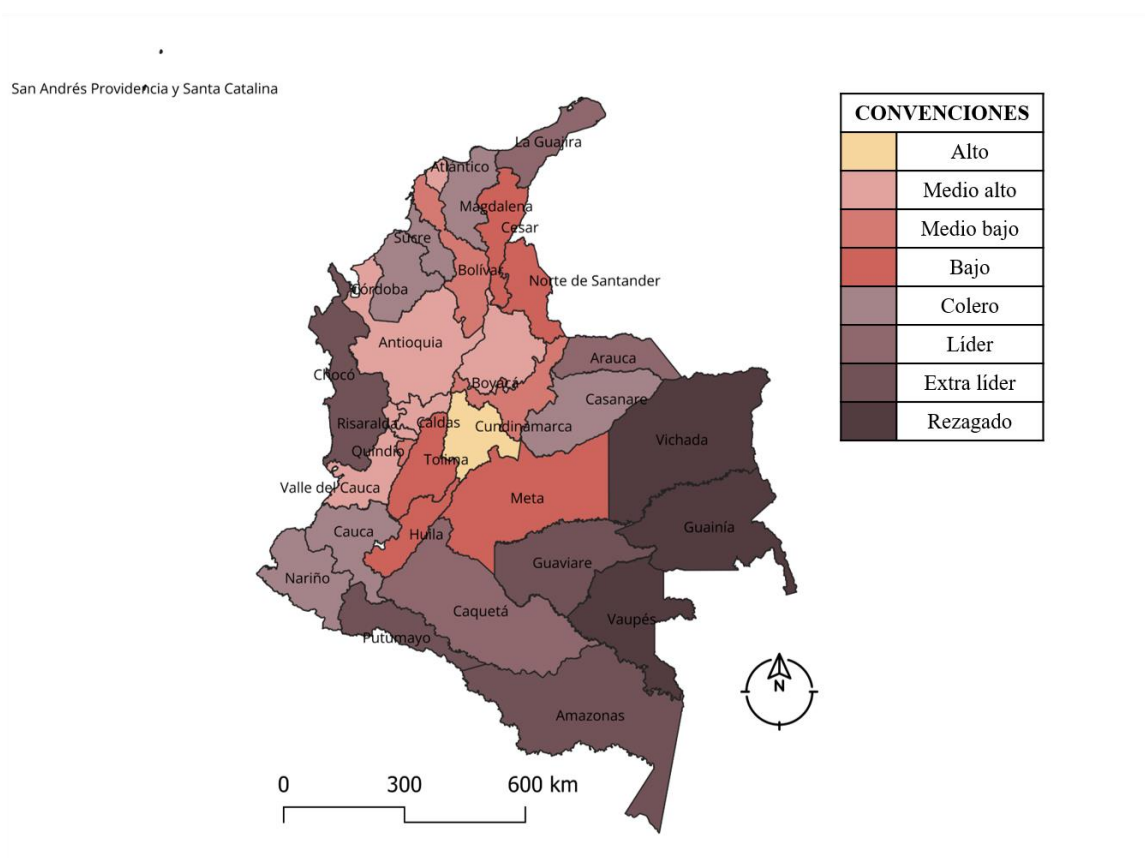
Una de las principales conclusiones que se obtienen de las cifras de déficit habitacional cuantitativo, es que los departamentos con porcentajes de déficit más altos son los que están más alejados de las zonas centrales del país. Para explicar mejor esta idea, se muestra en la Figura 57 un mapa de la competitividad departamental. Según información del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) esta competitividad se define de la siguiente manera:

La competitividad departamental hace énfasis en que las ventajas competitivas de una región (capacidad de una economía regional para adaptarse a las condiciones cambiantes del mercado, las nuevas tecnologías y los competidores) son producto de su desarrollo histórico, y dependen de su capacidad para crear futuras trayectorias de desarrollo (Huggins et al, 2014, citado en Ramírez & de Aguas, 2 021), según cálculos determinados

por el escalafón de competitividad para el año 2019, en los departamentos también se encuentran diferencias de acuerdo con cinco factores claves (Ramírez & de Aguas, 2021): La fortaleza económica, la infraestructura y logística, el bienestar social y capital humano, la ciencia, tecnología e innovación, la institucionalidad y gestión pública (Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 2021).

Figura 57

Mapa de Colombia según la competitividad departamental



Nota. Adaptado de *Clasificación de competitividad departamental* [Fotografía], por IGAC, 2021 (www.colombiaenmapas.gov.co). CC BY 4.0

Se observa que el departamento líder en competitividad es Cundinamarca, seguido de Antioquia, Atlántico, Santander y otros departamentos del centro del país. Por otra parte, los departamentos más apartados y con mayor déficit habitacional cuantitativo son los que menos competitividad tienen frente a la implementación de nuevas tecnologías, incluso departamentos como Vichada, Guainía y Vaupés están rezagados de esa competitividad.

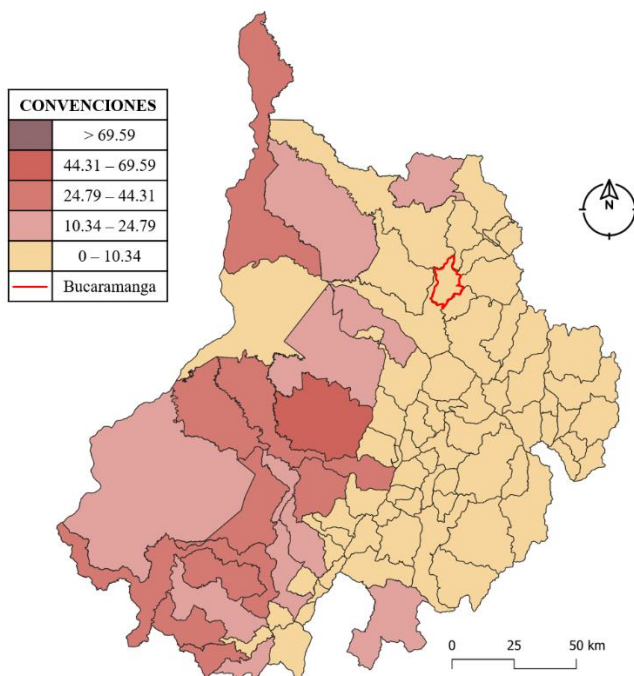
Debido a esto, la implementación de la impresión 3D para la construcción de vivienda social en estos departamentos puede presentar muchos problemas, la falta de conectividad puede aumentar mucho los costos de una vivienda construida con esta tecnología. Aun así, ocurre lo contrario en departamentos centrales, los cuales tienen gran competitividad para adaptarse a nuevos mercados o nuevas tecnologías.

4.3.2 Escala Meso

Para la escala meso se analiza el departamento de Santander, el cual, en 2 021 tuvo un déficit habitacional cuantitativo del 6,1% según cifras del DANE (2 018). En la Figura 58 se muestra el mapa de déficit en este departamento.

Figura 58

Déficit habitacional cuantitativo en Santander 2 021



Nota. Elaboración propia. (DANE, 2 018).

En total, el 6,1% representa a 47 000 hogares en déficit cuantitativo, de los cuales 16 000 están en zonas urbanas y 31 000 en zonas rurales (Habitacional, n.d.-b). Esta es una situación que ocurre en todos los departamentos del país, donde los sectores rurales son los que peores condiciones de habitabilidad presentan.

Sin embargo, como se mostró en la Figura 57, Santander hace parte de los departamentos líderes en competitividad frente a nuevos mercados y tecnologías. Gracias a esto, la impresión 3D no tendría dificultades extra para su implementación en la construcción de vivienda en el departamento.

4.3.3 Escala Micro

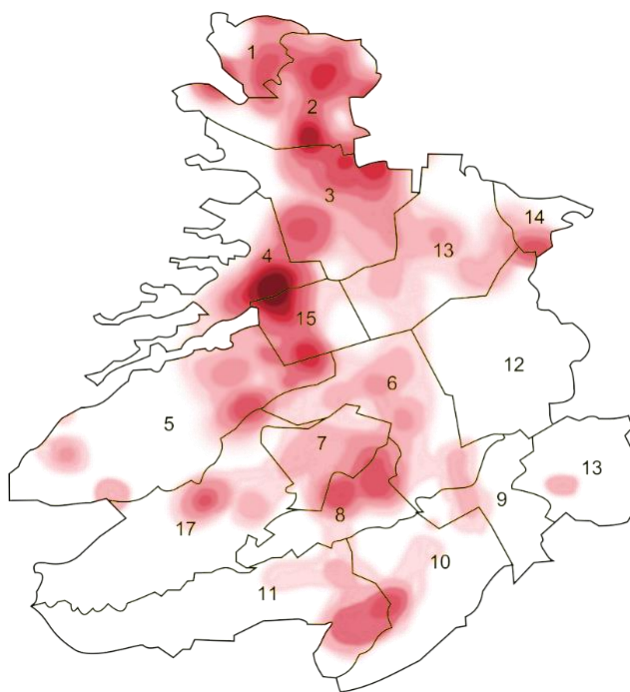
En esta escala se estudiará la ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander. La ciudad tuvo un déficit habitacional cuantitativo de 9 795 viviendas, según las últimas cifras del DANE (2 021).

Bucaramanga, al ser la capital del departamento tiene una buena proyección para la implementación de la impresión 3D en la construcción de vivienda. En 2 018, el total de viviendas en la ciudad era de 189 442, de las cuales 9 795 se encontraban en déficit habitacional cuantitativo.

En la Figura 59 se muestra la concentración de déficit cuantitativo de vivienda en Bucaramanga, siendo las comunas 1, 2 y 4 las más afectadas.

Figura 59

Concentración de déficit cuantitativo en Bucaramanga



Nota. Tomado de *La información del DANE en la toma de decisiones regionales* (p. 127), por DANE, 2 021. Todos los derechos reservados [2 023] Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

5. Marco Proyectual

En esta última parte, se exponen los resultados para generar un balance de la viabilidad de la impresión 3D para la construcción de vivienda en Colombia. Las cinco categorías analizadas permitirán evaluar su proyección, generando conclusiones específicas y generales.






5.1 Aspectos Técnicos

5.1.1 Alcance de la Impresión 3D para Elaborar los Elementos de una Vivienda

En la Figura 60 se describen el alcance que tiene la impresión 3D para fabricar la cimentación y los muros de una vivienda, estos son los elementos más implementados de acuerdo al análisis de proyectos. Para la cimentación solo es posible realizar el encofrado de las vigas, zapatas o losas, este trabaja en conjunto con el concreto fundido y reduce el tiempo de fabricación al eliminar tareas de encofrado y desencofrado. Por otra parte, es posible realizar la totalidad de los muros en la mayoría de los casos.

Figura 60

Alcance de la impresión 3D en la cimentación y muros de una vivienda.

CIMENTACIÓN		
Alcance	Ventajas	Funcionamiento
Impresión del encofrado	<ul style="list-style-type: none"> Ahorro de tiempo Reducción de desperdicios No es necesario desencofrar 	<ul style="list-style-type: none"> El encofrado impreso trabaja en conjunto con el concreto vertido
MUROS		
Tipo	Ventajas	Patrón
Dos capas exteriores	<ul style="list-style-type: none"> Ahorro de material Construcción más rápida 	
2 Capas ext. – Relleno triangular	<ul style="list-style-type: none"> Mayor resistencia estructural en comparación con muros sin relleno Ahorro de material Muros más estables 	
2 Capas exteriores – Relleno cuadrado		
2 capas exteriores – Relleno sólido	<ul style="list-style-type: none"> Muros más estables Buen comportamiento acústica o climático dependiendo del relleno 	
Patrones complejos	<ul style="list-style-type: none"> Formas orgánicas Buen comportamiento bioclimático Sostenibilidad 	
Todos los muros pueden implementar refuerzos de acero entre capas		

Nota. Elaboración propia.

En la Figura 61 se muestra el alcance de la impresión 3D para elaborar el resto de elementos; columnas, entrepisos y cubiertas. Las columnas pueden elaborarse mediante la impresión del encofrado, el cual hace parte de la estructura de muros y trabaja en conjunto con el concreto fundido. Además, es posible tener refuerzos de acero convencionales al interior de la columna. Por último, los entrepisos y cubiertas pueden ser elaborados de la misma manera, solo con la impresión del encofrado de la losa; si estos elementos no son planos, no es posible implementar esta tecnología.

Figura 61

Alcance de la impresión 3D para elaborar columnas, entrepisos y cubiertas

COLUMNAS		
Alcance	Ventajas	Descripción
Impresas en fábrica	<ul style="list-style-type: none"> Se pueden imprimir elementos que trabajen en conjunto con las vigas 	Este tipo de columnas solo ha sido implementada para estructuras pequeñas
Encofrado impreso junto con muros	<ul style="list-style-type: none"> Se imprimen en conjunto con los muros 	El encofrado de trabaja en conjunto con el concreto fundido
Encofrado impreso en fabrica	<ul style="list-style-type: none"> Puede implementarse para proyectos de gran escala 	
ENTREPISO . CUBIERTAS (PLANAS)		
Tipo	Ventajas	Descripción
Encofrado impreso en sitio o en fabrica	<ul style="list-style-type: none"> Ahorra tareas de encofrado y desencofrado 	Se necesitan otros elementos como parales y losas para fundir

Nota. Elaboración propia.

Según el análisis de referentes, la impresión 3D puede implementarse para elaborar toda la estructura de una vivienda. A pesar de ser poco implementada para elaborar elementos como entrepisos y cimentaciones, se ha observado que tiene ventajas en ahorro de tiempo debido a que se eliminan tareas de encofrado y desencofrado.

Sin embargo, la impresión de los muros sigue siendo el aspecto más fuerte de esta tecnología, este compone la estructura principal de una vivienda y puede hacerse de muchas maneras, ajustándose a las necesidades específicas de cada proyecto.

Por último, como se observa en la Figura 62, durante la impresión de muros es posible elaborar elementos como mesones y elementos no estructurales, lo cual representa una mayor ventaja en cuanto al tiempo de construcción.

Figura 62

Elemento de baño impreso durante la elaboración de los muros



Nota. Adaptado de *Accompany The Construction Process* [Fotografía], por Mense-Korte, 2 021, (<https://mense-korte.de/en/3d-printed-house/photos-videos/#3dfotos>). Todos los derechos reservados [2 022] Mense-Korte GbR.

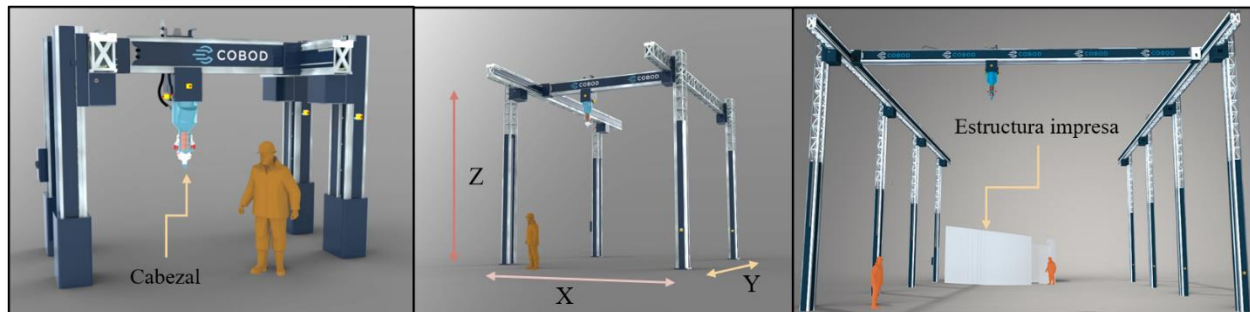
5.1.2 Tipos de Impresoras

De acuerdo a la revisión documental y la revisión de la web, se encontró que existen diferentes tipos de impresoras para la construcción de vivienda. A continuación, se describen los tres tipos principales.

Impresora de Módulos. Este tipo de impresora consiste en una estructura de módulos en las tres direcciones (X,Y y Z) que se acoplan de acuerdo a la necesidad del proyecto. En la Figura 63 se muestra como ejemplo la impresora BOD 2 de la empresa COBOD.

Figura 63

Impresora de módulos BOD2



Nota. Adaptado de *Especificaciones BOD2* [Fotografía], por COBOD, 2 022, (<https://cobod.com/solution/bod2/>). Todos los derechos reservados [2 022] COBOD International.

Esta impresora es implementada para fabricar viviendas en todo el mundo, incluso viviendas sociales en países de África. Tiene una capacidad máxima de impresión de 8,1 metros en altura, más la medida de las bases; 14,6 metros de ancho y sin límites en la longitud (Eje Y). Utiliza la Interfaz de control web Soft-NA (COBOD, 2 022).

Esta empresa afirma que solo se necesitan 3 o 4 operadores durante el proceso de impresión. Además, esta máquina está diseñada para imprimir con cualquier tipo de material. En relación al concreto permite un tamaño de grava de hasta 10 milímetros (COBOD, 2 022).

Impresora de Rieles. Este tipo de impresora consiste en una máquina que tiene un ancho y alto establecido (Ejes Z y X), esta se mueve a través de unos rieles ubicados en el suelo, los

cuales le permiten moverse en el eje Y. Como ejemplo, se muestra en la Figura 64 la impresora Vulcan de la empresa estadounidense ICON.

Figura 64

Impresora de rieles Vulcan



Nota. Adaptado de *Vulcan Construction System* [Fotografía], por ICON, 2 022, (<https://www.iconbuild.com/technology>). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

Según Icon Build, esta máquina es capaz de imprimir casas de un solo piso de hasta 279 metros cuadrados, sus longitudes máximas son 30,8 metros en el eje Y, 11,6 en el eje X y 3,3 metros de alto (Eje X). La interfaz utilizada es BuildOS. Además, la impresora se complementa con otros equipos como Magma, una fábrica portátil que formula el concreto de acuerdo a las necesidades del lugar y al mismo tiempo lo bombea hacia la boquilla de impresión (ICON Technology, 2 022).

5.1.3 Características del Concreto de Impresión


Como se describió anteriormente, una mezcla de impresión debe tener 3 características principales: bombeabilidad, capacidad de extrusión y edificabilidad. Así mismo, el tiempo de fraguado no debe ser muy corto para que la adherencia sea adecuada y no muy largo para que el concreto adquiera la resistencia suficiente para soportar las capas contiguas.

A continuación, se muestra la descripción técnica de algunos concretos de impresión 3D que se encuentran en el mercado, estos contienen cementos o aditivos creados por Cemex en sociedad con otras empresas.

Concreto Be More 3D – Cemex. Utiliza una mezcla de cemento patentada por las dos empresas, permite un tamaño máximo de grava de 2mm. Además, no necesita de arena, solo un 15% en peso de agua por bulto (Be More 3D, 2 023). En la Figura 65 se muestra su descripción.

Figura 65

Concreto Be More 3D

CONCRETO BE MORE 3D - CEMEX				
EMPRESA	GRAVA	FRAGUADO	COMPRESIÓN	IMAGEN
Be More 3D – CEMEX	2mm	120 min. Según clima	25 MPa 3625.94 psi	
TEMPERATURA	CONT. MÍN. CEMENTO	PREPARACIÓN	OBSERVACIONES	
5° - 40°C	450 kg/m ³	15% en peso de agua por bulto	No añadir arena ni otros elementos	

Nota. Elaboración propia.

Aditivos D. Fab. También, la empresa Cemex en sociedad con COBOD, desarrolló unos aditivos que permiten reducir los costos de un mortero de impresión hasta en un 90%. Estos permiten utilizar cualquier concreto convencional en un concreto apto para impresión 3D y alcanzan una resistencia de 35 MPa en las primeras 24 horas (COBOD, 2 022). En la Figura 66 se muestra la descripción del material y de los aditivos

Figura 66

Descripción de los aditivos D.Fab

CONCRETO CONVENCIONAL CON ADITIVOS D.FAB				
EMPRESA	GRAVA	COSTO	DOSIFICACIÓN	IMAGEN
COBOD – CEMEX	10mm	60/90 €/m ³	1% de aditivos 99% concreto	
ADITIVOS EN PLANTA DOSIFICADORA		ADITIVOS EN LA UNIDAD DE EMPUJE		
D.FAB 3D A.1.00	D.FAB 3D B.1.00	ISOXEL 5450	ISOXEL 899	
Plastificante Superplastificante	Refuerzo	Acelerador del fraguado	Acelerador del endurecimiento	

Nota. Elaboración propia.

5.1.4 Aportes de las Empresas en el Desarrollo de la Tecnología

Las empresas que implementan la fabricación aditiva en concreto han podido tener distintos aportes tecnológicos que mejoran la eficiencia de los proyectos. A continuación, se describen los principales aportes encontrados en la revisión web.

Automatización de otros procesos. La empresa SQ4D, mediante el desarrollo de su impresora ARCS, no solo automatiza la elaboración de la estructura de muros, sino que además realiza el riego del agua durante la impresión para optimizar el fraguado.

Figura 67

Impresora ARCS – SQ4D



Nota. Nota. Adaptado de *Largest 3D printed house as of August, 2 022* [Fotografía], por SQ4D, 2 022, (<https://www.sq4d.com/islandia-print/>). Todos los derechos reservados [2 023] SQ4D LLC.

Fábrica Inteligente. La empresa ICON ha podido patentar su propia tecnología de impresión 3D en concreto; la mezcla, la máquina y, además, un container que puede realizar muchas funciones para optimizar el proceso de impresión. Según la empresa, esta máquina llamada Magma es la encargada de dosificar la mezcla Lavacrete para ajustarse a las condiciones de cada lugar y al mismo tiempo bombearla hacia la impresora Vulcan.

Figura 68

Fábrica inteligente Magma



Nota. Adaptado de *Vulcan Construction System* [Fotografía], por ICON, 2 023, (<https://www.iconbuild.com/technology>). Todos los derechos reservados [2022] ICON Technology, inc.

Adaptación a la Arquitectura Local. Así mismo, la empresa ICON realizó un proyecto de viviendas sociales en México, la cuales pudieron conservar características de la arquitectura local. Como se muestra en la Figura 69, la implementación de la tecnología no eliminó estos aspectos.

Figura 69

Arquitectura tradicional con impresión 3D en concreto



Nota. Adaptado de *The New York Times* [Fotografía], por NYT, 2 021, (<https://www.nytimes.com/2021/09/28/business/3D-printing-homes.html>). Todos los derechos reservados [2023] The New York Times Company

5.1.5 Ventajas de la impresión 3D en Aspectos Técnicos

Automatización de Procesos. Como se expuesto a lo largo de este trabajo, la impresión 3D permite crear estructuras en concreto u otros materiales de manera automatizada con gran precisión. Según E. Camarena se reducen las interrupciones y la extrusión de la mezcla es continua en todo momento (2 022, pág. 4).

Libertad de Diseño. La impresión 3D permite la creación de formas complejas y libres que son difíciles o imposibles de lograr con los métodos de construcción tradicionales (Menna, 2 018, pág. 218).

Reducción del Peso de las Estructuras. Al necesitar menos material, las estructuras reducen su peso y tienen buena resistencia.

Reducción de la Mano de Obra. Esta tecnología permite tener menos operadores en comparación con métodos de construcción tradicional (Ghafur H. Ahmed, 2 022). Un ejemplo de esto se mencionó anteriormente con los requerimientos establecidos para la impresora BOD2, la cual solo necesita entre 3 o 4 operadores durante el proceso de impresión (COBOD, 2 022). Por último, en cuanto a las horas de trabajo, la empresa Winsun afirma que se reducen en un 91% con la implementación de esta tecnología (Mohd Tobi, 2 018, pág. 4).

Aumento de la seguridad laboral. El proceso de impresión reduce los errores debido a la automatización, es decir que se minimizan los accidentes de obra (Ghafur H. Ahmed, 2 022, pág. 508).

Fabricación de elementos NO Estructurales. Como se mostró en el análisis de referentes, se pueden fabricar elementos como mobiliarios, mesones, muros divisorios, entre otros.

5.1.6 Desventajas de la Impresión 3D en Aspectos Técnicos

Tecnología emergente. La tecnología de impresión 3D aún no se ha generalizado en el mercado, por lo que aún se necesitan más investigaciones para potenciar su desarrollo (Menna, 2 018, pág. 219).

Altura Limitada. El análisis de los tipos de impresoras reveló que existen unas que no superan los 3,3m del rango de impresión en altura, por lo que se requieren procesos más difíciles para poder superar este límite.

Refuerzos de Acero. Este aspecto aún no ha sido suficientemente estudiado. Las empresas estudiadas implementan refuerzos de acero entre capas, pero no existe información específica respecto a esto. Según C. Menna, los sistemas tradicionales de refuerzo de acero no se

adaptan fácilmente a formas complejas, debido a esto se han explorado métodos alternativos, como el uso de fibras en morteros imprimibles (2 018).

5.1.7 *Requerimientos y Recomendaciones Técnicas*

Prueba y Ensayo. La implementación de la impresión 3D se debe adaptar a las necesidades de cada proyecto y lugar. Existen múltiples factores que afectan la bombeabilidad, edificabilidad y capacidad de extrusión de una mezcla, por lo que es necesario realizar pruebas para lograr la mayor eficiencia posible.

Racionalidad de un modelo de impresión. El uso de software facilita el diseño y la planeación. Así mismo, la impresión 3D a escala es una herramienta útil para evaluar el proceso de impresión de un modelo 3D.

Capacitación. Si bien se reduce significativamente la mano de obra necesaria, esta debe estar previamente capacitada para operar los equipos y software que requiere la tecnología.

5.1.8 *Balance Final de Viabilidad Técnica*

Respecto a la viabilidad técnica de la impresión 3D para la construcción de vivienda en Colombia, la empresa Concreto afirma lo siguiente:

La tecnología de impresión 3D para la construcción en Colombia ha logrado grandes avances en el camino hacia la estandarización de la mezcla y la producción a grande escala, Constructora Concreto es pionera en América Latina de esta tecnología al servicio de la construcción que cada vez se acerca más en tema de costos a la construcción tradicional (Concreto, 2 021).

Para seguir desarrollando esta tecnología es necesario garantizar el cumplimiento de todos los requerimientos técnicos. Si bien es una tecnología emergente, las empresas que la implementan y los autores citados en este trabajo afirman que es más eficiente en comparación con métodos de construcción tradicional. Por lo que se puede afirmar que ya existe conocimiento previo y herramientas suficientes para seguir su desarrollo en el país.

5.2 Aspectos Ambientales

5.2.1 Ventajas Ambientales de la Impresión 3D

Disminución de Residuos y Ahorro de Material. La tecnología de impresión 3D mediante el uso de robótica permite disminuir los residuos y el consumo de material entre un 30% y 60% (Ghafur H. Ahmed, 2 022, pág. 508).

Reducción de las emisiones de CO₂ y el consumo de energía. En comparación con el concreto prefabricado, el concreto impreso en 3D reduce las emisiones de CO₂ hasta en un 85,9% y el consumo de energía hasta en un 87%, esto debido principalmente a la eliminación del encofrado (Ruan & Qian, 2 020, pág. 12).

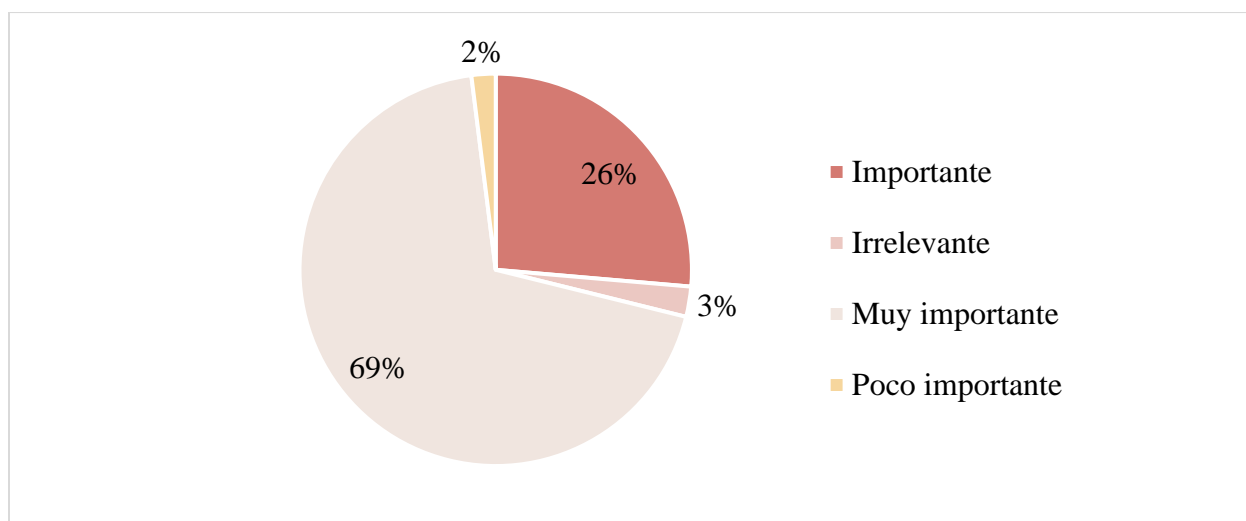
Uso de materiales de impresión alternativos. Como se ha mostrado en este trabajo, es posible imprimir con materiales diferentes al concreto o mortero. La tecnología de impresión 3D permite el uso de mezclas alternativas, las cuales pueden ser a base de tierra cruda o geopolímeros. A pesar de solo haber sido implementadas en investigaciones y proyectos de pequeña escala, estas mezclas tienen una muy buena proyección para ser implementadas en proyectos de construcción.

5.2.2 Percepción de la Importancia de la Reducción de la Contaminación Según Encuesta

Con base en las ventajas planteadas en este trabajo acerca de la reducción de contaminación que puede generar la impresión 3D, una pregunta de la encuesta buscó conocer la importancia que le dan las personas a este aspecto. Los resultados de esta pregunta se muestran en la Figura 70.

Figura 70

Resultados de la encuesta - ¿Qué tan importante es para usted disminuir la huella de carbono en la industria de la construcción?



Nota. Elaboración propia.

El 95% de las personas encuestadas considera que el aspecto ambiental es importante en el desarrollo de un proyecto de construcción, solo el 5% consideró que este es un aspecto poco importante.

5.2.3 Desventajas Ambientales de la Impresión 3D

Las principales desventajas ambientales de la impresión 3D están relacionadas con las mezclas alternativas al concreto, estas aun necesitan más desarrollo para tener las tres características principales de una mezcla de impresión (bombeabilidad, capacidad de extrusión y edificabilidad). De igual manera, estas mezclas aun requieren el uso de aditivos químicos.

Específicamente, las mezclas a base de componentes naturales pueden generar agrietamiento y perder resistencia por factores como la luz directa o la perdida de agua (Aguilar, 2 022, pág. 14). Y, por otra parte, las mezclas a base de cementos geopolímeros se complementan con elementos como la ceniza volante, la cual puede ser de difícil acceso comercialmente para proyectos de gran escala (Panda, 2 017, pág. 287).

Por último, como se ha mencionado anteriormente, no existe una norma específica para la construcción bajo el sistema de impresión 3D en concreto; por esta razón, las mezclas alternativas representan un reto más grande en este aspecto.

5.2.4 Requerimientos de la Impresión 3D en Aspectos Ambientales

Capacidad de la Impresora. Las mezclas de impresión alternativas requieren de impresoras con capacidades específicas de extrusión. Por ejemplo, la impresora Crane WASP tiene la capacidad de imprimir materiales a base de tierra, concreto y geopolímeros (WASP, 2 023).

Investigación. Y. Peng & C. Unluer afirman que es necesario un vinculo entre la investigación en laboratorio y los programas a gran escala para que los aglutinantes alternativos puedan llegar a ser implementados en proyectos de construcción (2 022, pág. 17).

5.2.5 Balance Final de la Viabilidad Ambiental

Si bien, existen muchas limitaciones en cuanto a la implementación de mezclas alternativas; la impresión 3D en concreto o mortero sigue siendo mucho más sostenible que el concreto fundido o prefabricado. Es decir, que esta es una tecnología con muy buena proyección en el aspecto ambiental para la construcción de vivienda nueva en Colombia.

5.3 Aspectos de Costo y Tiempo

5.3.1 Reducción de Costos Según Revisión Documental

Con base en la revisión documental, en la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos respecto a la reducción de costos y aumento de la rentabilidad de la impresión 3D en comparación con métodos de construcción tradicional.

Tabla 11

Reducción de costos y aumento de la rentabilidad según la revisión documental

Porcentaje	Descripción	Otros aspectos
34,1%	El costo de fabricación de una unidad de baño con concreto prefabricado fue un 34,1% mayor en comparación con una unidad de baño impresa en concreto. ^a	También se presentó un aumento de la productividad en un 48,1%. ^a
39%	La rentabilidad de un proyecto de viviendas sociales impresas puede ser un 39% mayor en comparación con métodos tradicionales. ^b	Se puede reducir el costo de la mano de obra hasta en un 35%. ^b
30%	Un estudio en Reino Unido arrojó que una vivienda impresa puede costar hasta un 30% menos que una vivienda adosada tradicional. ^c	Este estudio no incluyó el porcentaje de inversión para adquirir la máquina
34%	Media de reducción de costo y aumento de la productividad según autores	

Nota. Elaboración propia. ^a S. Ruan & S. Qian (2 020, págs. 7, 11). ^b E. Camarena (2 022, págs. 5, 1). ^c A. L. Mohd Tobi (2 018, pág. 5).

5.3.2 *Análisis de Rentabilidad de la Impresión 3D Frente a Métodos Tradicionales*

En el estudio realizado para el caso de Perú, *Viabilidad de la Impresión 3D de concreto para la constructibilidad de viviendas sociales*, se desarrollaron dos flujos de caja, donde se plasmó de manera teórica un comparativo de la rentabilidad de un proyecto de 200 viviendas sociales impresas en concreto frente al método tradicional, lo cual permitió establecer un precio teórico del costo por metro cuadrado de una vivienda impresa en 3D en Colombia.

E. Camarena presenta los costos en dólar estadounidense (USD), estas cifras fueron convertidas al peso colombiano (COP) utilizando la tasa de cambio representativa del mercado (TRM) del 22 de julio de 2022, fecha en la que se publicó la investigación mencionada. De esta manera 1,00 USD equivale a 4.410,14 COP (Dolar-Colombia, 2 023).

En primer lugar, la Figura 71 muestra la comparación del costo de inversión propuesta por E. Camarena para ambos casos.

Figura 71

Comparación del costo de inversión

INVERSIÓN – 200 Viviendas de 35m ²			
IMPRESIÓN 3D		TRADICIONAL	
Adquisición impresora	<u>USD 81 600,00</u> COP 359 867 424	<ul style="list-style-type: none"> • Adquisición del terreno • Estudios • Proyectos • Licencias 	<u>USD 1 178 862,05</u> COP 5 198 946 681,19
Instalación impresora	<u>USD 3 500,00</u> COP 15 435 490		
Capacitación de personal	<u>USD 937,50</u> COP 4 134 506,25		
Adquisición del terreno	<u>USD 717 946,00</u> COP 3 166 242 372,44		
Proyecto y licencias	<u>USD 436 596,40</u> COP 1 925 451 247,5		
TOTAL	<u>USD 1 240 579,9</u> COP 5 471 131 040,19	TOTAL	<u>USD 1 178 862,05</u> COP 5 198 946 681,19

Nota. Solo se toma un porcentaje del valor de la impresora debido a que esta puede usarse para varios proyectos. Elaboración propia. (Chávez Camarena, 2 022, págs. 4-5).

Debido a que la impresión 3D requiere una inversión mayor, el estudio muestra las ventajas económicas de esta tecnología mediante una evaluación de la rentabilidad. A continuación, en la Figura 72 se muestran los egresos totales para la impresión 3D.

Figura 72

Egresos totales de la impresión 3D

EGRESOS TOTALES IMPRESIÓN 3D– 200 Viviendas de 35m ²			
Costo construcción	Ventas - Marketing	Administrativos	Mantenimiento
USD 1 814 400	USD 234 435	USD 375 691	USD 16 200
COP 8 001 758 016	COP 1 033 891 170	COP 1 656 849 906	COP 71 444 268
TOTAL DE EGRESOS PARA AMBOS CASOS			
TOTAL USD	2 440 727	TOTAL COP	10 763 943 360

Nota. Elaboración propia.

Para los egresos del método de construcción tradicional, E. Camarena afirma lo siguiente: “se considera además del costo de construcción, ventas y marketing, y los gastos por administración y financiero, el gasto por contingencias y/o retrabajos que equivale un 0.5% del costo de construcción.” (2 022, pág. 5).

Por otra parte, se tiene como único factor de ingreso la venta de las 200 viviendas, para ambos casos se toma un mismo valor con el fin de medir la diferencia de utilidades. Estos ingresos se calcularon en USD 5 860 890, lo que equivale a COP 25 847 345 424,6 (Chávez Camarena, 2 022, pág. 5).

Luego de tener los cálculos de inversión, egresos e ingresos, se hizo una evaluación de la rentabilidad del proyecto de viviendas masivas para un año y nueve meses, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 73. La impresión 3D se presenta más rentable en todos los aspectos analizados.

Figura 73

Evaluación de la Rentabilidad

COMPARACIÓN DE LA RENTABILIDAD – 200 Viviendas de 35m ²			
Ítem	Impresión 3D	Método tradicional	Diferencia
Valor actual neto	USD 717 202,08 COP 3 162 961 581.09	USD 433 563,24 COP 1 912 074 587.25	39%
Tasa interna de retorno (TIR)	12%	5%	7%
Margen neto sobre ventas (ROS)	39%	28%	11%
Margen neto sobre costos (ROI)	63%	40%	23%
Utilidad después de impuestos	USD 1 584 831,15 COP 6 989 327 247.86	USD 1 161 175,42 COP 5 120 946 166.76	26,7%

Nota. Elaboración propia. (Chávez Camarena, 2 022, pág. 5).

5.3.3 Costo de Construcción por Metro Cuadrado en COP

Además de conocer la rentabilidad de la impresión 3D, el análisis presentado por E. Camarena, permitió tener una aproximación del costo por metro cuadrado para el caso de Colombia. Según esto, el costo de construcción de 200 módulos de vivienda social utilizando la impresión 3D sería de USD 1 814 400 (2 022, pág. 4), lo que equivale a COP 8 001 758 016. Si se divide esta cifra en 200 viviendas, el costo de construcción por cada una sería de USD 9 072 (COP 40 008 790,08). Por otra parte, cada módulo cuenta con 35 metros cuadrados, es decir que el costo de construcción por metro cuadrado es de USD 259,2 (COP 1 143 108,29).

5.3.4 Costo de Venta por Metro Cuadrado en COP

De igual manera, el estudio para el caso de Perú, el total de ingresos por la venta de las viviendas impresas en 3D fue de USD 5 860 890 (COP 25 847 345 424,6) (Chávez Camarena, 2 022, pág. 5). De esta manera, el costo de venta de cada vivienda impresa sería de USD 29 304,45

(COP 129 236 727,12) y el costo de venta por metro cuadrado sería de USD 837,27 (COP 3 692 477,9).

5.3.5 Comparación del Costo de Construcción Según el Tipo de Vivienda – COP

En la Figura 74 se muestra la comparación del costo de construcción por metro cuadrado de una vivienda impresa en 3D frente al costo de construcción de una vivienda VIS, VIP y No VIS en la ciudad de Bogotá. El precio de la vivienda impresa se obtuvo de manera teórica con la ayuda del caso de estudio en Perú descrito anteriormente, mientras que el precio de la vivienda social tradicional se obtuvo de la Revista Construdata Edición 203. Ambas fuentes son del mes de julio del año 2022.

Figura 74

Comparación de los costos de construcción por metro cuadrado

Ítem	Impresión 3D	VIP	VIS	No VIS
Fuente	Análisis propio según lo establecido por E. Camarena	Revista Construdata <i>Edición 203 (Junio-Agosto 2022)</i> Precios Bogotá		
Precio COP m ²	1 143 108,29	1 502 093	1 766 144	2 597 055
Diferencia %	---	+ 31,4%	+ 35,3%	+ 127%

Nota. Elaboración propia. (Chávez Camarena, 2 022). (Construdata, 2 022).

Según Construdata, los costos totales son la suma de los costos directos e indirectos. “No se incluyen costos financieros, de comercialización y ventas, de gerencia de proyecto ni de lote.” (Construdata, 2 022, pág. 45). Por lo tanto, en el análisis de los costos de construcción de una vivienda impresa en 3D no se incluyeron estos factores.

Como se observa en la Figura 74, según la propuesta teórica, el costo de construcción por metro cuadrado de una vivienda impresa en 3D resulta aproximadamente un 30% menor que la vivienda VIS y VIP; mientras que la vivienda No VIS tiene un valor promedio en más del doble.

5.3.6 Comparación del Costo de Venta Según el Estrato Socioeconómico – COP

Según el análisis teórico, se estableció el costo de venta por metro cuadrado de una vivienda impresa en 3D en USD 837,27 (COP 3 692 477,9). De esta manera, este precio se compara con los precios del mercado para viviendas de estratos 1-2, 3-4 y 5-6 en la ciudad de Bogotá, esto permite establecer una comparación de la ventaja económica que puede generar la tecnología y establecer cuales estratos tiene mejor proyección para implementarla.

La comparación se muestra en la Figura 75. El precio comercial para las viviendas en estratos 1-2 es difícil de conseguir y varía mucho según el sector, por esta razón, para la ciudad de Bogotá se tomó el valor de la localidad de Suba, la cual tiene un precio medio en comparación con otros sectores. El precio por metro cuadrado para esta localidad cerro en el año 2022 en COP 3 409 000 (Properati, ¿Cómo cerraron los precios de vivienda en venta de Bogotá en 2022?, 2023). Por otro lado, en junio de 2022, el precio medio por metro cuadrado para los estratos 3-4 fue de COP 4 383 433, mientras que para los estratos 5-6 el precio medio fue de COP 6 341 387 (Properati, 2022).

Figura 75

Comparación de los costos de venta por metro cuadrado

Método	Impresión 3D	Estrato 1-2	Estrato 3-4	Estrato 5-6
Fuente	Caso estudio	Properati (L. Suba)	Properati Blog (media junio 2022)	
Precio COP m ²	3 692 477,9	3 409 000	4 383 433	6 341 387
Diferencia %	---	- 7,6%	+ 18,7%	+ 41,7%

Nota. Elaboración propia.

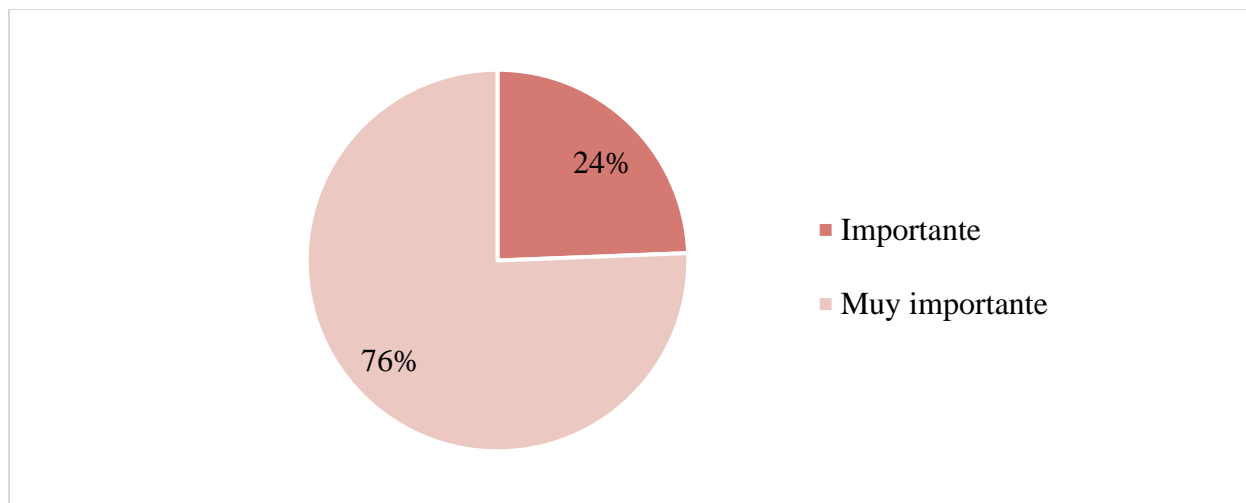
Se observa que el costo en estratos 1-2 sigue siendo más bajo para los métodos tradicionales. Sin embargo, existe una reducción del costo de la impresión 3D en los estratos 3-4 y 5-6 en un 18,7% y 41,7% respectivamente. Es importante aclarar que el costo para cada estrato puede verse afectada por factores como ubicación, disponibilidad de suelo, políticas, accesibilidad, entre otros factores.

5.3.7 Percepción de la Importancia de la Reducción de Costos Según Encuesta

Con base en las ventajas planteadas en este trabajo acerca de la reducción de costos que puede generar la impresión 3D, una pregunta de la encuesta buscó conocer la importancia que le dan las personas a este aspecto. Los resultados de esta pregunta se muestran en la Figura 76.

Figura 76

Resultados de la encuesta - ¿Qué tan importante es para usted la disminución de costos en la construcción de una vivienda?



Nota. La pregunta tenía dos opciones más de respuesta (“Poco importante”, “Irrelevante”), las cuales no fueron seleccionadas por ninguno de los encuestados. Elaboración propia.

5.3.8 *Porcentaje de Reducción del Tiempo de Construcción*

Con base en la revisión documental, en la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos respecto a la reducción de tiempos de construcción y el aumento de la productividad de la impresión 3D en comparación con métodos de construcción tradicional.

Tabla 12

Tiempo de construcción y aumento de la productividad según la revisión documental

Porcentaje	Descripción
30%	Cada módulo de vivienda social impreso presentó una reducción de 11 días (30%) según el cronograma hecho a través de Microsoft Excel y Microsoft Project. ^a
48,1%	Una unidad de baño impresa en concreto presentó un aumento de la productividad en un 48,1% en comparación con una unidad de baño en concreto prefabricado. ^b

Nota. Elaboración propia. ^aE. Camarena (2 022, pág. 4). ^bS. Ruan & S. Qian (2 020, pág. 11).

5.3.9 Ventajas Económicas de la Impresión 3D

Según lo expuesto en esta sección del trabajo, esta tecnología puede traer beneficios económicos para las empresas constructoras ya que genera una mayor rentabilidad en comparación con otros métodos de construcción. Así mismo, se presenta una reducción de costos que se debe principalmente a la automatización de procesos, aumento de la productividad, reducción de la mano de obra, reducción del desperdicio de material, ahorro en medidas de seguridad o errores en obra.

5.3.10 Desventajas Económicas de la Impresión 3D

La información presentada en temas de reducción de costos son en su mayoría estudios teóricos que han implementado la tecnología de manera práctica en la elaboración de prototipos o proyectos de pequeña escala; otros no la han implementado. La información de costos de las empresas constructoras sigue siendo muy reservada, lo que dificulta tener cálculos de costos más precisos.

5.3.11 Avance de la Fabricación Aditiva en Concreto en Colombia

En Colombia, la construcción con impresión 3D se encuentra en fase de investigación, la empresa Conconcreto, logro desarrollar la primera impresora de gran formato en Latinoamérica utilizando tecnología Siemens y diseño local (360enconcreto, 2 022). De esta manera, la empresa ha podido desarrollar proyectos en escala real como prototipos, porterías o sedes sociales.

En la Figura 77 se muestra el primer prototipo de vivienda impresa en 3D realizado en Colombia, la casa Origami, realizado en 2017, es un módulo habitacional de 23 metros cuadrados que cuenta con 32 piezas impresas en fabrica y ensambladas en sitio. El tiempo de impresión fue de 27 horas y el proyecto duró tres meses (360enconcreto, 2 022)

Figura 77*Casa Origami*

Nota. Adaptado de *Conozca la primera impresora 3D gran formato de concreto en Colombia* [Fotografía], por Concreto, 2 021 (<https://concreto.com/sala-de-prensa/conozca-la-primera-impresora-3d-gran-formato-de-concreto-en-colombia/>). Todos los derechos reservados [2 021] Concreto.

Por otra parte, la empresa ha logrado grandes avances en el desarrollo de la mezcla, junto con la empresa Argos se desarrolló una mezcla de concreto de alta resistencia con un resultado duradero, funcional y estético (Semana, 2 021)

De igual manera, se han fabricado pequeñas edificaciones como la portería del parque industrial Logika Siberia, en Cundinamarca, la cual tiene 22 metros cuadrados y se compone de 21 piezas impresas en fábrica. Además, entre 2 019 y 2 020 se imprimieron más de 350 elementos que incluyen mobiliarios urbanos que se muestran en la Figura 78 y Figura 79 (Semana, 2 021).

Figura 78

Mobiliario urbano con patrones complejos



Nota. Adaptado de *Imprimir casas en 3D ahora es posible, con una tecnología que presenta Concreto* [Fotografía], por Concreto, 2 021, Semana (<https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/imprimir-casas-en-3d-ahora-es-posible-con-una-tecnologia-que-presenta-concreto/202102/>). Todos los derechos reservados [2 021] Concreto.

Figura 79

Bancas impresas en 3D



Nota. Adaptado de *Imprimir casas en 3D ahora es posible, con una tecnología que presenta Concreto* [Fotografía], por Concreto, 2 021, Semana (<https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/imprimir-casas-en-3d-ahora-es-posible-con-una-tecnologia-que-presenta-concreto/202102/>). Todos los derechos reservados [2 021] Concreto.

Según Juan Luis Aristizábal, presidente de Concreto, el costo de este módulo habitacional de 23 metros cuadrados rodea los COP 70 000 0000 (El Espectador, 2 018). Es decir, que el costo de construcción por metro cuadrado para este módulo fue de aproximadamente COP 3 043 478,26.

Este precio obtenido en el primer prototipo en Colombia sigue siendo más alto que el precio establecido según el análisis realizado y, por ahora no logra reducir el costo de construcción, esto se debe principalmente a que la tecnología sigue estando en sus primeras etapas de desarrollo en el país. Como afirma Ana María Mesa, gerente de innovación de Concreto, “la manufactura aditiva está en una escala experimental, si bien, se ha llevado a

prototipos a una escala real para poder hacer las verificaciones, el tema del costo aún sigue siendo alto porque estamos en una escala de laboratorio” (2 018).

La empresa Concreto afirma que su principal meta con esta tecnología está en el desarrollo de vivienda con concreto premezclado. La impresión 3D puede hacer cambios significativos en la industria de la construcción minimizando el impacto ambiental e incrementando la productividad, la cual ha sido de 85% (Semana, 2 021).

5.3.12 Balance Final de la Viabilidad Económica en Colombia

Según el estudio teórico, el precio de construcción por metro cuadrado de un proyecto de vivienda masiva puede ser de COP 1 143 108,29. Lo cual representa una reducción significativa frente a métodos de construcción tradicional. Sin embargo, es necesario aclarar que los precios establecidos aplican especialmente para departamentos con buena competitividad económica como Cundinamarca, Antioquia o Santander, estos son descritos en la Figura 57. Lo anterior se debe a que existen departamentos con muy poca competitividad, los cuales no están preparados para adaptarse a nuevas tecnologías ni las condiciones cambiantes del mercado, es decir, que los costos por la implementación de la fabricación aditiva en concreto pueden ser mucho más altos y sería muy poco viable económicamente en estos lugares.

Por último, A. M. Mejía plantea que la reducción de costos para esta tecnología depende de la intervención de muchas industrias, es decir, que no solo es el reto de una empresa, sino de toda una comunidad científica. Si se logra cumplir con los objetivos en la reducción del costo de construcción, la impresión 3D será una tecnología muy viable para la fabricación masiva de vivienda (Mejía, 2 018).

5.4 Aspectos Sociales

5.4.1 Reducción del déficit habitacional en países en desarrollo

Como se ha expuesto en otros títulos de este documento, existen estudios sobre la viabilidad de la impresión 3D para la construcción de vivienda en países con alto déficit habitacional. En el caso de Nigeria y Perú se estableció que la tecnología puede traer grandes beneficios, por lo que puede ser implementada esperando buenos resultados.

5.4.2 Proyectos de vivienda social con impresión 3D

Actualmente, varias empresas han realizado esfuerzos para que las ventajas de este tipo de fabricación lleguen a las personas con menos recursos y se pueda garantizar el derecho a la vivienda. A continuación, se describen algunos proyectos de vivienda social en el mundo que han sido construidos mediante el sistema de impresión 3D.

Viviendas Sociales en Tabasco, México. Este proyecto consta de 200 viviendas sociales de 46,45 metros cuadrados, destinadas para familias en condiciones de pobreza. De las 200 viviendas, 48 fueron construidas con impresión 3D por la empresa ICON, cada estructura se fabricó en aproximadamente 24 horas. Además, este proyecto tuvo una articulación con las empresas sociales Échale y New Story (The New York Times Company, 2021).

Figura 80

Vivienda social impresa por ICON

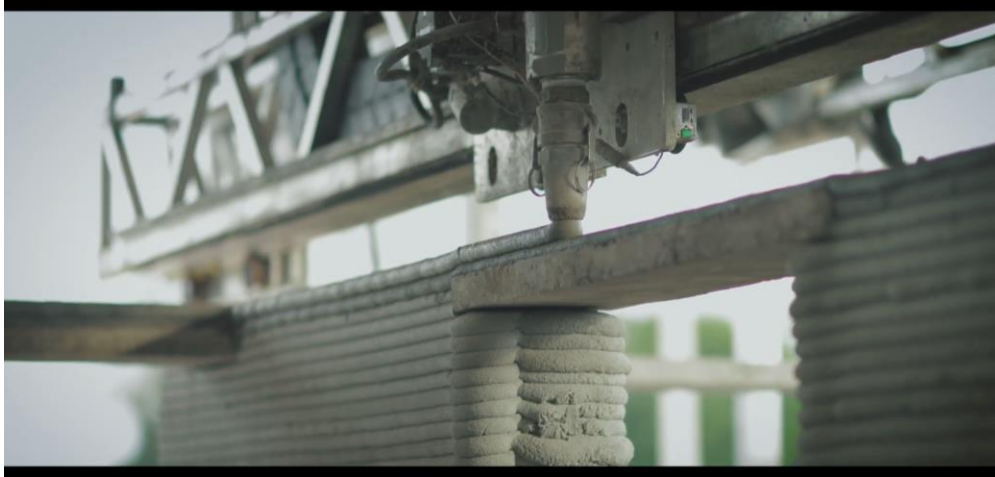


Nota. Adaptado de *Casas impresas en 3D en Nacajuca, México con New Story* [Fotografía], por Josh Pérez, 2 019, ICON (www.iconbuild.com). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

La estructura de muros fue impresa en sitio, como se muestra en la Figura 81. Los refuerzos de acero que permitieron cumplir con todos los requisitos estructurales, habiendo soportado un terremoto de 7.4 grados de magnitud en el año 2 020 (The New York Times Company, 2 021).

Figura 81

Impresión de muros de viviendas sociales en Nacajuca.



Nota. Adaptado de *Avance Oficial: "Project Home: Impresión 3D del Futuro"* [Fotografía], por Pablo García, 2 020, Moving Picture Institute (www.thempi.org). Todos los derechos reservados [2 020] Moving Picture Institute.

Por último, en la Figura 82 se muestra el principal aporte de este proyecto. La tecnología pudo adaptarse a la arquitectura tradicional del lugar, en este caso, se conservaron los calados de los muros y el porche de entrada característico de esta zona de México.

Figura 82

Elementos arquitectónicos locales combinados con muros impresos



Nota. Adaptado de Casas impresas en 3D en Nacajuca, México con New Story [Fotografía], por Josh Pérez, 2 019, ICON (www.iconbuild.com). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

Figura 83

Vivienda social con impresión 3D en México



Nota. Adaptado de Casas impresas en 3D en Nacajuca, México con New Story [Fotografía], por Josh Pérez, 2 019, ICON (www.iconbuild.com). Todos los derechos reservados [2 022] ICON Technology, inc.

Viviendas Sociales en África. La empresa danesa COBOD, líder en el desarrollo de la construcción con impresión 3D, está desarrollando proyectos de vivienda en diferentes países de África con el fin de ayudar a la disminuir el déficit habitacional. La empresa ha usado su mejor tecnología para este tipo de proyectos, como la impresora BOD2 y los aditivos D. Fab, los cuales pueden reducir los costos de material hasta en un 90%.

Como ejemplo, en la Figura 84 se muestra la segunda vivienda construida en Angola por COBOD en sociedad con Power2Build, esta cuenta con 140 metros cuadrados y se imprimió en 30 horas (4,5 veces más rápido que la primera). La empresa ha podido tener proyectos cada vez más eficientes y accesibles, por lo que se puede afirmar que la construcción de viviendas sociales con impresión 3D en una realidad (COBOD, 2 022).

Figura 84

Segunda vivienda social construida en Angola



Nota. Adaptado de *Largest 3D Printed Building In Africa* [Fotografía], por Power2Build, 2 022, COBOD (<https://cobod.com/largest-3d-printed-building-in-africa/>). Todos los derechos reservados [2 023] Power2Build.

Initiative 99. Por último, es importante mencionar este concurso mundial de arquitectura impulsado por la empresa ICON en sociedad Bjarke Ingels Group (BIG), una de las firmas de arquitectura más reconocidas del mundo. El concurso está destinado a diseñar casas impresas en

3D más accesibles, hermosas y dignas que puedan construirse por debajo de USD 99 000 (ICON Technology, 2 022).

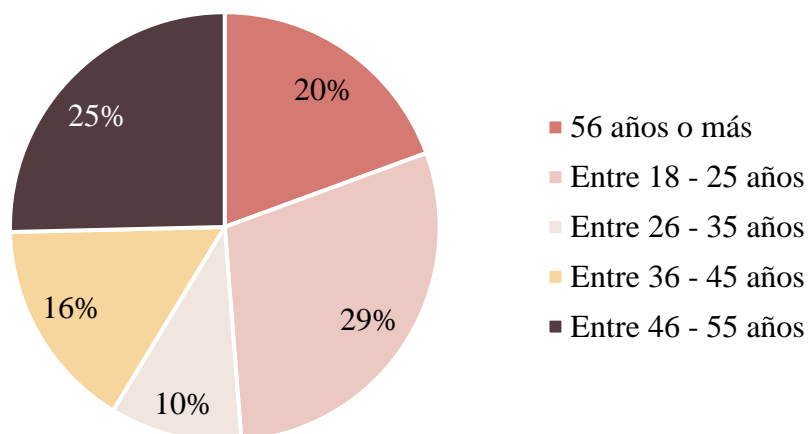
5.4.3 Encuesta Sobre la Percepción de la Tecnología en Colombia

La encuesta realizada buscó conocer la aceptación que tienen las personas respecto a una vivienda impresa en 3D; fue realizada de manera digital a través de la herramienta Google Forms. Esta se compone de tres partes principales, en la primera se proporcionó información respecto a la tecnología, ya que se dedujo que la mayoría de personas no la conocían, esto permitió que muchas personas encuestadas pudieran conocer el funcionamiento, las ventajas y los posibles resultados que puede traer la impresión 3D para la construcción de vivienda. Fueron encuestadas un total de 201 personas.

La segunda parte consta de 4 preguntas para tener información sobre los encuestados, el nombre (pregunta abierta), el rango de edad, el estrato al que pertenece y la ocupación (preguntas de selección múltiple con respuesta única). En las Figuras 85, 86 y 87 se describen los resultados obtenidos.

Figura 85

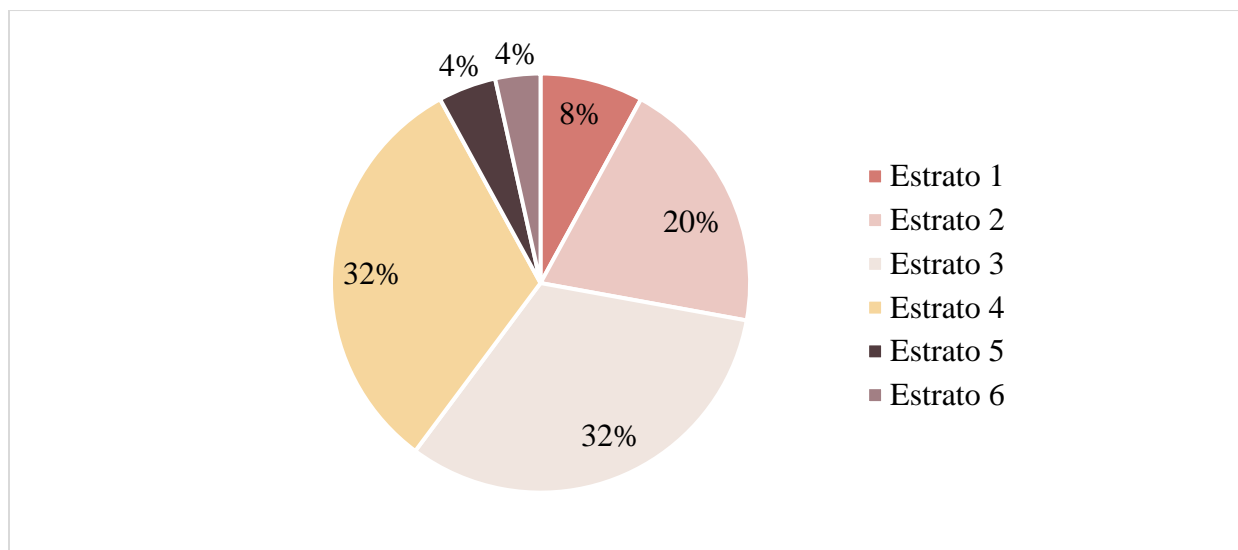
Resultados de la encuesta – Rango de edad



Nota. El rango de edad con más número de encuestados fue entre 46 y 55 años. Elaboración propia.

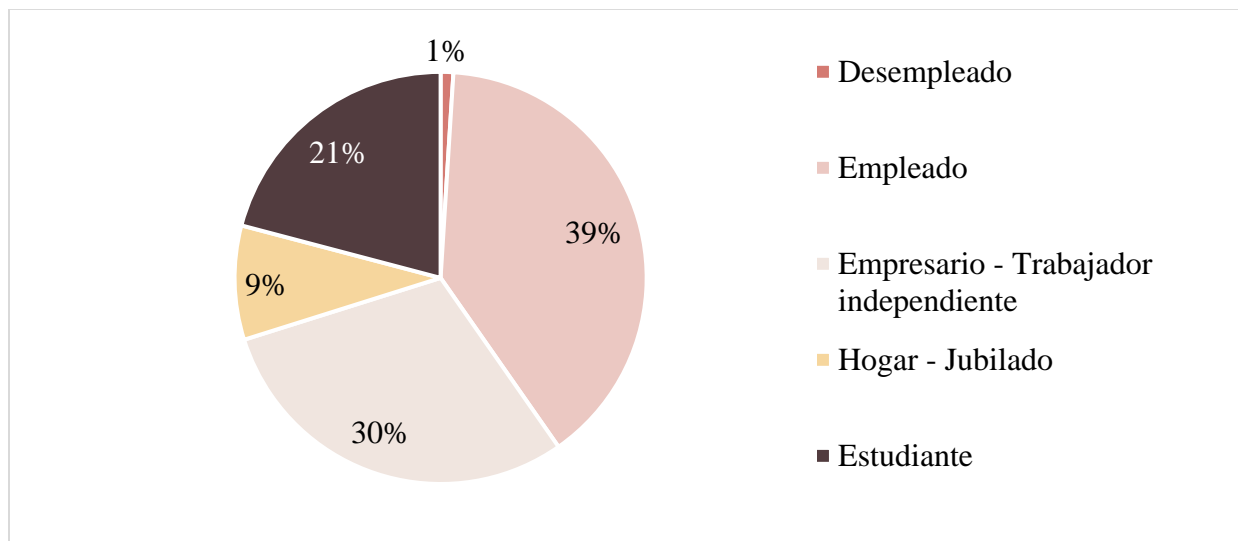
Figura 86

Resultados de la encuesta – Estrato socioeconómico



Nota. Los estratos 3 y 4 componen el 64% de las personas encuestadas. Elaboración propia.

Figura 87

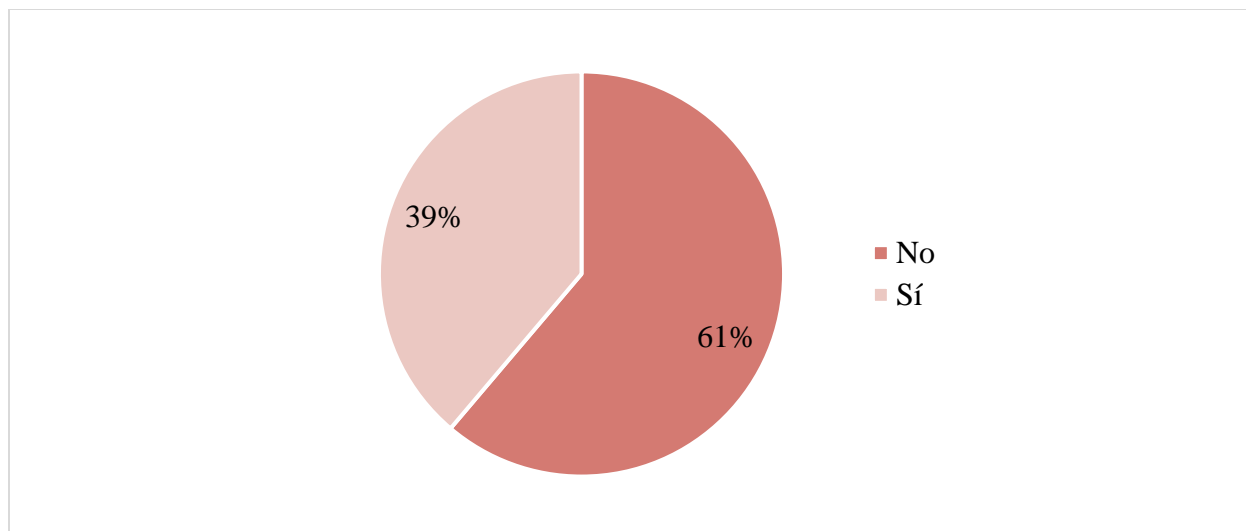
Resultados de la encuesta – Ocupación

Nota. La mayoría de personas encuestadas son empleados, trabajadores independientes y empresarios. Elaboración propia.

Como siguiente punto, se presentan los resultados obtenidos en la tercera parte de la encuesta, esta se compone de seis preguntas. La primera es una pregunta dicotómica, las personas respondieron si conocían la tecnología o no. Los resultados se muestran en la Figura 88, donde se observa que el 61% de las personas encuestadas no conocía la tecnología de impresión 3D para la fabricación de vivienda.

Figura 88

Resultados de la encuesta – ¿Conocía esta tecnología?

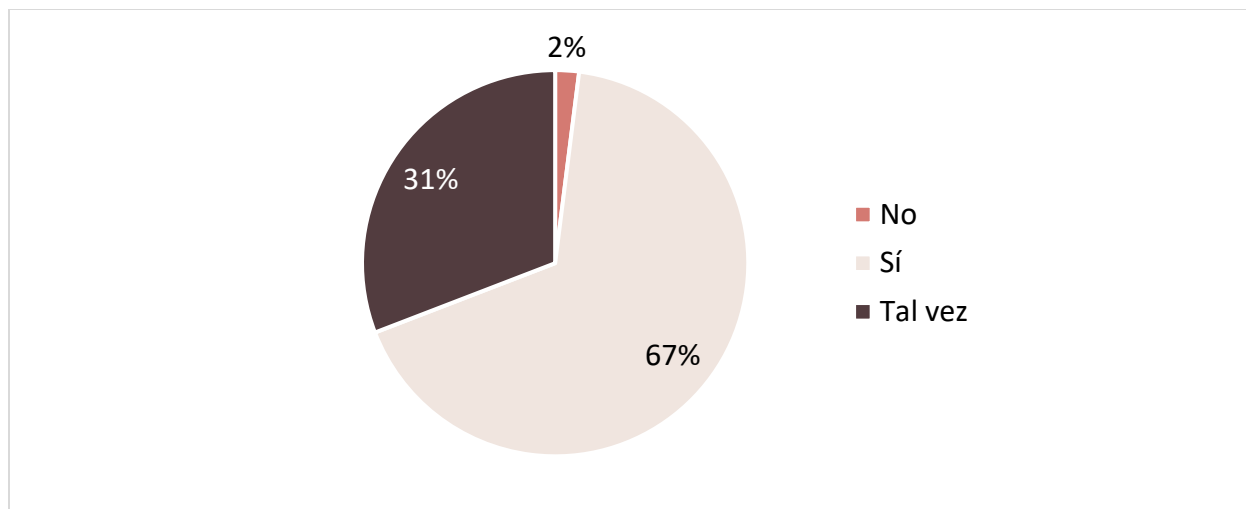


Nota. Elaboración propia.

Seguido de esto, se realizaron cuatro preguntas de escala semántica diferencial con el fin de conocer la percepción de las personas frente a la tecnología y la importancia que le dan a aspectos como la reducción del costo de una vivienda o la reducción de la huella de carbono. Además, estos resultados se analizaron según el estrato socioeconómico de las personas para conocer cuales tienen una mejor percepción.

Figura 89

Resultados - ¿Es para usted la impresión 3D una buena alternativa para construir vivienda nueva en Colombia?

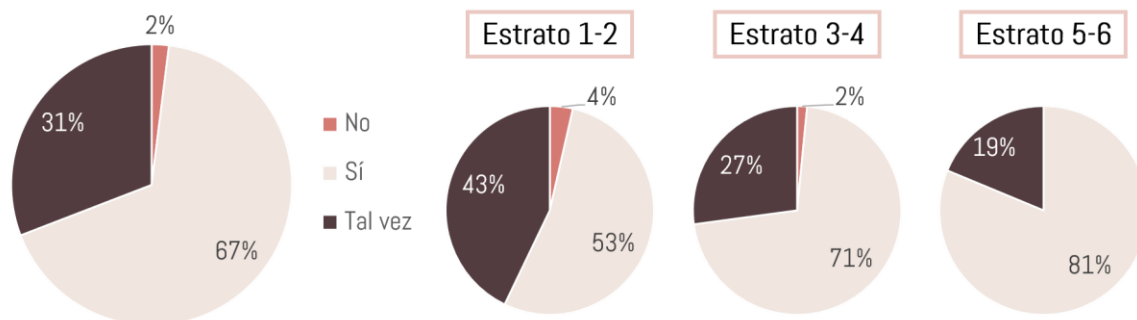


Nota. Elaboración propia.

Solo el 2% de las personas tienen una percepción negativa de la tecnología de impresión 3D; el 67% la considera como una buena alternativa y el 31% considera que puede llegar a serlo.

Figura 90

Resultados según el estrato - ¿Es para usted la impresión 3D una buena alternativa para construir vivienda nueva en Colombia?



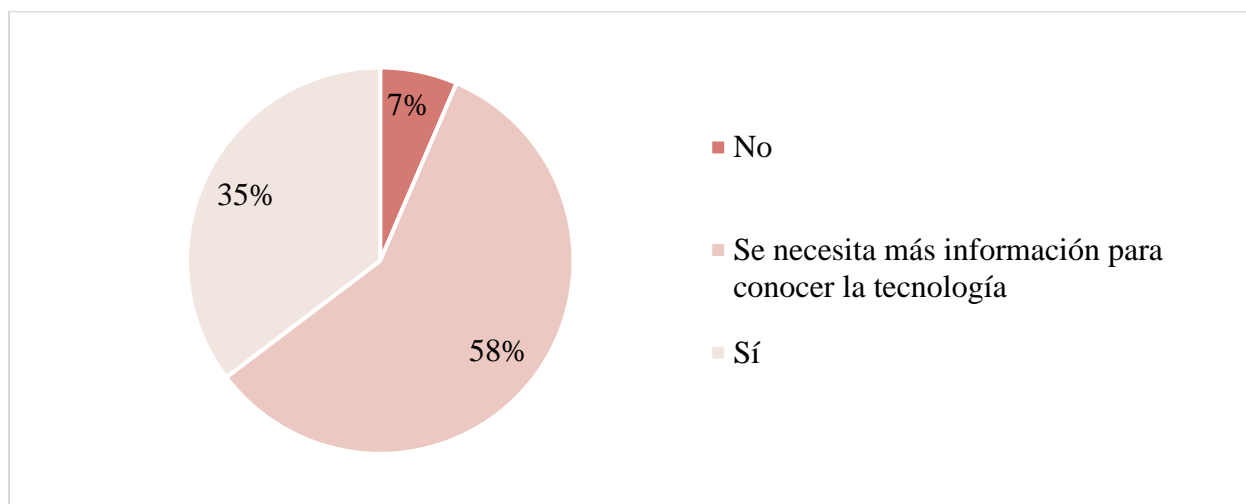
Nota. Elaboración propia.

Se encontró que a medida que aumenta el estrato, mejor es la percepción que tienen las personas de la tecnología. Aun así, los resultados permiten afirmar que las personas no tienen una percepción negativa frente a una vivienda construida bajo este sistema.

La siguiente pregunta buscó conocer la percepción que tienen las personas frente a la resistencia a los sismos que tendría una vivienda impresa en 3D, es decir, si se sentirían seguros o no. Los resultados se muestran en las Figura 91 y 92.

Figura 91

Resultados - En caso de un sismo, ¿Le transmitiría seguridad una vivienda impresa en 3D?

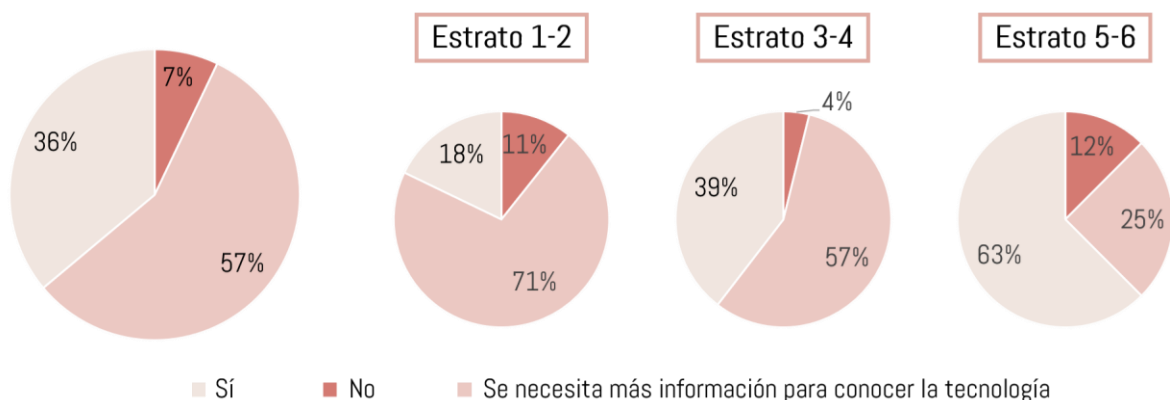


Nota. Elaboración propia.

Más del 50% de las personas encuestadas considera que aun no se tiene el conocimiento suficiente para afirmar que una vivienda impresa en 3D puede ser segura frente a sismos. Por otra parte, el 35% si tiene una buena percepción de seguridad y solo el 7% cree que no es lo suficientemente resistente para resistir sismos.

Figura 92

Resultados según el estrato - En caso de un sismo, ¿Le transmitiría seguridad una vivienda impresa en 3D?



Nota. Elaboración propia.

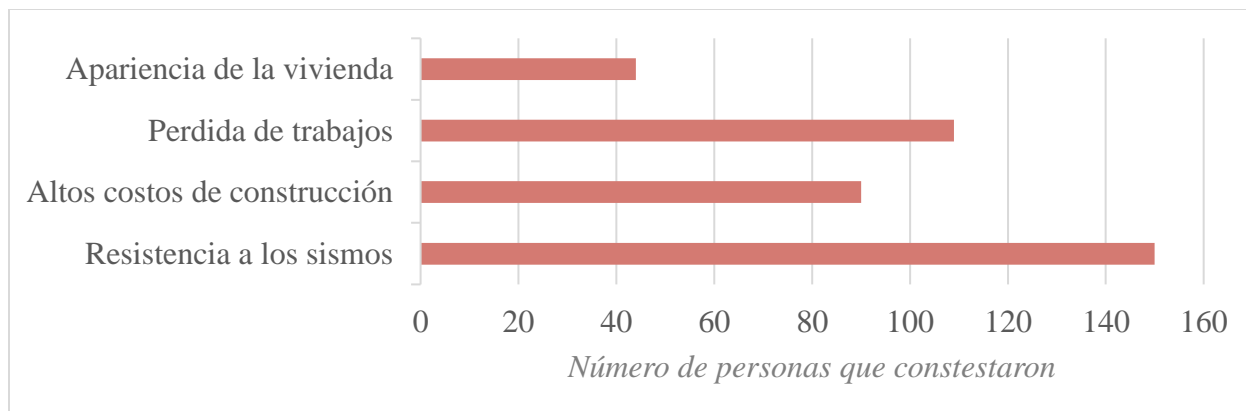
Al igual que en la pregunta anterior, aquí se conservó la tendencia de que a medida que aumenta el estrato, mejor es la percepción que tienen las personas; en este caso la seguridad frente a un sismo. Sin embargo, la percepción negativa fue menor en los estratos 3 y 4.

Las siguientes dos preguntas de escala semántica diferencial buscaron conocer la importancia que le dan las personas a aspectos ambientales y de costos. Estas fueron descritas en los capítulos anteriores.

Por último, la encuesta finaliza con una pregunta de cerrada de selección múltiple, en la cual las personas marcaron los aspectos que más les preocupaban sobre una vivienda impresa en 3D, las respuestas que podían seleccionar fueron las siguientes: resistencia a los sismos, altos costos de construcción, la pérdida de trabajos debido a la automatización y la apariencia de la vivienda.

Figura 93

Resultados – Aspectos que preocupan respecto a una vivienda impresa en 3D



Nota. Elaboración propia.

El aspecto que más les preocupa a las personas es la resistencia a los sismos, mientras que el que menos preocupa es la apariencia de la vivienda por la superposición de capas. De esta manera, este estudio permite conocer las virtudes de la tecnología para que las personas puedan resolver cualquier duda.

5.4.4 *Ventajas Sociales de la Impresión 3D*

Libertad de Diseño. Esto permite que los diseños se adapten a las necesidades específicas de una familia.

Accesibilidad. Si se logra reducir el costo de construcción en comparación con métodos tradicionales, las viviendas construidas bajo el sistema de impresión 3D puede ser más accesibles para las personas con menos recursos.

Trabajos Más Seguros. Como se ha mencionado anteriormente, la automatización de procesos aumenta la seguridad en obra; los trabajadores tienen menos probabilidades de sufrir algún accidente.

5.4.5 Desventajas Sociales de la Impresión 3D

En Colombia, los costos de la impresión 3D siguen siendo más altos en comparación con métodos tradicionales, aun es necesario seguir desarrollando esta tecnología para poder implementarla masivamente en la construcción de vivienda. De igual manera, como se observó en el análisis multiescalar, hay departamentos del país que tienen poca accesibilidad y no están preparados para recibir nuevas tecnologías. Lo cual hace que la implementación de la impresión 3D sea muy poco viable en estos departamentos apartados debido a que se incrementarían mucho los costos.

5.4.6 Balance Final de la Viabilidad Social en Colombia

La encuesta permitió conocer que las personas no tienen una percepción negativa frente a una vivienda impresa en 3D. Por lo tanto, el aspecto más importante para analizar debe ser el económico, ya que, está directamente relacionado con la viabilidad social.

En el estudio teórico se planteó que el costo de venta por metro cuadrado para una vivienda impresa en 3D puede llegar a ser de COP 3 692 477,9; al comparar esta cifra con los precios por estrato socioeconómico, se puede establecer la viabilidad social que tendría la impresión 3D si se logra tener un precio de venta similar al establecido en este trabajo.

Estrato Socioeconómico 1-2. El precio de venta por metro cuadrado de una vivienda en estrato 1 y 2 en la ciudad de Bogotá ronda los COP 3 409 000, una cifra menor a la establecida para la impresión 3D. Además, el sobre costo por baja accesibilidad es un factor muy importante para los departamentos apartados en los que habitan muchos hogares en condiciones de pobreza. Por esta razón, la tecnología no tiene muy buena proyección para implementarse en estos estratos.

Estrato Socioeconómico 3-4. Para el caso de los estratos medios, se puede lograr una reducción de aproximadamente el 18% del costo de venta por metro cuadrado. Por esta razón, la impresión 3D puede ser viable para la construcción de vivienda nueva en estos estratos.

Estrato Socioeconómico 5-6. Para los estratos altos se puede lograr una reducción del 41%. Si bien, las personas encuestadas que pertenecen a estos estratos mostraron interés en la tecnología, no se puede afirmar si esta puede competir frente a la oferta que se genera en la construcción tradicional. Es necesario hacer un estudio de mercado para saber si las personas de estratos altos estarían interesadas en comprar una vivienda impresa en 3D.

Por último, en relación a la población objetivo planteada para este trabajo se generaron las siguientes conclusiones.

Hogares en Déficit Habitacional Cuantitativo. En la Figura 57 se mostró la clasificación por competitividad departamental establecida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Esto se complementa con el número de viviendas en déficit cuantitativo del año 2021 establecidas por el DANE en la Figura 94.

Figura 94

Déficit habitacional y competitividad departamental

DÉFICITI HABITACIONAL CUANTITATIVO TOTAL Y ÁREAS (DANE)					
COMPETITIVIDAD (IGAC)	DEPARTAMENTOS (INCLUYE BOGOTÁ)	TOTAL	%	Cabeceras	Centros poblados y rural disperso
EXTRA LÍDER	CUNDINAMARCA	18 000	1,5	8 000	10 000
	BOGOTÁ	45 000	1,6	44 000	1 000
	TOTAL	63 000	1,55	52 000	11 000
LÍDER	RISARALDA	9 000	2,8	3 000	6 000
	CALDAS	11 000	3,0	4 000	7 000
	ATLÁNTICO	34 000	4,6	32 000	2 000
	ANTIOQUIA	109 000	4,7	36 000	74 000
	VALLE DEL CAUCA	74 000	4,9	49 000	25 000
	SANTANDER	47 000	6,1	16 000	31 000
TOTAL	284 000	4,35	140 000	145 000	
ALTO	BOYACÁ	13 000	3,0	4 000	9 000
	QUINDÍO	10 000	5,0	8 000	2 000
	BOLIVAR	89 000	13,6	39 000	50 000
MEDIO – ALTO	HUILA	18 000	4,9	7 000	11 000
	TOLIMA	27 000	5,6	8 000	19 000
	NOR. SANTANDER	36 000	7,3	23 000	14 000
	CESAR	30 000	7,6	15 000	15 000
	META	39 000	10,5	12 000	27 000
TOTAL	262 000	7,1	116 000	147 000	
MEDIO – BAJO	CASANARE	12 000	8,0	8 000	4 000
	CAUCA	49 000	8,8	9 000	40 000
	MAGDALENA	46 000	11,3	19 000	28 000
	SUCRE	32 000	11,4	11 000	21 000
	CÓRDOBA	121 000	20,6	20 000	101 000
	NARIÑO	121 000	21,0	27 000	94 000
BAJO	LA GUAJIRA	23 000	12,2	18 000	5 000
	CAQUETÁ	34 000	24,2	9 000	24 000
	ARAUCA	35 000	32,1	11 000	24 000
TOTAL	473 000	16,6	132 000	341 000	
COLERO	PUTUMAYO	58 000	39,8	13 000	45 000
	CHOCÓ	74 000	46,5	18 000	56 000
	GUAVIARE	14 000	47,6	4 000	11 000
	AMAZONAS	11 000	56,7	5 000	6 000
REZAGADO	VICHADA	7 000	36,2	2 000	5 000
	GUAINÍA	7 000	52,1	2 000	4 000
	VAUPÉS	9 000	81,7	2 000	6 000
TOTAL	180 000	51,5	46 000	133 000	
TOTAL NACIONAL	1 263 000	7,5	485 000	777 000	

Nota. Elaboración propia. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 2 021). (DANE, 2 022, pág. 7)

Se observa que a medida que disminuye la competitividad departamental, mayor es el porcentaje de viviendas en déficit, especialmente en zonas rurales o centros poblados. Lo anterior permite concluir que la impresión 3D solo tiene buena proyección para reducir el déficit habitacional cuantitativo en departamentos que tengan la capacidad de recibir nuevas tecnologías, especialmente en cabeceras municipales, ya que, la accesibilidad puede dificultarse en municipios apartados. La impresión 3D solo podría contribuir a la reducción del déficit en lugares específicos y no completamente a nivel nacional.

Por otra parte, un factor que puede mejorar la viabilidad en departamentos o municipios rurales es la implementación de mezclas a base de tierra cruda. Sin embargo, este es un aspecto que representa retos muchos más grandes en comparación con la impresión en concreto.

Nuevos hogares durante las siguientes dos décadas. Se estableció que la tecnología de impresión 3D es una buena alternativa para ayudar a suplir la demanda de vivienda nueva en el país. Específicamente, tiene una mejor proyección para la construcción de viviendas de estratos 3 y 4, en las principales ciudades del país.

5.5 Aspectos Estructurales

5.5.1 Resistencias de Concretos de Impresión

A continuación, en la Tabla 13 se muestra la resistencia a la compresión de algunos concretos y morteros de impresión en comparación con la resistencia mínima establecida por la NSR-10, la cual es de 17MPa (aprox. 2.500 PSI) (AIS, 2 010, pág. C.39). Los materiales expuestos son desarrollados y patentados por las empresas constructoras. Se encontró que, en

promedio, las mezclas superan en un 250% la resistencia mínima establecida por la norma colombiana.

Tabla 13

Resistencia a la compresión de mezclas a base de cemento

Nombre	Descripción	Resistencia	Diferencia NSR-10
Lavacrete <i>ICON Build</i>	Superó los requisitos en un 350%. ^a	<u>2 000 – 3 500 psi</u> 18,96 MPa	+ 10%
Mortero patentado <i>SQ4D</i>	Combinación de cemento Portland, geopolímeros, arena y fibras. ^b	<u>Aprox. 9 000 psi</u> 62,05 MPa	+ 360%
D.Fab <i>COBOD + CEMEX</i>	Entre las primeras 4 – 24 horas alcanza 35MPa. ^c	<u>5 076 psi</u> 35 MPa	+ 200%
Concreto patentado Be More 3D	Resistencia alcanzada a los 28 días. ^d	<u>6 787 psi</u> 46,8 MPa	+ 270%
Concreto de investigación	Cemento, humo de sílice, arena, piedra caliza, agua y aditivos. ^e	<u>8 159 psi</u> 56,26 MPa	+ 330%
Media de resistencia de las mezclas estudiadas		<u>6 352,6 psi</u> 43,8 MPa	+ 250%

Nota. ^a (ICON Technology, 2 023) ^b (SQ4D, 2023). ^c (COBOD, 2 022). ^d (Be More 3D, 2 018, pág. 14). ^e A. Aramburu (2 022, pág. 2).

5.5.2 Desventajas Estructurales de la Impresión 3D en concreto

Menos resistencia. Según A. Aramburu, las estructuras impresas en concreto son un 21% menos resistentes que las estructuras en concreto fundido convencionalmente (2 022, pág. 7).

Efecto diente de sierra. La fabricación capa por capa puede hacer que las capas inferiores se deformen y exista una distribución desigual de las cargas (Aramburu, 2 022, pág. 13).

Mezclas alternativas. Estas mezclas representan un reto mucho mayor en comparación con las mezclas de concreto o mortero. Actualmente sigue siendo difícil su implementación en proyectos de construcción con impresión 3D.

5.5.3 *Requerimientos y Recomendaciones Estructurales.*

La tecnología de impresión 3D puede cumplir con las normas estructurales de los países donde se implemente. Sin embargo, las estructuras impresas no pueden ser igual de resistentes a las tradicionales debido a la forma en la que se fabrican.

Es necesario que las empresas que desarrollen la tecnología realicen pruebas en aspectos técnicos y estructurales. Así mismo, se espera que con el tiempo se vayan creando normativas específicas que permitan conocer los requerimientos de una estructura impresa en 3D.

5.6 Análisis Económico y Social en Escala Micro – Bucaramanga

Con el fin de tener una aproximación en escala micro diferente a Bogotá, se opta por realizar la misma comparación de costos en la ciudad de Bucaramanga y, así, analizar la diferencia con respecto a la capital del país. De igual manera, como se mostró en el análisis multiescalar, se hizo una revisión del déficit habitacional cuantitativo en la ciudad, para tener una aproximación de cómo puede ser la posible implementación de la tecnología en esta ciudad para contribuir no solo a suplir la demanda de vivienda nueva, sino a la reducción del déficit.

5.6.1 *Comparación del costo de venta en Bucaramanga*

En la Figura 95 se observa el costo promedio por metro cuadrado en la ciudad de Bucaramanga en 2021. Se hizo una comparación con los precios de Bogotá del año 2022 para conocer como puede ser la variación de precios de acuerdo a la ciudad.

Figura 95

Costo de venta por metro cuadrado en Bucaramanga – 2021

Método	Impresión 3D	Estrato 3-4	Estrato 5-6
Fuente	Caso estudio	Properati Blog (media junio 2021)	
Precio COP m ²	3 692 477,9	2 900 000	3 500 000
Diferencia %	---	- 21,4%	+ 5,2
% Bogotá	---	+ 18,7%	+ 41,7%

Nota. No se encontró el dato sobre el costo promedio por metro cuadrado para estratos 1 y 2 en Bucaramanga. Elaboración propia. (Chávez Camarena, 2 022). (Properati, 2 021).

Se encontró que para estratos 3-4 los métodos tradicionales son un 21% más económicos, mientras que para estratos 5-6 solo se logra una reducción del 5,2%. Estos porcentajes pueden ser menores debido a que la fuente consultada no es del mismo año que la del estudio teórico.

5.6.2 Conclusión de Análisis en Bucaramanga

Si bien, el precio teórico establecido para la tecnología es similar al precio del mercado tradicional, la impresión 3D puede ayudar a suplir la demanda de vivienda nueva en Bucaramanga debido a que se construye de manera más rápida y las empresas pueden generar mayor rentabilidad en proyectos de vivienda masiva. De igual manera, Bucaramanga está ubicada en Santander, un departamento líder en competitividad, es decir que los precios de la tecnología de impresión 3D no se verían afectados por factores de accesibilidad.

6. Conclusiones Generales

6.1 Viabilidad de la Tecnología en Colombia

El desarrollo de la fabricación aditiva en el país ha tenido grandes avances en el desarrollo de la mezcla de concreto, el funcionamiento de la tecnología y la fabricación de prototipos o proyectos de pequeña escala. Además, la revisión documental permitió conocer que su implementación trae grandes ventajas ambientales con la reducción de desperdicios; ventajas técnicas con la automatización de procesos y el aumento de la eficiencia de los proyectos de construcción. Por otra parte, existen retos y limitaciones en relación a la ausencia de una normativa específica y la accesibilidad de algunas zonas del país.

6.2 Análisis Socio-Económico

De acuerdo a los objetivos planteados, se pudo concluir que la tecnología tiene una mejor proyección para construir viviendas en estratos medios (3-4), ya que se logra una reducción significativa del costo por metro cuadrado y son estratos que están presentes en departamentos o municipios con buena competitividad. Así mismo, en estos departamentos también se presenta la mejor proyección para la construcción de vivienda social o comercial, debido a que los precios teóricos no tendrían afectaciones por temas de accesibilidad o capacidad de adaptarse a nuevos mercados.

A pesar de esto, el costo de construcción de la tecnología sigue siendo alto en el país debido a que la tecnología sigue en fase de laboratorio. Se espera que con el paso de los años se potencie su desarrollo y se puedan alcanzar cifras similares a las propuestas en este trabajo.

6.3 Construcción Aditiva para la Reducción de la Brecha de Vivienda

Por último, se afirma que la impresión 3D en concreto aun no es una tecnología que pueda suplir toda la demanda de vivienda que tiene el país; pero si puede ser una buena alternativa para ayudar a suplir dicha demanda mediante la construcción en serie de vivienda; para esto es necesario garantizar la rentabilidad para las empresas constructoras. Si se logra igualar o reducir el costo de construcción con respecto a los métodos tradicionales, la impresión 3D sería mucho más rentable debido a que es un proceso automatizado que permite construir más rápido. Por esta razón, este estudio busca impulsar futuras investigaciones que permitan seguir desarrollando esta tecnología en Colombia, y, así, contribuir a la disminución de la brecha de vivienda.

7. Bibliografía

- 360enconcreto. (17 de Agosto de 2 022). *¿Cómo nace la impresión 3D de gran formato en Colombia?* Obtenido de Argos 360: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/como-nace-la-impresion-3d-en-colombia/>
- 360enconcreto. (8 de Junio de 2 022). *Viviendas de interés social con impresión 3D en Colombia: ¿Es posible?* Obtenido de Argos 360: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/viviendas-con-impresion-3d/>
- Afolabi, A. (2 019). 3D House Printing: A sustainable housing solution for Nigeria's housing needs.
- Aguilar, R. (29 de Julio de 2 022). Eco-friendly additive construction: Analysis of the printability of earthen-based matrices stabilized with potato starch gel and sisal fibers.
- AIS, A. C. (Enero de 2 010). Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente.
- Aramburu, A. (19 de Septiembre de 2 022). 3D printing effect on the compressive strength of concrete structures.
- Arias Gonzáles, J. L. (2022). Diseño y Metodología de la Investigación. pág. 70.
- Bazli, M. (3 de Febrero de 2 023). 3D printing for remote housing: Benefits and challenges.
- Be More 3D. (2 018). *La impresión 3D - Tecnología de la Industria 4.0*. Obtenido de Be More 3D: <https://bemore3d.com/wp-content/uploads/2018/10/Descripci%C3%B3n-Tecnol%C3%B3gica-FINAL-4.1.pdf>
- Be More 3D. (2 023). *Fórmula 3D*. Obtenido de <https://bemore3d.com/servicios/>

Charles Weinraub. (4 de Agosto de 2 022). *The 3D Printing Is Complete On SQ4D'S 3D Printed House* . Obtenido de Youtube:

https://www.youtube.com/watch?v=zOV3DOqe3zU&t=3s&ab_channel=CharlesWeinraub

Chávez Camarena, E. K. (2 022). Viabilidad de la Impresión 3D de concreto para la constructibilidad de viviendas sociales.

COBOD. (2 022). *Bod2 Specifications*. Obtenido de COBOD International:

<https://cobod.com/solution/bod2/specifications/>

COBOD. (20 de Junio de 2 022). *Largest 3D Printed Building In Africa*. Obtenido de COBOD International: <https://cobod.com/largest-3d-printed-building-in-africa/>

COBOD. (2 022). *The BOD2*. Obtenido de COBOD International:

<https://cobod.com/solution/bod2/>

COBOD. (2 022). *World's First 3D Printable Concrete Solution By CEMEX & COBOD*.

Obtenido de COBOD International: <https://cobod.com/solution/materials/dfab/details/>

Concreto. (Abril de 2 021). *Conozca la primera impresora 3D gran formato de concreto en Colombia*. Obtenido de Concreto: <https://concreto.com/sala-de-prensa/conozca-la-primer-impresora-3d-gran-formato-de-concreto-en-colombia/>

Construdata. (Junio-Agosto de 2 022). *Revista Construdata Edición 203 - Índices de Costos*.

Obtenido de FLIPHTML5: <https://fliphtml5.com/mlrkh/exaw/basic>

Construdata. (Junio-Agosto de 2022). *FLIPHTML5*. Obtenido de Revista Construdata Edición 203 - Índices de Costos: <https://fliphtml5.com/mlrkh/exaw/basic>

DANE. (2 018). *Geovisor Déficit Habitacional CNPV 2018*. Obtenido de Geoportal DANE:
<https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/sociedad/deficit-habitacional/>

DANE. (4 de Mayo de 2 022). Boletín Técnico - Déficit Habitacional 2 021.

DANE. (2 022). En 2021, el 31,0% de los hogares del país se encontraba en déficit habitacional.
Departamento Nacional de Estadística.

DANE. (2 023). *Preguntas Frecuentes Estratificación*.

Dolar-Colombia. (2 023). *TRM vigente el Viernes 22 de Julio del 2022*. Obtenido de Dolar-Colombia: <https://www.dolar-colombia.com/2022-07-22#:~:text=1%20USD%20%3D%204%2C410.14%20COP>

El Espectador. (5 de Noviembre de 2 018). *Esta es la primera impresora 3D de concreto premezclado de Latinoamérica*. Obtenido de Youtube | El Espectador:
https://www.youtube.com/watch?v=n50Yo-VUCQI&t=59s&ab_channel=ElEspectador

Forero, S. (28 de Agosto de 2 019). *"En Colombia se deben construir 3,2 millones de vivienda en la siguiente década"*, *Camacol*. Obtenido de La República:
<https://www.larepublica.co/economia/colombia-se-deben-construir-3-2-millones-de-vivienda-en-la-siguiente-decada-camacol-2902162#:~:text=De%201991%20a%20200%2C%20en,a%3%B1os%20fueron%202.100.000%20viviendas.>

Ghafur H. Ahmed. (4 de julio de 2 022). A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies.

ICON Technology. (2 de Marzo de 2 022). *House Zero*. Obtenido de ICON Build:

<https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>

ICON Technology. (2 022). *Initiative 99*. Obtenido de ICON Build:

<https://www.iconbuild.com/initiative-99#submission-details>

ICON Technology. (2 022). *Meet Vulcan Our Home-Sized 3D-printer*. Obtenido de ICON Build:

<https://www.iconbuild.com/technology>

ICON Technology. (2 023). *Rock Solid Science*. Obtenido de ICON Build:

<https://www.iconbuild.com/technology>

InfoPa'lante. (2 023). *InfoPa'lante*. Obtenido de InfoPa'lante:

<https://www.infopalante.org/hc/es/articles/1500002707802--Qu%C3%A9-son-los-estratos-sociales-y-c%C3%B3mo-s%C3%A9-a-cu%C3%A1l-pertenezco->

Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. (2 021). *Clasificación de competitividad departamental*. Obtenido de Colombia en Mapas:

<https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>

La República. (28 de Agosto de 2 019). *"En Colombia se deben construir 3,2 millones de vivienda en la siguiente década"*, Camacol. Obtenido de Editorial La República S.A.S.:

<https://www.larepublica.co/economia/colombia-se-deben-construir-3-2-millones-de-vivienda-en-la-siguiente-decada-camacol-2902162>

Mejía, A. M. (Noviembre de 26 de 2 018). Prototipo de vivienda impresa en 3D. (A. Youtube, Entrevistador)

Menna, C. (10 de enero de 2018). 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach.

Minvivienda. (2023). Obtenido de Ministerio de Vivienda:

<https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda/vis-y-vip>

Mohd Tobi, A. (2018). Cost viability of 3D printed house in UK.

ONU. (2020). *Vivienda: inviable para la mayoría*. Obtenido de Organización de las Naciones

Unidas: [https://onuhabitat.org.mx/index.php/vivienda-inviable-para-la-](https://onuhabitat.org.mx/index.php/vivienda-inviable-para-la-mayoria#:~:text=En%202010%2C%20alrededor%20de%20980,millones%20de%20millones%20en%20total)

[mayoria#:~:text=En%202010%2C%20alrededor%20de%20980,millones%20de%20millones%20en%20total](https://onuhabitat.org.mx/index.php/vivienda-inviable-para-la-mayoria#:~:text=En%202010%2C%20alrededor%20de%20980,millones%20de%20millones%20en%20total)

ONU. (2023). *El derecho humano a una vivienda adecuada*. Obtenido de Organización de las

Naciones Unidas: [https://www.ohchr.org/es/special-procedures/sr-housing/human-right-adequate-](https://www.ohchr.org/es/special-procedures/sr-housing/human-right-adequate-housing#:~:text=La%20vivienda%20constituye%20la%20base,paz%2C%20con%20seguridad%20y%20dignidad)

[housing#:~:text=La%20vivienda%20constituye%20la%20base,paz%2C%20con%20seguridad%20y%20dignidad](https://www.ohchr.org/es/special-procedures/sr-housing/human-right-adequate-housing#:~:text=La%20vivienda%20constituye%20la%20base,paz%2C%20con%20seguridad%20y%20dignidad)

ONU. (2023). *Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y*

sostenibles. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

Panda, B. (22 de Agosto de 2017). Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment.

Panda, B. (27 de Julio de 2017). Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material.

PERI 3D. (2 020). *Germany's first 3D-printed home*. Obtenido de PERI 3D Construction GmbH:

<https://www.peri3dconstruction.com/en/beckum>

PERI 3D. (2 023). *3D Printing Solutions*. Obtenido de PERI 3D Construcción GmbH:

<https://www.peri3dconstruction.com/en>

PERI 3D. (2 023). *Europe's largest 3D-printed apartment building*. Obtenido de PERI 3D

Construction GmbH: <https://www.peri3dconstruction.com/en/wallenhausen>

Properati. (28 de Junio de 2 021). *¿Cuánto cuesta la vivienda en el 'buen vividero' de Colombia?*

Obtenido de Properati Blog: <https://blog.properati.com.co/precio-metro-cuadrado-bucaramanga-y-arriendo/>

Properati. (25 de Agosto de 2 022). *Junio 2022: Precios del mercado inmobiliario – Bogotá*.

Obtenido de Properati Blog: [https://blog.properati.com.co/junio-2022-precios-del-mercado-inmobiliario-](https://blog.properati.com.co/junio-2022-precios-del-mercado-inmobiliario-bogota/#:~:text=Nivel%20de%20precios%20en%20barrios%20de%20estratos%203%20y%204,fue%20de%203%2C44%25.)

[bogota/#:~:text=Nivel%20de%20precios%20en%20barrios%20de%20estratos%203%20y%204,fue%20de%203%2C44%25.](https://blog.properati.com.co/junio-2022-precios-del-mercado-inmobiliario-bogota/#:~:text=Nivel%20de%20precios%20en%20barrios%20de%20estratos%203%20y%204,fue%20de%203%2C44%25.)

Properati. (2 023). *¿Cómo cerraron los precios de vivienda en venta de Bogotá en 2022?*

Obtenido de Properati Blog: <https://blog.properati.com.co/cierre-precios-metro-cuadrado-bogota-2022/>

Ramírez, S. F. (2 022). *Informe de Gestión 2 021 - 2 022*. Bogotá : Camacol.

Ramos Galarza, C. (2020). Los alcances de una investigación. pág. 3.

Ruan, S., & Qian, S. (25 de Marzo de 2020). Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach.

Saiz, A. (2022). Confronting The Housing Challenge In Latin America.

Semana. (21 de Abril de 2021). *Imprimir casas en 3D ahora es posible, con una tecnología que presenta Concreto*. Obtenido de Publicaciones Semana S.A.:
<https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/imprimir-casas-en-3d-ahora-es-posible-con-una-tecnologia-que-presenta-concreto/202102/>

Sierra, D. (25 de Enero de 2023). *Habi*. Obtenido de ¿Qué tipos de vivienda existen en Colombia?: <https://habi.co/blog/tipos-de-vivienda-colombia-caracteristicas>

SQ4D. (2023). *3D printed houses, commercial buildings, infrastructure, and more*. Obtenido de SQ4D LLC: <https://www.sq4d.com/>

SQ4D. (2023). *Largest 3D printed house as of August, 2022*. Obtenido de SQ4D LLC: <https://www.sq4d.com/islandia-print/>

SQ4D. (2023). *Characterizing the Strength of the Homes*. Obtenido de SQ4D LLC: <https://www.sq4d.com/how-long-do-3d-printed-houses-last/>

SQ4D. (2023). *Largest permitted 3D printed home*. Obtenido de SQ4D LLC: <https://www.sq4d.com/largest-3d-printed-home/>

The New York Times Company. (1 de Octubre de 2021). Obtenido de New York Times: <https://www.nytimes.com/es/2021/10/01/espanol/construccion-casas-3d-mexico.html>

Unluer, C. (23 de Diciembre de 2022). Development of alternative cementitious binders for 3D printing applications: A critical review of progress, advantages and challenges.

Velandia, J. (2 de Junio de 2022). *Habi*. Obtenido de ¿Cuáles son las diferencias entre la vivienda VIS y vivienda no VIS?: <https://habi.co/blog/diferencias-de-vivienda-vis-y-no-vis>

WASP. (2023). *Crane WASP*. Obtenido de WASP S.r.l.: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>

WASP. (2023). *TECLA*. Obtenido de WASP S.r.l.: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>

Zareyan, B. (17 de agosto de 2017). Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete.

Zuo, Z. (8 de Marzo de 2019). Experimental research on transition from scale 3D printing to full-size printing in construction.