

ARTICLE INFO

Received	16 March 2025
Revised	24 April 2025
Accepted	02 May 2025
Published	30 June 2025

PARAMETRICTECTURA

Un progetto parametrico per la prefabbricazione e l'autocostruzione nell'America Latina rurale

PARAMETRICTECTURA

A rural parametric design to enhance prefabrication and self-construction methods in Latin America

Camilo Ayala-Garcia, Diego Alejandro Velandia Rayo, Christiaan Job Nieman Jansen

ABSTRACT

La domanda di alloggi a prezzi accessibili nelle aree rurali dell'America Latina affronta continue sfide legate alla scarsità di risorse e ai costi elevati. I tradizionali metodi di costruzione hanno incontrato difficoltà a causa dell'inefficienza e della mancanza di flessibilità dovute all'assenza di infrastrutture adeguate e di investimenti economici nelle zone periferiche. La ricerca illustrata mira alla creazione di un housing rurale alternativo in America Latina attraverso lo sviluppo di un modello abitativo scalabile e replicabile che combini prefabbricazione modulare e autocostruzione partecipativa, con l'obiettivo di ridurre il tempo di costruzione e le risorse usate e di migliorare la qualità della vita e degli abitanti tramite il loro coinvolgimento nel processo costruttivo. Il sistema si compone di tre sottosistemi modulari prodotti tramite prefabbricazione digitale, in grado di garantire precisione e di minimizzare gli sprechi tramite l'ottimizzazione dell'utilizzo dei materiali. Il prototipo realizzato dimostra come sia possibile ridurre costi e tempi di esecuzione rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali e diminuire lo spreco di materiale e di consumo d'energia per migliorare le condizioni di vita delle comunità rurali.

The demand for affordable housing in rural areas in Latin America faces continuous challenges like resource scarcity and high costs. Traditional building methods often fail due to inefficiencies and inflexibility connected to the lack of infrastructure and economic investments in apart and disconnected areas. This research aims to create alternative rural housing in Latin America by developing a scalable and replicable housing model combining modular prefabrication and participatory self-construction. The goals include reducing construction time and resource use, enhancing quality and empowering users by involving them in the building process. The system comprises three modular subsystems produced through digital fabrication, ensuring precision, minimal waste, and optimal material use. The prototype shows how it is possible to reduce costs and construction times compared to traditional building systems and decrease material waste and energy consumption to improve the living conditions of rural communities.

KEYWORDS

design parametrico, costruzione modulare, autocostruzione, pratiche DIY, architettura a basso costo

parametric design, modular construction, self-construction, DIY practices, affordable architecture

Camilo Ayala-Garcia, Designer and PhD, is a Researcher and Assistant Professor at the Faculty of Design and Art, Free University of Bozen-Bolzano (Italy). His current research bridges emerging technologies and materials towards a transitional circularity, strongly focusing on tools to foster sharing knowledge and open-source materials and processes. E-mail: camilo.ayalagarcia@unibz.it

Diego Alejandro Velandia Rayo, Architect, is an Associate Professor at the Faculty of Architecture and Design, Universidad de Los Andes in Bogotá (Colombia). Working on technology issues in architecture, his research has focused on materials, construction processes, computational thinking and digital fabrication. E-mail: dvelandi@uniandes.edu.co

Christiaan Job Nieman Jansen, Designer, is an Associate Professor at the Faculty of Architecture and Design, Universidad de los Andes in Bogotá (Colombia). Working on different scales between product and architecture design, his research focuses on identifying resources in specific territories, from residual materials and local knowledge to collective intelligence solutions. E-mail: cj.nieman20@uniandes.edu.co



Le più recenti proiezioni del Dipartimento Amministrativo Nazionale di Statistica (DANE, 2023) prevedono nel 2025 un aumento demografico che attesterà la popolazione della Colombia intorno ai 52.77 milioni di abitanti, di cui circa il 23.5%, pari a 12,4 milioni, risiederà in aree rurali. Nonostante i continui interventi del Governo l'indisponibilità di alloggi rimane una delle emergenze più pressanti, poiché già nel 2013 si stimava una carenza di 1.664.050 alloggi che è stata parzialmente ridotta nel 2023 a 1.643.653 unità. Le previsioni inoltre stimano che nel 2025 vi sarà un'ulteriore richiesta di alloggi per le sole zone rurali di 800.000 nuove abitazioni che porterà il numero totale di unità necessarie a 2,5 milioni (DNP, 2015).

Uno dei fattori chiave che influenzano la crisi abitativa rurale è la trasformazione della composizione familiare contadina dovuta ai cambiamenti socio-economici avvenuti nel corso del XX e XXI secolo, durante i quali il settore agricolo è stato messo in secondo piano a favore dello sviluppo industriale e a un acuirsi dei conflitti interni che ha portato le popolazioni rurali a migrare (Salazar, 2016). Le cause del gap tra lo sviluppo abitativo delle aree urbane e di quelle rurali possono essere individuate da un lato nelle politiche governative e negli interessi economici degli immobilari, dall'altro nelle sfide logistiche che ostacolano lo sviluppo nelle aree rurali (World Bank, 2021). La maggioranza dei Paesi dell'America Latina mostra una tendenza simile poiché circa il 30% della popolazione della regione vive in zone rurali, con un deficit di unità abitative variabile tra il 25% e il 60% in alcuni Paesi (ECLAC, 2022).

L'autocostruzione è una pratica dominante specialmente nelle comunità contadine a basso reddito e stimabile attorno al 50% del patrimonio immobiliare esistente (Inter American Development Bank, 2012): le famiglie contadine si affidano prevalentemente a metodi di costruzione informali a causa della limitata disponibilità economica, di difficoltà di accesso al credito e al supporto tecnico, il che porta frequentemente a condizioni abitative al di sotto degli standard. Due sono i principali metodi di costruzione alternativi utilizzati per rispondere alla domanda di alloggi rurali e che si differenziano da quelli urbani tradizionali, i sistemi industrializzati e l'autocostruzione, ognuno dei quali risponde a specifiche dinamiche sociali ed economiche, ponendo al contempo sfide e vantaggi unici.

In quest'ottica il contributo illustra un approccio alternativo al problema dell'housing rurale in Colombia e America Latina combinando l'autocostruzione e i sistemi industrializzati grazie all'ausilio delle tecniche di fabbricazione digitale. Lo studio si concentra sullo sviluppo e sulla successiva verifica di sistemi di design parametrico ottimizzato sui bisogni delle comunità rurali con accesso ridotto a infrastrutture e risorse finanziarie; si propone una soluzione abitativa decentralizzata e guidata a livello locale, che sfrutta le potenzialità delle tecnologie CAD / CAM al fine di migliorare la qualità costruttiva e al tempo stesso consentire il coinvolgimento delle comunità e l'adattamento culturale.

Il paper è strutturato in diversi paragrafi, il primo dei quali analizza il contesto costruttivo rurale in Colombia; il secondo descrive la metodologia progettuale utilizzata per la realizzazione del sistema costruttivo proposto, mentre il terzo illustra il prototipo per testarne la tecnologia e la sua presentazione agli stakeholder; l'ultima sezione inten-

de stimolare una riflessione su vantaggi e sfide connessi all'implementazione del modello per le zone rurali. Prendendo in esame sia questioni tecniche che sociali dell'edilizia rurale, il contributo vuole offrire spunti pratici per progettisti, architetti, ricercatori e comunità e dimostrare come il design digitale possa fornire soluzioni alternative a basso costo rispetto a quei sistemi tradizionali che non solo ostacolano lo sviluppo e il benessere delle aree rurali, ma sono fondati anche su metodi di costruzione non sostenibili.

Sistemi di costruzioni industriali e prefabbricati

I sistemi di costruzione industrializzata e di prefabbricazione edilizia offrono significativi vantaggi, soprattutto in termini di precisione tecnica ed efficienza (Steinhardt et alii, 2019; Boafó, Kim and Kim, 2016; Chiu, 2012; Davies, 2005). Tali metodologie oltre che ridurre i tempi di produzione e costruzione abbassano i costi e permettono di offrire soluzioni abitative a costi più accessibili (Ibañez, Gualart and Salka, 2022; Parvin, 2013; Luther, 2009). Inoltre i sistemi industrializzati garantiscono una maggior precisione tecnica e integrità strutturale, se paragonati alle tecniche più tradizionali, e sono fortemente influenzati dal settore automobilistico, dove concetti come la condivisione di piattaforme (Ben Mahmoud-Jouini and Lenfle, 2010) e la componentistica (Takeishi and Fujimoto, 2001) influiscono in modo considerevole sul rapporto costo-efficienza (Krishnan and Gupta, 2001).

Nonostante ciò i sistemi industrializzati presentano diversi limiti: primo tra tutti la difficoltà di apportare modifiche durante la fase di costruzione: gli errori in fase di studio o di progettazione diventano evidenti durante la fase di assemblaggio e difficili da correggere in loco, specialmente se si tratta di sistemi di produzione seriale. Ulteriori sfide includono la difficoltà nel reperire manodopera specializzata, che è più costosa di un comune operaio, e gli alti costi per il trasporto di componenti prefabbricati dalla fabbrica al cantiere soprattutto nel caso di aree rurali con infrastrutture limitate, come accade nel 60% delle aree colombiane (Daheshpour and Herbert, 2018). In aggiunta sistemi abitativi prefabbricati spesso sono difficilmente personalizzabili dall'utente e determinano architetture seriali che potrebbero non soddisfare le esigenze dei potenziali clienti e non integrarsi nel contesto locale.

Autocostruzione | L'autocostruzione è una pratica molto diffusa, specialmente negli ambiti rurali e a basso reddito; anche se spesso associata a bassi standard qualitativi, a causa della mancanza di competenze tecniche dell'utente dell'utenza o di una supervisione professionale, l'autocostruzione offre notevoli benefici sia economici che culturali (Di Virgilio, 2023): il suo utilizzo consente alle famiglie di personalizzare le proprie abitazioni in base a specifiche esigenze e disponibilità di risorse, favorendo senso di appartenenza e legame emotivo con lo spazio abitativo; al contempo riduce costi di costruzione e necessità di affidarsi a specialisti esterni, consentendo di apprendere nuove abilità costruttive.

Si tratta di una estensione delle pratiche DIY (Do It Yourself; Edwards, 2006) che sono tipicamente radicate fuori dalle classiche attività professionali del design e dell'architettura. Esse sono spesso considerate come pratiche individuali, anche se alcuni studiosi affermano che si siano evolute come atti-

vità sociali grazie alla condivisione di conoscenze che generano (Bean and Rosner, 2012): con le DIY si possono realizzare soluzioni efficaci quanto o superiori a quelle delle infrastrutture convenzionali (Lukens, 2013).

Nonostante fornisca benefici diretti e indiretti l'autocostruzione è frequentemente associata a soluzioni abitative di bassa qualità a causa dell'inesperienza dei costruttori e dell'assenza della supervisione di un tecnico. Tuttavia, quando opportunamente condotta, può trasformarsi in una efficace strategia in grado di soddisfare sia i bisogni individuali che quelli collettivi (CEMEX and Universidad Nacional Autónoma de México, 2005). Il valore emozionale e psicologico associato alle abitazioni autocostruite contribuisce ad aumentare il valore immateriale, poiché le persone traggono orgoglio dai propri risultati e sviluppano un legame ancora più profondo con l'ambiente in cui vivono (Obremski and Carter, 2019); a ciò vanno aggiunti i citati vantaggi economici legati alla riduzione dei costi della manodopera e allo sviluppo di nuove competenze tra i membri della comunità (Hamiduddin and Gallent, 2015).

Verso un approccio integrato | Una soluzione abitativa ideale per i contesti rurali, in particolare in America Latina, dovrebbe integrare i punti di forza dell'autocostruzione e quelli dei sistemi industrializzati, valorizzando i rispettivi vantaggi e mitigando gli specifici limiti, per rispondere all'effettivo bisogno di alloggi in quelle aree. La centralizzazione delle fasi cruciali di processo edilizio – dalla progettazione alla produzione, dall'assemblaggio alla gestione amministrativa – consente un sensibile incremento qualitativo e una maggiore efficienza delle unità abitative nelle zone rurali.

Alcune precedenti esperienze progettuali condotte in ambito internazionale sono servite da riferimento per la ricerca e la realizzazione del prototipo, fornendo elementi fondamentali per sviluppare un sistema di architettura parametrica open-source. L'approccio di Walter Segal all'autocostruzione di abitazioni ha fornito ad esempio valide informazioni su come la comunicazione tra progettista e operatori che si occuperanno della fase costruttiva possa portare all'ideazione di valide alternative senza sacrificare la qualità (Di Virgilio, 2023), approccio questo che ha gettato le basi per quello che poi è diventato il processo di prototipizzazione digitale per l'edilizia residenziale (Pone, 2022).

L'uso di tecnologie legate al Computer-Aided Design (CAD) e al Computer-Aided Manufacturing (CAM) si è diffuso in diversi contesti geografici (Kolarevic, 2001; Díez, 2018) dimostrando il suo elevato potenziale nella realizzazione di soluzioni abitative a basso costo (Romano and Di Monte, 2023; Celani, 2016), spinte da numerose iniziative di successo che stanno aprendo la strada all'autocostruzione di abitazioni come la Digitally Fabricated House for New Orleans (Sass, 2008), il progetto WikiHouse¹, The Veneer Building System², il prototipo di casa BiosPHera³, un housing modulare per ambienti estremi⁴ e la casa modulare leggera⁵. Tali progetti permettono un flusso informativo continuo, semplificano la produzione e offrono maggiori opzioni di personalizzazione dell'edilizia alternativa. Tuttavia alcune soluzioni rimangono di difficile implementazione in aree remote dove vi è uno scarso se non nullo accesso alle infrastrutture di base. In linea con tali iniziative lo studio mira a sviluppare

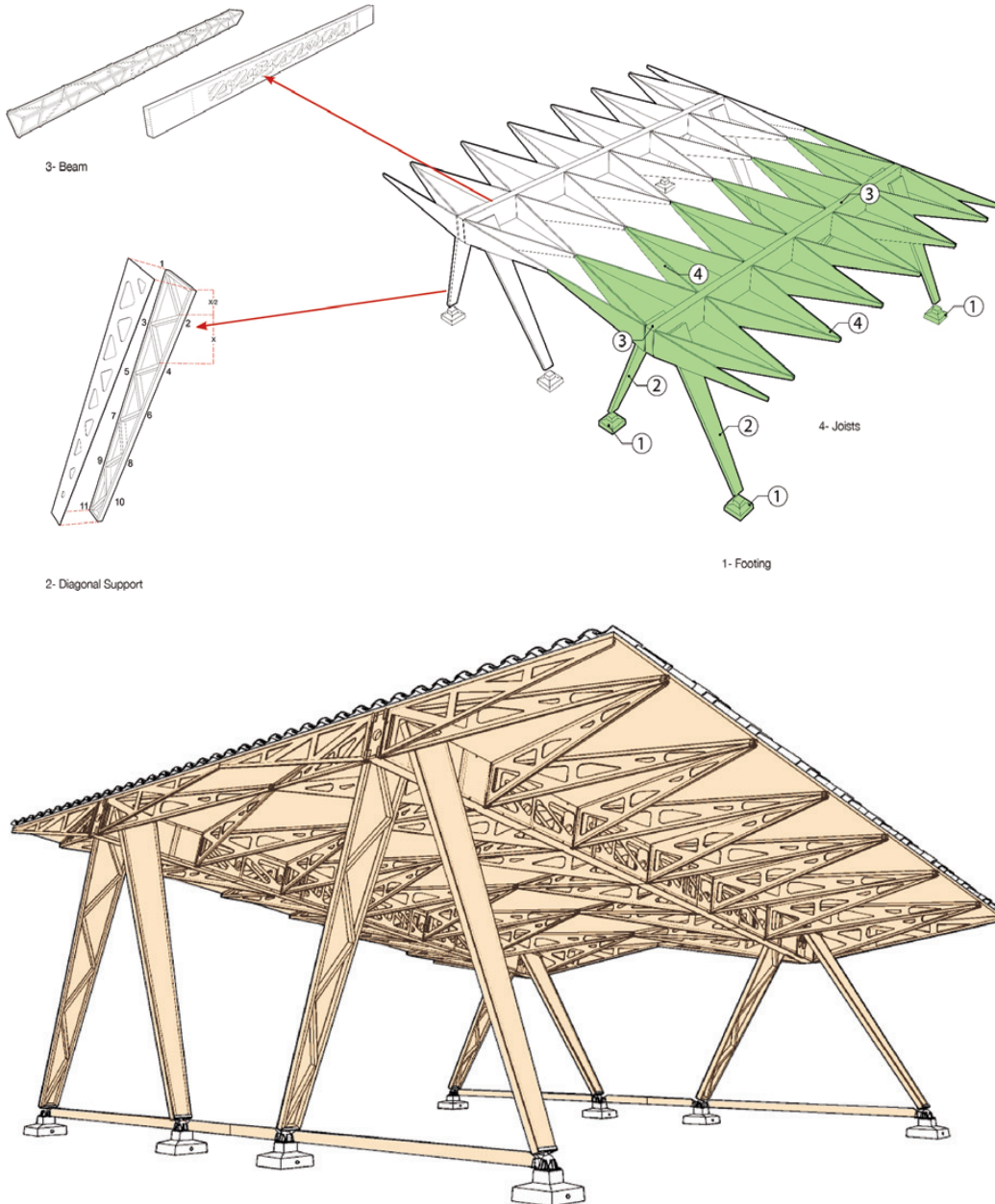


Fig. 1 | Roof Subsystem scheme (credit: C. Ayala-Garcia, 2024).

Fig. 2 | Roof structural modules (credit: C. Ayala-Garcia, 2024).

Next page

Fig. 3 | Footings detail (credit: D. Velandia, 2024).

Fig. 4 | Roof lifting sequence (credit: H. Guerrero and C. Nieman, 2024).

un processo digitale integrato in grado di far convergere design, produzione e costruzione per l'edilizia rurale in Colombia e, successivamente in America Latina, proprio tenendo in considerazione le sfide e i limiti menzionati; l'obiettivo è mettere a punto un sistema facilmente realizzabile con strumenti avanzati quali router CNC, seghe a pannello e seghe a trave che possa incorporare elementi rinnovabili a basso costo e con un impatto ambientale sensibilmente più basso di quello del cemento (Ashby, 2013), utilizzando legno massello e pannelli OSB (Oriented Strand Board) o MDF (Medium Density Fibreboard). In aggiunta il sistema proposto mira a decentralizzare il processo di produzione dei singoli componenti, dislocandone le tecnologie nelle municipalità o nei centri comunitari locali piuttosto che nelle fabbriche.

A seguito delle numerose interlocuzioni con gli stakeholder è emerso che se in ambito urbano l'acquisizione dei terreni è il maggior ostacolo allo sviluppo dell'edilizia residenziale, in quello rurale la situazione è diametralmente opposta; tuttavia anche se contadini e nuclei familiari hanno la proprietà della terra, trovano enormi ostacoli nel realizzare la propria abitazione a causa della scarsa reperibilità di

materiali essenziali, quali laterizi e calcestruzzo, e di altri componenti essenziali.

Alcuni Sindaci locali si sono dichiarati favorevoli all'idea di portare strumenti e tecnologie edili direttamente nella loro municipalità, anziché dipendere dall'esterno; pertanto un requisito chiave per il progetto è che ogni Amministrazione, la quale raggruppa più comunità rurali, investa in macchine a controllo numerico e nella formazione di falegnami locali e offra il servizio di taglio dei materiali ai contadini e agli abitanti che possono così partecipare attivamente alla progettazione della propria abitazione tramite l'iniziativa 'parametrictectura'.

Questo processo deve anche tenere conto di tutti quei fattori tangibili e non tangibili che definiscono il contesto socioculturale e geografico della popolazione coinvolta nell'iniziativa e per rendere possibile tutto ciò sono stati stabiliti quattro 'principi strategici' da tenere in considerazione in qualsiasi progetto di edilizia rurale:

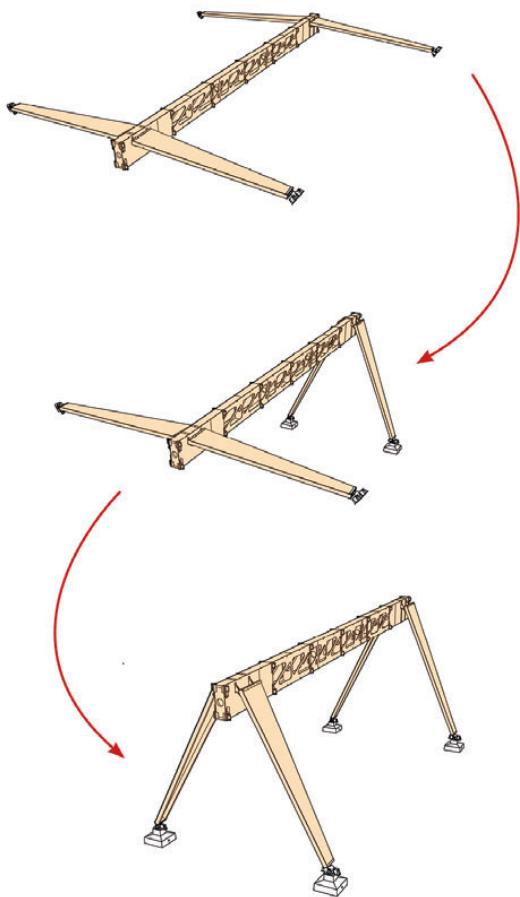
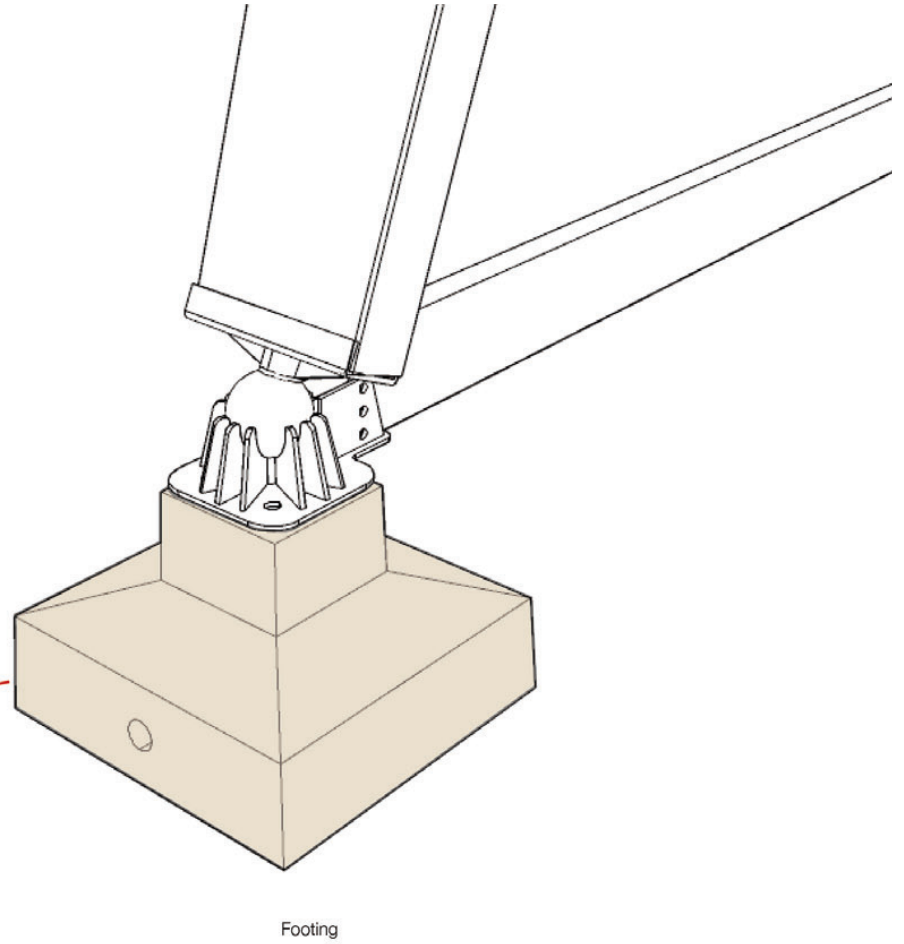
1) Definizione del contesto attraverso l'identificazione della popolazione target e dell'ambiente che deve trovare il giusto equilibrio tra specificità e generalità, consentendo la replicabilità metodologica pur affrontando le specifiche sfide regionali, in

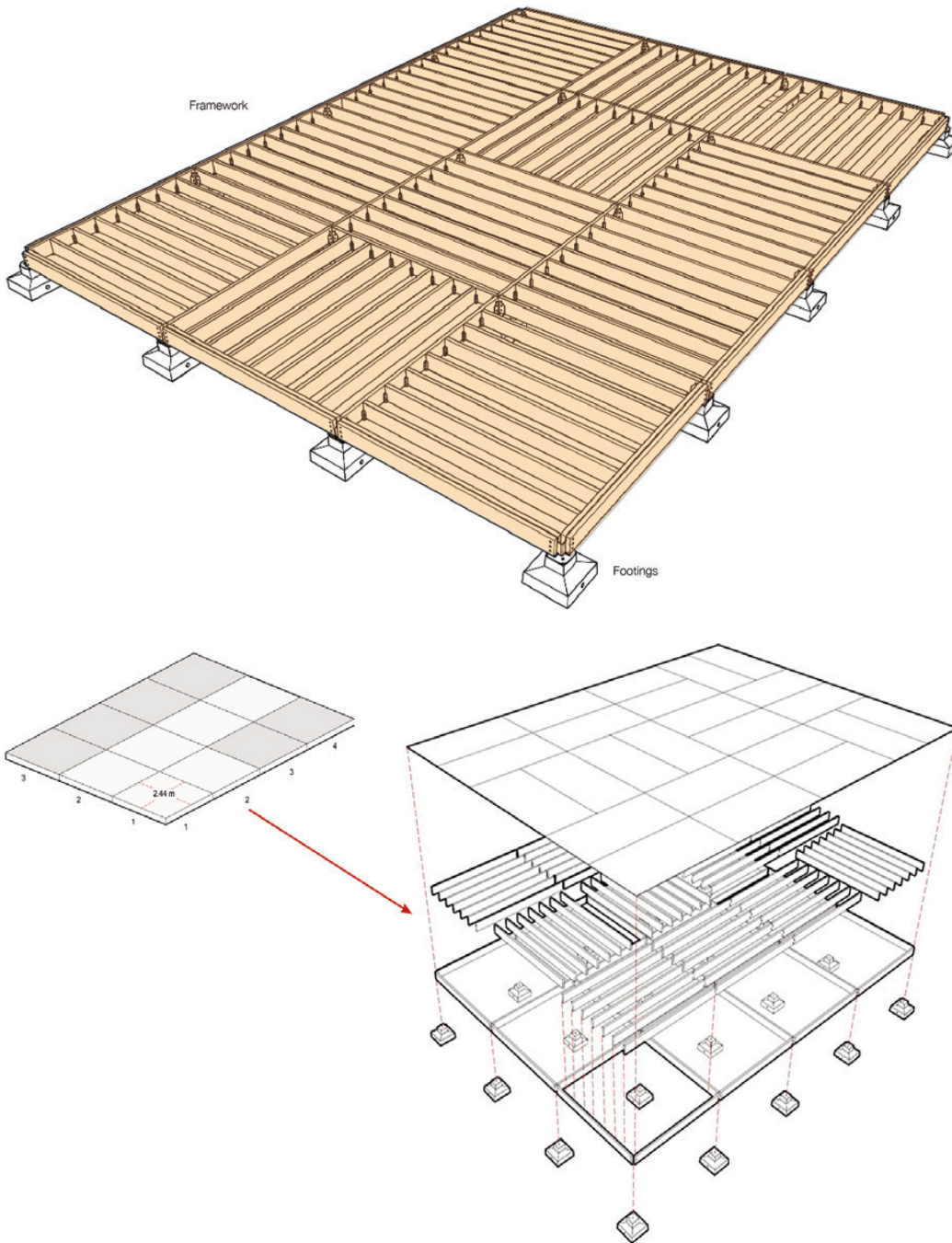
termini di condizioni climatiche e fattori geografici locali, e valorizzando i materiali locali disponibili;

2) Integrazione tra progettazione, produzione e assemblaggio coordinata dall'Amministrazione locale, attraverso un processo continuo in cui un esperto di design (Manzini, 2015), dipendente dell'Amministrazione o consulente esterno, guidi l'implementazione tecnologica e sia presente quando si richiede la progettazione di un'abitazione, soprattutto per la rispondenza ai requisiti di stabilità strutturale e abitabilità;

3) Incorporazione di aspetti tangibili e non, tra cui fattori culturali e sociali che dovrebbero essere inseriti nella progettazione per potenziarne i valori emotivo, culturale ed estetico (Chapman, 2015) della comunità, al fine di promuovere una maggiore accettazione del progetto;

4) Strategie di partecipazione degli utenti per garantire che le loro richieste non compromettano l'integrità strutturale del fabbricato pur consentendone un coinvolgimento significativo; si individuano due distinti livelli di partecipazione, il primo relativo alla 'interazione di assemblaggio' (gli utenti ricevono i componenti prefabbricati con istruzioni dettagliate, al fine di garantire che il processo di as-





sembraggio non comprometta l'integrità strutturale), il secondo relativo alla 'interazione di produzione' (gli utenti contribuiscono alla fase realizzativa di specifici componenti sotto la guida di un professionista, con la possibilità di migliorare la qualità progettuale finale).

Principi progettuali | L'integrazione dei processi autocostruttivo e industriale risponde a due esigenze fondamentali dell'abitare rurale: il controllo qualitativo delle costruzioni e la conservazione del patrimonio culturale immateriale. Attraverso la combinazione dei punti di forza di entrambe le metodologie con i 'principi strategici' citati, lo studio propone un framework operativo per la realizzazione di edilizia rurale sostenibile, da poter applicare in differenti aree geografiche della Colombia e America Latina. La creazione di un prototipo consente di validare l'approccio metodologico attraverso verifiche sperimentali.

Lo studio definisce i principi progettuali fondamentali su cui fondare la metodologia proposta: la riduzione dei costi di produzione è ottenuta attraverso la prefabbricazione di componenti (realizzati prima e assemblati in loco), utile anche a velocizzare in maniera sensibile il processo costruttivo: la mancanza di conoscenze delle tecniche costruttive è minimizzata dall'impiego di strumenti CAD / CAM i quali, nelle varie fasi di progettazione, produzione, e costruzione, consentono un preventivo riconoscimento di eventuali errori: l'utilizzo di risorse è ottimizzato dalla progettazione digitale centralizzata che garantisce precisione nel calcolo del materiale necessario e riduzione degli sprechi.

Inoltre la partecipazione attiva della comunità fa in modo che le soluzioni edilizie rispondano alle esigenze degli utenti: a tal fine i software CAD facilitano la creazione di un processo progettuale interattivo con gli abitanti e consentono di incorporare elementi culturali molto spesso non considerati in produzioni o processi di sviluppo urbano seriali. Si prevede che tale percorso formativo generi nuove opportunità lavorative e di occupazione nei territori rurali interessati dall'intervento.

L'utilizzo di risorse locali riduce la necessità di soluzioni industriali standardizzate, aumenta l'adattabilità del progetto alle specifiche condizioni geo-

Fig. 5 | Platform Subsystem Scheme (credit: C. Ayala-Garcia, 2024).

Fig. 6 | Structural grid and joists of the Platform Subsystem (credit: C. Ayala-Garcia and D. Velandia, 2024).

Fig. 7 | Platform Subsystem Prototype (credit: C. Nieman, 2024).

grafiche e climatiche, favorendo allo stesso tempo lo scambio di conoscenze e la riduzione dei costi: una standardizzazione flessibile può integrarsi con l'efficienza della produzione seriale grazie alla sua adattabilità agli specifici bisogni della comunità e ai principi di progettazione open-ended (Ostuzzi and Rognoli, 2019).

L'impatto ambientale della fase produttiva è mitigato dal confinamento dei processi di prefabbricazione in ambienti controllati, garantendo al contempo sia tempi di costruzione certi indipendentemente dalle condizioni atmosferiche sia l'integrità strutturale prevista dal progetto. Se il supporto tecnico e istituzionale è fondamentale per una corretta progettazione e realizzazione dell'opera, la collaborazione tra Enti locali, Istituzioni accademiche e comunità locali garantisce il supporto tecnico necessario a promuovere iniziative abitative sostenibili e coinvolgimento della comunità.

Sviluppo concettuale dei sottosistemi | L'housing rurale oggetto del presente studio è strutturato in tre sottosistemi concettuali, fondati sull'analisi dello stato dell'arte e sulle condizioni di contesto che hanno dimostrato come i tradizionali sistemi prefabbricati risultino problematici su pendii, in prossimità di aree fluviali o su terreni deboli.

L'implementazione dei principi progettuali strategici sin qui discussi consente che il progetto venga strutturato in base alle caratteristiche del terreno disponibile. Infatti una delle maggiori preoccupazioni emerse durante i colloqui con le comunità locali è relativa alla necessità di rendere pianeggiante il terreno prima di avviare la costruzione, operazione che richiede spesso l'utilizzo di macchinari pesanti che generano costi aggiuntivi non sopportabili dagli abitanti e che ritardano la realizzazione del fabbricato.

Mentre tradizionalmente gli elementi architettonici sono descritti in termini di muri, porte, pavimenti e finestre, la ricerca reinterpreta e ridefinisce questi elementi all'interno della struttura più ampia dei subsistemi (copertura, piattaforma e involucro), stabilendo nuove variabili progettuali di primaria importanza, che consentono di configurare un'abitazione rurale in modo autonomo e più rispondente alla realtà geografica e culturale degli abitanti.

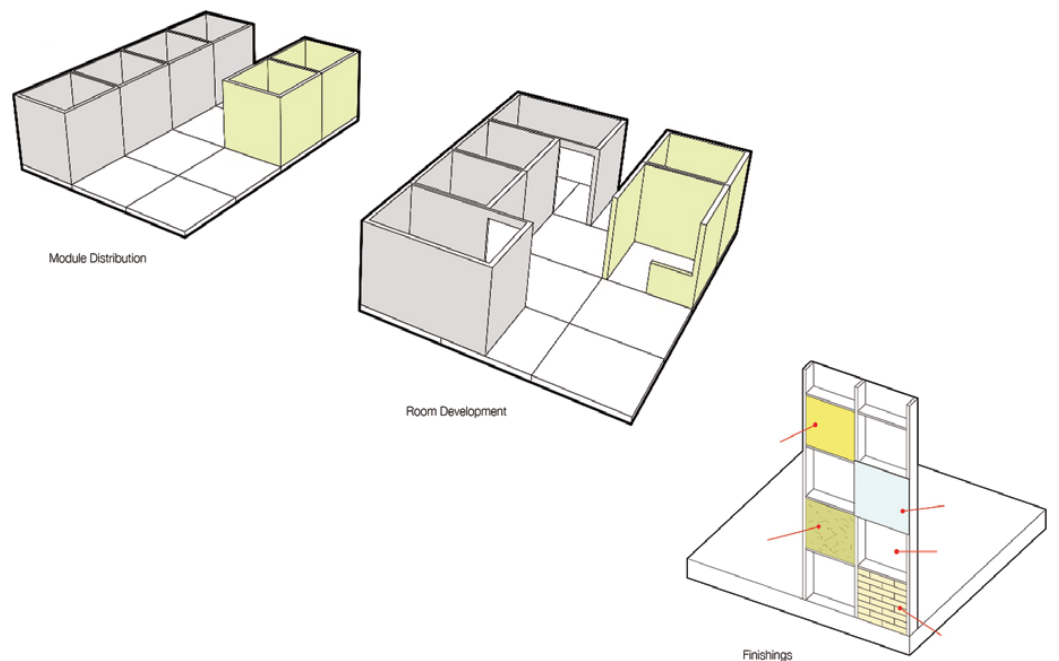
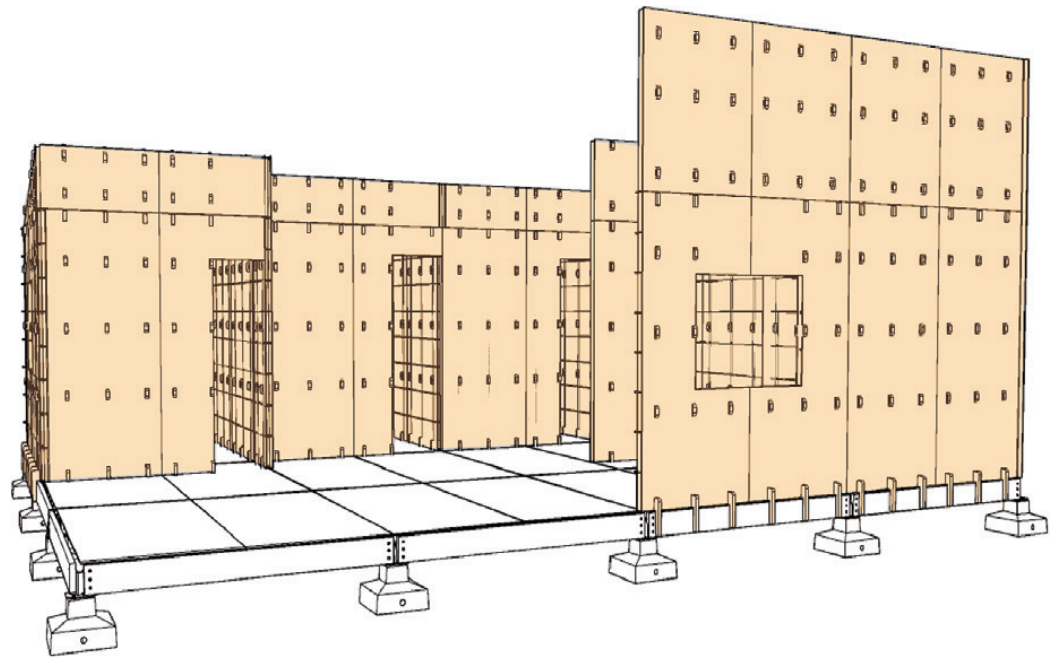


Fig. 8 | Enclosure Subsystem Scheme (credit: C. Ayala-Garcia and C. Nieman, 2024).

Fig. 9 | Decorations, furniture elements and accessories from OSB cut-outs and leftovers (credit: C. Ayala-Garcia and S. Luna, 2024).

Fig. 10 | Enclosure Subsystem modular grid (credit: H. Guerrero, 2022).

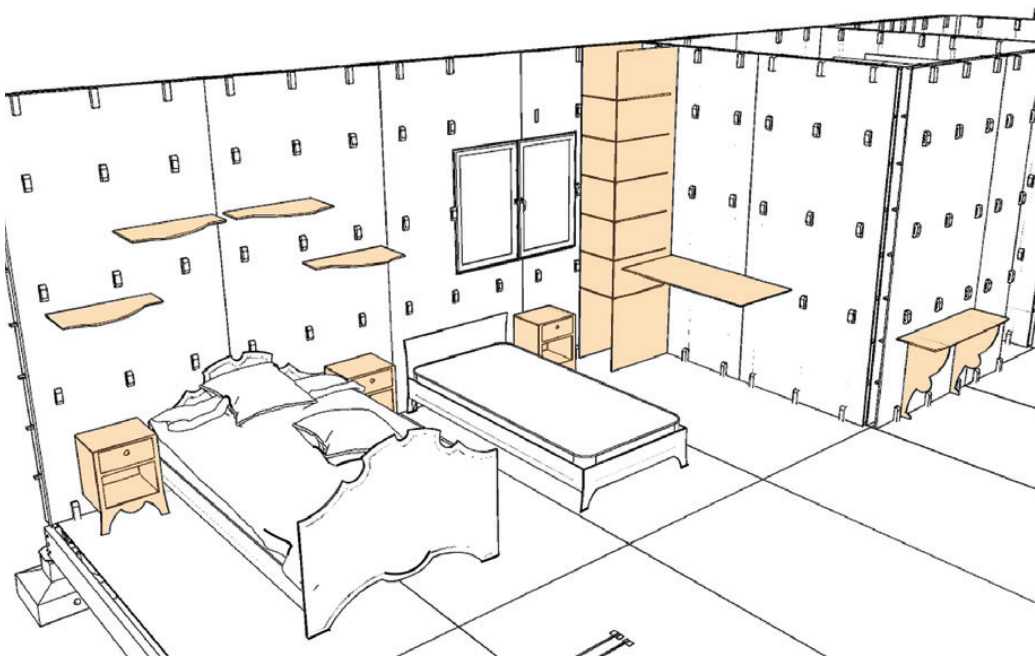


Fig. 11 | External enclosures forming the outer shell, integrating local cultural expressions (credit: C. Ayala-Garcia and S. Luna, 2024).

Fig. 12 | Built-in furniture (credit: C. Ayala-Garcia and S. Luna, 2024).

Il primo subsistema è quello della copertura che si estende per l'intera ampiezza dell'abitazione e richiede una struttura autoportante composta di elementi di supporto verticali combinati con uno orizzontale. Il sistema verticale è composto da due controventi diagonali che formano una struttura triangolare per garantire stabilità, mentre l'elemento orizzontale, denominato sistema di supporto della superficie superiore, attraversa lo spazio aperto (Fig. 1). La copertura, elemento strutturale primario, determina l'impronta a terra della costruzione e assolve alla funzione protettiva, operando in autonomia rispetto agli altri sottosistemi. Con una estensione massima di circa 114 mq, essa consiste in due moduli strutturali ognuno dei quali ospita una trave principale coadiuvata da quattro controventi diagonali ancorati alle fondazioni e 28 travetti di collegamento tra i moduli per garantirne la stabilità (Fig. 2).

Poiché eventuali alterazioni potrebbero comprometterne la solidità, gli utenti sono coinvolti in prima persona nella sua fase di assemblaggio eccetto che per le fondazioni, le quali vengono fabbricate in loco (Fig. 3). Per questioni climatiche e tecniche la copertura va realizzata per prima al fine di garantire riparo durante le operazioni di costruzione. Il suo montaggio segue un approccio strutturale dinamico, nel quale il nodo di collegamento tra i supporti diagonali e le travi consente la rotazione per favorire l'innalzamento graduale: dopo aver connesso la trave ai supporti diagonali, i cui piedi non sono collegati alla fondazione, la trave e i supporti di un lato vengono alzati gradualmente riducendo la distanza alla base tra i punti d'appoggio e formando così una struttura triangolare progressivamente più alta. Infine anche gli altri due supporti verticali vengono alzati seguendo lo stesso procedimento (Fig. 4); una volta fissate le

fondazioni e installati i travetti di irrigidimento, il progetto può procedere con il successivo sottosistema.

Il secondo subsistema è quello della piattaforma: si tratta di una soluzione modulare adattabile a differenti necessità abitative e si compone di fondazioni indipendenti da quelle della copertura e della struttura portante (Fig. 5). Le fondazioni, del tipo a plinto e progettate per essere leggere e adattabili al terreno, assolvono a due compiti: scaricare i pesi al suolo e creare un basamento rialzato, installabile con una coppia di operatori. La piattaforma è realizzata con travi che compongono la maglia strutturale e con travetti che ne aumentano la rigidità (Fig. 6).

Essa consente di elevare la struttura sopra il livello terreno, mitigando il rischio umidità e allagamento. Il sistema modulare segue una griglia ortogonale 3×4 , con ogni modulo che misura $2,44 \times 2,44$ metri e copre approssimativamente 72 mq. L'assemblaggio comincia con la realizzazione in loco delle fondazioni, ed è seguito dal loro posizionamento nei punti chiave strutturali (angoli, lati e centro) seguendo la geometria della piattaforma (Fig. 7); travi e travetti vengono quindi assemblati a incastro per aumentare la stabilità, prima della successiva installazione della pavimentazione e delle finiture.

Il terzo subsistema è quello dell'involucro che definisce la forma architettonica della casa e protegge i suoi abitanti dall'ambiente esterno (Fig. 8). A differenza del tetto e della piattaforma esso è progettato per l'interazione e la modifica da parte degli utenti, integrando usi, usanze ed elementi di finitura emersi durante workshop partecipativi – come decorazioni, elementi d'arredo e componenti accessori (Fig. 9).

L'involucro, realizzato secondo una griglia modulare, si compone di due tipologie di elementi, la divisione interna e la chiusura esterna (Fig. 10): la divisione interna (IC) definisce il layout delle stanze e consente modifiche modulari grazie all'impiego di pannelli prefabbricati che garantiscono un facile assemblaggio e riposizionamento; la chiusura esterna (EC) lungo il perimetro della costruzione esprime l'identità culturale del luogo (Fig. 11) e promuove l'utilizzo di materiale locale per le finiture. L'EC fornisce la massima protezione dai fattori ambientali, favorendo la ventilazione e l'illuminazione naturale tramite un controllato sistema di aperture.

Un elemento chiave emerso dalle interlocuzioni con la comunità è il riuso degli scarti di finestre e di altri componenti dell'involucro per creare arredi integrati (Fig. 12), approccio che concorre a ridurre lo spreco di materiale proveniente dalla prefabbricazione e permette l'integrazione di elementi familiari nel sistema, aumentandone la funzionalità e la sostenibilità.

Sviluppo del prototipo e fasi costruttive | Il modello parametrico e le sue regole generative di base sono stati gradualmente perfezionati durante lo sviluppo del prototipo. L'intero sistema è stato concepito tramite l'utilizzo del software Rhinoceros e del suo plug-in Grasshopper, scelti sia per la loro diffusione tra architetti e designer sia per i costi accessibili e l'efficienza nella progettazione e parametrizzazione di componenti sia perché consentono lo scambio di dati con le comuni macchine CNC. Per lo sviluppo del prototipo sono stati impiegati legname segato e pannelli di OSB, grazie al loro potenziale di lavorazione, di adattabilità al contesto e di

rinnovabilità nel breve termine (Nishimura, 2015). Le caratteristiche del materiale sono state incorporate nel modello parametrico al fine di migliorarne la precisione di progetto e le potenzialità di realizzazione. Ogni subsistema all'interno del modello è suddiviso in singoli componenti le cui proprietà geometriche sono predeterminate; tuttavia le loro caratteristiche tecniche, strutturali e di fabbricazione sono state verificate prima della fase di produzione. Tali aspetti sono stati valutati grazie a un modello CAD nel quale i materiali e i dettagli dei singoli componenti sono stati suddivisi in layer e ottimizzati per la fase di produzione attraverso un processo iterativo che spesso ha comportato modifiche a componenti e subsistemi per migliorarne la costruibilità (Fig. 13).

La relazione tra i singoli componenti influenza in maniera diretta queste ottimizzazioni progettuali: ad esempio nonostante l'elemento trave fosse stato inizialmente concepito come una serie di tre reticoli piani, è apparso evidente che l'elevato numero di elementi da assemblare avrebbe complicato la fase di cantierizzazione; questo processo è stato essenziale anche per identificare tutte le possibili variabili in grado di definire la progettazione dei nodi strutturali.

Un approccio strutturato ma adattabile è stato impiegato nella fase di prototipazione per assicurare il requisito di flessibilità; le fondazioni del volume sono state modellate su una base quadrata a sua volta suddivisa in una griglia ortogonale 3 x 4; tale configurazione è stata scelta per tre motivi chiave:

- una maglia ortogonale garantisce semplicità di costruzione e assemblaggio;
- l'adozione di un modulo quadrato di 2,44 metri di lato (pari a due formati industriali di pannelli) consente una superficie utile di 6 mq con uno sfido di materiale ridotto al minimo;
- un sistema a griglia consente molteplici configurazioni d'impianto, mantenendo allo stesso tempo uno schema distributivo costante in tutte le varianti; sei dei dodici moduli sono destinati a spazi privati, mentre i restanti sei assolvono a funzioni sociali o condivise.

Dopo aver stabilito una serie di possibili configurazioni spaziali con i potenziali abitanti è stato organizzato un workshop di co-progettazione (Binder and Brandt, 2008), durante il quale la forma e distribuzione interna sono stati concordati per adeguare il prototipo alle necessità degli utenti e interpretare i loro valori culturali (Fig. 14).

Gli elementi prefabbricati sono prodotti mediante gli strumenti di fabbricazione digitale disponibili sul mercato: per la produzione della maggior parte dei componenti prefabbricati è stata utilizzata una fresatrice a controllo numerico in quanto consente una progressiva scomposizione dei componenti con il risultato di dare vita a numerose variazioni a partire dal prototipo iniziale. L'implementazione della tecnologia a controllo numerico permette un'ottimizzazione del flusso di lavoro che comincia con la prototipazione digitale, prosegue con la produzione e si conclude con il montaggio. Queste tre fasi sono perfettamente interconnesse tramite il modello parametrico al fine di migliorarne l'efficienza e ridurre lo spreco di materiale, l'impatto economico e quello ambientale, rafforzando la sostenibilità dell'intero processo di costruzione.

Una volta realizzati i componenti sono trasportati in cantiere dove gli abitanti vengono coinvolti

nell'assemblaggio del prototipo. Questo processo mette in luce due fattori chiave: il primo è che le parti devono essere progettate pronte all'uso anche da parte di una manodopera non specializzata; mentre il secondo è che vi è il bisogno di sviluppare strategie per fornire assistenza e supporto durante tutto il processo costruttivo. L'implementazione dei sistemi CAM nell'housing rurale in America Latina introduce nuove metodologie che ridefiniscono così le tradizionali pratiche costruttive e spostano l'attenzione su dei nuovi modelli sostenibili e partecipativi che garantiscono una maggiore qualità di costruzione pur mantenendo l'investimento a basso costo.

Il prototipo è stato costruito attraverso un'elaborazione dedicata per ognuno dei suoi subsistemi (Fig. 15) e con lo scopo di validare sia il processo di costruzione tramite la parametrizzazione e i processi CAD / CAM, sia di prevedere i possibili scenari legati all'autocostruzione. Inoltre il prototipo ha consentito di mostrare ai sindaci l'intero processo di produzione⁶ e di assemblaggio che ha richiesto complessivamente tre giorni.

Al momento il prototipo è stato lasciato all'aperto in modo da verificarne la resistenza alle condizioni climatiche e verificarne ulteriori miglioramenti e/o modifiche. Questa fase è essenziale prima della costruzione della casa vera e propria in quanto consente di testare la performance strutturale del sistema e dei materiali prima della fase di prova da parte degli abitanti. Dopo sei mesi i materiali saranno analizzati in laboratorio per valutarne eventuali danni e verificare la stabilità strutturale; solo allora si proporrà la realizzazione di un'unità abitativa completa come illustrato nella Figura 14.

Riflessioni | Lo studio mette in luce la necessità di soluzioni abitative 'alternative' nella Colombia rurale e in America Latina, dove i sistemi autocostruiti e quelli industriali presentano vantaggi e sfide, ma allo stesso tempo non riescono ad ottemperare alle richieste del mercato. Si è messo in evidenza da un lato come la costruzione industrializzata garantisce performance strutturali, un buon rapporto costo-efficienza e una maggior velocità di produzione, sebbene rimanga una scelta per pochi a causa degli alti costi di trasporto, della mancanza di flessibilità e della necessità di manodopera specializzata, dall'altro come l'autocostruzione, pur favorendo il coinvolgimento della comunità, lo sviluppo di competenze e l'accessibilità economica, possa generare edilizia di scarsa qualità senza supervisione tecnica. Per superare tali criticità lo studio propone un approccio ibrido, che integri la prefabbricazione all'autocostruzione per ottimizzare efficienza e adattabilità.

Uno dei risultati chiave di questo studio è la dimostrazione di come il potenziale rappresentato dalle tecnologie di fabbricazione digitale (CAD / CAM) consenta di superare i limiti di questi due approcci: le comunità possono partecipare attivamente alla fase costruttiva mantenendo adeguati standard di qualità, tuttavia per una implementazione soddisfacente è necessario avviare percorsi di formazione specializzata con la partecipazione dell'istituzione locale, fondamentali per guidare consapevolmente gli utenti durante il processo costruttivo. Al contempo l'impiego di materiali locali e la personalizzazione di alcuni elementi di finitura risulta essenziale per favorire l'accettazione e l'adattamento alle comunità.

La costruzione del prototipo conferma la fattibilità di questo approccio e dimostra come i componenti prefabbricati possano essere assemblati in maniera efficiente e rapida garantendo la partecipazione dei cittadini durante tutto il processo. Mostrare alle Amministrazioni locali come svolgere le fasi di progettazione e di realizzazione (dalle prime interazioni con i futuri proprietari in cui si stabiliscono i parametri progettuali fino alla parametrizzazione dei componenti, alla fabbricazione digitale e all'assemblaggio sul posto) è stato fondamentale per convincerli del potenziale di questa sperimentazione e dell'importanza di investire in formazione ed equipaggiamento.

Anche il supporto degli investitori locali si è rivelato fondamentale per il successo della sperimentazione: ad esempio la donazione di materiale da un vicino produttore di legname non solo ha permesso la costruzione del prototipo, ma ha anche evidenziato l'importanza del coinvolgimento locale nel progetto; ad ogni modo ci sono ancora alcune problematiche da risolvere, sulle quali si sta lavorando.

La proprietà intellettuale è un ulteriore fattore chiave da tenere in considerazione. Per fare in modo che il progetto rimanga sempre accessibile e aperto alle comunità si è deciso di brevettare il sistema sviluppato⁷. Questa decisione mira a prevenire l'acquisizione monopolistica della tecnologia da parte di privati o l'applicazione di costi di accesso per gli utenti, preservandone la natura aperta e comunitaria. Le imprese locali sono invece benvenute nel partecipare all'iniziativa affinché possano offrire supporto come partner e non come soggetti interessati solo al suo sfruttamento. Lo studio ha infine confermato che i sistemi adattabili e modulari offrono una proposta multiscalare che può trovare applicazione ben oltre il contesto colombiano.

Considerazioni finali | Parametrictectura è un progetto di ricerca sviluppato da un gruppo di architetti e designer con l'obiettivo di rispondere a una delle crisi più impellenti che la Colombia e l'America Latina si trovano ad affrontare: quella della qualità degli alloggi rurali autocostruiti in zone dove le infrastrutture sono spesso carenti e le persone vivono in condizioni precarie e con accesso al credito limitato. Allineandosi ad alcuni dei Sustainable Development Goals (SDG), in particolare all'SDG1 – No poverty e all'SDG3 – Good Health and Well-Being) il progetto propone una soluzione abitativa adattabile e a basso costo che sostenga i contadini, le famiglie e le comunità rurali che si ritrovano spesso esclusi dai tradizionali processi di costruzione: grazie a ridotto investimento richiesto agli abitanti e al supporto delle comunità locali, il sistema vuole tracciare una direzione alternativa per il miglioramento delle loro condizioni di vita. Sebbene l'utilizzo di strumenti parametrici garantisca configurazioni flessibili modellate sulle necessità ambientali e sociali degli abitanti, il progetto deve ancora affrontare sfide tecniche che richiedono ulteriori ricerche, in particolare rispetto alla durabilità a lungo termine, alla sostituzione dei componenti strutturali e altre specifiche relative ai materiali.

La soluzione progettuale e il prototipo dimostrano un forte potenziale di implementazione sebbene sia ancora in corso la fase di test per accertare le performance del modello e apportare eventuali migliorie. Gli stakeholders chiave nel settore dell'housing rurale in America Latina sono stati invitati a contribuire alla scalabilità del progetto e a valutare

dove indirizzare i potenziali investimenti e come strutturare la gestione della fase di produzione; bisogna agire in fretta perché, sebbene le autorità locali abbiano espresso il loro interesse nell'adozione della tecnologia, una nuova compagine politica potrebbe rallentare la fase decisionale e influire sulla continuità della sperimentazione.

Per affrontare queste problematiche l'Ufficio per il Trasferimento Tecnologico dell'Università di Los Andes – grazie alla sua competenza e alle capacità di coinvolgere gli stakeholder e di attivare partnership – sta lavorando per ottenere finanziamenti aggiuntivi e supporto istituzionale. Sviluppi futuri della sperimentazione prevedono il testing di un prototipo migliorato a breve termine e, se le sfide strutturali e di durabilità verranno superate, saremo in grado di consentire a migliaia di famiglie a basso reddito di avere accesso ad abitazioni che, seppur dal costo contenuto, sono personalizzabili e facili da costruire senza rinunciare al diritto alla salute, alla sicurezza e al benessere.

According to the most recent projections by the National Administrative Department of Statistics (DANE, 2023), Colombia's population in 2025 is estimated to reach approximately 52.77 million, with about 23.5% residing in rural areas, equivalent to approximately 12.4 million people. Despite ongoing efforts, the housing deficit in Colombia remains a critical issue. In 2013, the deficit stood at 1,664,050 households; by 2023, it had only marginally decreased to 1,643,653. Projections estimate that by 2025, the demand for rural housing will require the construction of approximately 800,000 new homes, further exacerbating the need to address the rural housing gap, estimated at approximately 2.5 million homes (DNP, 2015).

One of the key factors shaping the rural housing crisis is the transformation of rural family structures due to socio-economic shifts over the twentieth and twenty-first centuries, where the agricultural sector was sidelined in favour of industrial modernisation, exacerbated by internal conflicts that displaced rural populations (Salazar, 2016). The disparity in housing development between urban and rural areas is attributable to the prioritisation of urban-centric policies, the consolidation of the construction sector in cities, and logistical challenges that hinder rural development (World Bank, 2021). Most countries in Latin America show similar patterns, where approximately 30% of the region's population lives in rural areas, with housing deficits ranging from 25% to 60% in some countries (ECLAC, 2022).

Self-construction is a predominant practice, particularly in low-income rural communities, accounting for up to 50% of housing solutions (Inter American Development Bank, 2012). Rural households rely predominantly on informal construction methods due to limited access to financial resources and technical support, leading to substandard housing conditions. To meet the demand for rural housing, two primary alternative construction methods deviate from traditional urban construction systems: industrialised systems and self-construction. Each approach responds to distinct social and economic dynamics, offering unique advantages and challenges. This contribution presents an alternative approach to providing rural housing in Colombia and Latin America by combining self-construction prac-

tices with industrialised prefabrication supported by digital fabrication technologies. The study focuses on the development and testing of a parametric design system tailored to the needs of rural communities with limited access to infrastructure and financial resources. It proposes a decentralised, locally-driven housing solution that leverages CAD / CAM tools to improve construction quality while allowing for community participation and cultural adaptation.

The paper consists of several sections, the first of which analyses the context of rural construction in Colombia. At the same time, the second describes the design methodology developed to create the construction system. Afterwards, it presents the current prototype to test the technology and present it to stakeholders. Finally, it discusses the advantages and challenges of implementing this system in rural areas. By addressing both technical and social aspects of rural housing, this contribution offers practical insights for designers, architects, researchers and communities, demonstrating how digital design can provide alternative affordable solutions to the standard construction systems that not only hinder rural development and well-being but also rely on unsustainable methods of construction.

Industrial and prefabricated construction systems

Industrialised construction and prefabricated housing systems offer significant advantages, particularly in terms of technical precision and cost-efficiency (Steinhardt et alii, 2019; Boafó, Kim and Kim, 2016; Chiu, 2012; Davies, 2005). These methods reduce production and construction times while lowering input costs, resulting in more affordable housing solutions (Ibañez, Guallart and Salka, 2022; Parvin, 2013; Luther, 2009). Additionally, industrialised systems ensure higher technical quality and structural integrity than traditional construction methods. Industrial production processes draw much inspiration from the automotive sector, where concepts like platform sharing (Ben Mahmoud-Jouini and Lenfle, 2010) and component sharing (Takeishi and Fujimoto, 2001) improve notably cost efficiency (Krishnan and Gupta, 2001).

Industrialised construction also has notable limitations. One of the primary drawbacks is the inflexibility of modifications during the construction process. Errors in planning or design become evident during assembly and are challenging to rectify on-site, particularly in serial production models. Additional challenges include the difficulty in finding specialised labour, which is more expensive than an ordinary labourer, and the high costs of transporting prefabricated components from the factory to the construction site, especially in the case of rural areas with limited infrastructure, as is the case in 60% of Colombian areas (Daeshpour and Herbert, 2018). In addition, prefabricated housing systems are often complex for users to customise and result in uniform designs that may not appeal to potential homeowners or blend seamlessly into the local context.

Self-construction | Self-construction is widespread, particularly in rural and low-income sectors. Although often associated with substandard quality due to the lack of technical expertise and professional supervision, self-construction offers several cultural and economic benefits (Di Virgilio, 2023). This approach allows families to customise their homes

based on their specific needs and available resources, fostering a sense of ownership and emotional attachment to the living space. Additionally, it minimises costs by reducing the reliance on external labour while providing an opportunity for individuals to acquire new construction skills.

It is an extension of 'DIY practices' (Do It Yourself; Edwards, 2006), typically rooted outside professional activities like design or architecture. Although DIY is considered an individual activity, some scholars argue that it has evolved as a social activity thanks to knowledge-sharing (Bean and Rosner, 2012). Through DIY, it is possible to build things that work the same or better than society's traditional infrastructure (Lukens, 2013).

Despite its advantages, self-construction often coincides with poor-quality housing due to the inexperience of builders and the absence of specialised oversight. However, when properly guided, self-construction can effectively accommodate individual and collective needs (CEMEX and Universidad Nacional Autónoma de México, 2005). Self-built homes' emotional and psychological value further enhances their significance, as individuals take pride in their achievements and develop a stronger connection to their living environment (Obremski and Carter, 2019). Moreover, self-construction promotes economic benefits by reducing labour costs and fostering skill development among community members (Hamiduddin and Gallent, 2015).

Towards an integrated approach | An ideal housing solution for a rural context, particularly in Latin America, would integrate the strengths of self-construction and industrialised systems, leveraging their respective advantages while mitigating their weaknesses in response to the actual need and housing deficit in those areas. Rural construction projects' overall quality and efficiency can improve significantly by centralising key processes such as design, production, assembly, management and administration.

Previous global projects worked as a benchmark for this project, providing the building blocks to develop an open-source parametric architecture system. For instance, Walter Segal's approach to self-building houses provides valuable insights into how the connection between the designer and the people who construct can propose alternatives for construction without sacrificing quality (Di Virgilio, 2023). In addition, it is important to underline that such an approach laid the foundation for what later became the digital fabrication process for house building (Pone, 2022).

The application of Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Manufacturing (CAM) technologies is becoming widespread across different contexts (Kolarevic, 2001; Díez, 2018) and is showing enormous potential to supply affordable quality home solutions for many (Romano and Di Monte, 2023; Celani, 2016). Several successful initiatives are paving the way for self-construction of houses with the aid of CAD-CAM tools, such as the Digitally Fabricated House for New Orleans (Sass, 2008), the WikiHouse project¹, The Veneer Building System², the BiosPHera housing prototype³, modular housing for extreme environments⁴, or the lightweight modular home⁵. These initiatives facilitate seamless information integration, streamline production, and enhance customisation options for alternative housing development. Still, some are dif-

difficult to implement in remote areas with no access or poor access to basic infrastructure.

The primary objective of this study is to develop an integrated digital process encompassing the design, production, and construction of rural housing in Colombia and, further, in Latin America, understanding the above limitations and challenges. We aim to produce a system easily produced with advanced equipment such as CNC routers, panel saws and beam saws; incorporate affordable renewable materials with significantly lower environmental impact than concrete (Ashby, 2013), including solid wood, Oriented Strand Board (OSB), or Medium Density Fibreboards (MDF). Additionally, the system promotes decentralised manufacturing of pieces, maintenance and supervision by putting the technology in the town hall buildings or local community centres rather than in the industry.

Numerous discussions with stakeholders revealed that while land acquisition is the greatest obstacle to housing development in urban areas, the situation is different in rural areas. Even if farmers and households own land, they face considerable obstacles in building their homes due to the lack of essential materials, such as bricks, concrete, and other essential components.

Some local mayors responded positively to bringing construction technology directly to the towns rather than relying on external sources. Consequently, a key requirement for this project is that each village administratively supports various rural communities and invests in CNC machinery and training local carpenters. Additionally, these villages should offer material-cutting services to en-

able farmers and villagers to actively participate in developing their homes through the 'parametric-tectura' initiative.

This process must account for both tangible and intangible factors that define the sociocultural and geographical context of the target population. To achieve this goal, four 'strategic principles' are established, necessary for any rural housing project of this type:

- 1) Context definition – Identifying the target population and environment must strike a balance between specificity and generality to allow methodological replication while addressing unique regional challenges; this includes recognising available local materials, climatic conditions, and geographical factors;
- 2) Integration of design, manufacturing and assembly led by the local administration through a continuous process in which a design expert (Manzini, 2015), either an employee of the administration or an external consultant, guides the technological implementation and is present when the design of a dwelling is required, especially for compliance with structural stability and habitability requirements;
- 3) Incorporation of tangible and intangible aspects – Cultural and social factors should be integrated into the design to enhance emotional community values and cultural aesthetics (Chapman, 2015) and promote acceptance;
- 4) User participation strategies to ensure that their requests do not compromise the structural integrity of the building while allowing for meaningful involvement; one identifies two distinct levels of participation, the first relating to 'assembly interaction' (users receive prefabricated components with detailed instructions to ensure that the assembly process does not compromise structural integrity), the second relating to 'production interaction' (users contribute to the fabrication phase of specific components under the guidance of a professional, with the possibility of improving the final design quality).

Design principles | Integrating self-construction and industrialised production addresses two key aspects of rural housing: ensuring high construction quality and incorporating intangible cultural values. By combining the strengths of both methodologies with 'strategic principles', this study establishes a framework for sustainable rural housing applicable in the different geographical areas of Colombia and Latin America. We proposed a prototype to validate this approach through empirical testing.

This research establishes essential design principles which guide the prototyping iterations developed under the proposed methodology. Primarily, it seeks to reduce construction costs through the prefabrication of components, which are produced off-site and assembled on-site, significantly expediting the building process. Construction deficiencies were minimised by integrating CAD / CAM tools throughout the design, production, and construction phases, enabling early issue detection. Resource utilisation is optimised through centralised digital planning, ensuring precise material estimation and waste reduction.

Secondarily, community participation ensures that housing solutions align with local needs. CAD tools facilitate an interactive design process with the

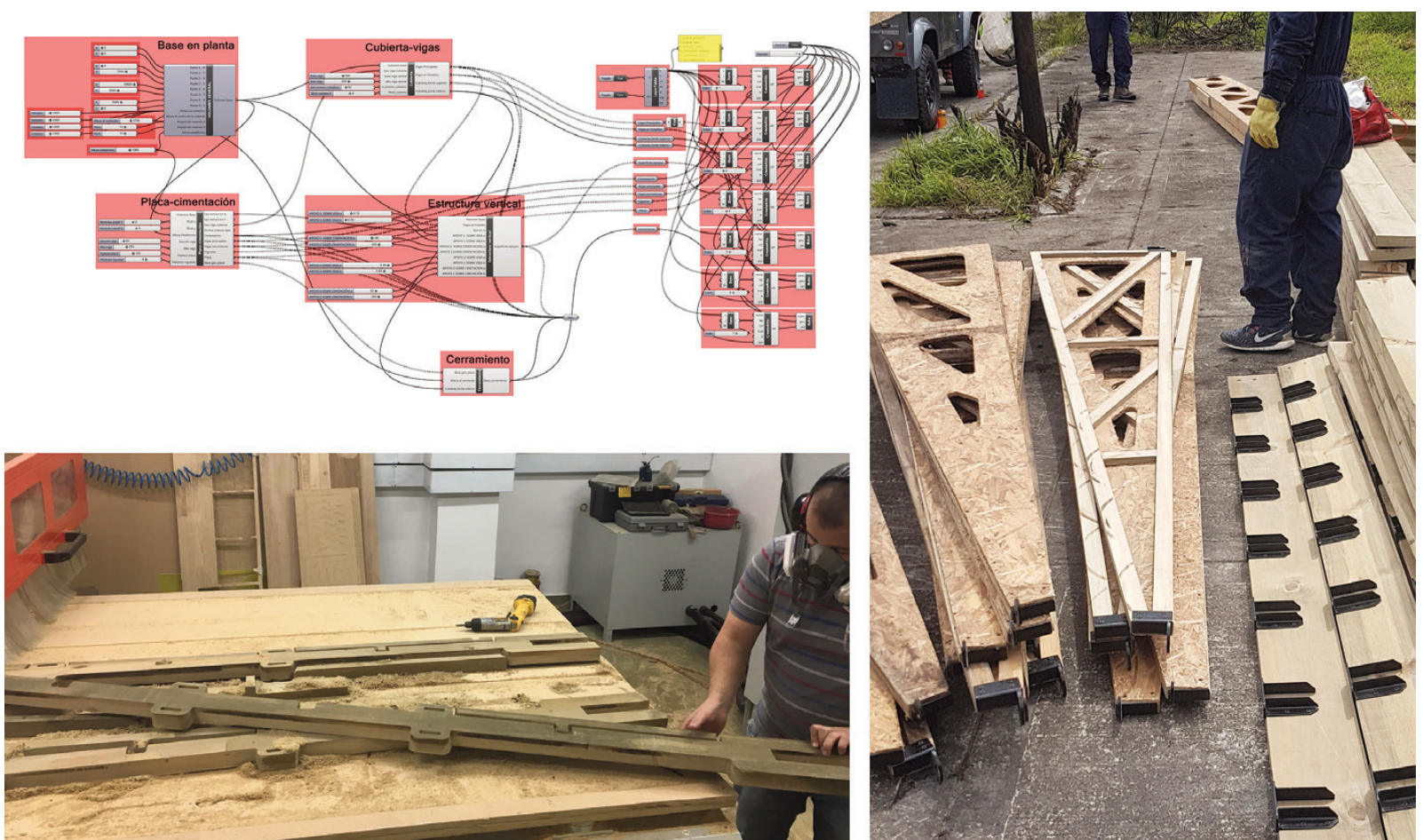


Fig. 13 | CNC Production settings and cuts (credit: C. Nieman and D. Velandia, 2024)



Fig. 14 | Visualisation of the rural house construction based on co-creative workshops with future users / builders (credit: S. Luna, 2024).



Fig. 15 | Prototype construction on rural setting in Suesca, Cundinamarca (credit: C. Nieman and D. Velandia 2024).

community, incorporating cultural elements often overlooked in mass production or urban setting development. We expect that employment opportunities will arise from this skill acquisition, facilitating immediate job creation in the various rural areas where the project will run.

Using local resources reduces reliance on standardised industrial materials, enhancing adaptability to geographical and climatic conditions while fostering knowledge exchange and cost reductions. Flexible standardisation balances serial production efficiency with adaptability to community-specific needs, following open-ended design principles (Ostuzzi and Rognoli, 2019).

Climate impact is mitigated by conducting prefabrication in controlled environments, ensuring construction schedules are not affected by weather conditions while maintaining structural integrity. Technical assistance and institutional support are crucial for successful implementation. Collaboration between local government, academic institutions, and communities ensures adequate guidance, fostering sustainable housing initiatives and community involvement.

Conceptual development of the subsystems |

This study's rural housing subject consists of three conceptual subsystems based on analysing the state of the art and contextual conditions. This analysis has shown that traditional prefabricated systems are problematic on slopes, near river areas, or with soft soils. Implementing these strategic design principles allows for an independent configuration of the project according to the specific characteristics of the available land. For instance, one of the main concerns expressed by the communities we consulted is the need to level the terrain before starting a traditional prefabricated housing project. This task often requires heavy machinery and incurs additional costs that users cannot afford, potentially delaying the entire construction process.

While architectural elements are traditionally about walls, doors, floors, and windows, this research reinterprets and redefines these elements within the broader structure of subsystems (roof, platform, and envelope), establishing new design variables that are important. These let us design a rural home in a way that's independent and more in tune with the geographical and cultural reality of the people who live there.

The first subsystem is the roof, which covers the entire width of the house and requires a self-supporting structure composed of vertical support elements combined with a horizontal element. The vertical support consists of two diagonal braces forming a triangular structure for stability. In contrast, the horizontal element, referred to as the upper horizontal surface support system, spans the open space (Fig. 1). The roof, a primary structural element, determines the construction's footprint and performs a protective function, operating independently of the other subsystems. With a maximum extension of approximately 114 square metres, it consists of two structural modules, each of which houses a main beam supported by four diagonal braces anchored to the foundations and 28 connecting beams between the modules to ensure stability (Fig. 2).

Since altering the roof could compromise stability, users engage with it primarily during assembly, except for the footings, fabricated on-site (Fig.

3). Due to geographical and technical constraints, the roof assembly takes place in advance to provide shelter during construction. Its assembly follows a dynamic structural approach, where diagonal supports and beams act as rotational axes, allowing gradual elevation. First, the beam connects to the diagonal supports using a prefabricated joint, with the upper ends attached while the lower ends remain unanchored. The beam and supports are then raised incrementally by reducing the base distance between supports, forming a progressively taller triangular structure. Finally, the opposite end undergoes the same process (Fig. 4). Once the footings are secured and the joists are in place to reinforce the structure, the project can continue with the next subsystem.

The second is called the platform subsystem. It is a modular system adaptable to various housing needs. It consists of footings and a framework (Fig. 5). The footings transfer loads to the ground and elevate the house, designed as lightweight, surface-level components manageable by one or two people. The framework consists of beams, which form the structural grid, and joists, placed between beams to enhance rigidity (Fig. 6).

As the primary base for housing activities, the platform elevates the structure above natural terrain, mitigating environmental factors such as moisture, flooding, and uneven ground. The modular system follows a 3×4 orthogonal grid, with each module measuring 2.44×2.44 metres, covering approximately 72 sqm. Assembly begins with footing fabrication, followed by positioning footings at key structural points (corners, sides, and centre) to support the framework (Fig. 7). Beams and joists are then interlocked to reinforce stability before installing flooring and finishes.

The third one is called the enclosure subsystem. It defines the house's architectural form and protects inhabitants from external conditions (Fig. 8). Unlike the roof and platform, it is designed for user interaction and modification, incorporating cultural values identified through participatory workshops such as decorations, furniture elements and accessories (Fig. 9).

The enclosure follows a modular grid. Consists of internal and external elements (Fig. 10). Internal enclosures (IC) define room layouts and allow modular adjustments, with prefabricated panels enabling easy assembly and repositioning. External enclosures (EC) form the outer shell, integrating local cultural expressions (Fig. 11) and promoting the use of locally available materials for finishings. While prefabricated, they include open framework sections, allowing users to customise finishes with regionally sourced materials. The EC must provide complete protection against environmental factors, facilitate ventilation and natural lighting through controlled openings, and include access points for circulation.

A key development in the enclosures arose from community interactions: utilising cut-offs from windows and other enclosure components, it is possible to create integrated furniture (Fig. 12). This approach reduces material waste from prefabrication while integrating familiar design elements into the overall system, enhancing both functionality and sustainability.

Prototype development and construction stages | The parametric model and its rules improve for the development of the prototype. The entire sys-

tem uses Rhinoceros software and its Grasshopper plug-in, chosen for their popularity among architects and designers, their affordable cost, and their efficiency in designing and parameterising components, as well as because they allow data exchange with standard CNC machines. Sawn wood and OSB chipboard sheets came into play in developing the prototype due to their potential for processing, adaptability to the context and short-term renewability (Nishimura, 2015). The characteristics of the material become an integral part of the parametric model to improve its design accuracy and construction potential.

Each subsystem within the parametric model generates individual components. While their geometrical properties are predefined, various technical, structural, and manufacturing considerations must precede production. These aspects involved a CAD model in which the materials and details of individual components are broken down into layers and optimised for the production phase through a reiterative process that frequently involves modifications to components and subsystems to improve their constructability (Fig. 13).

Component relationships directly influence these design adaptations. For example, although the beam element initially conceives of itself as a series of three flat grids, it became evident that the large number of elements to assemble would complicate the construction phase; this process was also essential to identify all the possible variables that could define the design of the structural joints.

A structured but adaptable approach is adopted during the prototyping phase to ensure the flexibility requirement; the foundation shape of the volume is a square base split into a 3×4 orthogonal grid. This configuration came about because of three key factors:

- the use of an orthogonal system simplifies the construction and assembly of the prototype;
- a modular unit of 2.44×2.44 metres is employed, corresponding to the dimensions of two standard commercial chipboard sheets; each module has an approximate area of 6 sqm, optimising material efficiency;
- the grid system allows multiple layout configurations; a consistent distribution pattern is present in all variants; six of the twelve modules are designated private spaces, while the remaining six serve social or shared functions.

After establishing a series of possible spatial configurations with the potential inhabitants, a co-design workshop is organised (Binder and Brandt, 2008), during which the shape and internal distribution agree to ensure that the prototype meets the users' needs and reflects their cultural values (Fig. 14).

The prefabricated elements comprise the production of digital fabrication tools available on the market: a numerically controlled milling machine to produce the majority of the prefabricated components as it allows a progressive breakdown of the components, resulting in numerous variations from the initial prototype. The implementation of numerical control technology allows for an optimised workflow that begins with digital prototyping, continues with production and ends with assembly. These three phases are perfectly interconnected through the parametric model to improve efficiency and reduce material waste and economic and environmental impact, enhancing the sustainability of the

entire construction process. Once fabricated, the components move to the construction site, where users are ready to assemble the prototype. This process highlights two key aspects: first, the components must be designed for ease of use, ensuring accessibility for non-specialised users; secondly, we need to develop strategies to provide guidance and support during the construction process. Incorporating CAM systems into rural housing construction in Latin America introduces new methodologies that redefine traditional building practices, shifting towards more adaptable and participatory models, assuring higher quality of construction while maintaining affordable investment. The prototype was built by partially elaborating on each subsystem (Fig. 15). This prototype aims to verify the construction process through parameterisation and CAD / CAM development processes and evaluate the directed self-construction scenarios. Additionally, the prototype setting allows us to show the entire production system to the local town majors involved in the project for implementation⁶. After assembling the three systems, construction takes three days.

The prototype is left outdoors to validate its resistance to weather conditions. It can also iterate with the parametric model making possible modifications. This phase is essential before constructing the complete home, as it is necessary to verify the structural performance of the system and materials for safety reasons before user testing. After six months of outdoor exposure, the materials will be analysed in the laboratory to assess potential damage and their structural stability. Once the prototype evaluation phase is over, it proposes to start the second phase, which aims to produce a complete housing unit, as illustrated in Figure 14.

Discussion | The study highlights the urgent need for alternative housing solutions in rural Colombia and Latin America, where self-construction and industrialised methods each present advantages and challenges, but also as both models are failing in supply demand. Industrialised construction ensures structural integrity, cost-efficiency, and faster production, yet it remains limited by high transportation costs, a lack of flexibility, and the need for specialised labour. On the other hand, self-construction fosters community involvement, skill development, and affordability, but without technical oversight, it can result in poor-quality housing. This research proposes a hybrid approach, integrating prefabrication with self-construction to optimise efficiency and adaptability.

One of the key findings is the potential of digital fabrication technologies, such as CAD / CAM tools, to bridge the gap between industrialised and self-

built housing. By leveraging these technologies, communities can actively participate in construction while maintaining quality standards. However, for successful implementation, accessible training programs and institutional support must be developed to guide users through the construction process. Moreover, local materials and cultural preferences must be incorporated to enhance community acceptance and integration.

The prototype construction verified the feasibility of this approach, demonstrating that prefabricated components can be efficiently assembled within a short time frame while allowing for community participation. Showing local governments how to carry out the design and implementation phases (from the first interactions with the future owners, where design parameters get set, to component parameterisation, digital fabrication and on-site assembly) was crucial to convince them of the potential of this experiment and the importance of investing in training and equipment.

Support from local stakeholders has proven critical. For instance, we obtained a donation of materials from a nearby wood and timber manufacturer, which enabled the prototype's construction and highlighted the importance of local engagement in the project. As we move towards wider implementation, some challenges remain. The university's technology transfer office is now actively helping overcome these obstacles.

Intellectual property is another key consideration. To safeguard the project and ensure it remains accessible to communities, we have chosen to patent the system⁷. This strategy wants to prevent private companies from monopolising the technology or charging users for access, thus preserving its open and community-focused nature. Local businesses are welcome to participate in the initiative, providing support as collaborators rather than exploiters of the system. The study also confirms that modular, adaptable systems offer a scalable solution applicable beyond the Colombian context.

Conclusions | Parametrictectura is a research initiative developed by a team of architects and designers seeking to address one of the most pressing housing challenges in Colombia and Latin America: the quality of rural self-constructed housing. The project examines the application of CAD / CAM technologies in areas where conventional infrastructure is lacking and where people often reside in precarious conditions with limited access to adequate shelter and overall well-being.

By aligning with Sustainable Development Goals (specifically SDG 1—No Poverty and SDG 3—Good Health and Well-Being), the project aims to provide

an affordable, adaptable housing system that empowers rural families, farmers, and communities often outside formal building processes due to financial constraints or geographical isolation. With minimal investment from the end user and support from local communities, the system offers an alternative path to improving living conditions. Utilising parametric design tools, the system allows for flexible configurations tailored to each user's geographic and social needs. However, the project still faces technical challenges that require further research, particularly regarding long-term durability, replacement of structural components over time, and other material-specific concerns.

The design solution and prototype demonstrate strong implementation potential, although testing is underway to ascertain the model's performance and make any necessary improvements. Key stakeholders are encouraged to contribute to the project's scalability, consider where to direct potential investments and structure the management of the production phase. It is necessary to act quickly because, although local authorities have expressed interest in adopting the technology, a new political administration could slow down the decision-making process and affect the continuity of the trial.

Thanks to its expertise and ability to engage stakeholders and activate partnerships, the Technology Transfer Office at the University of Los Andes is working to secure additional funding and institutional support to address these issues. Future developments in the trial include testing an improved prototype in the short term. Suppose the structural and durability challenges are over. In that case, we will enable thousands of low-income families to access affordable, customisable, and easy-to-build homes without sacrificing their right to health, safety, and well-being.

Acknowledgements

The highlighted project in this paper was developed inside the Faculty of Architecture and Design at Los Andes University, funded by an interdisciplinary joint internal grant and the tech transfer 'impacta programme' of the Vice-Rectorate of Research from Los Andes University for the period 2017-2023. Initial development and Parametric setting: H.D. Guerrero Garzón. Joint development: E. L. Ortiz. Visualisation Images: S. Luna. Technology transfer support: TU Uniandes. Wood and timber donors: Inmunizadora Serye S. A. Additional ac-

knowledgements to the families and local government of Suesca municipality (Colombia), especially to C. Ruiz Talero, who served as a connection bridge between the project and the local community. Additionally, this work was supported by the Open Access Publishing Fund of the Free University of Bozen-Bolzano.

The Authors confirm that the paper has the following credits: study conception, writing and original manuscript preparation, subsystems design analysis and interpretation of data (C. Ayala-Garcia); writing review and editing, study conception, parametric development, prototype construction (D.

A. Velandia Rayo); study conception, prototype construction writing review and editing (C. J. Nieman Jansen). All the Authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Notes

1) For more information, see the web page: wikihouse.cc [Accessed 23 April 2025].

2) For more information, see the web page: veneerhouse.com [Accessed 23 April 2025].

3) For more information, see the web page: biosphera2.com/ [Accessed 23 April 2025].

4) For more information, see the web page: leapfactory.it [Accessed 23 April 2025].

5) For more information, see the web page: wikkellhouse.com [Accessed 23 April 2025].

6) The initial phase of the prototype development was carried out in the Municipality of Suesca (Cundinamarca, Colombia). The participation of families in co-design workshops, collaboration with the town hall and mayor, as well as the use of local space for prototype production, were all approved by the Ethics Committee of Los Andes University in accordance with its code of ethics. Additional information is available upon request.

7) The subsystems have been submitted to the local authority for IP protection under the following protocols CO2017 0006075, CO20170010145, and CO20170007359. For more information, see: patentscope.wipo.int [Accessed 23 April 2025]

References

- Ashby, M. F. (2013) "Sustainability – Living within our means", in Ashby, M. F. (ed.), *Materials and the environment*, Butterworth-Heinemann, pp. 319-347. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-385971-6.00011-7 [Accessed 24 April 2025].
- Ben Mahmoud-Jouini, S. and Lenfle, S. (2010), "Platform reuse lessons from the automotive industry", in *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 30, issue 1, pp. 98-124. [Online] Available at: doi.org/10.1108/01443571011012398 [Accessed 24 April 2025].
- Bean, J. and Rosner, D. (2012), "Old hat – Craft versus design?", in *Interactions*, vol. 19, issue 1, pp. 86-88. [Online] Available at: doi.org/10.1145/2065327.2065344 [Accessed 24 April 2025].
- Binder, T. and Brandt, E. (2008), "The Design:Lab as platform in participatory design research", in *CoDesign | International Journal of CoCreation in Design and the Arts*, vol. 4, issue 2, pp. 115-129. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15710880802117113 [Accessed 24 April 2025].
- Boafo, F. E., Kim, J.-H. and Kim, J.-T. (2016), "Performance of Modular Prefabricated Architecture – Case Study-Based Review and Future Pathways", in *Sustainability*, vol. 8, issue 6, article 558, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su8060558 [Accessed 24 April 2025].
- Celani, G. (2016), "Changing the Architectural Production Chain in Latin America with the introduction of New Technologies", in *Materia Arquitectura*, vol. 13, pp. 118-121. [Online] Available at: materiaarquitectura.com/index.php/MA/article/view/58 [Accessed 24 April 2025].
- CEMEX México and Universidad Nacional Autónoma de México (2005), *Manual de autoconstrucción y mejoramiento de vivienda*, CEMEX, Ciudad de México. [Online] Available at: ingenieria.unam.mx/pdf/manual_autoconstruccion.pdf [Accessed 24 April 2025].
- Chapman, J. (2015), *Emotionally durable design – Objects, experiences and empathy*, Routledge.
- Chiu, S. T.-L. (2012), *An analysis on – The potential of prefabricated construction industry*, report submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science in Wood Products Processing in the Faculty of Forestry, University of British Columbia, WOOD 493. [Online] Available at: hdl.handle.net/2429/42792 [Accessed 24 April 2025].
- Daeshpour, K. and Herbert, S. (2018), *Infrastructure project failures in Colombia*, The Institute of Development Studies and Partner Organisations. [Online] Available at: hdl.handle.net/20.500.12413/14073 [Accessed 24 April 2025].
- Davies, C. (2005), *The prefabricated home*, Reaktion Books, London.
- Di Virgilio, N. (2023), "Fare molto con poco – Un'architettura modulare a partire da Walter Segal | Making a lot with little – Modular architecture, starting with Walter Segal", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 164-173. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14132023 [Accessed 24 April 2025]
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2023), *Proyecciones de población y vivienda en Colombia*. [Online] Available at: dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion [Accessed 24 April 2025].
- Díez, T. (ed.) (2018), *Fab City – The mass distribution of (almost) everything*, IAAC – Fab Lab Barcelona, Barcelona. [Online] Available at: fablabbcn.org/wp-content/uploads/2020/09/Fab-City-The-Mass-Distribution-of-Almost-Everything.pdf [Accessed 24 April 2025].
- DNP – Departamento Nacional de Planeación (2015), *Misión para la Transformación del Campo – Informe – Mejoramiento de las Condiciones de Habitabilidad en el Campo*. [Online] Available at: colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Agriculturapecuarioforestal%20y%20pesca/Pol%C3%ADtica%20de%20Mejoramiento%20de%20las%20Condiciones%20de%20Habitabilidad%20en%20el%20Campo.pdf [Accessed 24 April 2025].
- ECLAC – Economic Commission for Latin America and the Caribbean (2022), *Social Panorama of Latin America and the Caribbean 2022 – Transforming education as a basis for sustainable development*. [Online] Available at: cepal.org/en/publications/48519-social-panorama-latin-america-and-caribbean-2022-transforming-education-basis [Accessed 24 April 2025].
- Edwards, C. (2006), "Home is where the art is – Women, handicrafts, and home improvements 1750-1900", in *Journal of Design History*, vol. 19, issue 1, pp. 11-21. [Online] Available at: doi.org/10.1093/jdh/epk002 [Accessed 24 April 2025].
- Hamiduddin, I. and Gallent, N. (2015), "Self-build communities – The rationale and experiences of group-build (Baugruppen) housing development in Germany", in *Housing Studies*, vol. 31, issue 4, pp. 365-383. [Online] Available at: doi.org/10.1080/02673037.2015.1091920 [Accessed 24 April 2025].
- Ibañez, D., Gualart, V. and Salka, M. (2022), "La prototipizzazione pedagogica di edifici ecologici avanzati e bio-città presso il Valldaura Labs | On pedagogical prototyping of advanced ecological buildings and biocities at Valldaura Labs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 136-149. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11122022 [Accessed 24 April 2025].
- Inter American Development Bank (2012), *Room for Development – Housing Markets in Latin America and the Caribbean – Summary*. [Online] Available at: doi.org/10.18235/0012554 [Accessed 24 April 2025].
- Krishnan, V. and Gupta, S. (2001), "Appropriateness and impact of platform-based product development", in *Management Science*, vol. 47, issue 1, pp. 52-68. [Online] Available at: dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2789870.2789875 [Accessed 24 April 2025].
- Kolarevic, B. (2001), "Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age", in *19th eCAADe – Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Helsinki (Finland) 29-31 August 2001*, pp. 117-123. [Online] Available at: doi.org/10.52842/conf.eaaade.2001.117 [Accessed 24 April 2025].
- Lukens, J. (2013), *DIY Infrastructure*, Doctoral dissertation, PhD in Digital Media, Georgia Institute of Technology, Atlanta. [Online] Available at: repository.gatech.edu/entities/publication/e108d0c6-58dc-421d-8184-16ae2b6db1b5/full [Accessed 21 April 2025].
- Luther, M. B. (2009), "Towards prefabricated sustainable housing – An introduction", in *Environment Design Guide*, August 2009, pp. 1-11. [Online] Available at: jstor.org/stable/26151879 [Accessed 24 April 2025].
- Manzini, E. (2015), *Design, when everybody designs – An introduction to design for social innovation*, The MIT Press. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/9873.001.0001 [Accessed 24 April 2025].
- Nishimura, T. (2015), "Chipboard, oriented strand board (OSB) and structural composite lumber", in Ansell, M. P. (ed.), *Wood composites*, Woodhead Publishing, pp. 103-121. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00006-8 [Accessed 24 April 2025].
- Obremski, H. and Carter, C. (2019), "Can self-build housing improve social sustainability within low-income groups?", in *Town Planning Review*, vol. 90, issue 2, pp. 167-193. [Online] Available at: doi.org/10.3828/tp.2019.12 [Accessed 24 April 2025].
- Ostuzzi, F. and Rognoli, V. (2019), "Open-ended design – Local re-appropriations through imperfection", in Ambrosio, M. and Vezzoli, C. (eds), *Designing sustainability for all – Proceedings of the 3rd LeNS World Distributed Conference, Volume 3, Milan, Italy, April 3-5, 2019*, POLI.DESIGN, Milano, pp. 868-873. [Online] Available at: hdl.handle.net/1854/LU-8629330 [Accessed 24 April 2025].
- Parvin, A. (2013), *Architecture for the people by the people*. [Online] Available at: ted.com/talks/alastair_parvin_architecture_for_the_people_by_the_people [Accessed 24 April 2025].
- Pone, S. (2022), "Maker – Il ritorno dei costruttori – Una possibile transizione digitale per l'Architettura | Maker – The return of the builders – A possible digital transition for Architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 14-23. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1212022 [Accessed 24 April 2025].
- Romano, R. and Di Monte, E. (2023), "Moduli nearly Zero Energy – Modelli abitativi a basso impatto ambientale per la città del futuro | nearly Zero Energy Modules – Low-impact modular housing models for the city of the future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 250-263. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14212023 [Accessed 24 April 2025].
- Salazar, G. S. (2016), "El conflicto armado y su incidencia en la configuración territorial – Reflexiones desde la ciencia geográfica para la consolidación de un periodo de pos negociación del conflicto armado en Colombia", in *Bitácora Urbano Territorial*, vol. 26, issue 2, pp. 45-57. [Online] Available at: revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/57605/0 [Accessed 24 April 2025].
- Sass, L. (2008), *Project Summary – Digitally fabricated housing for New Orleans*. [Online] Available at: ddf.mit.edu/project-summary-2/ [Accessed 24 April 2025].
- Steinhardt, D., Manley, K., Bildsten, L. and Widen, K. (2019), "The structure of emergent prefabricated housing industries – A comparative case study of Australia and Sweden", in *Construction Management and Economics*, vol. 38, issue 6, pp. 483-501. [Online] Available at: doi.org/10.1080/01446193.2019.1588464 [Accessed 24 April 2025].
- Takeishi, A. and Fujimoto, T. (2001), "Modularisation in the auto industry – Interlinked multiple hierarchies of product, production and supplier systems", in *International Journal of Automotive Technology and Management*, vol. 1, issue 1, pp. 1-16. [Online] Available at: hdl.handle.net/1721.1/741 [Accessed 24 April 2025].
- World Bank (2021), *Urbanization and Rural Development in Latin America – A Review of Trends and Policies*. [Online] Available at: documents1.worldbank.org/curated/en/886971644211206681/pdf/2021-Results-in-the-Latin-America-and-Caribbean-Region.pdf [Accessed 24 April 2025].