

## ARTICLE INFO

Received	10 March 2026
Revised	13 April 2026
Accepted	21 April 2026
Published	30 June 2026

**ANACARDO CIRCOLARE**

Progetto centrato sulle persone per filiere circolari di produzione dell'anacardio

**CASHEW IN-CYCLE**

Human-centred design for circular cashew production chains

Camilo Ayala-Garcia, Carolina Perez Rodriguez, Clara Forero Lesmes, Tatiana Cruz Perea, Juan Sebastian Porras, Alejandro Maranon, Camilo Hernandez Acevedo, Oscar Álvarez Solano, Alicia Porras Holguín

## ABSTRACT

L'articolo presenta Jurui, un progetto 'centrato sulle persone' che affronta i principali nodi tecnologici della filiera dell'anacardio nella regione colombiana del Vichada. Inserita in un contesto segnato da risorse infrastrutturali limitate e da pratiche che impiegano strumenti autoprodotto, la ricerca integra sperimentazione materica, validazione tecnica e co-progettazione intervenendo sui residui del guscio di anacardio per trasformarli in materiali compositi e impiegarli per riprogettare un sistema di contenitori integrato con i macchinari per l'apertura della noce. Attraverso la prototipazione iterativa e prove sul campo il progetto ha evidenziato miglioramenti in termini di ergonomia, sicurezza, efficienza d'uso del materiale e continuità d'impiego dei contenitori nelle diverse fasi della raccolta e lavorazione della materia prima. L'esperienza mostra come la valorizzazione degli scarti, la realizzazione di strumenti locali e il rafforzamento delle competenze locali possano contribuire alla riorganizzazione dei sistemi agroindustriali.

This article presents Jurui, a human-centred design project addressing technological bottlenecks in the cashew production chain in Vichada, Colombia. Operating in a context of informal adaptation and limited infrastructure, the research integrates material experimentation, engineering validation, and participatory design. Cashew shell residues were transformed into composite materials and applied to the redesign of a basket system integrated with nut-opening machinery. Through iterative prototyping and field testing, improvements were observed in ergonomics, safety, material efficiency, and workflow continuity. The project demonstrates how waste valorisation, decentralised manufacturing, and community capacity building can reorganise agro-industrial systems.

## KEYWORDS

design centrato sulle persone, valorizzazione degli scarti agroindustriali, design sistemico circolare, co-progettazione, multidisciplinarietà

human-centred design, agro-waste valorisation, circular systemic design, co-creation, multidisciplinary development

**Camilo Ayala-Garcia**, Researcher, Free University of Bozen-Bolzano (Italy).

**Carolina Perez Rodriguez**, Research Assistant, Universidad de los Andes (Colombia).

**Clara Ligia Forero Lesmes**, Research Assistant, Universidad de los Andes (Colombia).

**Tatiana Cruz Perea**, PhD Candidate, Universidad de los Andes (Colombia).

**Juan Sebastian Porras**, Research Assistant, Universidad de los Andes (Colombia).

**Alejandro Maranon**, Associate Professor, Universidad de los Andes (Colombia).

**Camilo Hernández Acevedo**, Associate Professor, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia).

**Óscar Álvarez Solano**, Associate Professor, Universidad de los Andes (Colombia).

**Alicia Porras Holguín**, Associate Professor, Universidad de los Andes (Colombia).



I sistemi agroindustriali localizzati in aree rurali e periferiche operano spesso in contesti segnati da una dotazione tecnologica limitata, dall'impiego di soluzioni tecniche auto-prodotte e da una ridotta disponibilità di strumenti e infrastrutture conformi a standard consolidati. In molte aree del 'Sud globale' (Bull and Banik, 2025) la trasformazione dei prodotti agricoli si basa su macchinari assemblati o modificati localmente e su utensili trasferiti da altri settori produttivi, in assenza di un effettivo sviluppo progettuale, di procedure di certificazione e di adeguate verifiche ergonomiche, il che riflette disuguaglianze più ampie nelle capacità tecnologiche e nello sviluppo industriale rispetto ad altri Paesi (Bell and Pavitt, 1993). Ne derivano una produttività ridotta, un aumento dei rischi per i lavoratori e una tendenziale concentrazione delle fasi a maggiore valore aggiunto al di fuori della regione, poiché attività come confezionamento, logistica di trasporto e commercializzazione finale sono spesso svolte da attori esterni al contesto locale (Goyal, Hicel and Jha, 2025).

Nella regione del Vichada, nel sud-est della Colombia, la situazione produttiva riflette queste dinamiche. Negli ultimi anni la produzione di anacardio è cresciuta in modo significativo, sostenuta da programmi nazionali e regionali che hanno incentivato la diversificazione agricola (Roman Hoyos and Arango Wiesner, 2007; Orduz-Rodríguez and Rodríguez-Polanco, 2022). L'anacardio è stato promosso come coltura strategica per la regione dell'Orinoquia grazie alla sua capacità di tollerare la siccità e di adattarsi a suoli poco fertili (Arango Wiesner et alii, 2016; León, 2020). All'aumento delle superfici coltivate non è tuttavia seguito un analogo avanzamento tecnologico della filiera di trasformazione: l'apertura della noce, la separazione del guscio e la gestione del liquido del guscio dell'anacardio (CNLSL) restano operazioni prevalentemente manuali (Fig. 1).

Lungo l'intera filiera gli strumenti di lavoro sono spesso improvvisati o adattati da ambiti produttivi diversi. I dispositivi per l'apertura delle noci derivano spesso da utensili da taglio riadattati, gli impianti di cottura si basano su processi termici artigianali – adottati anche in relazione alla domanda di prodotto trattato termicamente, particolarmente rilevante in alcuni mercati di destinazione, fra cui quello europeo – e i contenitori per lo stoccaggio sono in plastica di bassa qualità che, in condizioni di clima tropicale, si degrada rapidamente (Fig. 2). Sebbene tali adattamenti testimonino l'ingegnosità locale, vengono di norma sviluppati senza standard di sicurezza né criteri ergonomici. Ciò espone gli operatori a rischi rilevanti, tra cui ustioni chimiche da CNLSL, lesioni da sovraccarico ripetuto ed esposizione ai fumi di combustione (Fig. 3).

Studi condotti in altre aree in cui si lavora l'anacardio hanno documentato danni cutanei ed effetti negativi di lungo periodo sulla salute dei lavoratori coinvolti nella sgusciatura manuale (Andonaba et alii, 2017); inoltre le proprietà corrosive del CNLSL sono ampiamente documentate in letteratura (Mazzetto, Lomonaco and Mele, 2009; Oliveira et alii, 2020), il che rafforza l'urgenza di ridurre l'esposizione diretta. I citati limiti tecnologici incidono anche sulla produttività e sulla qualità del prodotto: meccanismi di apertura mal calibrati e sistemi di separazione inefficienti danneggiano il seme della noce di anacardio, riducendone la qualità commerciale, mentre processi di cottura non controllati pos-

sono causare fratture del seme e un rilascio disomogeneo dell'olio.

Al tempo stesso sottoprodotti di valore come i gusci e le ceneri rimangono spesso sottoutilizzati, nonostante il loro potenziale nell'ambito dei materiali compositi e delle applicazioni con materiali a base biologica (Patel, Bandyopadhyay and Ganesh, 2006; Yuliana et alii, 2012; Prakash et alii, 2018; Harini et alii, 2018). L'insieme di rischi per la sicurezza, sprechi di materiale e scarsa integrazione delle più elementari tecnologie costituisce una criticità nella catena di valore dell'anacardio e richiede una rilettura critica dell'intera filiera, anziché interventi puntuali e isolati (Gaddi and Mastrodonardo, 2024).

Studi recenti inquadrano i sistemi produttivi basati sugli adattamenti tecnologici come reti socio-tecniche complesse che richiedono approcci di design sistemico (Barbero and Ferrulli, 2023; Maffei et alii, 2024). In questo dibattito il design è sempre più riconosciuto come motore delle transizioni circolari attraverso la valorizzazione degli scarti e la costruzione di sistemi produttivi radicati localmente (Santos Malaguti de Sousa et alii, 2023), mentre l'innovazione materica assume valore non solo in rapporto alle prestazioni tecniche, ma anche alla percezione e all'uso (Del Curto et alii, 2022; Pedgeley, Rognoli and Karana, 2016; Karana, Hekker and Kandachar, 2009).

Nonostante la crescente attenzione al design circolare<sup>1</sup>, all'ergonomia nei processi agroindustriali e all'appropriazione della tecnologia (Vacanti and Leonardi, 2024) gli studi disponibili tendono ancora a trattare separatamente materiali, processi e strumenti. Rimangono limitate le ricerche che esplorano come uno strumento impiegato all'interno di un sistema agroindustriale possa agire da connettore sistemico tra fattori umani (intesi in senso ergonomico, operativo e prestazionale), valorizzazione dei residui materiali e produzione delocalizzata.

Il presente contributo affronta questa lacuna proponendo, nell'ambito del progetto Juruí<sup>2</sup>, un approccio interdisciplinare guidato dal design applicato alla filiera dell'anacardio nella regione del Vichada, attraverso un protocollo replicabile per individuare e riprogettare gli strumenti critici del sistema, con l'obiettivo di migliorare la sicurezza, la continuità operativa e la produzione locale. Il testo è articolato come segue: dopo aver riportato il contesto e lo stato dell'arte, il paper individua i punti critici del progetto, presenta la metodologia e illustra le fasi della ricerca e di validazione; la sezione finale discute limiti, trasferibilità e implicazioni.

Il contributo si colloca nel campo del design per la sostenibilità (Vezzoli, 2018; Manzini, 2015), all'interno del quale il progetto oltrepassa la sola dimensione del prodotto per includere processi collaborativi, la costruzione di scenari e la resilienza della filiera produttiva (Morpurgo, 2024; Gaddi and Mastrodonardo, 2024). La sua originalità risiede nell'integrare, in un unico intervento, la valorizzazione degli scarti, la riprogettazione ergonomica di un oggetto, l'ottimizzazione della produzione e dei saperi locali, riformulando il design circolare come condizione relazionale e infrastrutturale incorporata nei sistemi produttivi.

Inoltre il progetto mira a valorizzare e potenziare il sapere locale, anziché sostituire le pratiche esistenti con processi industriali importati: attraverso workshop di co-progettazione, attività di 'cartografia sociale' – intesa come costruzione condivisa di map-

pe del territorio e delle pratiche locali a partire dallo sguardo della comunità – e osservazione diretta, il gruppo di ricerca ha potuto attivare sinergie tra gli attori del sistema agroindustriale, designer e ingegneri (Moore and Garzón, 2010; Sanders and Stappers, 2008). La sperimentazione sui materiali e la validazione del progetto sono state condotte in modo iterativo, così da mantenere gli interventi tecnicamente fattibili e al contempo socialmente radicati.

### Individuazione dei punti critici nella filiera |

Le ricerche condotte sul campo nella regione del Vichada hanno mostrato che molti degli strumenti e dei sistemi di supporto impiegati lungo la filiera dell'anacardio derivano da adattamenti di oggetti provenienti da altri settori. Contenitori per bevande, lattiero-caseari, di plastica per la frutta e altri contenitori generici venivano riutilizzati per raccogliere le noci e trasportarle fino ai macchinari di lavorazione, stoccare i gusci già aperti o mettere a dimora le piantine nelle prime fasi di crescita (Fig. 4). Queste soluzioni versatili attestano una notevole capacità locale di risolvere problemi e di riuso dei materiali; nello stesso tempo mettono però in evidenza la presenza di carenze tecnologiche nella produzione di anacardio.

Benché tali adattamenti dimostrino l'ingegno e la resilienza della popolazione locale la ricerca sui sistemi agroindustriali informali mostra che strumenti non adatti tendono ad aumentare i rischi per la salute degli operatori e a ridurre l'efficienza produttiva di processo (Battini et alii, 2011; Dianat et alii, 2020; Rainbird and O'Neill, 1995). Nella regione del Vichada l'assenza di attrezzature specifiche ha comportato discontinuità dei piani di lavoro, il sollevamento di pesi ad altezze eccessive, distribuzioni irregolari dei carichi e inadeguatezza dei contenitori, tutti fattori che incidono direttamente sulla postura e sui movimenti degli operatori.

Osservazioni sul campo e interviste partecipate hanno documentato frequenti flessioni, torsioni e posture innaturali prolungate durante la raccolta, la tostatura, l'apertura delle noci e la separazione dei gusci (Fig. 5). I lavoratori hanno riferito di lombalgie croniche, affaticamento delle spalle e stanchezza fisica al termine di lunghe giornate di lavoro, sintomi coerenti con quanto rilevato in altri settori agroindustriali di piccola scala, dove il lavoro manuale ripetitivo e strumenti mal concepiti contribuiscono a dolori muscolo-scheletrici (Fathallah, 2010; ILO, 2011). In particolare le attività di trasformazione della noce implicano contrazioni muscolari ripetute e con sforzi elevati, utilizzo improprio di dispositivi di taglio, prolungata esposizione al calore e posizioni innaturali del polso, tutti fattori di rischio ergonomico riconosciuti in letteratura (Bao and Silverstein, 2005). Nel caso dell'anacardio, tali sollecitazioni fisiche sono aggravate dall'esposizione al Cashew Nutshell Liquid (CNLSL), con un aumento congiunto del rischio per la salute dei lavoratori, come rilevato personalmente dal gruppo di ricerca.

I contenitori utilizzati non avevano una geometria che ne favorisse l'impilamento e ne agevolasse lo stoccaggio e il trasporto, soprattutto nei contesti tipici del bacino dell'Orinoco in cui il trasporto è fluviale. Piuttosto che liquidare tali condizioni come soluzioni inadeguate o informali il progetto le ha assunte come evidenze critiche di un'autonoma capacità tecnologica locale (Brennan and Luloff, 2007) e le ha analizzate come prototipi già in uso, ossia come soluzioni locali adattate a una condizio-



**Fig. 1** | Manual opening of cashew nuts in the department of Vichada, illustrating direct contact with Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) under traditional processing conditions (credit: Jurui Project, 2022).

Next page

**Fig. 2, 3** | Improvised tools for cashew nut opening, adapted from other industrial sectors; Occupational risks associated with manual cashew processing, including exposure to CNSL and transformation residues (credits: Jurui Project, 2022).

ne di risorse esigue. Questa prospettiva è coerente con gli studi sul design per la sostenibilità (Vezzoli, 2018) e sulle tecnologie appropriate (Vacanti and Leonardi, 2024), secondo cui l'innovazione nelle regioni periferiche del mondo dovrebbe partire dal riconoscimento e dal perfezionamento delle pratiche esistenti, più che dalla loro sostituzione integrale (Smith, Fressoli and Thomas, 2014).

Attraverso workshop di co-progettazione, mappature del contesto partecipate e osservazione diretta, il gruppo di ricerca ha potuto attivare sinergie tra gli attori del sistema agroindustriale e designer e ingegneri (Massari et alii, 2025). Tali attività hanno reso possibile l'identificazione e l'analisi degli strumenti autoprodotti, acquisendone funzioni, capacità di carico, configurazioni ergonomiche e durabilità dei materiali (Fig. 6). Questa mappatura ha permesso di individuare specifici ambiti di intervento lungo la filiera, con particolare riferimento agli strumenti di supporto alla raccolta, ai contenitori destinati al trasporto dei gusci, ai dispositivi impiegati per regolare l'altezza del piano di lavoro e ai sistemi modulari di impilamento dei contenitori. Ciascuna criticità è stata quindi analizzata in rapporto ai profili di sicurezza, efficienza operativa e integrazione con le successive fasi di trasformazione.

**Metodologia: protocollo di ricerca e replicabilità** | Adottando un protocollo interdisciplinare guidato dal design, che combina osservazione sul campo, co-progettazione, sperimentazione materiale, validazione tecnica e prove in situ, la ricerca è stata articolata in sei fasi: 1) mappatura della filiera dell'anacardio e individuazione dei colli di bottiglia ergonomici e operativi; 2) documentazione e classificazione degli strumenti adattati localmente mediante osservazione e workshop; 3) sperimentazione sui materiali a partire dai residui del guscio di anacardio; 4) co-progettazione interdisciplinare integrando design, ingegneria meccanica e ingegneria chimica; 5) prototipazione iterativa e validazione basata su simulazioni; 6) prove sul campo in condizioni reali di produzione.

I partecipanti sono stati selezionati in base al loro coinvolgimento nella filiera e ai ruoli tecnici ricoperti nel progetto<sup>3</sup>. I casi di sperimentazione sono stati definiti in relazione alla loro ricorrenza nelle diverse fasi produttive e alla loro rilevanza per il rischio ergonomico e l'inefficienza dei flussi di lavoro. I dati raccolti hanno incluso osservazioni, feed-

back degli utenti, prestazioni dei prototipi e risultati delle simulazioni. Le prove si sono concentrate su capacità di carico (circa 10 kg), ergonomia, controllo dello sversamento del prodotto, resistenza strutturale e compatibilità con i macchinari. Il confronto con i contenitori esistenti è stato condotto attraverso una valutazione prestazionale di carattere qualitativo e applicativo (Tab. 1); la replicabilità del protocollo risiede proprio in questa sequenza di fasi, pur restando gli esiti dipendenti dal contesto.

Il gruppo di lavoro ha condotto sperimentazioni di laboratorio utilizzando residui del guscio di anacardio (particelle e ceneri), combinati con polimeri biodegradabili, quali il PLA. I compositi ottenuti hanno mostrato maggiore rigidità e stabilità, risultando idonei a processi di stampaggio a iniezione e a compressione (Fig. 7), in coerenza con la letteratura sui riempitivi lignocellulosici (Bogoeva-Gaceva et alii, 2007; Azwa et alii, 2013).

Questo passaggio ha spostato la ricerca dall'esplorazione materiale all'applicazione sistemica; la mappatura della filiera ha evidenziato che i contenitori sono un elemento ricorrente nelle fasi di raccolta, trasporto, trasformazione, essiccazione e coltivazione (Fig. 8), configurandoli come veri e propri connettori infrastrutturali. I contenitori esistenti, spesso semplici recipienti in plastica riadattati, erano tuttavia privi di qualità ergonomiche, di durabilità strutturale e di compatibilità con i processi produttivi, contribuendo a inefficienze, perdite di materiale e affaticamento degli operatori (Neumann, Ekman and Winkel, 2009).

Il contenitore è stato quindi individuato come punto strategico di intervento; invece di introdurre nuovi dispositivi il progetto ha applicato il composito sviluppato alla riprogettazione dei contenitori. In coerenza con i principi del Material Driven Design e dei materiali autoprodotti (Karana et alii, 2015; Rognoli et alii, 2015) le proprietà del materiale hanno orientato lo sviluppo di contenitori modulari, impilabili ed ergonomicamente adattati alle attività della filiera. Tali elementi operano come infrastrutture minute capaci di migliorare la distribuzione del carico, ridurre l'esposizione al CNSL e integrarsi con i macchinari per l'apertura delle noci sviluppati nel progetto.

La ricerca si è articolata in tre linee interconnesse: 1) sviluppo di materiali compositi a partire dai residui dell'anacardio; 2) progetto di un sistema di contenitori orientato all'ergonomia, alla sicurezza

e ai flussi operativi; 3) sviluppo di macchinari per l'apertura delle noci, finalizzati a minimizzare il contatto con il CNSL (Ayala-Garcia et alii., 2025). Sebbene reciprocamente dipendenti, in questo articolo l'attenzione si concentra sulla seconda linea, assumendo la cassetta come artefatto specifico del sistema all'interno della filiera.

**Processo progettuale integrativo e co-progettazione** | Il design svolge un ruolo centrale nell'integrazione tra lo sviluppo dei materiali, gli aspetti chimico-fisici della materia prima e le competenze della comunità. Più che configurarsi come un semplice segmento nello sviluppo di soluzioni tecniche, il progetto ha agito come quadro di mediazione, rendendo possibile il dialogo tra le discipline e tra la sperimentazione di laboratorio e la realtà territoriale (Barbero and Ferrulli, 2023). Sono stati organizzati workshop con esperti di ingegneria meccanica, ingegneria chimica e design per individuare requisiti, vincoli prestazionali e soluzioni possibili (Fig. 9); queste sessioni hanno allineato criteri di prestazione strutturale, limiti di processo, considerazioni ergonomiche e disponibilità dei materiali in una strategia di sviluppo coerente.

Lo scambio interdisciplinare ha consentito a ciascuna disciplina di esplicitare i propri presupposti: gli ingegneri meccanici hanno definito i requisiti di portanza, di resistenza all'impilamento e i parametri di fabbricabilità; gli ingegneri chimici hanno contribuito con soglie di compatibilità dei materiali, temperature di processo, limiti compositivi dei materiali a base di guscio di anacardio e criteri per l'isolamento della componente corrosiva del CNSL; i designer hanno tradotto tali vincoli tecnici in forma, ergonomia e sistema, assicurando che l'oggetto potesse funzionare entro i ritmi delle pratiche produttive quotidiane, integrarsi con i sistemi di apertura meccanica e consentire agli operatori di lavorare in condizioni ergonomicamente sicure.

Attraverso discussioni iterative e prototipazione rapida, il contenitore è progressivamente emerso come oggetto specifico del sistema. Il gruppo di lavoro ha convenuto che non potesse essere sviluppato come generico contenitore agroindustriale, ma che dovesse essere progettato esplicitamente per la filiera dell'anacardio nella regione del Vichada. Il suo sviluppo è avvenuto a partire dall'osservazione diretta delle fasi di raccolta, tostatura, essiccazione e confezionamento nella regione:

il contenitore è stato quindi inteso non come artefatto isolato, ma come elemento infrastrutturale capace di connettere il flusso dei materiali, il movimento degli operatori e le logiche di stoccaggio (Fig. 10).

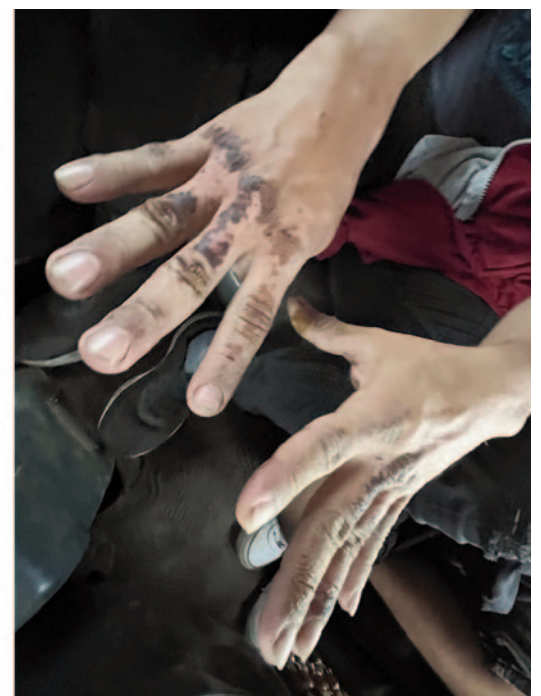
Le pratiche locali hanno avuto un ruolo decisivo nella definizione del progetto; gli operatori delle fasi di coltivazione e di lavorazione modificavano spesso i contenitori di plastica, tagliando i pannelli laterali per migliorare la ventilazione, rinforzando le basi per evitare fessurazioni, rivestendo l'interno per evitare di danneggiare l'anacardo, oppure adattando le maniglie per migliorare la presa. Questi interventi informali hanno rivelato una competenza progettuale incorporata nelle pratiche d'uso quotidiane (Fig. 11) e il progetto la ha reinterpretata come caratteristiche formali del nuovo artefatto: le asole di ventilazione sono state dimensionate e posizionate in funzione delle esigenze di essiccazio-

ne; la geometria delle maniglie è stata adattata per ridurre lo sforzo del polso, mantenendo la mano il più possibile lontana dai gusci aperti e dal relativo liquido; lo spessore delle pareti è stato calibrato per aumentare resistenza e durabilità minimizzando il peso; l'impilamento è stato riprogettato per meglio distribuire i carichi verticali durante il trasporto (Fig. 12).

**Risultati: caratteristiche ed evoluzione della cassetta** | Attraverso la prototipazione iterativa e le prove sul campo è stato progressivamente definito un insieme di requisiti funzionali ed ergonomici: il contenitore è stato progettato per contenere circa 10 kg di noci di anacardio, in linea con le soglie di movimentazione manuale in grado di bilanciare efficienza e riduzione dello sforzo fisico; tale capacità è stata verificata mediante prove dirette con gli operatori.

È risultata inoltre essenziale la compatibilità con i macchinari di apertura e separazione sviluppati in parallelo (Fig. 13). La geometria del contenitore è stata calibrata per allinearsi alle altezze dei macchinari e dei sistemi di raccolta, così da rendere continuo il flusso operativo e ridurre i passaggi di movimentazione. Un ulteriore requisito chiave riguardava lo sversamento controllato: la geometria del bordo e l'inclinazione delle pareti sono state ottimizzate per consentire uno scarico fluido del prodotto nei macchinari, riducendo la dispersione laterale e la caduta di noci al di fuori dei macchinari (Fig. 14). Una forma simmetrica ha assicurato una distribuzione equilibrata del peso, migliorando la stabilità e riducendo i movimenti compensativi e il contatto con il CNSL.

Il disegno ergonomico delle maniglie è stato affinato in termini di curvatura, spessore e posizione per ridurre l'affaticamento della mano e movimenti



impropri del polso durante le attività ripetitive. Anche la resistenza strutturale è risultata migliorata e le aperture di ventilazione sono state concentrate alla base per semplificare la fabbricazione, migliorare il passaggio d'aria nelle fasi di essiccazione e ridurre l'impiego di materiale mantenendo la stabilità (Fig. 15). La compatibilità con i 'tubetes' per le piantine<sup>4</sup> ha esteso la funzione del contenitore anche alla fase di coltivazione, rafforzandone il ruolo sistemico lungo l'intera filiera (Fig. 16).

Sono stati sviluppati prototipi a bassa e ad alta risoluzione, i primi dei quali, in cartone, MDF e componenti stampati in 3D, sono stati utilizzati per verificare proporzioni, logiche di impilamento e modalità di interazione. Gli operatori hanno interagito direttamente con questi modelli, consentendo di osservare prese, posture e modalità di movimentazione, il tutto supportato da documentazione fotografica e da analisi di mappatura posturale (Fig. 17).

I prototipi ad alta risoluzione sono stati quindi testati in condizioni reali, comprese attività ripetitive di sollevamento, impilamento e integrazione con i macchinari, e capacità di carico, resistenza agli urti e durabilità sono state valutate mediante prove controllate che simulavano l'uso quotidiano (Fig.

18). La validazione sul campo ha coinvolto operatori attivi nelle diverse fasi della produzione; il confronto con i contenitori esistenti ha evidenziato una riduzione della dispersione di anacardi durante lo svuotamento nei macchinari, una maggiore stabilità e una migliore integrazione tra le fasi di trasformazione, essiccazione e coltivazione (Fig. 19).

**Integrazione ingegneristica e strategia di fabbricazione** | Un processo iterativo di confronto con il team di ingegneria meccanica ha introdotto simulazioni strutturali finalizzate a ottimizzare la geometria della cassetta. L'analisi agli elementi finiti è stata utilizzata per valutare la distribuzione delle tensioni sotto carico (10 kg), in condizioni di impilamento e in caso di urto, orientando modifiche allo spessore delle pareti, alla disposizione delle nervature e al rinforzo della base. Un vincolo decisivo riguardava il mantenimento della fabbricabilità entro un quadro tecnologico a bassa complessità (Fig. 20). Anziché fare affidamento esclusivo su una produzione industriale centralizzata, il progetto ha esplorato strategie di fabbricazione distribuita compatibili con le capacità regionali. Strumenti di fabbricazione digitale, sistemi modulari di stampi e documentazione open source per la produzione so-

no stati valutati come dispositivi per ridurre le barriere di accesso e aumentare la riproducibilità.

Workshop e mappature tecniche hanno rivelato una gamma ampia di competenze presenti nel territorio, tra cui riparazione meccanica, saldatura, falegnameria e piccola fabbricazione; officine per la riparazione di motocicli, laboratori per la manutenzione di attrezzi agricoli e spazi informali di fabbricazione hanno mostrato competenze tecniche mobilitabili per la produzione degli stampi, la manutenzione delle attrezzature e la manifattura in piccole serie. Ciò ha orientato la strategia progettuale verso la fabbricabilità distribuita, rendendo possibile un'innovazione radicata localmente e sostenibile (Vacanti and Leonardi, 2024).

**Prototipazione, validazione e attuazione circolare** | I prototipi finali del prodotto sono stati realizzati mediante tecniche di fabbricazione additiva, in particolare la stampa 3D, per validarne la precisione geometrica, il comportamento strutturale e l'integrazione con i macchinari di apertura e separazione sviluppati in precedenza. Le prove sono state condotte parallelamente ai prototipi meccanici per valutare la continuità del flusso operativo, il trasferimento dei carichi tra una fase e l'altra e la compatibilità con i sistemi di raccolta dei gusci (Fig. 21).

Oltre alla prototipazione fisica il progetto ha incorporato un processo strutturato di trasferimento di conoscenze e rafforzamento delle competenze, essenziale per consentire a piccole infrastrutture e micro-reti territoriali nella regione del Vichada di avviare transizioni verdi (Gaddi and Mastrodonato, 2024). Gli sviluppi tecnologici sono stati presentati ai membri della comunità per valutarne l'interesse, la fattibilità dell'adozione e il potenziale di produzione locale. Le sessioni di restituzione hanno permesso ai partecipanti di discutere dei benefici percepiti e delle criticità operative, assicurando che le strategie di implementazione fossero coerenti con le condizioni locali.

È stata istituita una collaborazione formale con il Centro Regionale di Formazione Professionale SE-NA (Servicio Nacional de Aprendizaje) che si è impegnato a sostenere la formazione tecnica relativa all'uso dei macchinari, al trattamento dei materiali compositi e ai metodi di fabbricazione digitale. I moduli formativi sono stati progettati per affrontare sia la sicurezza operativa sia le competenze di pro-



**Fig. 4** | Reused plastic baskets used for the cultivation, collection, and transport of cashew nuts along the production chain (credit: Jurui Project, 2023).

Next page

**Fig. 5** | Working postures observed during cashew nut opening and shell separation operations (credit: Jurui Project, 2022).

**Fig. 6** | Community workshop applying the Design Thinking AEIOU framework to categorise improvised tools and containers used across the cashew production chain (credit: Jurui Project, 2022).





**Fig. 7** | Laboratory experiments combining cashew shell residues with biodegradable polymers to develop composite materials (credit: Jurui Project, 2023).

Next page

**Fig. 8** | Mapping of the cashew production chain highlighting the recurrent use of baskets and containment systems (credit: Jurui Project, 2023).

**Fig. 9** | Interdisciplinary workshops involving design, mechanical engineering, and chemical engineering teams to define shared technical requirements (credit: Jurui Project, 2023).

testuali, a bassa complessità, integrate nella filiera dell'anacardio. In relazione all'SDG 9 la ricerca promuove l'innovazione decentrata introducendo strumenti e materiali fabbricabili localmente, capaci di ridurre la dipendenza da infrastrutture industriali centralizzate. In relazione all'SDG 10 il progetto contribuisce alla riduzione delle disuguaglianze ampliando le possibilità di partecipazione all'interno della catena del valore. Attraverso processi di co-progettazione, il rafforzamento delle competenze e la collaborazione con le Istituzioni locali la ricerca favorisce l'accesso a conoscenze tecniche e capacità produttive, permettendo agli attori locali di agire non solo come utilizzatori, ma anche come produttori e manutentori del sistema.

Il progetto genera inoltre sinergie indirette con altri SDG. Sostiene l'SDG 12 attraverso la valorizzazione dei residui agroindustriali, trasformati da scarto a nuova risorsa materiale mediante approcci riconducibili al Material Driven Design e ai DIY Materials (Del Curto et alii, 2022; Rognoli et alii, 2015), e attraverso la riduzione delle perdite di prodotto lungo le fasi di trasferimento e lavorazione; contribuisce inoltre all'SDG 8 migliorando le condizioni di lavoro e riducendo i rischi dovuti all'assenza di adeguati requisiti ergonomici. L'implementazione di approcci di questo tipo comporta però anche alcuni compromessi; il ricorso alle capacità locali richiede un supporto istituzionale continuo e può incontrare vincoli legati all'integrazione nel mercato, alla certificazione e alla conformità normativa. Tali tensioni evidenziano la necessità di bilanciare accessibilità, prestazioni e scalabilità nella progettazione di sistemi agroindustriali circolari e inclusivi.

**Discussione e conclusioni** | Questa ricerca mostra come il design può aggiungere valore ai sistemi agroindustriali, soprattutto nei contesti in cui pratiche informali, limiti infrastrutturali e inadeguatezza di strumenti e materiali condizionano la produzione. Attraverso l'osservazione sul campo, la sperimentazione materica, la validazione tecnica e i processi partecipativi lo studio ha identificato nel con-

tenitore un punto di intervento strategico all'interno della filiera dell'anacardio; il nuovo contenitore ha migliorato le condizioni ergonomiche, ridotto le perdite di prodotto, rafforzato la continuità operativa e consentito una migliore integrazione con i macchinari di trasformazione.

Oltre a questi esiti operativi il principale contributo della ricerca risiede nel suo posizionamento metodologico e teorico. Invece di affrontare separatamente materiali, strumenti e processi, lo studio propone un approccio guidato dal design in cui un singolo artefatto viene riformulato come elemento infrastrutturale capace di connettere i fattori umani, i flussi materiali e i sistemi produttivi. In questo senso la circolarità non è trattata come semplice proprietà del materiale, bensì come una condizione sistemica che emerge dall'allineamento tra tecnologie, pratiche e capacità locali.

I risultati sottolineano inoltre l'importanza di abbassare le soglie tecnologiche; privilegiando soluzioni fabbricabili localmente, documentazione aperta e collaborazione con gli attori regionali, il progetto sostiene un passaggio dalla dipendenza da sistemi industriali centralizzati a modelli produttivi distribuiti e sensibili al contesto. Tale impostazione contribuisce al dibattito in corso sulle tecnologie appropriate, sul design circolare e sull'innovazione agroindustriale nel Sud globale. Al tempo stesso, la ricerca presenta alcuni limiti: lo studio si basa su un caso territoriale specifico e la valutazione si fonda prevalentemente su osservazioni qualitative, più che su dati quantitativi di lungo periodo. La durabilità del materiale e la stabilità dell'adozione del sistema richiedono ulteriori verifiche nel tempo.

La trasferibilità della ricerca risiede soprattutto nella sua impalcatura metodologica: il protocollo si fonda sulla mappatura delle filiere, sull'individuazione di strumenti ricorrenti e sull'integrazione tra design, ingegneria e saperi locali; per questo può essere adattato ad altri sistemi agroindustriali. La sua applicazione dipende tuttavia dalle pratiche culturali locali, dalle capacità tecniche e dalle condizioni infrastrutturali e richiede quindi una

reinterpretazione contestuale, non una semplice replica diretta.

Gli sviluppi futuri dovrebbero concentrarsi sulla valutazione di lungo periodo delle prestazioni di materiali e strumenti, sull'affinamento delle strategie di fabbricazione locale e sulla verifica degli impatti socioeconomici, inclusi la diversificazione del reddito, la riduzione dei rischi occupazionali e il rafforzamento delle capacità locali. Nel complesso la ricerca contribuisce al dibattito scientifico mostrando che la trasformazione sistemica dei contesti agroindustriali può essere attivata attraverso interventi di design mirati e sensibili al contesto.

---

Agro-industrial systems in rural and peripheral regions often operate under conditions of technological scarcity, informal adaptation, and limited access to standardised tools and infrastructure. In many parts of the Global South (Bull and Banik, 2025), agricultural processing relies on locally assembled devices, modified machinery, and tools transferred from other sectors, developed informally and lacking formal development, certification, or ergonomic considerations. These structural conditions reflect broader inequalities in technological capabilities and industrial development (Bell and Pavitt, 1993). As a result, productivity remains constrained, occupational risks increase, and higher-value phases are frequently carried out outside the region, as activities such as packaging, transport logistics, and final commercialisation are often handled by actors external to the local context (Goyal, Hickel and Jha, 2025).

In the Vichada region, in south-eastern Colombia, the situation reflects these broader patterns. Cashew production has expanded significantly in recent years, supported by national and regional agricultural diversification programmes (Roman Hoyos and Arango Wiesner, 2007; Orduz-Rodríguez and Rodríguez-Polanco, 2022). Cashew has been promoted as a strategic crop for the Orino-



quía region for its tolerance of drought and adaptability to low-fertility soils (Arango Wiesner et alii, 2016; León, 2020). However, while cultivation has increased, technological development within the processing chain has not kept pace. The opening of the nut, separation of the shell, and handling of cashew nutshell liquid (CNSL) remain largely manual operations (Fig. 1).

Along the production chain, tools are often improvised or adapted from unrelated industries. Nut-opening devices are frequently repurposed cutting tools, heating systems rely on artisanal thermal processes, and storage containers are made from low-grade plastics that deteriorate rapidly in tropical conditions (Fig. 2). Although these adaptations demonstrate local ingenuity, they are typically developed without safety standards or ergonomic validation. This exposes workers to significant risks, including chemical burns from CNSL, repetitive strain injuries, and exposure to combustion residues (Fig. 3). Studies in other cashew-producing regions have documented skin damage and long-term occupational health issues among workers engaged in manual shelling (Andonaba et alii, 2017). The corrosive properties of CNSL are well established in the literature (Mazzetto, Lomonaco and Mele, 2009; Oliveira et alii, 2020), reinforcing the urgency of mitigating direct exposure. These technological limitations also affect productivity and product quality. Poorly calibrated opening mechanisms damage the edible seed of the cashew nut, lowering its commercial quality. Inefficient separation systems increase material loss. Uncontrolled heating can lead to seed fracture and uneven oil release.

Meanwhile, valuable by-products such as shells and ash are often underutilised despite their potential in composite materials and bio-based applications (Patel, Bandyopadhyay and Ganesh, 2006; Yuliana et alii, 2012; Prakash et alii, 2018; Harini et alii, 2018). This combination of safety risks, material waste, and low technological integration constitutes a critical bottleneck in the cashew value chain and calls for a supply chain perspective

rather than isolated interventions (Gaddi and Mastrodonardo, 2024).

Recent studies frame these systems as complex socio-technical networks that require systemic design approaches (Barbero and Ferrulli, 2023; Maffei et alii, 2024). Within this debate, design is increasingly recognised as a driver of circular transitions through waste valorisation and locally grounded production systems (Santos Malaguti de Sousa et alii, 2023). Material innovation is understood not only in terms of technical performance but also in relation to perception and use (Del Curto et alii, 2022; Pedgley, Rognoli and Karana, 2016; Karana, Hekkert and Kandachar, 2009).

Despite growing attention to circular design<sup>1</sup>, ergonomics in agro-processing, and technology appropriation (Vacanti and Leonardi, 2024), existing studies tend to address materials, processes, or tools separately. Limited research has examined how a recurrent tool within an agro-industrial system can serve as a systemic connector linking human factors, material valorisation, and distributed manufacturing.

This paper addresses this gap by formalising a design-led, interdisciplinary approach to the cashew production chain in Vichada, as applied in the Jurui<sup>2</sup> project. It proposes a replicable protocol for identifying and redesigning system-critical tools to improve safety, workflow continuity, and local manufacturability. The paper is structured as follows: Section 1 frames the context and state of the art; Section 2 identifies critical points; Section 3 presents the methodology; Sections 4-6 report on design development and validation; the final section discusses limitations, transferability, and implications. The contribution aligns with design for sustainability (Vezzoli, 2018; Manzini, 2015), which extends design beyond product development to encompass collaborative processes, scenario building, and supply chain resilience (Morpurgo, 2024; Gaddi and Mastrodonardo, 2024). Its originality lies in integrating waste valorisation, ergonomic redesign, distributed manufacturability, and local knowl-

edge within a single intervention, reframing circular design as a relational and infrastructural condition embedded in production systems. Rather than replacing existing practices with imported industrial systems, the project sought to recognise and build upon local knowledge. Participatory approaches, such as social cartography and co-design workshops, enabled the integration of situated knowledge into technological development (Moore and Garzón, 2010; Sanders and Stappers, 2008). Material experimentation and engineering validation were conducted iteratively, ensuring that interventions remained technically feasible while remaining socially embedded.

### Identifying critical points in the production chain

Field research in Vichada revealed that many of the tools and support systems used throughout the cashew production chain were adapted from unrelated industries. Beer containers, dairy baskets, plastic fruit boxes, and other generic containers were repurposed for collecting nuts, transporting them to processing machines, storing opened shells, or holding seedlings during early cultivation stages (Fig. 4). These improvised solutions reflected a strong capacity for local problem-solving and material reuse. However, they also exposed structural deficiencies in the technological environment surrounding cashew production.

While such adaptations demonstrate ingenuity and resilience, research on informal agro-industrial systems shows that improvised tools often heighten ergonomic risks and reduce process efficiency (Battini et alii, 2011; Dianat et alii, 2020; Rainbird and O'Neill, 1995). In Vichada, the absence of purpose-designed equipment led to unstable work surfaces, excessive lifting heights, irregular load distribution, and inconsistent container dimensions. These factors directly affected workers' posture and movement patterns.

Observational studies and participatory interviews documented frequent bending, twisting, and sustained static positions during harvesting,



**Fig. 10, 11** | Conceptual diagram of the basket as a structural element linking material flow, labour movement, and storage logic; Local adaptations to existing plastic baskets, including ventilation modifications, base reinforcement, and handle adjustments (credits: Jurui Project, 2023).

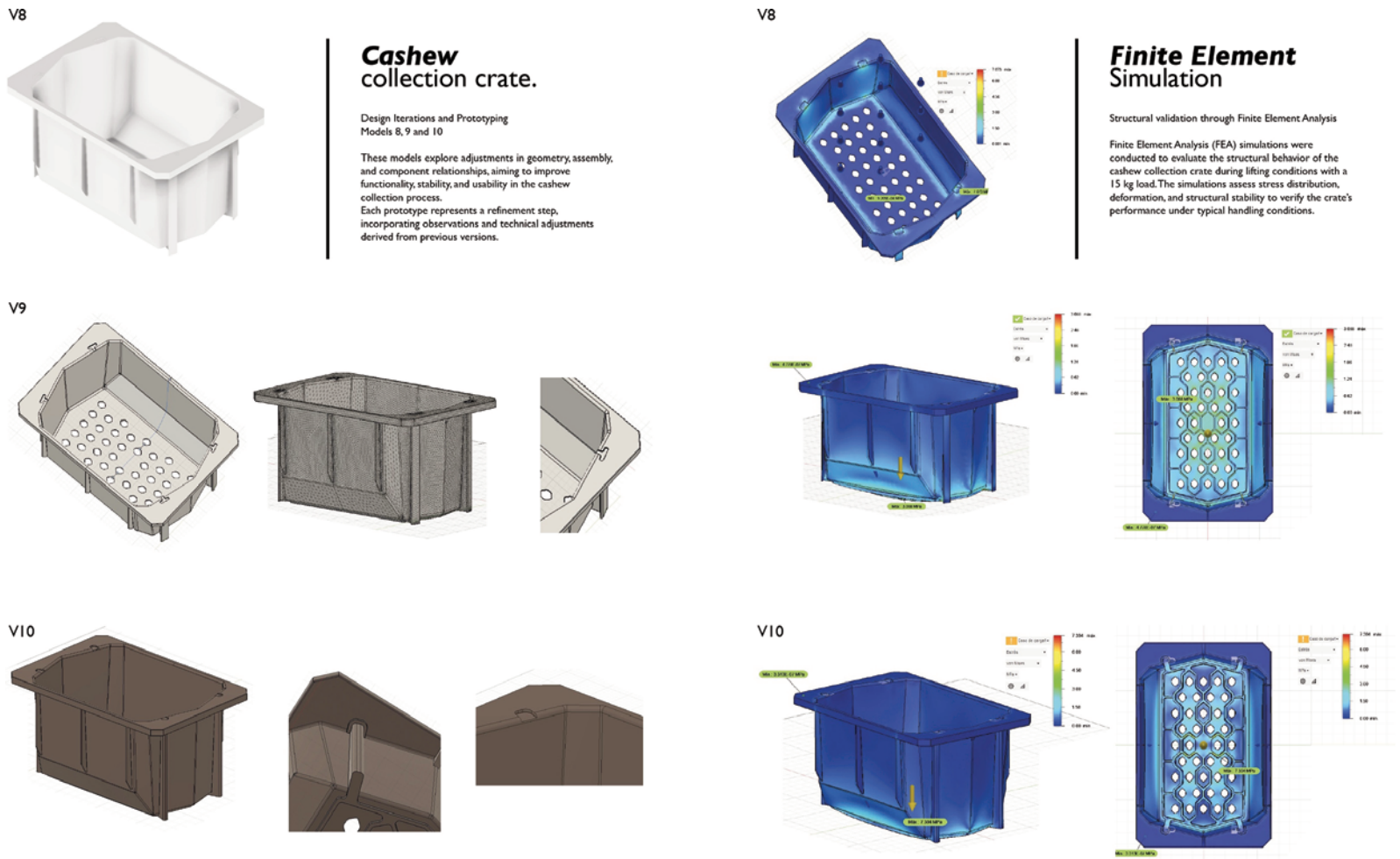


Fig. 12 | Design features integrated into the basket prototype, including ventilation slots, ergonomic handles, calibrated wall thickness, and stacking indentations (credit: Jurui Project, 2024).

roasting, nut opening, and shell separation tasks (Fig. 5). Workers reported chronic back pain, shoulder strain, and physical exhaustion after extended workdays. These symptoms align with findings from other small-scale agro-processing sectors, where repetitive manual labour and poorly designed tools contribute to musculoskeletal disorders (Fathallah, 2010; ILO, 2011). In particular, nut-processing tasks involve repetitive, forceful gripping, exposure to heat, and awkward wrist angles, all recognised ergonomic risk factors (Bao and Silverstein, 2005). In cashew processing, these physical demands are compounded by exposure to Cashew Nutshell Liquid (CNSL), increasing both mechanical and chemical risks.

The research team identified clear human-factor challenges across the production chain. These included: inappropriate working heights during shelling; manual handling of heavy containers of nuts or shells; unstable support structures used as platforms; repetitive fine-motor actions during kernel separation; and unsafe interactions with cutting or heating devices. In addition, container systems lacked modular coordination, complicating stacking, storage, and transport, particularly in fluvial transport contexts typical of the Orinoco basin. Rather than dismissing these adaptations as inadequate or informal, the project treated them as critical evidence of local technological agency (Brennan and Luloff, 2007). Improvised systems were analysed as prototypes already in use, representing solutions that had emerged organically under resource constraints. This perspective aligns

with research in design for sustainability (Vezzoli, 2018) and appropriate technology (Vacanti and Leonardi, 2024), which argues that innovation in peripheral regions should begin by recognising and refining existing practices rather than replacing them entirely (Smith, Fressoli and Thomas, 2014).

Through co-creation workshops, participatory mapping, and direct observation, the team fostered synergies between actors across the agro-industrial system and the design and engineering teams (Massari et alii, 2025). These activities enabled the identification and analysis of improvised tools, including their functions, load capacities, ergonomic configurations, and material durability (Fig. 6). This mapping identified specific intervention points within the chain: harvesting support tools, shell transport containers, work surface elevation systems, and modular stacking units. Each critical point was analysed with respect to safety, efficiency, and integration with subsequent processing stages.

**Methodology: research protocol and replicability** | This study adopts a design-led, interdisciplinary protocol that combines field observation, co-creation, material experimentation, engineering validation, and in-situ testing. The research was structured into six phases: 1) mapping the cashew production chain and identifying ergonomic and operational bottlenecks; 2) documenting and classifying locally adapted tools through observation and workshops; 3) material experimentation with cashew shell residues; 4) interdisciplinary co-design integrating design, mechanical, and chemical

engineering; 5) iterative prototyping and simulation-based validation; and 6) field testing under real production conditions.

Participants were selected based on their involvement in the production chain and on technical roles in the project<sup>3</sup>. Cases were defined by recurrence across production stages and by relevance to ergonomic risk and workflow inefficiency. Data comprised observations, user feedback, prototype performance, and simulation outputs. Testing focused on load capacity (~10 kg), ergonomics, pouring control, structural resistance, and machine compatibility. Comparison with existing containers was based on qualitative and applied performance evaluation (Tab. 1). The protocol is replicable through this sequence of phases and can be adapted to other agro-industrial contexts, although outcomes remain context-dependent.

The design and engineering teams conducted laboratory experiments using cashew shell residues (particles and ash) combined with biodegradable polymers such as PLA. The resulting composites showed improved rigidity and stability, supporting processing by injection and compression moulding (Fig. 7), consistent with findings on lignocellulosic fillers (Bogoeva-Gaceva et alii, 2007; Azwa et alii, 2013).

This shifted the research from material exploration to systemic application. Mapping the production chain revealed baskets as a recurring element across harvesting, transport, processing, drying, and cultivation (Fig. 8), positioning them as infrastructural connectors. However, existing con-



Fig. 13 | Compatibility testing of the redesigned basket with R&D prototypes for cashew nut opening, separation, and classification in Vichada (credit: Jurui Project, 2024).

tainers, often made of repurposed plastic, lacked ergonomic design, structural durability, and compatibility with production processes, contributing to inefficiencies, material loss, and worker strain (Neumann, Ekman, and Winkel, 2009).

The basket was therefore identified as a strategic intervention point. Rather than introducing new, isolated devices, the project applied the developed composite to redesign containment systems. Guided by material-driven design and DIY material principles (Karana et alii, 2015; Rognoli et alii, 2015), material properties informed the development of modular, stackable, and ergonomically adapted baskets. These function as infrastructural elements that improve load distribution, reduce exposure to CNSL, and integrate with nut-opening machinery developed within the project.

The research evolved through three interconnected streams: 1) composite material development from cashew residues; 2) design of a container system addressing ergonomics, safety, and workflow; and 3) development of nut-opening machinery that minimises contact with CNSL (Ayala-Garcia et alii, 2025). While interdependent, this paper focuses on the second stream, analysing the

basket as a system-specific artefact within the production chain.

#### Integrative design process and co-creation

Design plays a central role in integrating material development, engineering constraints, and community knowledge. Rather than functioning solely as a component in the development of technical solutions, design serves as a mediating framework that enables dialogue across disciplines and between laboratory experimentation and territorial reality (Barbero and Ferrulli, 2023). Workshops were held with mechanical engineering, chemical engineering, and design teams to identify shared requirements, performance constraints, and opportunities for convergence (Fig. 9). These sessions aligned structural performance criteria, processing limitations, ergonomic considerations, and material availability within a coherent development strategy. The interdisciplinary exchange made each discipline's assumptions explicit. Mechanical engineers defined load-bearing requirements, stacking resistance, and manufacturability parameters. Chemical engineers contributed material compatibility thresholds, processing temperatures, composi-

onal limits for cashew shell-based composites, and criteria for isolating the corrosive component of CNSL. Designers translated these technical constraints into spatial, ergonomic, and systemic considerations, ensuring that the resulting object would function within the rhythms of daily production practices, integrate with the machine-opening systems, and allow workers to operate in ergonomically safe conditions.

Through iterative discussions and rapid prototyping, the basket gradually emerged as a system-specific object. The team agreed that it could not be developed as a generic agro-industrial container, but rather as one explicitly designed for the cashew production chain in Vichada. Its development was based on direct observation of the harvesting, roasting, drying, and packaging stages in the region. The basket was understood not as an isolated artefact, but as an infrastructural element connecting material flow, labour movement, and storage logic (Fig. 10).

Local practices played a decisive role in shaping the design. Farmers and processors frequently modified existing plastic containers by cutting side panels to improve ventilation, reinforcing bases to



Fig. 14 | Controlled pouring tests using sacks and prototype receivers to evaluate rim geometry and wall inclination to reduce spillage (credit: Jurui Project, 2025).

prevent cracking, lining interiors to avoid kernel damage, or adjusting handles to improve grip. These informal adaptations revealed latent design intelligence embedded in everyday use (Fig. 11). Rather than eliminating these modifications, the project reinterpreted them as formal design features. Ventilation slots were dimensioned and positioned to meet drying requirements; handle geometry was adjusted to reduce wrist strain, keeping the hand as far as possible from opened nutshells and their liquid; wall thickness was calibrated to improve durability while minimising weight; stacking systems were redesigned to stabilise vertical loads during transport (Fig. 12).

**Results: basket features and evolution** | Through iterative prototyping and field testing, a clear set of functional and ergonomic requirements was progressively defined. The basket was designed to hold approximately 10 kg of cashew nuts, in line with manual handling thresholds that balance efficiency with reduced physical strain. This capacity was validated through direct testing with workers.

Compatibility with the nut-opening and separation machines developed in parallel was also es-

sential (Fig. 13). The basket geometry was calibrated to match machine heights and collection systems, enabling a continuous workflow and reducing handling steps. Controlled pouring was another key requirement: rim geometry and wall inclination were optimised to ensure smooth discharge without spillage (Fig. 14). A symmetrical form ensured balanced weight distribution, improving stability and reducing compensatory movements and contact with CNSL.

The ergonomic handle design was refined in terms of curvature, thickness, and placement to reduce hand strain and wrist deviation during repetitive tasks. Structural robustness was also critical: the basket was designed to withstand impacts, stacking pressure, and repeated use. Ventilation openings were concentrated at the base to simplify fabrication, improve airflow during drying, and reduce material use while maintaining stability (Fig. 15). Compatibility with seedling 'tubetes'<sup>4</sup> extended the basket's function to cultivation stages, reinforcing its systemic role across the production chain (Fig. 16). Prototypes were developed at low and high resolution. Low-resolution models (cardboard, MDF, 3D-printed parts) were used to

test proportions, stacking, and interaction logic. Workers interacted directly with these models, allowing observation of grip, posture, and handling patterns, supported by photographic and posture-mapping analyses (Fig. 17).

High-resolution prototypes were tested under real-world conditions, including repetitive lifting, stacking, and integration with machinery. Load capacity, impact resistance, and durability were evaluated through controlled tests simulating daily use (Fig. 18). Field validation was conducted with workers at all production stages. Observations focused on posture, grip comfort, load balance, and transfer efficiency. Comparative assessments with existing containers highlighted reduced spillage, improved stability, and better integration across processing, drying, and cultivation stages (Fig. 19).

**Engineering integration and manufacturing strategy** | An iterative integration process with the mechanical engineering team introduced structural simulations to optimise the basket geometry. Finite element analysis was used to evaluate stress distribution under load (10 kg), stacking pressure, and impact conditions, informing adjustments to

wall thickness, rib placement, and base reinforcement. A key constraint was maintaining manufacturability within a low-complexity technological framework (Fig. 20). Rather than relying solely on centralised industrial production, the project explored distributed manufacturing strategies compatible with regional capacities. Digital fabrication tools, modular mould systems, and open-source fabrication documentation were evaluated as means to reduce entry barriers and increase reproducibility.

Workshops and technical mapping revealed a broad range of skills across the region, including mechanical repair, welding, carpentry, and small-scale fabrication. Motorcycle repair workshops, agricultural tool maintenance shops, and informal fabrication spaces demonstrated technical competence that could be mobilised for mould produc-

tion, equipment maintenance, and small-batch manufacturing. This shifted the design strategy towards distributed manufacturability, enabling locally grounded and territorially sustainable innovation (Vacanti and Leonardi, 2024).

**Prototyping, validation, and circular implementation** | Final basket prototypes were produced using additive manufacturing, specifically 3D printing, to validate geometric accuracy, structural performance, and integration with the previously developed nut-opening and separation machines. Testing was conducted in parallel with the machinery prototypes to assess workflow continuity, load transfer between stages, and compatibility with shell collection systems (Fig. 21). These validations enabled the team to assess measurable improve-

ments in ergonomics, productivity, and operational safety. Observations confirmed fewer manual handling steps, improved posture during lifting and pouring, and reduced material loss from spillage. The integration of the basket with the mechanical system also enabled more efficient shell recovery, supporting downstream material reuse.

Beyond physical prototyping, the project incorporated a structured process of knowledge transfer and capacity building, which is essential if small infrastructures and micro-territorial networks in Vichada are to engage in green transitions (Gaddi and Mastrodonardo, 2024). Technological developments were presented to community members to assess interest, adoption feasibility, and local manufacturing potential. Feedback sessions enabled participants to evaluate perceived benefits and op-



erational challenges, ensuring that implementation strategies aligned with regional conditions.

A formal partnership was established with the regional vocational training centre, SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje), which committed to supporting technical training in machine operation, composite material processing, and digital fabrication. Training modules were designed to address both operational safety and manufacturing competence, enabling local actors to maintain and replicate the developed systems. Open production plans and technical documentation were prepared to facilitate decentralised manufacturing and reduce dependence on external suppliers.

To support the qualitative assessment of the proposed system, a comparative evaluation was conducted between the existing adapted contain-

ers and the redesigned basket system (Tab. 2). The comparison considered key operational parameters, including handling steps, product loss during pouring into the machinery, ergonomic strain, and workflow continuity. Although the study is not based on controlled measurements, field observations and repeated testing indicate reduced material loss, improved load-handling conditions, and more continuous integration between production stages. These results suggest that the intervention contributes to operational efficiency and to improved working conditions and reduced exposure to risks associated with manual handling and contact with cashew nut shell liquid (CNSL).

**Limitations and transferability** | This research has several limitations. The study is based on a single

territorial case, and the findings are therefore conditioned by the specific socio-economic, environmental, and infrastructural conditions of the Vichada region. The evaluation of the proposed system is primarily based on qualitative and applied performance observations rather than long-term quantitative data. In addition, the durability of the developed material and the long-term adoption of the proposed tools require further validation under extended operational conditions.

Beyond these limitations, the dissemination of the approach faces several barriers. Cultural factors include the persistence of established practices and resistance to modifying familiar tools. Economic constraints relate to limited access to investment, equipment, and stable markets for locally produced solutions. Logistical and infrastruc-

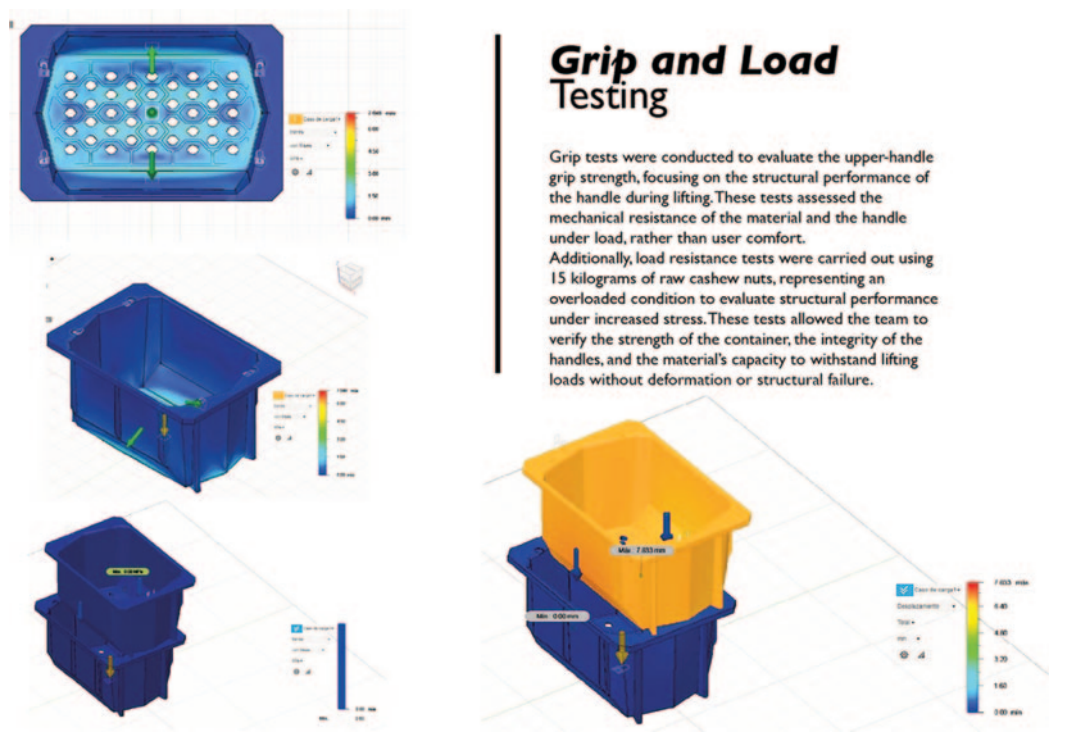
Previous page

**Fig. 15** | Ventilation openings concentrated at the base of the basket to improve airflow during drying and storage (credit: Jurui Project, 2025).

**Fig. 16** | Use of the basket as a support container for seedling cultivation, verifying compatibility with agricultural 'tubete' height (credit: Jurui Project, 2025).

**Fig. 17** | Low-resolution prototypes used to evaluate ergonomics, grip patterns, stacking logic, and spatial proportions (credit: Jurui Project, 2025).

**Fig. 18** | High-resolution prototype subjected to load and impact tests with approximately 10 kg of cashew nuts, complemented by finite element simulations for design validation (credit: Jurui Project, 2025).



**Fig. 19** | Field validation assessing transfer efficiency, spillage during pouring, and stacking stability during transport (credit: Jurui Project, 2025).



Fig. 20, 21 | Final basket prototype validated with users and integrated with the nut-opening system and the shell separation and classification workflow (credits: Jurui Project, 2025).

tural barriers are linked to the region’s geographical isolation, which affects access to materials, maintenance, and distribution networks, particularly in the absence of a clearly structured local alternative supply chain (Gaddi and Mastrolonardo, 2024). Regulatory and institutional factors may also influence implementation, particularly regarding safety standards, certification, and support for decentralised production systems. These barriers align with challenges identified in the literature on appropriate technology (Vacanti and Leonardi, 2024) and rural innovation systems.

The research’s transferability lies primarily in its methodological approach rather than in the direct replication of the developed basket. The protocol, based on mapping production chains, identifying recurrent tools, integrating local knowledge, and

combining design, engineering, and material development, can be adapted to other agro-industrial systems, particularly in peripheral contexts of the Global South. (Bull and Banik, 2025). Its implementation depends largely on the design team’s ability to structure a collaborative project involving engineers, scientists, and governmental institutions; however, this research demonstrates that such collaboration is feasible. The specific configuration of tools, material valorisation strategies, and manufacturing processes must nevertheless be redefined to suit local cultural practices, technical capacities, and infrastructural conditions.

**Contribution to SDGs: synergies and trade-offs**

| The Jurui project primarily contributes to Sustainable Development Goals (SDGs) 9 and 10 by de-

veloping context-specific, low-complexity technological solutions embedded in the cashew production chain. In relation to SDG 9, the research promotes decentralised innovation by introducing locally manufacturable tools and material systems that reduce dependence on centralised industrial infrastructure. In relation to SDG 10, the project helps reduce inequalities by enabling broader participation across the value chain. Through co-creation processes, capacity building, and collaboration with local institutions, the research fosters access to technical knowledge and production capabilities, enabling local actors to engage not only as users but also as producers and maintainers of the system.

The project also generates indirect synergies with other SDGs. It supports SDG 12 by valorising

Variable	Evaluation criterion	Before the intervention	After the intervention	Observed improvement	Field evidence
Number of handling steps	Number of transfers between containers and processing stages	10-11 manual operations (collection, depulping, transfer to sacks, transport to cooking, unloading, post-cooking collection, transport to processing, input transfer, output transfer, transfer to separation, by-product storage).	5-6 manual operations (collection, transport, integrated depulping, cooking or direct transfer, processing, separation).	45-55% reduction in handling steps, reducing points of operational friction.	Cashew nuts could be kept within a single container across multiple stages, reducing intermediate transfers.
Product loss and reprocessing during transfers	Frequency of spillage and need for material repositioning	Low. Despite multiple transfers, material loss was not significant in the current system.	Low. Loss levels remained stable, with no increase associated with the proposed basket.	Low loss levels were maintained without affecting process performance.	No increase in losses was observed during testing; performance remained stable during filling and unloading operations.
Ergonomic strain	Handled weight (kg), loading height (m) and lifting configuration	High. Loads of up to ~40 kg are handled from ground level to heights between 1.80 m and 2.20 m, sometimes using ladders. This involves above-shoulder lifting and high physical strain.	Medium-low. Standardised load (~15 kg) and reduced working height (1.40–1.50 m), eliminating extreme lifting.	Significant reduction in physical strain and improved accessibility, enabling broader participation, including women.	Critical lifting conditions were observed in the current system, whereas the proposed system enabled safer, more stable and more continuous handling.
Operation time	Time per transfer (s) and units per equivalent volume	Bulk-to-basket transfer: 20–35 s, requiring approximately 1.8 baskets per bulk load (~40 kg). Hopper loading: 15–25 s with elevated lifting.	Basket transfer: 11–15 s per operation, requiring approximately 2.6 baskets for an equivalent volume (~15 kg per unit).	Reduction in time per operation. Although the number of units increased, overall efficiency was maintained.	Faster transfers and improved workflow continuity were observed during testing.
Workflow continuity	Number of interruptions and manual readjustments	Low. Fragmented workflow due to container changes and mismatches between stages.	High. The basket's designed outlet angle enables direct transfer to machines or other systems.	Improved system flow and fewer interruptions.	More direct feeding into subsequent stages was achieved, with fewer manual readjustments.
Inter-stage compatibility	Degree of fit between container and production system	Low. Differences between containers require constant manual adaptation.	High. The basket acts as a common interface across stages.	Improved articulation of the production system.	Better integration with worktables, filling processes and transformation stages was observed.
Cleaning and maintenance	Ease of cleaning and residue accumulation	Cleaning: medium-low. Complex geometries and multiple perforations make cleaning more difficult. Drying: medium-high. The high density of perforations enhances ventilation and promotes efficient material drying.	Cleaning: high. Fewer perforations improve cleanability by preventing particle and residue retention, while ventilation is preserved through stacking. Drying: medium. Although drying time may increase, this does not have a significant impact under the territory's climatic conditions.	Improved sanitary and operational conditions.	Less residue accumulation and easier cleaning were observed.
Operational safety	Risk associated with lifting and working height	High. Lifting from ground level to heights above 1.80 m and up to 2.20 m, including ladder use while carrying loads.	Medium-low. Working height reduced to 1.40–1.50 m, eliminating elevated lifting.	Reduced physical risk and improved safety conditions.	Risky practices observed in the current system were no longer required in the proposed system.

Parameter	Evaluation criterion	Basket prototype (FEM results)	Conventional system (reference condition)	Observed advantage
Structural resistance under static load	Von Mises stress compared with yield strength.	Maximum stress: 3.20-4.63 MPa (below yield strength of 16.35 MPa); safety factor: 3.5-5.1.	No structural validation; unknown stress distribution under load.	Verified structural integrity under operational loads.
Stacking performance	Load distribution across stacked units.	Stable stacking of up to five units; maximum stress: 3.43 MPa; safety factor ≈ 2.2.	Uncontrolled stacking; potential deformation or instability.	Controlled load transfer and stable storage conditions.
Impact resistance (drop test)	Deformation under impact compared with failure threshold.	Maximum plastic deformation: 16.09% (<30% failure criterion); no critical damage.	No validated impact performance; risk of failure during handling.	Resilience to accidental drops and operational misuse.
Load capacity and distribution	Load application and stress concentration.	Uniform load distribution; stress concentrated in non-critical zones.	Irregular load distribution depending on container type.	Reduced risk of structural failure in functional areas.
Ergonomic load conditions	Weight and lifting configuration.	Designed for a 15 kg load; compatible with controlled lifting conditions.	Loads of up to 40 kg, with lifting above shoulder height.	Reduced physical strain and improved handling conditions.
Material performance	Mechanical properties and circular material strategy.	Composite material (HDPE + 30% CNSA + 7% CNSL); yield strength: 16.35 MPa.	Conventional plastic containers or sacks without material optimisation.	Integration of mechanical performance and circular material strategy.
Geometric optimisation	Stress distribution and manufacturability.	Reinforced structure, filleted edges (>2 mm) and inclined walls for stress control.	Non-optimised geometries with potential stress concentrations.	Improved structural efficiency and manufacturability.
Functional durability	Performance under repeated-use conditions.	Elastic behaviour maintained under load; no permanent deformation expected.	Potential degradation due to lack of structural design.	Increased durability and reusability across the production chain.

**Tabb. 1. 2 |** Comparative assessment of workflow performance in the cashew production chain before and after implementation of the proposed basket; Performance measurement (credits: the Authors, 2026).

agro-industrial waste, transformed from discarded matter into a new material resource through approaches aligned with Material-Driven Design and DIY Materials (Del Curto et alii, 2022; Rognoli et alii, 2015), while also reducing product losses along transfer and processing stages; it further contributes to SDG 8 by improving working conditions and reducing ergonomic risks. However, implementing such approaches also involves trade-offs. Reliance on local capacities requires sustained institutional support and may be constrained by market integration, certification, and regulatory compliance. These tensions highlight the need to balance accessibility, performance, and scalability when designing circular and inclusive agro-industrial systems.

**Discussion and conclusions** | This research demonstrates how design can serve as an integrative force within agro-industrial systems, particularly in peripheral contexts where informal practices, infrastructural limitations, and material scarcity shape production. Through field observation, material experimentation, engineering validation, and participatory processes, the study identified the basket as a recurrent and strategic intervention point within the cashew production chain. The redesigned system improved ergonomic conditions, reduced material loss, enhanced workflow continuity, and enabled better integration with processing machinery.

#### Acknowledgements

This paper forms part of the research project ‘Use of Agro-industrial By-products in the Production of Cashew in the Department of Vichada’, funded by the General System of Royalties (SGR) through the Ministry of Science, Technology and Innovation of Colombia and approved by OCAD ACTeI. The project ran from 2022 to 2025 and involved interdisciplinary collaboration between the Design Department at Universidad de los Andes and the Departments of Mechanical Engineering and Chemical and Food Engineering at Universidad de los Andes (Colombia), in partnership with the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, SENA and the regional institutions in Vichada. Additionally, this work was supported by the Open Access Publishing Fund of the Free University of Bozen-Bolzano.

The contribution is the result of a common reflection by the Authors. However, given their different areas of expertise and disciplinary backgrounds, the roles in this publication are acknowledged as follows. C. Ayala-García: writing, original draft preparation, methodology development and design lead for materials, packaging development, and machinery; analysis and interpretation of results; writing – review and editing. C. Pérez Rodríguez: field research, integration of qualitative data and visual documentation. Basket development; C. Ligia Forero: field research, integration of qualitative data and visual documentation; T. Cruz Perea: material formulation and characterisation, finite element modelling, testing; J. S. Porras: material characterisation, basket manufacturing, testing and evaluation; A. Marañón: material characterisation lead, packaging development and viability data collection; writing, review and editing; C. Hernández Acevedo: machine development and construction lead; O. Álvarez Solano: CNSL transformation lead; A. Porras Holguín: study conception and project lead; writing, review and editing.

Beyond these operational outcomes, the research’s main contribution lies in its methodological and theoretical positioning. Rather than addressing materials, tools, or processes in isolation, the study proposes a design-led approach in which a single artefact is reframed as an infrastructural element linking human factors, material flows, and production systems. In this sense, circularity is not treated as a material property alone, but as a systemic condition emerging from the alignment of technologies, practices, and local capacities.

The findings also underscore the importance of lowering technological barriers. By prioritising locally manufacturable solutions, open documentation, and collaboration with regional actors, the project supports a shift from dependence on centralised industrial systems towards distributed, context-sensitive production models. This approach contributes to ongoing debates about appropriate technology, circular design, and agro-industrial innovation in the Global South. At the same time, the research has limitations. The study is based on a specific territorial case, and the evaluation relies primarily on qualitative and applied performance observations rather than long-term quantitative data. The material’s durability and the system’s sustained adoption require further validation over time.

The research’s transferability lies primarily in its methodological framework. The protocol maps production chains, identifies recurring tools, and in-

tegrates design, engineering, and local knowledge. It can be adapted to other agro-industrial systems. However, its application depends on local cultural practices, technical capacities, and infrastructural conditions, and therefore requires contextual reinterpretation rather than direct replication.

Future developments should focus on long-term performance assessment of materials and tools, refining decentralised manufacturing strategies, and evaluating socio-economic impacts, including income diversification, reduced occupational risks, and local capacity building. Overall, the research contributes to the scientific debate by demonstrating that systemic transformation in agro-industrial contexts can be achieved through targeted, context-sensitive design interventions.

All the Authors have read and approved the published version of this manuscript. The Authors wish to thank the Ministry of Science, Technology and Innovation and the OCAD of ACTeI, which carried out the feasibility assessment, prioritisation and approval of this research, with resources from the General System of Royalties (SGR), under Call No. 6 of the Project ‘Use of Agro-industrial by-products in the production of cashew in the department of Vichada’ – BPIN 2020000100571. Likewise, thanks are given to the government and the department’s community for their interest and participation in the activities carried out to date.

Special thanks are extended to the research assistants for their valuable contributions across different streams of this work: G. Ortiz Mora and J. S. León for their advances in CNSL transformation; J. Rodríguez for machine prototyping; and H. C. Pacheco, C. A. Pino, A. A. Sánchez, and P. F. Van Grieken for machine construction.

Additional information related to this study may be requested from the corresponding author upon reasonable request.

#### Notes

1) For more information, see the webpage: [ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-design/overview](https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-design/overview) [Accessed 08 April 2026].

2) In the Sikuani language, spoken by indigenous tribes of the Vichada region, ‘jurui’ means cashew.

3) Direct beneficiaries numbered 140. They were defined and reached in accordance with the project’s technical document, which identifies producers, processors, and actors involved in the cashew production chain in the Vichada region, aged 20 to 59 years, with no gender restriction, and selected based on availability, contextual knowledge, and experience in cashew processing.

4) Tubetes are small nursery containers used for seed germination and early seedling development, allowing controlled root growth before field transplantation.

#### References

- Andonaba, J.-B., Lompo, S., Ouédraogo, V., Ouédraogo, F., Ouédraogo, M., Konaté, I., Diallo, B. and Traore, A. (2017), “Skin damage and aesthetic disadvantage observed in women in the hand craft shelling chain of cashew nuts in a factory in Bobo-Dioulasso, Burkina Faso”, in *Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications*, vol. 7, issue 3, pp. 211-220. [Online] Available at: [doi.org/10.4236/jcdsa.2017.73020](https://doi.org/10.4236/jcdsa.2017.73020) [Accessed 30 March 2026].
- Arango Wiesner, L. V., Clímaco Hio, J., Guevara Agudelo, E. J. and Navas Arboleda, A. A. (2016), *Corpoica Mapiiria Ao1, Corpoica Yopare Ao2, Corpoica Yucac Ao3 – Clones de marañón para la altillanura plana de la Orinoquia colombiana*, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Villavicencio – Meta. [Online] Available at: [hdl.handle.net/20.500.12324/11535](https://hdl.handle.net/20.500.12324/11535) [Accessed 08 April 2026].
- Ayala-García, C., Forero Lesmes, C., De Francisco Vela, S., Marañón León, A., Hernández Acevedo, C., Porras Holguín, A. and Álvarez Solano, O. (2025), “Jurui, Marañón mas allá de su nuez y su cascara – Tejiendo relaciones con la materia las personas, el lugar y la cultura”, in *Inmaterial | Diseño, Arte Y Sociedad*, vol. 10, issue 20, pp. 14-55. [Online] Available at: [doi.org/10.46516/inmaterial.v10.323](https://doi.org/10.46516/inmaterial.v10.323) [Accessed 30 March 2026].
- Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C. and Karunaseena, W. (2013), “A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres”, in *Materials and Design*, vol. 47, pp. 424-442. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025) [Accessed 30 March 2026].
- Bao, S. and Silverstein, B. (2005), “Estimation of hand force in ergonomic job evaluations”, in *Ergonomics*, vol. 48,

issue 3, pp. 288-301. [Online] Available at: doi.org/10.1080/0014013042000327724 [Accessed 30 March 2026].

Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), “Transizione ecologica digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 08 April 2026].

Battini, D., Faccio, M., Persona, A. and Sgarbossa, F. (2011), “New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design”, in *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, issue 1, pp. 30-42. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ergo.n.2010.12.001 [Accessed 30 March 2026].

Bell, M. and Pavitt, K. (1993), “Technological accumulation and industrial growth – Contrasts between developed and developing countries”, in *Industrial and Corporate Change*, vol. 2, issue 2, pp. 157-210. [Online] Available at: doi.org/10.1093/icc/2.2.157 [Accessed 30 March 2026].

Bogoeva-Gaceva, G., Avella, M., Malinconico, M., Buzarovska, A., Grozdanov, A., Gentile, G. and Errico, M. E. (2007), “Natural fiber eco-composites”, in *Polymer Composites*, vol. 28, issue 1, pp. 98-107. [Online] Available at: doi.org/10.1002/pc.20270 [Accessed 30 March 2026].

Brennan, M. A., and Luloff, A. E. (2007), “Exploring rural community agency differences in Ireland and Pennsylvania”, in *Journal of Rural Studies*, vol. 23, issue 1, pp. 52-61. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jrurstud.2006.04.003 [Accessed 30 March 2026].

Bull, B. and Banik, D. (2025), “The Rebirth of the Global South – Geopolitics, Imageries and Developmental Realities”, in *Forum for Development Studies*, vol. 52, issue 2, pp. 195-214. [Online] Available at: doi.org/10.1080/08039410.2025.2490696 [Accessed 08 April 2026].

Del Curto, B., Sossini, L., Santi, R. and Papile, F. (2022), “Percezione e plastiche sostenibili – Un tool digitale per gestire estetica e sostenibilità | Perception and sustainable plastics – A digital tool to manage aesthetics and sustainability”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 280-289. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12252022 [Accessed 08 April 2026].

Dianat, I., Afshari, D., Sarmasti, N., Sharifi Sangdeh, M. and Azaddel, R. (2020), “Work posture, working conditions and musculoskeletal outcomes in agricultural workers”, in *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 77, article 102941, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ergon.2020.102941 [Accessed 30 March 2026].

Fathallah, F. A. (2010), “Musculoskeletal disorders in labor-intensive agriculture”, in *Applied Ergonomics*, vol. 41, issue 6, pp. 738-743. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apergo.2010.03.003 [Accessed 30 March 2026].

Gaddi, R. and Mastrodonato, L. (2024), “Micro-reti locali per la transizione verde della filiera della lana | Local micro-networks for green transition of the wool supply chain”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15292024 [Accessed 08 April 2026].

Goyal, M., Hickel, J. and Jha, P. (2025), “Increasing inequality in agri-food value chains – Global trends from 1995-2020”, in *Global Food Security*, vol. 46, article 100883, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.gfs.2025.100883 [Accessed 17 March 2026].

Harini, K., Chandra Mohan, C., Ramya, K., Karthikeyan, S. and Sukumar, M. (2018), “Effect of Punica granatum peel extracts on antimicrobial properties in walnut shell cellulose reinforced bio-thermoplastic starch films from cashew nut shells”, in *Carbohydrate Polymers*, vol. 184, pp. 231-242. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.072 [Accessed 08 April 2026].

ILO – International Labour Organization (2011), *Safety and health in agriculture*, International Labour Office, Geneva. [Online] Available at: ilo.org/resource/other/safety-and-health-agriculture [Accessed 30 March 2026].

Karana, E., Hekkert, P. and Kandachar, P. (2009),

“Meanings of materials through sensorial properties and manufacturing processes”, in *Materials & Design*, vol. 30, issue 7, pp. 2778-2784. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.028 [Accessed 08 April 2026].

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. and Zeeuw van der Laan, A. (2015), “Material Driven Design (MDD) – A method to design for material experiences”, in *International Journal of Design*, vol. 9, issue 2, pp. 35-54. [Online] Available at: ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1965 [Accessed 30 March 2026].

León, Á. (2020), *Plan departamental de extensión agropecuaria 2020-2023*, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Económico. [Online] Available at: minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/PublishingImages/Paginas/PDEA/Vichada.pdf [Accessed 08 April 2026].

Maffei, S., Bolzan, P., Bianchini, M., Zeccara, F., Barbero, S., Campagnaro, C., Di Prima, N., Filippini, A., Puglielli, M., Rosato, L., Lotti, G. and Pontillo, G. (2024), “Svelare la complessità della transizione circolare per il settore del mobile imbottito | Unveiling the complexity of circular transition for the upholstered furniture sector”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 304-313. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16252024 [Accessed 08 April 2026].

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An introduction to design for social innovation*, MIT Press.

Massari, S., Galli, F., Colombo, L. and Goretti, G. (2025), “Divinfood, NUCs e agrobiodiversità – Food Design Agile e Living Labs per l’innovazione sostenibile | Divinfood, NUCs and agrobiodiversity – Agile Food Design and Living Labs for sustainable innovation”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 398-411. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17282025 [Accessed 08 April 2026].

Mazzetto, S. E., Lomonaco, D. and Mele, G. (2009), “Óleo de castanha de caju – Oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial | Cashew nut oil – Opportunities and challenges in the context of sustainable industrial development”, in *Química Nova*, vol. 32, issue 3, pp. 732-741. [Online] Available at: doi.org/10.1590/S0100-40422009000300017 [Accessed 30 March 2026].

Moore, E. and Garzón, C. (2010), “Social cartography – The art of using maps to build community power”, in *Race, Poverty & the Environment*, vol. 17, issue 2, pp. 66-67. [Online] Available at: friendsforpe.org/files/Moore.Garzon.17-2.pdf [Accessed 30 March 2026].

Morpurgo, E. (2024), “Biomateriali e zone umide – Filiere per l’edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 08 April 2026].

Neumann, W. P., Ekman, M. and Winkel, J. (2009), “Integrating ergonomics into production system development – The Volvo Powertrain case”, in *Applied Ergonomics*, vol. 40, issue 3, pp. 527-537. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apergo.2008.09.010 [Accessed 30 March 2026].

Oliveira, N. N., Mothé, C. G., Mothé, M. G. and de Oliveira, L. G. (2020), “Cashew nut and cashew apple – A scientific and technological monitoring worldwide review”, in *Journal of Food Science and Technology*, vol. 57, pp. 12-21. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13197-019-04051-7 [Accessed 08 April 2026].

Orduz-Rodríguez, J. and Rodríguez-Polanco, E. (2022), “Cashew (*Anacardium occidentale* L.) a crop with productive potential – Technological development and perspectives in Colombia”, in *Agronomia Mesoamericana*, vol. 33, issue 2, pp. 24-41. [Online] Available at: doi.org/10.15517/am.v33i2.47268 [Accessed 30 March 2026].

Patel, R. N., Bandyopadhyay, S., and Ganesh, A. (2006), “Economic appraisal of supercritical fluid extraction of refined cashew nut shell liquid”, in *Journal of Chromatog-*

*raphy A*, vol. 1124, issue 1-2, pp. 130-138. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.chroma.2006.06.015 [Accessed 30 March 2026].

Pedgley, O., Rognoli, V. and Karana, E. (2016), “Materials experience as a foundation for materials and design education”, in *International Journal of Technology and Design Education*, vol. 26, pp. 613-630. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10798-015-9327-y [Accessed 08 April 2026].

Prakash, A., Vadivel, V., Banu, S. F., Nithyanand, P., Lalitha, C., and Brindha, P. (2018), “Evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of solvent extracts of agro-food by-products (cashew nut shell, coconut shell and groundnut hull)”, in *Agriculture and Natural Resources*, vol. 52, issue 5, pp. 451-459. [Online] Available at: li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/231843 [Accessed 30 March 2026].

Rainbird, G. and O’Neill, D. (1995), “Occupational disorders affecting agricultural workers in tropical developing countries – Results of a literature review”, in *Applied Ergonomics*, vol. 26, issue 3, pp. 187-193. [Online] Available at: doi.org/10.1016/0003-6870(95)00016-6 [Accessed 30 March 2026].

Romám Hoyos, C. A. and Arango Wiesner, L. V. (2007), *Marañón (*Anacardium occidentale* L.) tecnologías de producción e industrialización*, Produmedios, Bogotá. [Online] Available at: hdl.handle.net/20.500.12324/13263 [Accessed 08 April 2026].

Rognoli, V., Bianchini, M., Maffei, S. and Karana, E. (2015), “DIY materials”, in *Materials & Design*, col. 86, pp. 692-702. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.020 [Accessed 08 April 2026].

Sanders, E. B. N. and Stappers, P. J. (2008), “Co-creation and the new landscapes of design”, in *CoDesign | International Journal of CoCreation in Design and the Arts*, vol. 4, issue 1, pp. 5-18. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15710880701875068 [Accessed 30 March 2026].

Santos Malaguti de Sousa, C., Queiroz Ferreira Barata, T., Dutra Profirio de Souza, C. and de Melo, F. G. (2023), “Urban Forest Management – Design-Driven Technology Pathways for the Valorization of Pruning Waste | Urban forests management – Design-driven technological routes for wood waste valuing”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 291-300. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13252023 [Accessed 08 April 2026].

Smith, A., Fressoli, M. and Thomas, H. (2014), “Grassroots innovation movements – Challenges and contributions”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 63, pp. 114-124. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.025 [Accessed 30 March 2026].

Yuliana, M., Huynh, L.-H., Ho, Q.-P., Truong, C.-T. and Ju, Y.-H. (2012), “Defatted cashew nut shell starch as renewable polymeric material – Isolation and characterization”, in *Carbohydrate Polymers*, vol. 87, issue 4, pp. 2576-2581. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.044 [Accessed 08 April 2026].

Vacanti, A. and Leonardi, C. (2024), “Tecnologia, energia e tempo – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, energy, and time – Experimental paths for the design of appropriate technology”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 08 April 2026].

Vezzoli, C. A. (2018), *Design for environmental sustainability – Life cycle design of products*, Springer, London. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-1-4471-7364-9 [Accessed 30 March 2026].