



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità
A.A. 2025/2026

**Architettura adattiva in contesti sismici: strategie di progettazione passiva
per un modulo scolastico bioclimatico in Nepal**

Candidata:

Silvia Mastrorosa s326004

Relatore:

Professore Pennacchio Roberto

Correlatrice:

Professoressa Restuccia Luciana

Indice

	Pag.
Introduzione	7
1. Il Nepal	11
1.1 Geografia	
1.2 Clima	
1.3 Biodiversità	
1.4 Materiali locali	
1.4.1 Filiera del legno	
1.4.2 Filiera della paglia	
1.5 Sismicità	
2. Architettura	31
2.1 Architettura vernacolare	
2.1.1 Tharu	
2.1.2 Newari	
2.1.3 Gurungs	
2.1.4 Sherpa	
2.1.5 Tamang	
2.1.6 Mustang	
2.1.7 Considerazioni conclusive	
3. Progetto	63
3.1 Matrici di analisi e indicazioni progettuali	
3.2 Modulo	
3.2.1 Sistema strutturale	
3.2.2 Stratigrafie	
3.2.3 Strategie bioclimatiche	
3.3 Considerazioni	
Conclusioni	95
Bibliografia	99

Introduzione

La presente tesi nasce dalla volontà di sviluppare un progetto architettonico che ambisca ad una reale utilità sociale, confrontandosi con condizioni di necessità concreta. In questa ottica, la scelta di operare all'interno di un contesto fragile, per la sismicità, la varietà di condizioni climatiche e lo sviluppo economico, guida la progettazione architettonica di soluzioni mirate ed efficaci per soddisfare i bisogni delle persone.

Attraverso la partecipazione al concorso di Archstorming “Nepal School Project. Designing for resilience”, che mirava alla progettazione di un edificio scolastico nell'ottica di plausibili ricostruzioni post-sismiche future, richiedendone l'adattabilità ai diversi ambiti nepalesi, è stata estrapolata la tematica della tesi: la progettazione di una soluzione architettonica antisismica e intrinsecamente adattabile ai differenti contesti del Nepal. Il concetto di adattabilità è stato ampliato attraverso lo studio della peculiare varietà topografica, climatica, sociale e culturale che compone il Nepal.

Nelle sue piccole dimensioni (distanza orizzontale inferiore a 200 km) la variazione altimetrica passa da 60 m s.l.m. a sud fino a 8848 m s.l.m. a nord (Paudel et al., 2011), dando vita a paesaggi, climi, culture e condizioni economiche differenti tra loro che si traducono in esigenze altrettanto eterogenee. Il ventaglio di conoscenze acquisito dalle analisi fatte ha permesso di delineare linee guida progettuali specifiche per ciascuna regione, considerando il cruciale fattore comune della sismicità del Paese. Il Nepal si trova, da un punto di vista sismico, in una delle regioni più attive al mondo. L'arco himalayano si è formato dallo scontro tra la placca tettonica continentale indiana e quella euroasiatica, che tuttora continuano il movimento provocando grandi terremoti lungo la catena montuosa. Il più recente è stato il terremoto di Gorkha (Nepal centrale) del 25 aprile 2015 con magnitudo 7,8, seguito per mesi da centinaia di scosse di assestamento con magnitudo fino a 7,3. L'evento ha colpito 5,4 milioni di persone causando più di 9000 vittime e 22300 feriti, oltre al danneggiamento e distruzione di più di 755000 edifici residenziali, 4000 uffici governativi e 8200 scuole (Hendriks et al., 2021).

Il Nepal presenta un contesto socioeconomico complesso e fortemente eterogeneo, risultato di una combinazione di fattori storici, geografici e politici che continuano ad influenzare significativamente lo sviluppo territoriale e le condizioni del Paese. Storicamente caratterizzato da una struttura economica e agricola e da un assetto sociale stratificato, il Paese ha attraversato profonde trasformazioni sociali negli ultimi trent'anni (Sharma, 2016) che hanno dato vita ad una fase di transizione tra la spinta modernizzatrice del mondo globalizzato e il mantenimento di tradizioni profondamente radicate nella cultura locale. Il cambiamento si è osservato nella moderata crescita economica (fortemente dipendente dalle rimesse dei lavoratori emigrati all'estero), nell'aumento di industrializzazione e nello sviluppo della capacità infrastrutturale (World Bank, 2025). Lo sviluppo non sta avvenendo uniformemente nel Paese, questo accentua le disuguaglianze territoriali tra le pianure del Terai, le aree collinari e le regioni montane himalayane (Fisher, 2011).

La definizione delle soluzioni progettuali è basata su un'analisi approfondita e puntuale delle zone climatiche, delle relative architetture vernacolari e delle condizioni di rischio sismico, considerando i materiali disponibili in loco e le filiere di produzione edili esistenti, secondo un approccio "context-based". I risultati ottenuti sono sintetizzati attraverso matrici grafiche, utilizzate come strumento di valutazione e confronto delle strategie architettoniche adottate in risposta alle esigenze riscontrate, con particolare attenzione alla loro congruenza con la tradizione costruttiva nepalese. Sono state quindi definite delle linee guida specifiche per ciascuna regione geografica, capaci di raggruppare i diversi contesti climatici e sismici e di individuare soluzioni comuni e varianti locali. L'elevato rischio sismico, costante sull'intero territorio nazionale seppur con caratteristiche differenti, ha portato all'individuazione di una tipologia strutturale unitaria, mentre la forte eterogeneità climatica ha determinato la definizione di variabili strategiche e tecnologiche adattive.

Il risultato è un sistema modulare che integra una struttura comune con soluzioni flessibili legate al clima e al contesto locale, inteso in termini di contesto socioculturale, disponibilità di materiali e capacità produttive.

1 Il Nepal

Il Nepal è un Paese asiatico situato tra India e Cina, che si estende su un terzo dell'intera catena montuosa dell'Himalaya vantando la presenza di otto delle montagne più alte al mondo, tra cui il monte Everest. Nonostante le piccole dimensioni si compone di un mosaico di paesaggi e condizioni climatiche grazie alla grande variazione altimetrica e alla moltitudine di valli fluviali e pianure (Soldati et al., 2011).

1.1 Geografia

Il Nepal può essere diviso in tre regioni geografiche, che raggruppano le aree fisiografiche la cui altitudine media aumenta da sud a nord, con un'estensione continua che segue la frastagliata composizione delle complesse fratture vallive.

Il Terai è una striscia di terra piatta larga 25-32 km nel sud del Paese, un'estensione geografica delle pianure gangetiche dell'India, con altitudini tra 60 e 300 m s.l.m. Originariamente la regione consisteva in una distesa ininterrotta di densa foresta tropicale, finché non è diventata meta attrattiva per le migrazioni interne al Paese che hanno comportato un'ampia deforestazione e intensi utilizzi urbani (Paudel et al., 2011). Nonostante la regione del Terai copra circa il 17% del Nepal, sostiene quasi la metà della popolazione e accoglie le principali aree industriali, grazie alla favorevole topografia che permette una rete infrastrutturale densa (Chaulagain et al., 2015).

Il Pahad è la regione centrale del Paese, accoglie la catena himalayana più giovane ed è caratterizzata da un brusco aumento delle altimetrie che vanno dai 300 ai 3000 m s.l.m. La regione è popolata in modo uniforme nel territorio, accogliendo oltre il 60% della popolazione, nonostante siano presenti delle concentrazioni urbane e agricole nelle valli. La più importante di queste è la Valle di Kathmandu che ospita l'omonima capitale, cuore sociale e di sviluppo economico del Paese (Chaulagain et al., 2015). Anche in questo caso, la regione è stata soggetta a deforestazioni e modifiche dei bacini idrografici per far posto alle attività agricole ed industriali. La concentrazione di popolazione e aree urbane d'interesse in questa regione, ne ha favorito lo sviluppo infrastrutturale ed economico (Paudel et al., 2011).

La regione settentrionale del Paese è l'Himal, coincidente con la catena montuosa dell'Himalaya che si estende da est ad ovest con altitudini superiori a 3000 m s.l.m. e accogliendo le cime più alte al mondo. Gli insediamenti sono pochi e confinati a bassa quota, meno del 7% della popolazione abita nell'Himal e l'attività principale è la pastorizia (Chaulagain et al., 2015). La critica situazione climatica e infrastrutturale di questa regione ha provocato negli ultimi decenni dei flussi migratori interni verso le aree a quote minori. Al di sopra dei 5000 m s.l.m. non è presente vegetazione ed è considerato deserto artico, queste sono aree aride che non subiscono l'effetto dei monsoni (Paudel et al., 2011).

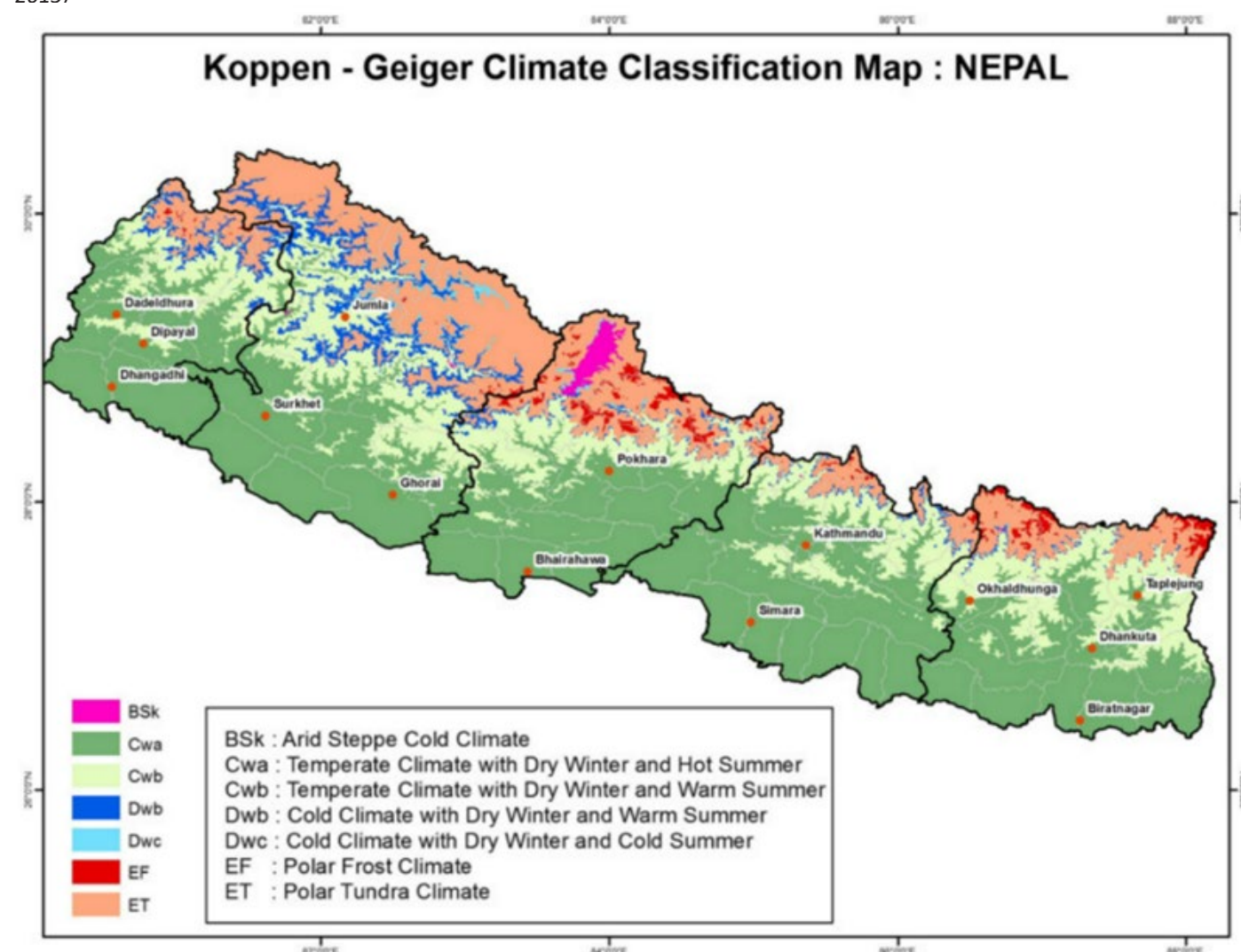
1.2 Clima

La complessa composizione topografica del Nepal rende impegnativa la classificazione climatica, che è inoltre influenzata da due principali sistemi meteorologici: la circolazione occidentale (novembre - maggio) e la circolazione monsonica estiva (giugno - settembre); quest'ultima è responsabile di circa l'80% delle precipitazioni annue del Paese ed è

accompagnata da venti che arrivano da nord ovest. L'influenza dei due sistemi è differente all'interno del Paese in quanto le montagne svolgono la funzione di barriere fisiche per i flussi d'aria e le precipitazioni, nelle zone sud-orientali sono predominanti le precipitazioni estive e, al contrario, nelle aree nord-occidentali si concentrano le precipitazioni invernali. Un altro fattore che influenza le precipitazioni è l'altitudine: la frequenza di precipitazioni aumenta con l'altitudine fino a 2000 m s.l.m., mentre tra i 2000 m e i 3500 m diminuisce (Paudel et al., 2011). La classificazione climatica non corrisponde perfettamente alla suddivisione in regioni geografiche, ma è possibile identificare dei climi principali per ciascuna di esse. Secondo la classificazione Köppen-Geiger¹ i climi principali del Nepal sono: il clima temperato, distinto in Cwa che caratterizza l'intera regione del Terai e la parte più bassa del Pahad e il Cwb diffuso nella restante regione collinare; il clima freddo (Dwc) e il clima polare (ET e EF) che sono presenti alle diverse altitudini della regione dell'Himal (Karki, 2015).

I climi temperati sono caratterizzati da temperature superiori a 10 °C nel mese più caldo e temperature comprese tra 0 °C e 18 °C nel mese più freddo, definendo ambienti ideali per le foreste decidue, in particolar modo per le foreste di Sal. Il sotto clima Cwa presenta inverni secchi ed estati dieci volte più piovose con temperature estive superiori a 22 °C. Questo è dominante in tutta la regione pianeggiante del Terai e parte meridionale della regione collinare. La restante area della regione collinare è caratterizzata dal sotto clima Cwb, anch'esso presenta inverni secchi, temperature inferiori a 22 °C in estate e più di quattro mesi con temperature superiori a 10 °C. I climi polari si distinguono per temperature inferiori a 10 °C nel mese più caldo e caratterizzano l'intera regione montana dell'Himalaya, in particolare il clima polare di tundra ET è caratterizzato dai mesi più caldi con temperatura compresa tra 0 °C e 10 °C. Specifiche aree della regione montana presentano climi freddi, definiti da temperature superiori a 10 °C nel mese più caldo e inferiori a 0 °C nel mese più freddo, sostenendo una vegetazione dominata dalle foreste di conifere differenziate a seconda dell'altitudine tra querce, rododendri e pini. Nello specifico il clima Dwb è caratterizzato da inverni secchi ed estati fresche con temperature inferiori a 22 °C in estate e maggiori a 10 °C per più di quattro mesi. Gli inverni secchi sono propri anche del clima Dwc che, però, è contraddistinto da estati fredde con temperature inferiori a 22 °C, massimo 4 mesi con temperature superiori a 10 °C e le temperature del mese più freddo superiori a -30 °C. Questi sono i climi meno frequenti nel Paese, con estensione limitata a specifiche aree abitate della regione dell'Himal.

Figura 1
Mappa climatica del Nepal
secondo la classificazione
Köppen-Geiger (Karki et al.,
2015)



1.3 Biodiversità

Le molteplici condizioni topografiche e climatiche danno vita al mosaico di biodiversità del Nepal, identificato anche attraverso la classificazione Köppen–Geiger. La pianura del Terai è composta da praterie, foreste fluviali e foreste di sal; queste ultime si estendono nella regione collinare e lungo le valli del Paese. È presente una significativa variazione di vegetazione tra la parte orientale e occidentale del Paese; nel primo caso sono presenti fitte foreste dominate da querce e rododendri in funzione dell'altitudine, mentre le aree occidentali sono più aride e presentano una maggior quantità di pinete. La regione montana presenta una divisione simile, in cui nella parte occidentale predominano le conifere, mentre le zone orientali presentano latifoglie e querce in quanto le condizioni climatiche sono più umide. Il limite della vegetazione varia tra 3700 e 4200 m s.l.m. di altitudine, in funzione del clima locale, tendenzialmente il limite è più basso nel Nepal occidentale.

Il quadro generale della complessa situazione nepalese può essere rappresentato attraverso la definizione delle ecoregioni. Sono 9 le ecoregioni che compongono il Paese e si sviluppano in fasce altimetriche successive; le tre ecoregioni più basse, situate tra la pianura e le colline basse, si estendono da est a ovest in modo continuo, mentre le ecoregioni a partire dai 2000 m s.l.m. di altitudine si distinguono in occidentali ed orientali seguendo la differente piovosità delle due zone. Le fasce più basse sono dominate da foreste tropicali di latifoglie e sempreverdi, in particolare è molto diffusa la foresta di Sal nelle aree pianeggianti e la foresta di pino Chir sopra i 1000 m di altitudine. Le ecoregioni superiori, nonostante le differenti caratteristiche, sono accomunate dalla presenza di querce, rododendri e betulle (Paudel et al., 2011).

1.4 Materiali locali

L'eterogeneità morfologica e climatica del Paese, descritta precedentemente, si traduce in un'ampia varietà di materiali da costruzione disponibili localmente. La regione del Terai è caratterizzata da sedimenti grossolani e ghiaiosi, con un ricco suolo alluvionale che offre fertili terreni agricoli e foreste di sal, garantendo abbondanza di legno, paglia, fango e sabbia per la costruzione. Nella regione del Pahad i materiali da costruzione disponibili sono ottenuti dalle fitte foreste, dalle cave, dai depositi di terra e le grandi valli lacustri forniscono, inoltre, i materiali per la produzione di mattoni. Infine, la regione dell'Himal ha grande disponibilità di pietre e terra, mentre viene meno la disponibilità

di legname a causa dei climi rigidi. La difficoltà di collegamenti tra le diverse aree del Paese, specialmente quelle montane, rafforza tutt'oggi l'utilizzo di materiali locali in quanto il trasporto di materiale da costruzione è complesso e costoso; nonostante l'infrastruttura sia migliorata ed implementata nel tempo, attraverso l'apertura del Paese e l'avvento del turismo (Dangol, 2024).

Il 40% del territorio nepalese è coperto da foreste, nonostante si differenzino per le specie dominanti. Le principali risorse legnose commerciali sono nella regione pianeggiante e parzialmente nella regione collinare, dove sono presenti anche imprese locali per la gestione e la fornitura di legno da costruzione, combustibile e artigianato. Sono altrettanto diffuse nel territorio le cave per l'estrazione di pietre calcaree o da taglio, con prevalenza nella regione montana, ed è largamente eseguita l'estrazione di aggregati fluviali (ghiaia e sabbia) dalle pianure e dalle valli. La principale filiera legata alle miniere calcaree è quella dei cementifici, che tendenzialmente sono di medio-piccola dimensione. Le argille adatte per laterizi e tegole, invece, si trovano soprattutto nelle pianure e nelle valli fluviali. Il settore dei mattoni è molto ampio, anche se concentrato nella valle di Kathmandu e nel Terai.

Vista la distribuzione delle materie prime sul territorio è stato scelto di approfondire lo studio sul legno, da considerare come materiale principale per la progettazione. Scelta supportata dal vasto utilizzo nelle costruzioni vernacolari e contemporanee, che garantisce la presenza di maestranze locali.

1.4.1 Filiera del legno

Nel Nepal il legno è da sempre la spina dorsale delle tradizioni costruttive, dagli intricati intagli in legno degli antichi templi alle robuste travi che sostengono le case moderne. La sua abbondanza nelle foreste, la facilità di lavorazione con strumenti semplici e l'adattabilità sia a disegni ornamentali che utilitaristici lo hanno reso insostituibile (Duwadi, 2025). Le risorse forestali coprono circa 5,96 milioni di ettari della superficie del Nepal, equivalenti al 40% del Paese (Forest Inventory, 2021), localizzate principalmente nella regione collinare (37%), seguita dalla regione montana (32%) e pianeggiante (31%) (Eaturu, 2025).

I terreni forestali nazionali in Nepal sono suddivisi in cinque categorie principali: foreste di proprietà dello Stato, foreste comunitarie, foreste in affitto, foreste protette e foreste religiose. La Legge sulle foreste del

2019 (Forests Act 12/2019) conferisce il potere di gestione delle foreste nazionali agli uffici forestali divisionali in qualità di rappresentanti dello Stato, consentendo la silvicoltura da parte di soggetti privati in modo controllato con l'obiettivo di ripristinare le foreste degradate e contribuire alla riduzione della povertà rurale. La gestione forestale comunitaria, in cui le comunità locali gestiscono le foreste con diritti di usufrutto limitati, è un approccio decentralizzato alla gestione del territorio legittimata dalla Legge sulle foreste (GoN 1993) e dalla Legge sulla regolamentazione delle foreste (GoN 1995) che hanno permesso il coinvolgimento delle comunità nella gestione delle foreste attraverso la redazione e l'approvazione di un piano di gestione forestale. La gestione forestale collaborativa è un regime specifico di proprietà forestale basato sulla comunità che riunisce il governo centrale, il governo locale e i gruppi di utenti forestali locali. Questo regime di gestione è stato implementato con particolare attenzione alla generazione di reddito e alla gestione di appezzamenti più estesi di foreste commercialmente redditizie; il che la distingue dalla gestione forestale collaborativa, in cui le attività sono svolte principalmente dalle comunità locali concentrandosi sul sostentamento della comunità e meno sulla generazione di reddito. Questi due diversi schemi di gestione creano opportunità lavorative per le comunità rurali riducendo la povertà e la deforestazione. Le foreste private possono essere legalmente autorizzate al taglio e alla vendita di legname, attraverso un complesso processo di registrazione stabilito dalla Legge sulle foreste del 2019 (Forests Act 12/2019). Meno dell'1% del territorio nepalese è classificato come foresta privata registrata; tuttavia, questa piccola porzione contribuisce quasi al 20% del legname disponibile ogni anno sul mercato interno (Saxena et al., 2022).

Il codice edilizio nepalese dedica degli specifici codici per i materiali da costruzione più utilizzati, tra cui il legno (NBC 112:1994). Nel contesto nepalese il legno rappresenta un materiale diffuso e caratterizzato da forte variabilità qualitativa, per cui il codice si pone come strumento per regolamentare l'uso tecnico del legno attraverso procedure di classificazione, criteri di calcolo e principi di buona pratica costruttiva. Il codice ha la duplice finalità di assicurare la sicurezza strutturale delle opere in legno, attraverso regole di progetto e verifiche coerenti alla natura del materiale, e di uniformare le pratiche costruttive tradizionali introducendo criteri tecnici basati su standard internazionali.

La classificazione delle diverse specie legnose nepalesi avviene attraverso dei parametri comparativi normalizzati rispetto al sal (*Shorea robusta*), assunto come riferimento con prestazioni massime. Sono analizzate le proprietà meccaniche e fisiche, le proprietà di lavorabilità, le categorie

qualitative e gli usi distintivi, in modo tale da poter conseguire una scelta consapevole e appropriata alle condizioni d'uso e al tipo di elemento. Oltre al comportamento strutturale, vengono valutati anche parametri come la durabilità naturale (resistenza a marciume e insetti), la stabilità dimensionale (ritiro, imbarcamento e nodi), la lavorabilità e la qualità estetica; questi parametri permettono la valutazione dell'idoneità della tipologia di legname per l'intera costruzione, inclusi infissi, pavimenti o rivestimenti.

Ai fini progettuali è stata selezionata una specie arborea per regione: sal (*Shorea robusta*) nella regione del Terai, chir pine (*Pinus roxburghii*) nella regione del Pahad e deodar (*Cedrus deodara*) nella regione dell'Himal.

SAL

È un albero deciduo originario del subcontinente indiano che può raggiungere fino a 40 metri di altezza con diametro del tronco superiore a 2 metri. In Nepal prospera nelle colline del Terai e del Churia (nella regione collinare), quindi in altitudini comprese tra 100 m e 900 m s.l.m., prediligendo terreni ben drenati e temperature intorno ai 25 °C. Il legno di sal è il legno duro più pregiato del Paese e viene utilizzato non solo nel settore edile ma anche in quello medico, usandone la resina, e in quello dell'artigianato. La sua struttura densa e a grana grossa offre ottima durata, resistenza alle termiti e deformazioni minime, anche nel clima umido del Terai. Le sue caratteristiche fanno sì che abbia elevata capacità di carico, resistenza all'acqua e resistenza al fuoco (proprietà dovuta dalle resine naturali che riducono l'infiammabilità). La stagionatura del legno di sal permette, inoltre, di ridurre il restringimento e aumentarne la longevità (Giri, 2025).

CHIR PINE

Le foreste di pini costituiscono quasi il 12% della superficie forestale totale del Nepal e sono dominate da due specie: il chir pine (*Pinus roxburghii*) e il blue pine (*Pinus wallichiana*) (Subedi et al., 2022). Anche detto pino dell'Himalaya, il chir pine è una conifera sempreverde e diffusa nelle regioni montuose del Nepal, caratterizzata da una crescita rapida e buona capacità di adattamento a diversi tipi di suolo e condizioni climatiche (Tiwari et al., 2020). Il chir pine presenta una struttura compatta con fibre lunghe e uniformi, che conferiscono elevata resistenza meccanica e stabilità dimensionale, permettendo l'impiego edile per componenti strutturali soggetti a carichi e sollecitazioni (Joshi, 2022).

DEODAR

È un albero sempreverde di grandi dimensioni presente ad altitudini comprese tra 1550 e 3200 m s.l.m. Si tratta di un albero che cresce rapidamente, raggiungendo fino 50 m di altezza e 1 m di diametro. È un legno durevole e resistente alla putrefazione che viene utilizzato come materiale da costruzione anche nella tradizione nepalese (Lovaglio et al., 2022).

Data la mancanza di una guida nazionale che verifichi le capacità dei materiali legnosi e l’adeguatezza strutturale, Duwadi (2025) ha condotto uno studio per la valutazione delle proprietà meccaniche e fisiche dei principali legni usati in edilizia del Nepal, adottando gli standard indiani (IIS 1708:1986). Le proprietà meccaniche del legno sono fondamentali per determinarne la resistenza e l’utilizzabilità: i parametri chiave includono la flessione statica, che consiste nel modulo di rottura (MOR) e nel modulo di elasticità (MOE), nonché la resistenza alla compressione sia parallela che perpendicolare alla venatura. Altre caratteristiche meccaniche rilevanti sono la resistenza al taglio parallela alla venatura, la resistenza alla trazione sia parallela che perpendicolare alla venatura e la durezza. Oltre alle proprietà meccaniche, anche le caratteristiche fisiche del legno svolgono un ruolo significativo nelle sue prestazioni. La densità è classificata secondo la densità di base e la densità all’aria (secondo la norma IS 1708), che categorizza il legno come leggero, medio o pesante, influenzato dal contenuto di umidità (Duwadi, 2025). Da questo studio sono state ricavate le proprietà meccaniche e fisiche delle specie del sal e del chir pine, mentre per il legno di deodar sono state consultate le diverse fonti raccolte dallo studio di Lovaglio et al. (2022) (tabella 1).

Tabella 1
Proprietà meccaniche del legno
di sal, chir pine e deodar

Nome comune	Densità (Kg/m³)	Modulo di rottura (N/mm²)	Modulo di elasticità (N/mm²)	Resistenza a compressione (N/mm²)		Resistenza a trazione (N/mm²)
				Parallela alla fibra	Perpendicolare alla fibra	
Sal	816.7	129.9	13959.7	37.45	3.20	20.0
Chir pine	450.0	84.9	8276.0	25.25	2.536	14.8
Deodar	520.0	94.0	10100.0	29.0	-	-

Secondo il Ministero delle Foreste e dell’Ambiente nepalese le principali industrie del legno presenti nel Paese sono segherie, industrie per la lavorazione del legno, fornitori di prodotti in legno e aziende produttrici di mobili. Si tratta di una filiera composta per lo più da imprese medio-piccole a conduzione familiare, localizzate nella regione del Terai (57%) e del Pahad (42%) (Ministry of Forests and Environment, 2024).

Le informazioni reperibili riguardano la regione del Terai (che accoglie il maggior numero di industrie) e l’albero del sal (specie più utilizzata nell’edilizia nepalese); basandosi sulle informazioni ricavate sono stati stimati dei plausibili dimensionamenti per le tre specie legnose indagate e le industrie presenti in ciascuna regione. Le lunghezze più comuni degli elementi costruttivi in legno sono nella fascia tra 2 e 3 metri, ma le massime commerciali arrivano fino a 4,5 m; le sezioni standard disponibili sul mercato arrivano a 150 x 150 mm per il sal, delle sezioni maggiori sono disponibili ma meno comuni (Forest Carbon Partnership Facility, 2012). Per gli elementi in chir pine e in deodar sono state considerate le medesime lunghezze massime e la sezione limite maggiore (150 x 200 mm) in funzione delle proprietà fisiche e meccaniche del materiale e della possibilità di realizzazione da parte delle industrie locali.

La filiera del legno, grande o piccola che sia, produce molti scarti dal materiale primo, che vengono utilizzati nuovamente in diversi modi, tra cui la creazione di prodotti in legno ingegnerizzato come pannelli in legno strutturale (compensato, multistrato, OSB), pannelli truciolari, pannelli di fibre a media densità (MDF) e altri (Pandey, 2022).

1.4.2 Filiera della paglia

Proseguendo con la scelta di indagare le risorse naturali locali, sono state

utilizzati nell’ambito edile in Nepal; in particolare gli scarti del legno sono spesso reimpiegati per la combustione e la produzione energetica nonostante la filiera del legno abbia la potenzialità per utilizzare e gestire queste risorse anche per prodotti edili (Jelle et al., 2010), mentre, la lana è utilizzata principalmente per la produzione di abbigliamento e tappezzeria (Khanal et al., 2022). La paglia è un sottoprodotto della coltivazione dei cereali disponibile in grande quantità e a basso costo in molti paesi, motivo per cui è ampiamente studiata e utilizzata nell’edilizia a livello mondiale (Asdrubali et al., 2015).

Il Nepal è un Paese agricolo, con circa il 60% della popolazione coinvolto in questo settore nonostante solo il 28% del terreno del Paese sia coltivabile (Basnyat, 2023). La produzione di residui agricoli annua è di oltre 15 milioni di tonnellate (WECS, 2010), ottenuti prevalentemente da riso (quasi la metà), mais, grano, canna da zucchero, legumi e miglio, i cui utilizzi principali sono il reimpiego come mangimi o fertilizzanti, la produzione energetica, il riuso edilizio e gli usi industriali (Kafle et al., 2024). La regione del Terai è considerata il granaio del Nepal, circa il 60% della produzione totale di residui agricoli del Paese proviene dalla sola regione pianeggiante, seguita dalla regione collinare (35%), mentre il contributo della regione montana è il più basso (5%) principalmente a causa della topografia accidentata e delle rigide condizioni climatiche (Pandey et al., 2023).

La paglia è un prezioso sottoprodotto della produzione agricola, che può essere utilizzato per vari scopi. Nei sistemi agricoli tradizionali integrati con l’allevamento: i raccolti venivano mietuti manualmente, lasciando solo corti steli sul campo, e la paglia raccolta veniva utilizzata per il bestiame e per scopi domestici (Basnyat, 2023). Una tendenza cresciuta negli ultimi anni nella regione del Terai è invece la combustione all’aperto della paglia in eccesso, a causa della mancanza di tecnologie per il reimpiego e dello scarso valore economico (Kafle et al., 2024). Vista la carenza di essa nelle zone collinari e montuose, gli allevatori di queste aree trasportano la paglia dal Terai per creare la scorta per la stagione di magra (Basnyat, 2023).

Come verrà descritto in seguito nello studio dell’architettura tradizionale (capitolo 2.1), la paglia è da sempre utilizzata nella regione del Terai per la composizione dell’involucro degli edifici. Nel contesto attuale, l’introduzione del concetto di sostenibilità nella progettazione degli edifici ha incoraggiato un ritorno ai materiali naturali e riciclati, stimolando la ricerca scientifica e lo sviluppo di tecniche costruttive (Asdrubali et al., 2015). In Nepal, soprattutto col fine di contrastare la combustione degli scarti agricoli in eccesso, il governo sta cercando di

incentivare il reimpiego della paglia come materia prima per le industrie, tra cui quella edile. Attualmente non esiste però una filiera industriale consolidata per la produzione di pannelli compressi in paglia come prodotto prefabbricato per l’edilizia (Basnyat, 2023). Tuttavia, l’uso della paglia compressa in forma di balle o blocchi è stato sperimentato in progetti di costruzione sostenibile in Nepal, come il progetto del 2019 di Paral Ko Ghar (Kevin Rohan Memorial Eco Foundation & Builders Without Borders) a seguito del terremoto del 2015.

Sono quindi state indagate le proprietà delle balle in paglia al fine di valutarne l’adozione. La resistenza termica delle balle in paglia compressa varia a seconda dell’orientamento delle fibre rispetto al flusso di calore: quando il flusso di calore è perpendicolare all’orientamento delle fibre la resistenza termica migliora consentendo di diminuire lo spessore dell’isolante (Cosentino et al., 2023). Attraverso la consultazione di fonti scientifiche, quali Cosentino et al. (2021) e Platt et al. (2020) sono stati considerati i seguenti valori (tabella 2) come congrui per le prestazioni isolanti delle balle di paglia.

Tabella 2
Capacità isolante delle balle in paglia

Materiale		Densità (Kg/m³)	Conduttività termica (W/mK)
Balle in paglia	Generico	126	0.078
	Stelo parallelo al flusso	92 - 144	0.077 – 0.084
	Stelo perpendicolare al flusso	86 - 135	0,066 - 0,071

1.5 Sismicità

Il Nepal si trova nella regione himalayana, che è tra le più attive regioni sismiche al mondo.

L'arco himalayano si è formato dallo scontro tra la placca tettonica continentale indiana e quella euroasiatica, risalente a 225 milioni di anni fa; tutt'ora la placca indiana continua a scorrere verso nord andando in subduzione alla placca eurasiatica sovrastante e provocando grandi terremoti lungo l'arco himalayano (EEFIT, 2019).

La regione himalayana in cui si trova il Nepal è geologicamente suddivisa in Alto Himalaya, Sub-Himalaya, Basso Himalaya e Himalaya Tetide, ripartite da quattro faglie principali: la Main Frontal Thrust (MFT) separa i sedimenti delle pianure indo-gangetiche dall'Himalaya esterno, il confine tra Himalaya esterno e Basso Himalaya corrisponde alla Main Boundary Thrust (MBT), mentre quello tra Basso e Alto Himalaya è rappresentato dalla Main Central Thrust (MCT), il South Tibet Detachment (STD) si colloca invece tra Alto Himalaya e Himalaya Tetide (Figura 2) (Chaulagain, 2015).

Le faglie attive collocate all'interno del Nepal rendono il Paese ad alta sismicità, come dimostrato dalla sequenza storica di terremoti molto intensi. I più recenti sono:

- Aprile 2015, con magnitudo 7,8 a Gorkha, a cui seguirono centinaia scosse di assestamento per i successivi due mesi con magnitudo anche superiore a 7;
- Agosto 1988, con magnitudo 6,8 a 160 km da Kathmandu, vicino al confine con l'India;
- Gennaio 1934, con magnitudo 8,1 è stato il più forte che ha colpito la regione negli ultimi 200 anni causando la rottura di un'ampia sezione di faglia (Collins et al., 2015).

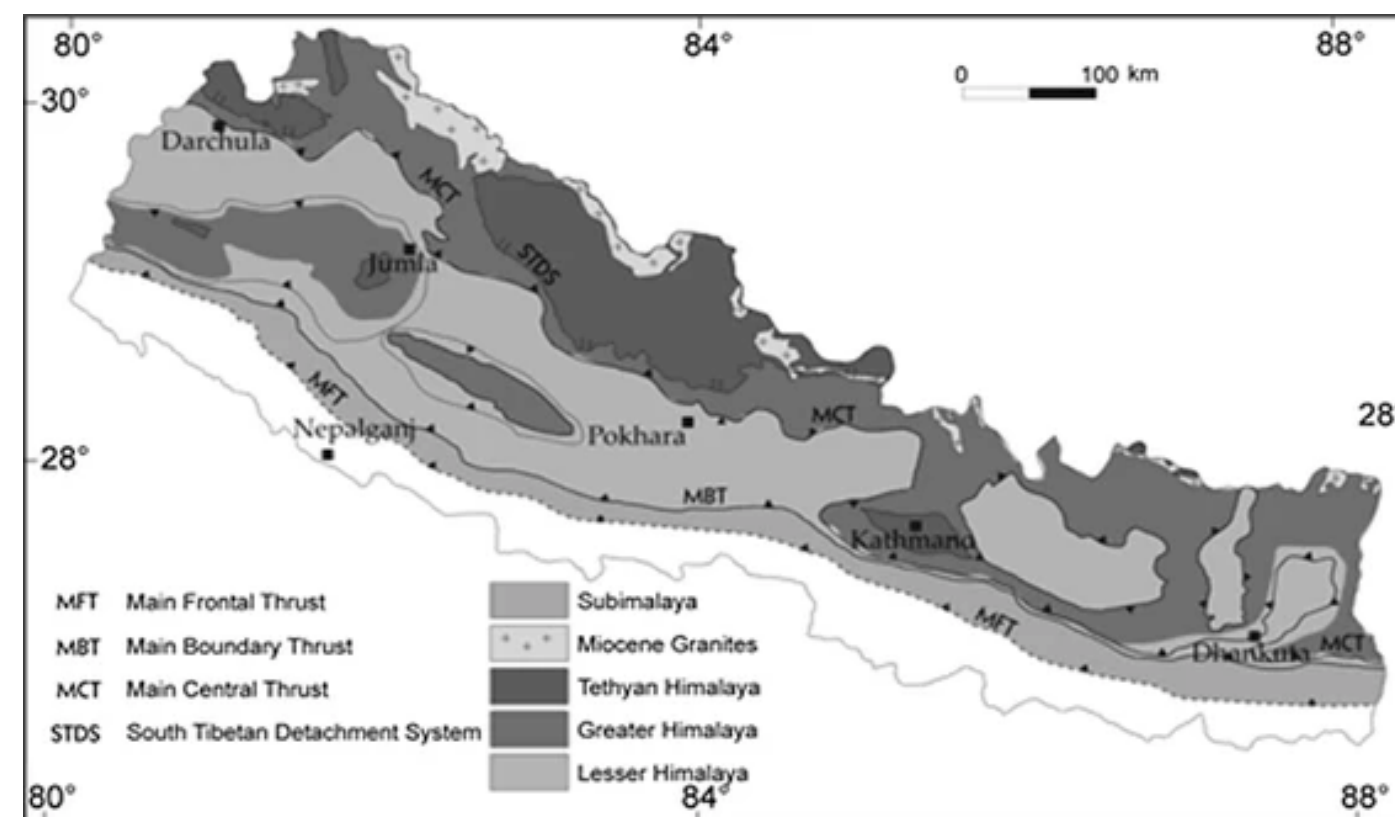


Figura 2
Carta geologica del Nepal
(Chaulagain et al., 2015).

1.5.1 Rischio sismico

Misura dei danni attesi in un determinato luogo in un dato intervallo di tempo, in base alla sismicità, alla resistenza delle costruzioni e all'antropizzazione.

La valutazione del rischio sismico avviene attraverso la stima dei fenomeni sismici attesi, dei valori esposti e della loro vulnerabilità, rispettivamente pericolosità, esposizione e vulnerabilità sismica (Dipartimento della Protezione Civile, 2025).

Pericolosità sismica

Probabilità che in un dato luogo e in certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che superi la soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco (PGA) di interesse (Dipartimento della Protezione Civile, 2025).

Nello studio di Chaulagain, Rodrigues, Silva, Spacone e Varum (2015) viene stimata la pericolosità sismica del Nepal secondo un'analisi probabilistica. Lo studio dei terremoti passati nell'Himalaya nepalese mostra che l'intera area è sismicamente attiva, con attività microsismiche di particolare intensità nella regione orientale, centrale e dell'estremo ovest, la cui distribuzione spaziale evidenzia la vicinanza della maggior parte dei terremoti al Main Central Thrust (MCT).

10% in 50 anni. Questo dato è un coefficiente normativo sintetico, elaborato a partire da analisi probabilistiche condotte dal Department of Mines and Geology e dal programma Earthquake Risk Reduction and Recovery Preparedness, la cui funzione è semplificare l'applicazione ingegneristica della pericolosità sismica, fornendo valori univoci e omogenei per ciascuna macrozona territoriale. Infatti, il massimo livello di pericolosità è collocato nella fascia collinare, dove si ha concomitanza tra la prossimità alla principale faglia attiva, la presenza di depositi alluvionali e lacustri e l'alta densità abitativa.

Alla pericolosità macrosismica si sovrappongono le condizioni di sito, che il codice definisce in categorie di suolo e categorie topografiche. Le prime sono basate sulle caratteristiche geotecniche e sulla velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità (Vs30) con associato un fattore di amplificazione sismica che modifica lo spettro di risposta elastico (tabella 3). Mentre, il Topographic Amplification Factor tiene conto dell'amplificazione sismica dovuta alla morfologia del terreno e moltiplica le accelerazioni di base nel calcolo dello spettro o del taglio di piano (tabella 4).

Il codice stabilisce un metodo d'analisi strutturale basato sulle capacità del sistema strutturale e presentando una gerarchia metodologica in funzione della complessità e affidabilità richiesta per le differenti strutture. Con il codice NBC 105:2020 è quindi abbandonata la prospettiva puramente descrittiva del codice precedente, orientandosi ad una progettazione prestazionale e resiliente.

Tabella 3
Categorie di suolo (NBC 105:2020)

Categoria	Descrizione	Vs30	Criterio geotecnico principale	Fattore di amplificazione
Type A: Stiff or Hard Soil	Roccia dura o molto compatta	> 800 m/s	Rocce ignee o metamorfiche dure, poco fratturate	1.0
Type B: Medium Soil	Roccia fratturata o terreno rigido	360 – 800 m/s	Terreni compatti, sabbie dense, limi cementati	1.2
Type C: Soft Soil	Terreni mediamente consistenti	180 – 360 m/s	Sabbie limose o argille moderatamente consistenti	1.5
Type D: Very Soft Soil	Terreni soffici, argillosi o alluvionali	< 180 m/s	Argille molli, sabbie sciolte, depositi alluvionali recenti	2.0

Tabella 4
Categoria topografica (NBC 105:2020)

Categoria topografica	Pendenza media	Fattore tipico
Flat / Gentle slope	< 15°	1.0
Ridge / Hill with moderate slope	15°–30°	1.2
Steep hill / Ridge top	30°-45°	1.4
Cliff or very steep slope	>45°	1.6

2 Architettura

Vi è una ricca diversità di strutture edilizie in Nepal, risultato della sua geografia, della storia dei gruppi etnici, dell'intensità della crescita economica e della disponibilità di materiali da costruzione locali. Fino alla metà del XX secolo i villaggi rurali del Nepal si compongono principalmente di edifici tradizionali, in terra, legno e pietra, mentre la maggior parte degli edifici nelle aree urbane e suburbane erano in muratura di pietra o mattoni e in cemento armato. Dopo gli anni '80 le costruzioni in cemento armato si sono moltiplicate, nonostante le difficoltà dovute alla disponibilità di materiali e ai vincoli economici, diventando la tipologia prevalente nelle aree urbane; al contrario, continuano ad essere dominanti gli edifici tradizionali nelle aree rurali (Gautam et al., 2016). I censimenti più recenti dimostrano che la composizione del patrimonio edilizio nepalese è per più della metà in muratura non rinforzata o in legno, le percentuali minori sono costituite da edifici in terra e in cemento (gem, 2023).

A seguito del terremoto del 1988 è stato redatto il primo Codice Edilizio del Nepal, emanato nel 1994 con ingresso in vigore nel 2003, attraverso il quale sono state pubblicate una serie di Regole Empiriche Obbligatorie (1994) con delle soluzioni "pronte all'uso" che rispettavano le regole progettuali antisismiche introdotte (Hendriks et al., 2021); l'impiego di queste soluzioni ha uniformato l'edilizia urbana recente. La normativa per la progettazione sismica è stata aggiornata nel 2020, successivamente al terremoto di Gorkha del 2015. Viste le tempistiche d'ingresso in vigore dei codici edilizi, la maggior parte degli edifici in cemento armato esistenti sono costruiti dai proprietari con l'aiuto di appaltatori nel rispetto dei regolamenti o costruiti secondo le regole empiriche del Codice Edilizio (Gautam et al., 2016).

Il Nepal ha una ricca tradizione di architettura vernacolare, tutt'ora predominante nei contesti rurali. È stato ritenuto fondamentale il loro studio, in particolar modo osservandone le caratteristiche bioclimatiche e sismiche, in modo tale da comprendere la tradizione locale ancora rappresentativa di un'ampia parte dell'architettura nepalese. A seguito

del terremoto

locale, confermando il valore empirico e adattivo delle soluzioni tradizionali (Olgyay, 1963). L'analisi del comportamento sismico dell'architettura vernacolare si basa sull'interpretazione critica dei modelli di danno osservati a seguito del terremoto di Gorkha del 2015, così come documentati da Gautam et al. (2016), integrando tali evidenze con la lettura tipologica e costruttiva dei casi studio analizzati per osservarne le criticità e gli elementi di resilienza.

2.1.1 Tharu

Regione del Terai

Clima temperato Cwa

Uno dei più antichi popoli del Terai sono i Tharu, insediati da secoli nella regione meridionale del Nepal al confine con l'India, composto da sottogruppi etnici uniti da stretti vincoli familiari con tradizione agricola per il sostentamento.

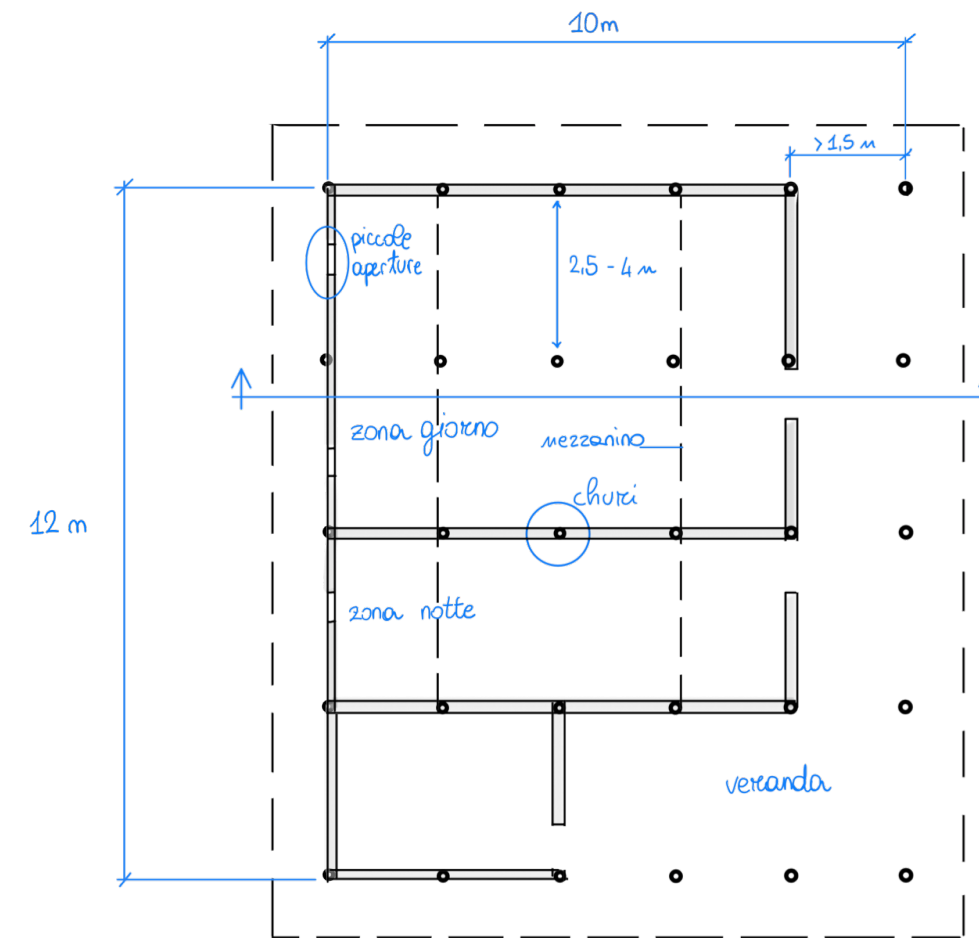
I villaggi Tharu sono situati su sommità in prossimità di sorgenti d'acqua, ma riparati dalle esondazioni caratteristiche della stagione delle piogge. Gli insediamenti seguono la strada principale, su entrambi i suoi lati le case si dispongono ad U creando dei cortili familiari. Nei punti nodali delle strade si generano piazza comuni (chowk) con edifici per il commercio, per l'aggregazione e sorgenti d'acqua potabile.

La casa ha pianta rettangolare (in media 12 x 10 m), si sviluppa su un solo piano con un mezzanino usato per le provviste ed è rivolta verso est per auspicio di prosperità. La facciata che si affaccia sul cortile ospita ampie verande coperte dal tetto sporgente (almeno 1,5 m), usate come luogo di lavoro e di ritrovo per l'intera famiglia in alternativa al cortile. Ogni casa è composta almeno da due aree (paies), il cui numero aumenta man mano che s'ingrandisce la famiglia. All'esterno della casa, su entrambi i lati, è presente un piccolo frutteto e un orto vicino ai quali viene generalmente costruita una pompa d'acqua, sul perimetro del cortile sono anche presenti stalle e depositi. Il terzo lato del cortile viene occupato dall'abitazione secondaria (Bangla), che segue lo stile della principale, con la differenza di essere chiusa su tre lati ospitando la veranda al centro della facciata che si affaccia sul cortile. Gli spazi seguono una gerarchia: il cortile è utilizzato per il deposito dei prodotti agricoli, come luogo di riposo durante le sere estive e come spazio pubblico per incontri, cerimonie e feste; la veranda è uno spazio semi-privato, anch'essa utilizzata per dormire all'aperto e come salotto familiare, ospita inoltre alcuni attrezzi di lavoro e della casa; le stanze sono luoghi privati utilizzati unicamente per dormire, cucinare e riporre le provviste, hanno dimensione di circa 4 x 2 m e piccole aperture.

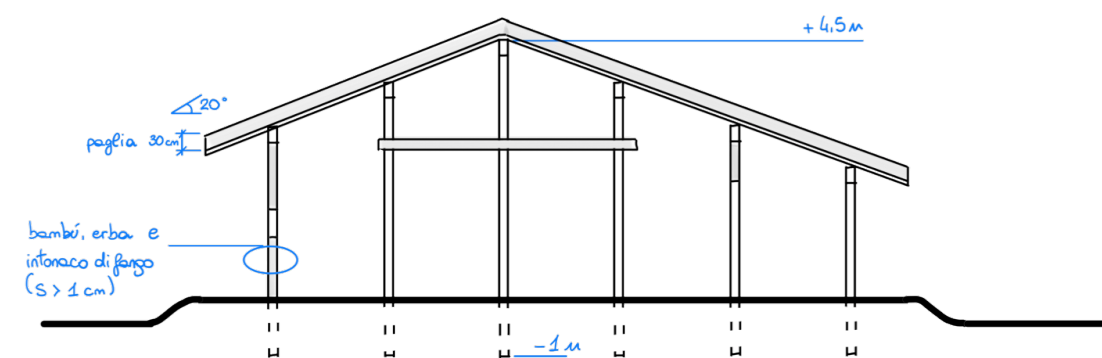
La costruzione e la manutenzione delle case avvengono generalmente nei mesi di aprile e maggio, prima dell'inizio della stagione delle piogge, nei luoghi indicati dal Bharra, la guida religiosa. L'organizzazione strutturale delle case si basa su una maglia regolare di pilastri con l'estremità superiore a forcilla per sostenere le travi. Queste sostengono la struttura del tetto che, oltre a poggiarsi su esse, è legata ai pilastri attraverso delle funi per evitare spostamenti a causa del vento. La costruzione

delle abitazioni coinvolge l'intero villaggio e parte dal posizionamento del pilastro centrale fissato ad una profondità di circa un metro nel terreno e con altezza compresa tra 4,5 e 6 m dal suolo. Sulla stessa linea vengono collocati gli altri pilastri di uguale altezza con distanza tra 2,5 e 4 m, il numero di pilastri è determinato dal numero di partizioni necessarie all'abitazione. La disposizione nell'altro senso ortogonale dei pilastri ha una differenza costante in altezza di mezzo metro, in modo tale da definire una pendenza regolare del tetto compresa tra i 18 e i 25 gradi. Il manto di copertura è composto da 30 cm di paglia per impedire infiltrazioni durante le piogge monsoniche. Le pareti sono costituite da elementi in bambù ed erba fissati con corde e intonacati con più di un

Schizzo pianta tipo - casa Tharu



Schizzo sezione tipo - casa Tharu



<

2.1.4 Sherpa

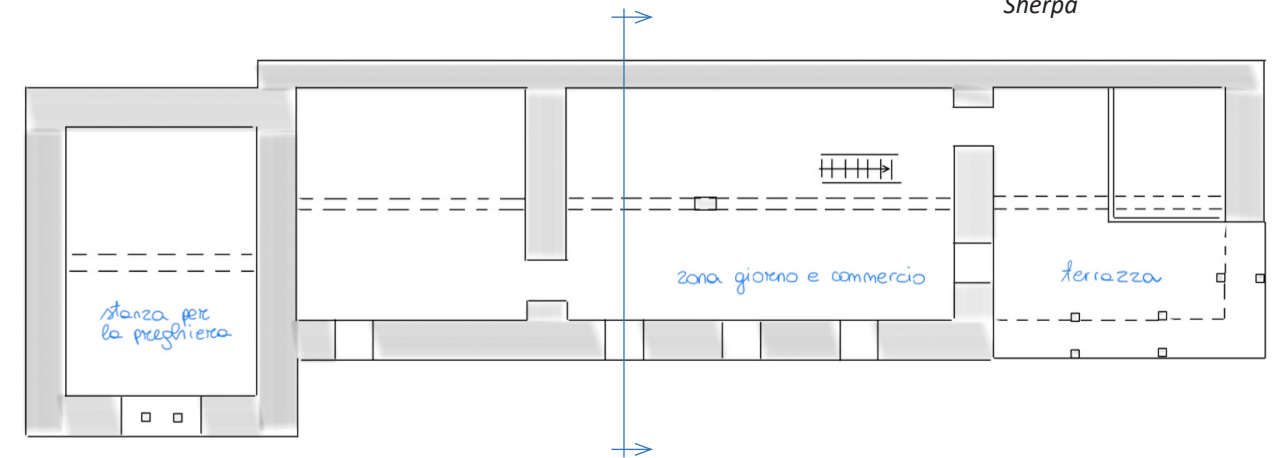
Regione dell'Himal

Clima freddo Dwb

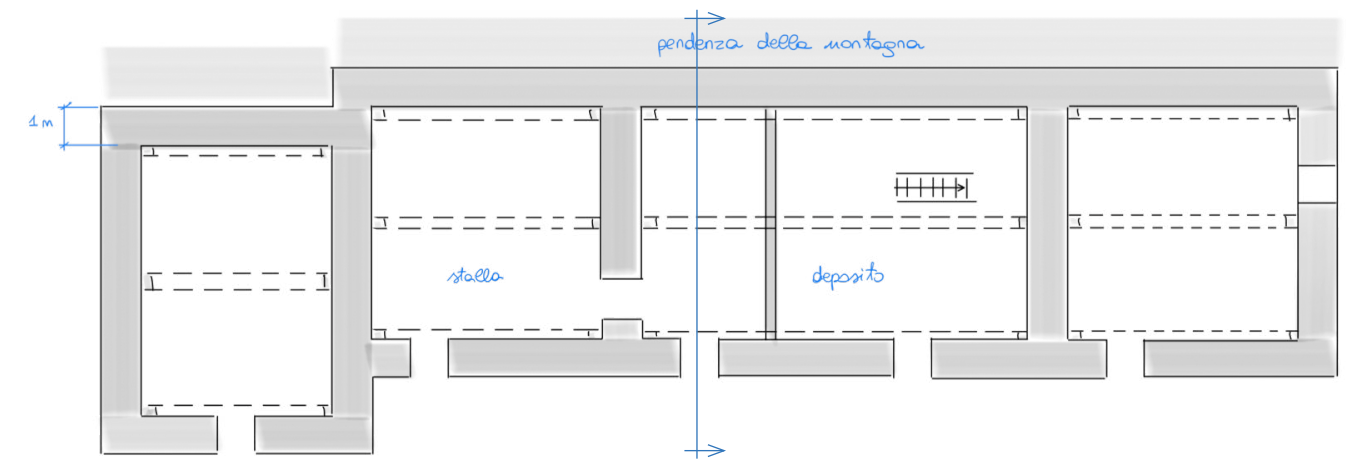
Il popolo Sherpa è un gruppo etnico delle montagne dell'Everest, che abita in tre sub-regioni: Khumbu, Solu e Pharak. La remota posizione geografica ha permesso a questa cultura di non essere influenzata per molti secoli.

Lo stile architettonico Sherpa è suddivisibile in tre tipologie, di cui una è il prototipo delle altre due. Le case, in tutte e tre le tipologie architettoniche, hanno pianta rettangolare, si sviluppano su due piani e hanno una copertura a falde. Strutturalmente presentano un muro in pietra esterno, spesso fino a mezzo metro, che racchiude una struttura lignea interna indipendente, le travi non sono fissate ai pilastri, ma poggiano su grandi capitelli a mensola che le sormontano. Il piano terra è parzialmente costruito nella pendenza della montagna ed ha la funzione di deposito e stalla. Il piano superiore ospita le funzioni domestiche e sociali, la stanza principale è luogo di ritrovo per la famiglia, per gli ospiti e per il commercio (nei villaggi Sherpa non esistono edifici pubblici dedicati a questa funzione). Al primo piano si trovano anche una piccola terrazza e una stanza dedicata alla preghiera con una larga finestra. Tutte le aperture sono in legno e rivolte verso sud-est, situate quindi su un'unica facciata. Gli elementi in legno sono minuziosamente intagliati con motivi geometrici e le finestre sono, per la maggior parte, dipinte con colori vivaci per compensare i toni cupi delle pareti (Sestini et al, 1978).

Schizzo pianta p1 tipo - casa Sherpa



Schizzo pianta pt tipo - casa Sherpa



Schizzo sezione tipo - casa Sherpa

