UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE

Corso di Laurea Magistrale in
Rischio Ambientale e Protezione Civile

IMPATTO CLIMATICO E ANTROPICO SUL FIUME MEKONG, CON PARTICOLARE RIGUARDO AL LAGO TONLE' SAP, ANALISI DELLE CONSEGUENZE ECONOMICO SOCIALI

-

CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE MEKONG RIVER, WITH PARTICULAR REGARD TO LAKE TONLE' SAP, ANALYSIS OF THE SOCIAL ECONOMIC CONSEQUENCES

Tesi di Laurea Magistrale di:

BUCCI GLENDA

Relatore
Chiar.mo Prof.

NEGRI ALESSANDRA

Sessione Autunnale

Anno Accademico 2025-2026

SOMMARIO

SOMMARIO 3

ELENCO DELLE TABELLE 5

ELENCO DELLE FIGURE 6

ELENCO DEGLI ACRONIMI 14

RIASSUNTO 15

SCOPO E OBBIETTIVO DELLA TESI 17

DESCRIZIONE DEL CONTESTO REGIONALE 18

TOPOGRAFIA E IDROGRAFIA 18

CLIMA 23

ANALISI ISTITUZIONALE, CONFINI AMMINISTRATIVI 29

CONTESTO SOCIO-ECONOMICO 31

ETNIE E STRUTTURA DELLE COMUNITÀ LOCALI 31

DEMOGRAFIA 33

PRINCIPALI ATTIVITÀ ECONOMICHE GENERATRICI DI REDDITO 37

STRATEGIA DI APPROCCIO ALLO STUDIO 38

ASSETTO TOPOGRAFICO, GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DEL BACINO DEL FIUME MEKONG 38

ASSETTO TETTONICO, TOPOGRAFICO, GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELLA CAMBOGIA 40

SEDIMENTOLOGIA E BILANCIO SEDIMENTARIO DEL SISTEMA MEKONG-TONLE' SAP 46

ELEMENTI DI PEDOLOGIA E CARATTERISTICHE DEI SUOLI CAMBOGIANI 52

ANALISI D'USO DEL SUOLO 55

ASSETTO IDROGRAFICO DEL SISTEMA FIUME MEKONG - TONLE' SAP 58

ASSETTO IDROGRAFICO DEL FIUME MEKONG 58

INTERAZIONE DELL'ASSETTO IDROGRAFICO DEL FIUME MEKONG CON IL SISTEMA LAGO-FIUME TONLÈ SAP 62

EFFETTI DELLE DIGHE IDROELETTRICHE 64

ASSETTO IDROGRAFICO DEL FIUME MEKONG, CAMBIAMENTI CLIMATICI E IMPATTO ANTROPICO 74

IMPATTO ANTROPICO- ESTRAZIONE DEI SEDIMENTI 80

IMPATTO ECONOMICO - SOCIALE..... 90

POSSIBILI SOLUZIONI AGLI EFFETTI DEL SAND MINING..... 98

CONCLUSIONI.....107

BIBLIOGRAFIA E OPERE CITATE.....109

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1- Banca Mondiale (2023). Databank – Indicatori di Sviluppo Mondiale. URL: https://databank.worldbank.org/source/world-development-Indicatori .UNDP (2022). Indice Globale Multidimensionale della Povertà 2022. URL: https://hdr.undp.org/system/files/documents/hdp-document/2022mpireportenpdf.pdf *pag.33*

Tabella 2 - Periodo di copertura dei dati e numero totale di campionamenti di solidi sospesi e scarichi d'acqua. (Sok et al., 2021). *pag.44*

Tabella 3 - Differenza tra i fl OW massimo, medio e minimo in tre stazioni principali del Mekong tra simulazioni DAM e NAT. I risultati mostrati sono le medie per ogni decennio e per l'intero periodo dal 1979 al 2016. I valori più alti di riduzione del flow massimo e aumento del flow minimo sono evidenziati rispettivamente in rosa e verde. (H.Dang et al., 2022). *pag.67*

Tabella 4- Cambiamenti complessivi nel riso e nella pesca tradizionali rispetto alla base Mekong River Commission 2017. *pag.88*

Tabella 5 - Effetto del cambiamento climatico sulla sicurezza alimentare Mekong River Commission 2017. *pag.89*

Tabella 6 - Proiezioni del PIL (medie) per il 2040 a prezzi costanti del 2017. Mekong River Commission 2017. *pag.90*

Tabella 7 - Riduzione percentuale del PIL prevista per il 2040 a causa dei cambiamenti climatici. Mekong River Commission 2017. *pag.91*

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 - Overton, L. C., e Chandler, D. P. (2023). Cambogia. Enciclopedia Britannica. URL: https://www.britannica.com/place/Cambodia pag.18

Figura 2- Siam society royal patronage Bangkok Thailand pag.19

Figura 3 - Created by Matti Kummu (Helsinki University of Technology) - users.tkk.fi/u/mkummu; pag. 20

Figura 4 - Climate classification maps at 1-km resolution, Köppen-Geiger. Classificazione climatica di Köppen-Geiger della Cambogia nel periodo 1980–2016. Elaborazione dell'autrice su dati di Beck et al. (2018). pag. 23

Figura 5 - Di Man77, using map drawn by Nord-NordWest - Questa immagine vettoriale include elementi che sono stati presi o adattati da questa: CC BY-SA 3.0 de, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45023138 pag. 28

Figura 6- © 2024United Nations DESA, Population Division. Licensed under Creative Commons licence CCBY3.0 Igo: United Nations, DESA, Population Division. World Population Prospect 2020. http//: population.un.or/wpp/ pag. 32

Figura 7- Distribuzione della popolazione totale per provincia in Cambogia. Dati tratti dal General Population Census of the Kingdom of Cambodia 2019 del National Institute of Statistics (NIS) pag. 33

Figura 8 – Villaggio galleggiante sul lago Tonlè Sap, nei pressi di Chong Khneas, Cambogia. Fonte: Christophe95, 2018, Wikimedia Commons, licenza CC BY-SA 4.0. pag. 35

Figura. 9 - Cartoon showing the tectonic evolution of Sundaland (Thailand–Malay Peninsula) and evolution of the Sukhothai Arc System during Late Carboniferous–Early Jurassic times (after Ueno and Hisada, 1999; Metcalfe, 2002a; Sone and Metcalfe, 2008; Metcalfe, 2011a, b; Searle et al., 2012). pag. 38

Figura. 10 - Distribution of continental blocks, fragments and terranes, and principal sutures of Southeast Asia. Numbered micro-continental blocks, 1. East Java; 2. Bawean; 3. Paternoster; 4. Mangkalihat; 5. West Sulawesi; 6. Semitau; 7. Luconia; 8. Kelabit–Longbowan; 9. Spratly Islands–Dangerous Ground; 10. Reed Bank; 11. North Palawan; 12. Paracel Islands; 13. Macclesfield Bank; 14. East Sulawesi; 15. Bangai–Sula; 16. Buton; 17. Obi–Bacan; 18. Buru–Seram; 19. West Irian Jaya. LT = Lincang Terrane, ST = Sukhothai Terrane and CT = Chanthaburi Terrane, EM = East Malaya. C–M = Changning–Menglian Suture, C.-Mai = Chiang Mai Suture, and Nan–Utt. = Nan–Uttaradit Suture. After Metcalfe (2011b). *pag. 39*

Figura 11 - Topography and main active faults in East Asia and location of SE Asia at the zone of convergence of the Eurasian (pale orange), Philippine (pale blue) and Indian Australian plates (pale green). Large arrows represent absolute (International Terrestrial Reference Frame 2000, Altamimi et al. 2002) motions of plates (After Simons et al., 2007; Metcalfe, 2011a). *pag. 41*

Figura 12- Carta geologia della Cambogia- Ministry of Mines and Energy (MME) [Cambogia] - https://mme.gov.kh/strategic-sectors/mining/potential-mineral-resources/geological-map *pag. 43*

Fig. 13 - Mappe dell'area di studio. (a): Il fiume Mekong Baisin, (b): tre siti di campionamento situati a Kratie sul fiume Mekong, Chroy Changvar a Phnom Penh e a Prek Kdam del fiume Tonlè Sap. (c). la confluenza con Chatumuk situata vicino alla città di Phnom Penh. (Sok et al., 2021) *pag. 45*

Figura 14 - Variazione della portata d'acqua al passo temporale giornaliero e concentrazione totale di solidi sospesi (intervallo mensile) a (a) Kratie (1995-2018) e (b) Chroy Changvar (1993-2017). Dati dalla Cambogia MOWRAM. *pag. 47*

Figura 15 - Variazione della portata d'acqua al passo temporale giornaliero e dei solidi sospesi totali (TSS) al Prek Kdam (passo temporale mensile). I valori negativi di concentrazione e portata sono l'afflusso (inverso) nel TSL dal fiume Mekong, mentre i valori positivi sono l'afflusso dal lago verso il fiume Mekong. Dati dalla Cambogia MOWRAM. *pag. 48*

Figura 16 - Scambio stagionale di portata d'acqua tra TSL e Mekong presso la stazione Prek Kdam per l'anno idrologico 1995-2017. I valori negativi della portata sono l'afflusso (inverso) nel lago Tonle Sap dal fiume Mekong, mentre i valori positivi sono l'afflusso dal lago verso il fiume Mekong. *pag. 49*

Figura 17 - Distribuzione dei tipi di suolo in Cambogia (Crocker, 1962)

URL: https://data.opendevelopmentcambodia.net/km/dataset/fd43dcd8-643a-4165-9e34-b38a14a7357f/resource/81ec968e-253d-49b4-9f1d-9888c285770a/download/soil-type.jpgRappresentazione dei dati [JPEG] *pag. 52*

Figura 18 - Land Cover Map 2010 - Enhancing the MRC's Land Use and Land Cover 2020 Mapping Products. *pag. 54*

Figura 19 - Map of land cover change - Enhancing the MRC's Land Use and Land Cover 2023. *pag. 55*

Figura 20 - Resa idrica annuale del Basso Bacino del Mekong (da MRC, 2008). *pag. 57*

Figura 21- Rete idrografica del bacino del fiume Mekong. Fonte: Mekong River Commission (2024), The Mekong Atlas 2023. *pag. 59*

Figura 22 - Distribuzione delle dighe idroelettriche nel bacino del Mekong. Fonte: Mekong River Commission (2021), Hydropower Database. *pag. 62*

Figura 23 - Valori decennali (linee codificate a colori) e media a lungo termine (linee nere spesse; 1979–2016) dei livelli d'acqua alla stazione KL nel TSL (a) e della portata fluviale alla stazione PK nel TSR (b). Linee continue e tratteggiate rappresentano rispettivamente i risultati della simulazione DAM e NAT. (Dang et al. 2022). *pag. 65*

Figura 24 -Una mappa spaziale del MRB che mostra la posizione delle 86 dighe selezionate (cerchi codificati a colori) incluse nel modello. La codifica a colori e la dimensione dei cerchi indicano rispettivamente il decennio di messa in servizio e la capacità massima di stoccaggio. Le dighe situate nel corso principale del Mekong

(a partire dal 2016) portano il nome. Lo sfondo mostra la rete fluviale (linee blu) con spessore scalato basato sulla portata media a lungo termine simulata dal 1979 al 2016 con una risoluzione spaziale di 3 arcmin (~5 km). L'incrocio in basso a sinistra mostra la pianura della Cambogia fl, con TSL e TSR indicati in magenta e il confine del bacino idrografico del lago indicato dalla linea nera tratteggiata. (H.Dang et al., 2022). *pag. 66*

Figura 25 - Media a lungo termine (1979–2016) della profondità simulata di flood sull'area TSL (a). Confronto del ciclo stagionale della portata del fiume simulata (b-d) e dei livelli idrici (e-g) con le osservazioni alle stazioni di Kratie (KT; b ed e), Kompong Cham (KC; c e f) e Phnom Penh Port (PP; d e g). Le ombreggiature (rosso, blu e grigio per la portata simulata del fiume, livello dell'acqua simulato e osservazioni, rispettivamente) indicano la variabilità interannuale presentata come i quantili superiore e inferiore del 25% per ogni mese. Viene inoltre fornita una validazione completa del livello dell'acqua giornaliero alle stazioni di Kompong Luong (KL; h) e Prek Kdam (PK; i). (H.Dang et al., 2022). *pag. 67*

Figura. 26- Media a lungo termine (1979–2016) della presenza di flood (a). Differenza tra la media dell'occorrenza flood per ogni decennio e la media a lungo termine nella simulazione NAT: anni '80 (b), '90 (c), 2000 (d) e 2010 (e). La barra colore inferiore si applica ai pannelli b–e, dove i risultati mostrati sono differenze percentuali per un dato decennio rispetto alla media a lungo termine. Le aree senza occorrenza di flood sia nella media a lungo termine sia nel decennio confrontato sono indicate in grigio (b–e). (H.Dang et al.2022). *pag. 70*

Figura 27 - Differenze nelle aree sommerse a media decadale (barra codificata a colori; asse y sinistro) tra simulazioni DAM e NAT. I risultati mostrati sono la media spaziale per il bacino idrografico del TSL. (H.Dang et al.2022). *pag. 71*

Figura 28 - (a) Mappa del bacino del fiume Lancang-Mekong (LMRB) con dighe e stazioni idrologiche. Le diverse parti dell'area di studio sono anch'esse separate: l'area grigia mostra la parte cinese del bacino; l'area bianca mostra la parte Laos-Thailandia-Vietnam, mentre l'area gialla indica il sistema del lago Tonle Sap, ampliato nella parte b. (b) il sistema di pianura alluvionale del lago Tonle Sap, gli

affluenti e la posizione delle stazioni idrologiche per l'analisi del regime di flusso. (c) Confronto dei profili dei livelli dell'acqua nel porto di Phnom Penh (HPP) con le stazioni di Kompong Luong (HKL) e il periodo di flusso inverso per il 2004, indicato dalla linea della freccia nera. Le fonti di dati sul livello dell'acqua e il flusso inverso si trovano sul sito web della Commissione del Fiume Mekong (MRC). I dati sulle dighe si trovano nel CGIAR Research Program on Water, Land, and Ecosystems (https://wle.cgiar.org/thrive/2018/02/13/dams-data-and-decisions). Si noti che il corso superiore del fiume in Cina è chiamato fiume Lancang, mentre il corso a valle è chiamato fiume Mekong. (Per l'interpretazione dei riferimenti al colore in questa leggenda figurativa, il lettore viene indirizzato alla versione web di questo articolo.) (K. Morovati et al. 2023). *pag. 75*

Figura 29 - Riepilogo dei risultati ottenuti sulla quota del lago Tonle Sap nel

flusso totale nella confluenza e nel successivo delta del Mekong influenzato da

attività umane a monte e cambiamenti climatici. (K. Morovati et al. 2023). *pag. 76*

Figura 30 - Principali impatti geomorfologici, idrologici ed ecologici-sociali associati all'estrazione di sabbia nei sistemi fluviali. Fonte: Park (2024). *pag. 78*

Figura 31 - Compositi annuali dei tratti del Mekong, Bassac e Tonlè Sap dove è stato effettuato un conteggio di draghe a suzione, pale meccaniche e chiatte di sabbia, con date immagini indicate. (Immagine per gentile concessione di CNES/Airbus e Maxar Technologies, via Google Earth) B: Draggi a aspirazione, pale meccaniche e chiatte di sabbia che operano nella confluenza del Mekong, Bassac e Tonlè Sap. (Immagine per gentile concessione di Maxar Technologies, via Google Earth) C: Una draga a aspirazione in funzione vicino a Phnom Penh. (Immagine per gentile concessione di Chris Hackney) D: Sabbia dragata con una pala meccanica.

(Immagine per gentile concessione di Kalyanee Mam.) (Ng & Park, 2023). *pag. 81*

Figura 32 - A&B: Istogrammi di frequenza di chiatte di sabbia, draghe a aspirazione e pale meccaniche operative nelle zone selezionate del Mekong, Bassac e Tonlè Sap dal 2014 al 2020. C&D: Numero di chiatte di sabbia, draghe a suzione e pale

meccaniche durante il periodo di indagine. E: Mappa termica composita che mostra la concentrazione complessiva di pale meccaniche e draghe a aspirazione durante il periodo di indagine. (Ng & Park, 2023). (Crediti del livello di servizio: Esri, DigitalGlobal e GeoEye.) *pag. 82*

Figura 33 - Mappa dell'area di studio; mappa che mostra il bacino del fiume Mekong e le posizioni delle dighe e dighe operative in costruzione; riquadro rosso che indica i tratti dei fiumi Mekong, Tonlè Sap e Bassac, dove è stato effettuato il conteggio del numero di draghe ad aspirazione, pale meccaniche e chiatte di sabbia tra il 2014 e il 2020 (Fig. 5). B: Modello concettuale della correlazione tra l'estrazione del letto fluviale nella regione di Phnom Penh e il livello dell'acqua di Tonlè Sap: Il livello dell'acqua di Tonlè Sap è controllato dal livello del Mekong. Ciò significa che un calo del livello dell'acqua del Mekong a Phnom Penh dovuto all'incisione del letto del fiume, dovuto all'estrazione del letto fluviale, porterà direttamente al calo dei livelli d'acqua nel Tonlè Sap. (Ng & Park, 2023). *pag. 84*

Figura 34 - R: Area media di inondazione mensile del Lago Tonlè Sap dal 1988 al 2018. I prodotti dati Landsat Collection 1 Level-1 (risoluzione 30 m) tra il 1988 e il 2020 sono stati ottenuti dall'USGS. I prodotti (MOD09Q1) di risoluzione () di Riflettanza della Superficie MODIS/Terra Surface Reflectance a 8 giorni () tra il 2000 e il 2019 sono stati acquisiti dal NASA Land Processes Distribution Archive Center. B: Curva di valutazione del livello dell'acqua al Lago Tonlè Sap (dati altimetrici) rispetto al livello dell'acqua a Prek Kdam (dati della stazione di misura) costruita per stimare i livelli dell'acqua al Lago Tonlè Sap; la curva di valutazione ha rivelato una forte correlazione dei livelli d'acqua al Lago Tonlè Sap e a Prek Kdam sia durante la stagione di salita che quella di discesa (R2 = 0,9388 e R2 = 0,9673, rispettivamente). C: Curva di valutazione dell'area di inondazione rispetto al livello dell'acqua del Lago Tonlè Sap, costruita per stimare il volume del Lago Tonlè Sap sopra l'acqua permanente. D: Volume del Lago Tonlè Sap sopra l'acqua permanente dal 1980 al 2018. (Ng & Park, 2023). *pag. 86*

Figura 35 - Serie di stazioni a livello dell'acqua lungo il corso principale del Mekong e il fiume Tonlè Sap, e all'interno del bacino di Tonlè Sap. A–E, G e I sono serie

giornaliere provenienti da stazioni a scartamento. F è la serie giornaliera dei livelli dell'acqua del Lago Tonlè Sap ricostruita utilizzando una curva di valutazione del livello dell'acqua a Tonlè Sap (dati altimetrici) rispetto al livello dell'acqua a Prek Kdam (dati della stazione di misura) (Fig. 3B). H e J–L sono serie di livelli d'acqua derivate dall'altimetria radar satellitare. I discarichi giornalieri a Kompong Cham, Neak Luong e Phnom Penh Bassac sono tracciati sullo sfondo (grigio). Le precipitazioni annuali totali a Prek Kdam e Sisophon sono anch'esse rappresentate sullo sfondo (grigio); le precipitazioni a Sisophon sono state tracciate sullo sfondo della serie dei livelli dell'acqua di Battambang, dato che queste due stazioni si trovano molto vicine. (Ng & Park, 2023). *pag. 87*

Figura 36 - Adeguatezza dell'apporto energetico alimentare (% del fabbisogno energetico alimentare soddisfatto dalla produzione nazionale) nei paesi del bacino del fiume Mekong dal 2000 al 2020.MRC 2023- FAOSTAT 2023. *pag. 91*

Figura 37- Prevalenza della malnutrizione, in proporzione alla popolazione, nei paesi del bacino del fiume Mekong dal 2000 al 2020. MRC 2023- FAOSTAT 2023. pag. 92

Figura 38 - Prevalenza della malnutrizione in proporzione alla popolazione nei bacini idrografici di Cambogia e Laos dal 2013 al 2019. MRC 2023- FAOSTAT 2023. pag. 92

Figura 39 – Procedura di sediment flushing adottata nel sistema delle dighe sul fiume Kurobe, Giappone: abbassamento del livello del serbatoio (drawdown), rilascio dei sedimenti mediante flusso libero (sediment flushing) e successivo ripristino del livello idrico. Fonte: Kanazawa (2005), in Japan Commission on Large Dams (JCOLD, 2005) *pag.100*

Figura 40 - Planimetria generale del Sediment Bypass Tunnel (SBT) del serbatoio di Solis (Canton Grigioni, Svizzera). Si osservano la struttura d'imbocco (Tunnel intake) posizionata all'interno del bacino (SBT di Tipo B), l'opera di sbarramento (Solis dam), il tracciato della galleria di deviazione e l'opera di restituzione a valle (Outlet structure). Fonte: rielaborato da Dahal et al. (2025) / Auel et al. (2011).

Figura 41 - Evoluzione temporale e spaziale del profilo longitudinale del letto del serbatoio di Solis (talweg) in diversi anni indicati (fonte dati: Dahal et al. (2025). Pag. 102

ELENCO DEGLI ACRONIMI

CMA	China Meteorological Administration
CASC	Classificazione Agronomica dei Suoli Cambogiana
ENSO	El Niño–Southern Oscillation
FAO	Food and Agriculture Organization
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
IPCC	Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico
IWGIA	International Work Group for Indigenous Affairs
JCOLD	*Japan Commission on Large Dams*
LMB	Low Mekong Basin
MRB	Mekong river basin
MRC	Mekong River Commission
NGO	Non-Governmental Organization
NIS	National Institute of Statistics
SBT	*Sediment Bypass Tunnel*
SSL	Suspended Sediment Load
TSL	Tonlè Sap Lake
TSS	solidi sospesi totali
THREW	Tsinghua Representative Elementary Watershed
UMB	Upper Mekong Basin
UN Comtrade	United Nations Commodity Trade Statistics Database
UNDP	United Nations Development Programme
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
WBG	World Bank Group
WCRP	World Climate Research Programme
WCO	World Customs Organization
WITS	World Integrated Trade Solution

RIASSUNTO

Il lago Tonlè Sap ha una stretta connessione con il fiume Mekong ed è il più grande lago di acqua dolce del sud-est asiatico , il nome significa "*Grande fiume dalle acque fresche*", ma viene più comunemente tradotto come "*Grande lago*". È stato dichiarato "riserva della biosfera" dall'UNESCO nel 1997 ed ha ampie zone comprese in aree protette a livello internazionale secondo la Convenzione di Ramsar.

Il presente lavoro si pone come obbiettivo l'analisi degli effetti dei cambiamenti climatici e delle pressioni antropiche sul sistema idrografico Mekong–Tonlè Sap, con particolare attenzione alle conseguenze geomorfologiche, ambientali ed economico-sociali che interessano la Cambogia.

Nella prima parte viene descritto il contesto geografico, geologico, geomorfologico, climatico e socio-economico del Paese.

Successivamente è stato analizzato il funzionamento del meccanismo del flood pulse, tra il sistema Tonlè Sap – Mekong, che durante la stagione delle piogge determina l'inversione del flusso del fiume Tonlè Sap, consentendo l'espansione del lago, il deposito dei sedimenti fertili, la ricarica delle pianure alluvionali e il mantenimento di uno degli ecosistemi di acqua dolce più produttivi del pianeta.

Sono stati analizzati il bilancio sedimentario e il trasporto dei sedimenti, il cui equilibrio è stato profondamente modificato negli ultimi decenni.

Dalle ricerche fatte è emerso che i cambiamenti antropici dovuti alla costruzione di numerose dighe sia nel Mekong che lungo il corso dei suoi affluenti insieme al cambiamento climatico stanno influenzando in modo significativo il funzionamento naturale del fiume, le sue pianure alluvionali e il delta.

La costruzione di numerose dighe idroelettriche lungo il corso principale del Mekong e dei suoi affluenti, infatti, ha ridotto in modo significativo il trasporto dei sedimenti verso valle, mentre la crescente estrazione di sabbia dall'alveo del fiume ha accentuato l'incisione del letto fluviale e l'abbassamento del livello idrico del fiume Mekong riducendo il gradiente idraulico nei confronti del sistema Lago -

Fiume Tonlè Sap. Tali processi hanno alterato il meccanismo del “flood pulse”, riducendo l'intensità e la durata dell'inversione stagionale del flusso del fiume Mekong verso il lago Tonlè Sap.

La diminuzione dell'apporto sedimentario e delle inondazioni stagionali determina importanti conseguenze, tra cui la perdita di fertilità delle pianure alluvionali, la riduzione della resa della pesca, la progressiva degradazione degli habitat naturali e la perdita dei servizi ecosistemici ad essi connessi, nonché l'erosione delle sponde, del delta del Mekong e l’intrusione del cuneo salino nelle zone del delta.

Il cambiamento climatico, inoltre, modifica il regime delle precipitazioni e aumenta la frequenza di eventi estremi, aggravando ulteriormente gli squilibri idrologici.

Tali trasformazioni hanno ripercussioni dirette sulle comunità locali, fortemente dipendenti dalla pesca, dall'agricoltura e dai servizi ecosistemici forniti dal sistema Mekong–Tonlè Sap. La riduzione della produttività ittica, la diminuzione della fertilità dei terreni agricoli e l'aumento della vulnerabilità ai fenomeni climatici estremi compromettono la sicurezza alimentare, favoriscono l'aumento della povertà rurale e intensificano i fenomeni migratori.

Infine, vengono esaminate le principali strategie di mitigazione proposte dalla letteratura scientifica e dagli organismi internazionali, tra cui una gestione coordinata delle dighe, la regolamentazione dell'estrazione dei sedimenti e il suo monitoraggio, il ripristino del bilancio sedimentario, la tutela delle aree di particolare pregio ambientale, l'impiego di materiali alternativi alla sabbia fluviale e il rafforzamento della cooperazione internazionale attraverso la Mekong River Commission.

SCOPO E OBBIETTIVO DELLA TESI

L'obbiettivo della tesi è quello di analizzare l'impatto climatico e antropico sul sistema Lago – fiume del Tonlè Sap e fiume Mekong, inquadrare il suo sistema di regolazione delle acque in equilibrio e lo scostamento da esso.

Individuare le fonti di alterazione dell'equilibrio del regime di reciproco approvvigionamento d'acqua, di nutrienti e di regolazione della biodiversità e scambio dei sedimenti nel corso del tempo e come tali alterazioni abbiamo modificato non solo il livello delle acque del lago Tonlè Sap in maniera impressionante ma anche il regime del fiume Mekong con tutto quello che ne consegue.

Il progressivo abbassamento delle acque del lago ha infatti provocato un notevole impatto anche sulle comunità locali modificando l'afflusso dei nutrienti e la resa della pesca nonché il ciclo dei sedimenti tra il lago, il fiume Tonlè Sap e il corso del Fiume Mekong.

L'alterazione delle condizioni naturali ha messo in pericolo il sostentamento non solo delle popolazioni che vivono di pesca e agricoltura sulle rive del lago, ma anche di tutte quelle popolazioni che vivono grazie ad esse lungo il territorio del fiume Mekong fino al delta.

Un altro aspetto non secondario dovuto a all'alterazione dell'equilibrio è la diminuzione dell'apporto dei sedimenti causato sia dalle dighe che dall'estrazione di sedimenti dall'alveo del fiume Mekong che ha provocato il progressivo arretramento del delta, l'avanzamento del cuneo salino nei terreni agricoli e l'impoverimento di nutrienti dei suoli.

DESCRIZIONE DEL CONTESTO REGIONALE

TOPOGRAFIA E IDROGRAFIA

La Cambogia è un paese del sud-est asiatico che confina a ovest e a nord-ovest con la Thailandia, a nord-est con il Laos, a est e a sud-est con il Vietnam e a sud-ovest con il golfo di Thailandia. (Enciclopedia Britannica, 2024; CIA, 2024) L'estensione massima del paese è di circa 450 km da nord a sud e di 580 km da est a ovest. La regione è prevalentemente pianeggiante, circa il 75% del territorio si trova ad una quota di meno di 100 m s.l.m. e presenta catene montuose relativamente basse. (Enciclopedia Britannica, 2024). Verso nord, la pianura cambogiana è interrotta da una scarpata di arenaria, che forma una falesia rivolta verso sud che si allunga per più di 320 km da ovest a est con un'altezza variabile tra i 180 e i 550 m. Nella pianura sottostante si trova il più grande lago d'acqua dolce più grade del Sud-est asiatico, il Tonlè Sap. Durante la stagione delle piogge, la sua superficie può aumentare di quattro-cinque volte grazie all'inversione del flusso dell'omonimo fiume Tonlè Sap. Il suo bacino occupa quasi i due terzi dell'intero territorio cambogiano e si trova a un'altitudine media di appena 5 metri s.l.m. (MRC, 2010; FAO, 2011) Le sue sponde e le sue zone umide toccano diverse province cambogiane, il suo ecosistema e quello della pianura alluvionale e quindi la sua produttività in termini di risorse ittiche e agricole è influenzato dalle inondazioni monsoniche annuali del fiume Mekong.

La regione è densamente popolata ed è in gran parte coperta da coltivazioni di riso. (FAO, 2011) Ad est del Mekong le pianure si raccordano gradualmente con gli altopiani orientali, una regione ricoperta da foreste che si estende fino al Laos e al Vietnam. (Enciclopedia Britannica, 2024) Nella Cambogia sud-occidentale i monti Krâvanh (o Monti dei Cardamomi) e i monti Dâmrei (Massiccio dell'Elefante) formano un'altra regione di altopiani che ricopre gran parte della superficie compresa tra il Tonlè Sap e il golfo di Thailandia. (Enciclopedia Britannica, 2024; FAO, 2011) La fascia costiera meridionale che si affaccia sul golfo di Thailandia è una zona pianeggiante, ricoperta da fitte foreste e scarsamente popolata perché alle sue spalle si trova la zona degli altopiani. (Enciclopedia Britannica, 2024)

FIGURA 1. Mappa topografica e amministrativa della Cambogia[3]



Si noti le divisioni regionali tra le alture occidentali, le alture orientali e le pianure alluvionali centrali. Kampong Cham (a ovest del fiume Mekong)

Figura 1 - Overton, L. C., e Chandler, D. P. (2023). Cambogia. Enciclopedia Britannica. URL: https://www.britannica.com/place/Cambodia

I due fiumi principali della Cambogia sono il fiume Mekong e il Tonle Sap. Il Mekong, che nasce sull'altopiano del Tibet , entra in Cambogia dal Laos in prossimità delle cascate di Khone e scorre generalmente verso sud fino al confine con il Vietnam dove sfocia nel mar Cinese Meridionale, per un tratto di circa di 510 km. **(**MRC, 2010; Mekong River Commission, 2023)

Questo fiume è strettamente connesso con Il sistema lago- fiume Tonlè Sap al quale è collegato tramite il fiume omonimo (Tonlè Sap), che dopo un percorso di 120 km confluisce in esso all'altezza della capitale cambogiana, Phnom Penh. (MRC, 2010)

La particolarità del sistema Mekong- Tonlè Sap risiede nel fatto che il fiume Tonlè Sap durante la stagione delle piogge inverte la propria direzione di scorrimento, a causa della portata del Mekong e riversa le acque che prima scorrevano in direzione del Mekong verso il lago, determinandone una notevole espansione superficiale (Kummu et al., 2014; MRC, 2010). La porta del fiume Mekong invece è fortemente influenza influenzata dal regime monsonico che durante la stagione delle piogge ne fa aumentare notevolmente la portata d'acqua che poi causa delle grandi esondazioni. Tali fenomeni determinano un'elevata produttività biologica sia in temini di risorse ittiche che in termini di fertilità del terreno agricolo contribuendo in materia predominiate al sostentamento e l'economia della popolazione che vive in tali aree. (Kummu et al., 2014).

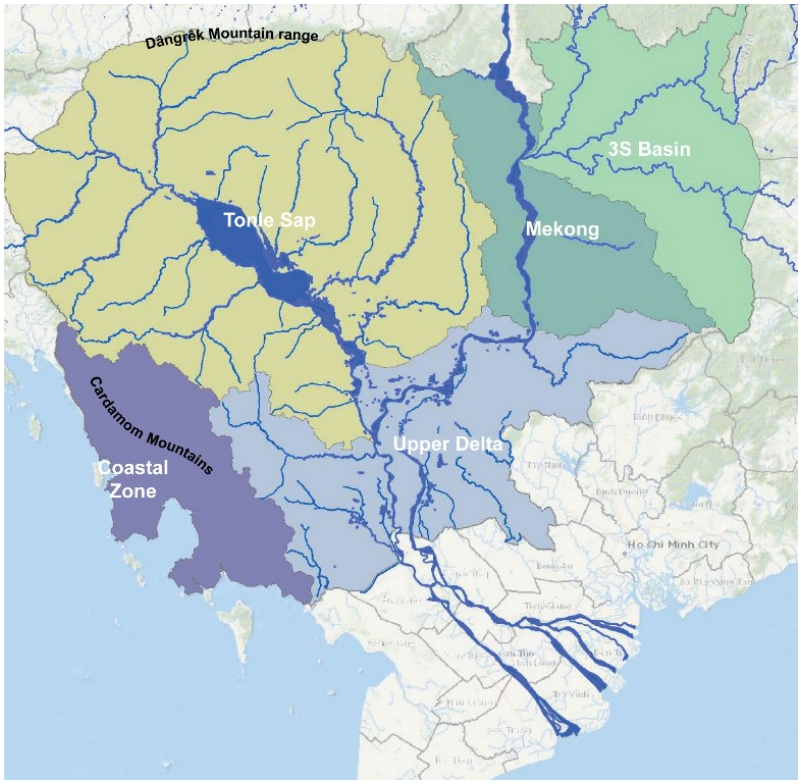


Figura 2- Siam society royal patronage Bangkok Thailand

Il lago comprende una parte permanente costituita da un grande bacino nord-occidentale collegato da uno stretto a un bacino sud-est relativamente più piccolo. (K. Morovati e al. 2023)

La maggior parte dell'afflusso nel lago Tonlè Sap (57%) proviene dal corso principale del Mekong, i suoi affluenti invece contribuiscono per circa il 30%, e le precipitazioni che ricadono direttamente nel lago contribuiscono per circa il 13%. (Kummu et al., 2014) Il flusso medio annuo in ingresso è di 79,0 km^3, quello misurato nel 1998 era pari a 44,1 km^3 e nel 2000 pari a 106,5 km3 nel. (MRC, 2005) Circa l'88% dell'acqua immessa nel lago ritorna al fiume Mekong attraverso il fiume Tonle Sap (87%) mentre il 12% evapora dal lago. Il flusso del fiume Mekong è il fattore principale che determina l'impulso di piena del Lago Tonlè Sap. (Kummu et al., 2014)

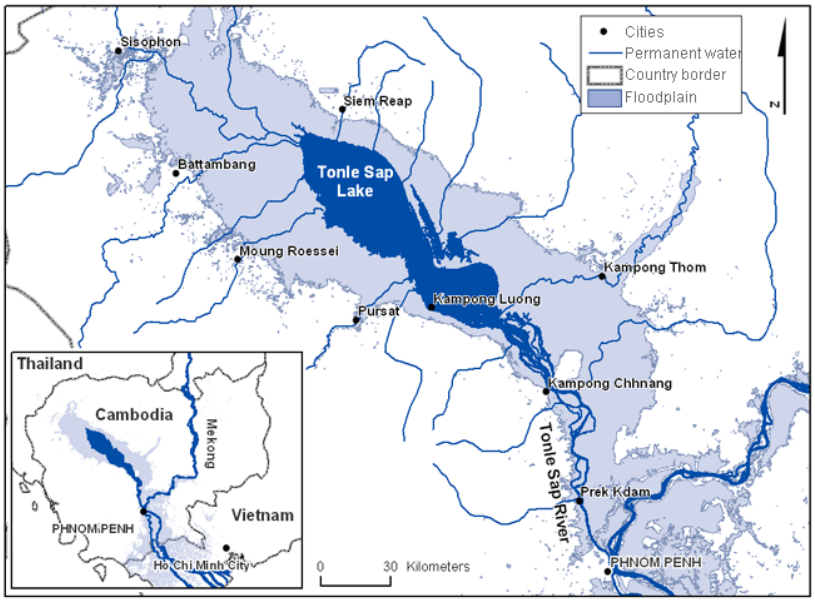


Figura 3 - Created by Matti Kummu (Helsinki University of Technology) - users.tkk.fi/u/mkummu;

Il Lago Tonlè Sap è alimentato da numerosi immissari e nel periodo dell'anno compreso tra ottobre e giugno tributa al Mekong tramite un fiume chiamato a sua volta Tonlè Sap e lungo 120 km. Nella stagione secca il fiume alimenta il Mekong portando a valle sedimenti, nutrienti e risorse ittiche. (Arias et al., 2012) Nella stagione estiva, a causa delle piogge monsoniche, le acque del fiume invertono la

direzione del flusso d'acqua grazie alla forza della portata del Mekong che spingono le acque del Fiume Tonlè Sap ad invertire la loro naturale direzione di scorrimento. La superficie del lago passa da 2500–3000 km^2 (stagione secca) a 10000–20000 km^2 mentre la sua profondità aumenta da 2–3 m fino a un massimo di 14 m. (MRC, 2010; Kummu et al., 2014) Il lago Tonle Sap con la sua grande biodiversità e il deposito annuale di ricchi sedimenti portati dal Mekong lo rendono una delle zone di pesca interne più ricche del mondo, fornendo cibo per più di 3 milioni di persone, contribuendo per il 75% al totale della pesca interna della Cambogia e al 60% del consumo proteico dell'intera popolazione cambogiana. (FAO, 2011). Le pianure cambogiane, infatti, sono costituite per lo più da depositi sabbiosi poveri di nutrienti che sono rese fertili dalle esondazioni delle acque del fiume Mekong ricche di nutrienti. (MRC, 2010) È proprio grazie a questo fenomeno, infatti, che è molto praticata l'agricoltura ed in particolare la coltivazione del riso che contribuisce al sostentamento della popolazione cambogiana, sia nelle pianure circostanti il lago che nelle zone a valle lungo il corso del Mekong.

CLIMA

Il clima della Cambogia è principalmente guidato dall'Oscillazione Meridionale dell'ENSO (El Niño–Southern Oscillation), che influenza la natura dei monsoni e generalmente porta condizioni invernali più calde e secche nel Sud-est asiatico durante la fase El Niño (novembre-aprile) e condizioni più fresche e umide durante la fase de La Niña (maggio-ottobre) (FAO, 2011; MRC, 2023)

Il fenomeno dell'ENSO deriva dalle interazioni tra le anomalie della temperatura superficiale del mare nel Pacifico equatoriale e la circolazione atmosferica tropicale e si sviluppa in tre fasi: El Niño, caratterizzato da un riscaldamento anomalo delle acque superficiali del Pacifico centrale e orientale; La Niña, associata a un raffreddamento delle stesse aree; e una fase neutra, con anomalie assenti o poco significative (Wang, Wu & Fu, 2000).

Nonostante l'Enso abbia origine nel Pacifico tropicale, i suoi effetti si riflettono a scala globale, compreso il Sud-est asiatico, modificando la distribuzione delle precipitazioni, la temperatura dell'aria e la frequenza degli eventi climatici estremi. (Juneng & Tangang, 2005)

In Cambogia il monsone estivo determina la disponibilità di acqua per le coltivazioni di riso, la resa della pesca e per l'equilibrio dell'ecosistema del lago Tonlè Sap - Mekong. Quando c'è il El Niño si registra generalmente una diminuzione delle precipitazioni monsoniche estive e un aumento delle temperature medie, favorendo periodi di siccità e compromettendo la produzione agricola in particolare del riso che è la principale coltura del paese e principale fonte di sostentamento delle popolazioni agricole. Al contrario, durante La Niña, si verifica un incremento delle precipitazioni causando un maggiore rischio di alluvioni, esondazioni del fiume Mekong e danni alle infrastrutture rurali e alle coltivazioni **(**Räsänen et al., 2013). L'episodio più grave causato dal El Niño fu tra il 2015 e il 2016: quando la siccità ha provocato grandi perdite agricole ed economiche ma anche grande carenza in termini di risorse idriche per gran parte della popolazione. (Sutton et al., 2019). Le variazioni dovute al El Niño, si ripercuotono anche sull'equilibrio del sistema Tonlè Sap -Mekong; la riduzione delle precipitazioni determina una minore espansione stagionale del lago e una diminuzione degli habitat destinati alla

riproduzione delle specie ittiche. (Kummu & Sarkkula, 2008; Räsänen et al., 2013). Questo si riflette sull' economia del paese perché la riduzione della pesca e della resa agricola comportano la diminuzione del lavoro e l'aumento delle condizioni di povertà della popolazione che risiede in tali zone.
In particolare, da metà marzo ai primi di ottobre, i venti di sud-ovest del monsone portano forti piogge ed elevata umidità. In questo periodo cadono circa tre quarti delle precipitazioni annue. Dai primi di novembre a metà marzo, i venti più deboli e secchi del monsone di nord-est portano nuvolosità variabile, precipitazioni occasionali e un livello di umidità minore.

Le precipitazioni annue variano considerevolmente da una parte all'altra del paese, da più di 5000 mm sui versanti rivolti al mare delle zone collinari sud-occidentali ai circa 1270-1400 mm nelle regioni della pianura centrale. (MRC, 2023)

Il picco delle precipitazioni si raggiunge tra agosto e settembre (310,60 mm a settembre), ma i massimi si verificano prima a ovest e nord e successivamente a sud. Nelle pianure alluvionali centrali sono stati registrati picchi mensili di pioggia compresi tra 250 e 300 mm. La piovosità media annua della Cambogia è di 1.836 millimetri (1991–2020); la media di precipitazioni mensili più basse si si hanno a gennaio (1,14 mm a Preah Vihear, seguiti da 2,27 mm a Siem Reap).

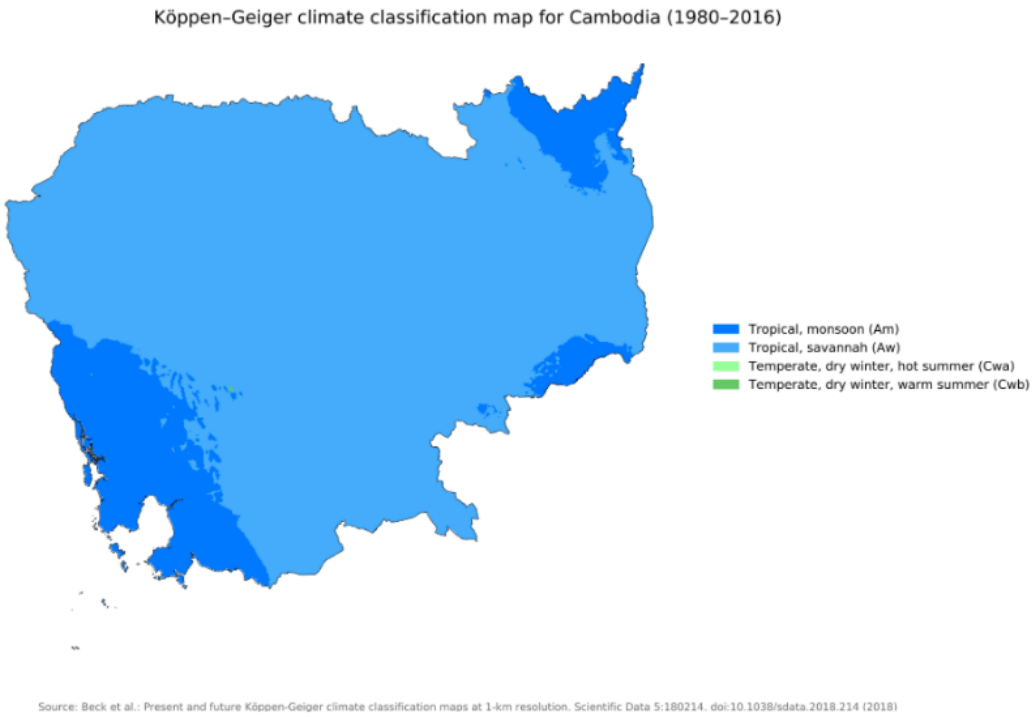


Figura 4 - Climate *classification maps at 1-km resolution, Köppen-Geiger. Classificazione climatica di Köppen-Geiger della Cambogia nel periodo 1980–2016. Elaborazione dell'autrice su dati di Beck et al. (2018).*

Le temperature massime sono elevate durante tutto l'anno, e vanno dai circa 28 °C di gennaio, ai circa 35 °C di aprile. (World Bank, 2021) La temperatura media annuale è di 27,41°C. Durante il periodo 1991–2020, il mese più caldo, quello precedente all'inizio della stagione delle piogge, era aprile con una temperatura minima media di 24,18°C e una temperatura massima media di 34,59°C, mentre il mese più fresco, dicembre, andava da una temperatura media minima di 20,99°C a una temperatura media massima di 30,27°C

Secondo uno studio fatto dal Gruppo della Banca Mondiale a causa dei cambiamenti climatici, si prevede che la Cambogia sperimenterà eventi più frequenti e intensi come inondazioni e siccità, entrambi già con gravi impatti sulle popolazioni cambogiane. A livello nazionale, le temperature minime medie sono aumentate di 0,29°C per decennio tra il 1971 e il 2020, mentre le temperature massime medie sono aumentate di 0,32°C per decennio nello stesso periodo. I

mesi invernali hanno mostrato i maggiori aumenti stagionali di temperatura per decennio, con variazioni che si avvicinavano o superavano gli 0,40°C nelle province centrali e orientali. Nel periodo dal 1971 al 2020, si sono registrate diminuzioni stagionali delle precipitazioni per lo più nelle province centrali e orientali, con gli effetti più marcati durante i mesi monsonici umidi estivi. Al contrario, diverse province occidentali hanno registrato un significativo aumento delle precipitazioni nello stesso periodo, specialmente durante i mesi primaverili. Le previsioni per il futuro ottenute mediante i modelli climatici derivati da CMIP6, che fanno parte del più importante programma internazionale di confronto tra modelli climatici, coordinato dal World Climate Research Programme (WCRP), Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (IPCC,) mostrano cinque possibili scenari futuri di concentrazione di gas serra adottate dall'IPCC. Il maggior profilo di rischio si concentra principalmente sullo scenario SSP3-7.0 il quale prevede che le temperature continueranno ad aumentare. La temperatura media a livello nazionale dal periodo di riferimento 995–2014 era pari a 27,88 °C, per il periodo 2020–2039 sarà 28,34°C, e 29,00°C per il periodo 2040–2059. Il numero medio annuo di giorni caldi (T-max > 35°C) nel periodo 2020–2039 arriverà a 60,17 giorni all'anno e a 82,87 giorni entro il 2050. Il maggior numero di anomalie nelle giornate calde si verifica durante i mesi primaverili in tutta la pianura centrale.
L'aumento delle temperature riguarda anche quelle notturne che non scendono sotto i 20°C (notti tropicali), aggravando il potenziale rischio di caldo estremo in tutta la Cambogia, tranne che sulla costa sud-occidentale e sugli altopiani. (World Bank, 2024)

A livello nazionale, i totali annuali di precipitazioni aumentano rispetto al periodo di riferimento 1995–2014 di 14,48 mm (−106,38 mm, 128,27 mm) rispetto al periodo di riferimento 2020–2039 secondo SSP3-7,0 ma diminuiscono −11,27 mm (−158,81 mm, 192,51 mm) rispetto al 2040–2059. Si prevede che le province meridionali ed orientali registreranno i maggiori aumenti delle precipitazioni annuali nel periodo 2020–2039, mentre le aree settentrionali dovrebbero registrare le maggiori diminuzioni delle precipitazioni annuali entro metà secolo. Le maggiori diminuzioni mensili di precipitazioni intorno all'inizio della stagione dei monsoni umidi e i maggiori aumenti mensili alla fine della stagione dei monsoni umidi potrebbero

segnalare uno spostamento successivo nel momento della stagione delle piogge. Secondo lo scenario SSP3-7 entro il 2050 si avranno delle stagioni secche ancora più secche e delle stagioni umide con più piogge, con variazioni regionali. È inoltre probabile che entro la metà del secolo si verificheranno più frequentemente eventi di precipitazioni estreme. Nel periodo 2035–2064, i giorni di grandi piogge associate ai periodi storici di ritorno di 100 anni saranno quasi due volte più probabili nelle province dell'altopiano occidentale, mentre il tasso di variazione è inferiore per eventi con periodo di ritorno a 25 e 10 anni a livello nazionale. (World Bank Group, 2024)

Di conseguenza, la Cambogia che ha un'esposizione alle inondazioni fluviali tra le più alte al mondo affronterà una serie di altri rischi legati al clima, come siccità, caldo estremo, incendi boschivi e innalzamento del livello del mare. (World Bank Group, 2024; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023)

In questo quadro, i cicloni tropicali che possono causare inondazioni che colpiscono la Cambogia si verificano in media ogni cinque anni, ma la frequenza delle inondazioni maggiori negli ultimi decenni è aumentata. Questo include inondazioni urbane in aree come Phnom Penh, inondazioni lungo la valle del fiume Mekong e le pianure alluvionali di Tonlè Sap (dove vive più di tre quarti della popolazione), oltre a inondazioni improvvise durante la stagione monsonica umida ed eventi legati a cicloni tropicali. (IPCC, 2023; World Bank Group, 2024)

Tra il 1987 e il 2007, 12 grandi alluvioni e intervallati a gravi episodi di siccità hanno causato impatti diffusi in tutto il territorio. Inondazioni estreme si sono verificate durante le stagioni monsoniche nel il 2000, che ha colpito circa 3,5 milioni di persone e causato la morte di quasi 350; il 2001 e il 2002, che hanno colpito più di 3 milioni di persone e causato quasi 100 morti in totale; e il 2011 e il 2013, che hanno coinvolto più di 2 milioni di persone, uccidendo più di 400 persone in totale, e hanno causato rispettivamente danni stimati di 451 milioni e 356 milioni di dollari USA. Le zone più esposte ai rischi di esondazione e le conseguenti perdite agricole ed economiche sono la Valle del Basso Mekong in Cambogia e il bacino di Tonlè Sap.

Tuttavia, le future proiezioni di piene mostrano una serie di incertezze dovute agli sviluppi idroelettrici a monte lungo il Mekong e i suoi affluenti. (Mekong River

Commission, 2023; World Bank Group, 2024)

Senza una adeguata pianificazione del rischio di alluvione le inondazioni entro metà secolo potrebbero causare danni tra 3,3 e 10,6 miliardi di dollari aumentando i rischi di frana, rischi per le attività agricole, la biodiversità e la salute umana.

Nel golfo di Thailandia temperature superficiali del mare tra il 1981 e il 2011 nel Golfo di Thailandia sono aumentate di 0,003–0,089°C all'anno. Secondo lo scenario SSP3-7.0 l'innalzamento del livello del mare nelle quattro province costiere della Cambogia è previsto che aumenti di 0,21 m entro il 2050 e di 0,69 entro il 2100. (World Bank Group, 2024). Tale fenomeno interesserebbe un'area di circa 25.000 ettari per lo più nei pressi di Koh Kong situata nell'estremità sud-occidentale della Cambogia. L'innalzamento del livello del mare comporterebbe la perdita delle foreste di mangrovie e degli ecosistemi marini, la salinizzazione delle terre agricole e l'intrusione di acqua di mare e avrebbe impatti negativi anche sulle attività turistiche delle coste in particolare quelle situate nella parte sud-occidentale della Cambogia. In base alle previsioni, quindi, gli episodi sia di inondazioni che di siccità in Cambogia probabilmente si verificheranno con maggiore intensità e frequenza in futuro, influenzati dai cambiamenti dell'ENSO.

SITUAZIONE POLITICO-AMMINISTRATIVA

ANALISI ISTITUZIONALE, CONFINI AMMINISTRATIVI

La Cambogia è una monarchia costituzionale, l'attuale Capo di Stato è il re Norodom Sihamoni, la lingua ufficiale è lo khmer. La religione ufficiale è il Buddismo e la capitale è Phnom Penh.

In seguito alla caduta del prospero Impero Khmer nel 1400, la Cambogia subì per secoli l'influenza politico-militare dei paesi limitrofi, per poi diventare un protettorato francese nel 1863 da cui ottenne l'indipendenza nel 1953. Subito dopo attraversò un periodo di instabilità e guerre con il coinvolgimento nel conflitto vietnamita che portò alla morte di 600-800.000 persone. Durante il conflitto ci fu anche un colpo di stato che costrinse all'esilio il Capo di Stato Sihanouk, il quale da Pechino, formò il Fronte Nazionale Unito Khmer ("FUNK") che si alleò con gli Khmer rossi di Pol Pot, primo ministro del paese dal 1976 al 1979, alleati a loro volta dei Viet Cong. Gli Khmer Rossi costrinsero la popolazione ad un esodo forzato dei civili verso le campagne al fine di creare una società comunista basata sull'agricoltura. Non furono esclusi nemmeno coloro che avevano titoli di studio come dottori e avvocati, e utilizzati come mano d'opera nei campi, rinchiusi in "campi di rieducazione" o uccisi se si contrapponevano al regime. Questo periodo di terrore durò 4 anni, fino alla conquista del paese da parte del Vietnam nel 1979 che durò fino al settembre 1989. Il 24 settembre 1993, grazie all'intervento delle nazioni Unite fu promulgata la nuova costituzione che faceva della Cambogia una monarchia costituzionale.

Oggi la Cambogia è divisa in 24 province (khet), divise in distretti (srŏk) e poi in comuni (khum), villaggi (phum) e isole (koh).

Non è ricompresa in alcuna provincia la capitale Phnom Penh.



Figura 5 - Di Man77, using map drawn by Nord-NordWest - Questa immagine vettoriale include elementi che sono stati presi o adattati da questa: CC BY-SA 3.0 de, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45023138

CONTESTO SOCIO-ECONOMICO

ETNIE E STRUTTURA DELLE COMUNITÀ LOCALI

La prima etnia della Cambogia è rappresentata dai khmer (cambogiani) che rappresentano il 95,4% della popolazione. Il popolo khmer è originario del territorio dell'odierna Thailandia, da cui si espanse fino a dominare la maggior parte dell'Indocina. (Chandler, 2008)

L'etnia vietnamita è presente soprattutto nella Cambogia ad est del fiume Mekong vi sono poi i Cham musulmani che vivono per lo più lungo il corso del Mekong, mentre i cambogiani di etnia cinese sono circa l'1% della popolazione e la loro presenza risale al periodo della colonizzazione francese. (National Institute of Statistics, 2019)

In totale la Cambogia è costituita da 24 differenti gruppi etnici. Le popolazioni numericamente più importanti sono i Tampuan, i Kuy, i Bunong, gli Jarai, i Brao e i Kreung. In assenza di dati statistici aggiornati, varie fonti stimano che questi gruppi costituiscono il 2-3% dell'intera popolazione cambogiana, ossia tra le 350 e le 400 mila persone. I territori delle popolazioni indigene sono per lo più dislocate nelle province settentrionali e nord-orientali**.** (International Work Group for Indigenous Affairs, 2024)

Il disordine geopolitico generato dalla Guerra del Vietnam e l'estensione del conflitto interno della stessa Cambogia ebbero effetti dirompenti sulla configurazione sociale, ecologica e territoriale delle popolazioni indigene. Dopo la liberazione del paese nel 1989, il nuovo governo cambogiano espropriò le terre alle popolazioni natie e concesse i diritti fondiari (Economic Land Concession, ELC) agli investitori nazionali, internazionali e ai consorzi multinazionali per lo sfruttamento di monocolture come gomma, manioca, anacardo, canna da zucchero e granoturco la cui coltivazione è concentrata nel nordest del paese. Le popolazioni natie espropriate (i Khmer e i Cham della valle centrale del fiume Mekong, i Lao, i sino-cambogiani e i vietnamiti nelle province settentrionali) sono emigrate. Questi territori furono poi colonizzati dai migranti che provenivano dalle province sovrappopolate centrali e sud-orientali. (LICADHO, 2023)

Una nuova migrazione si verificò poi intorno agli anni 2000 d.c. sempre per motivi agricoli e anche questa volta i forestieri cercarono di costringere le popolazioni locali a vendere i loro terreni; in caso di dissenso avrebbero corso il rischio di confisca da parte delle autorità locali, senza ricevere alcun tipo di compenso. (LICADHO, 2023)

Fu poi imposta la cultura della piantagione e abbandonata le pratica della rotazione delle colture che richiese l'uso di più braccianti agricoli reclutati tra i Khmer delle pianure, assunti da appaltatori cambogiani per svolgere lavori stagionali. (Baird, 2011; Milne, 2015) Tali meccanismi di sopruso nel corso degli ultimi secoli hanno impedito lo sviluppo della produzione agricoltura locale di sussistenza e favorito l'espansione del capitalismo. (Milne, 2015; Neef, Touch & Chiengthong, 2013). Nel 2001 fu proclamata la legge fondiaria che consente agli indigeni di fare richiesta dei titoli fondiari comuni, questo è uno strumento volto ad assicurare un appezzamento di terreno agricolo alla comunità e alle future generazioni (Communal Land Title – CLT). Si tratta però di un processo lungo e dispendioso sia in termini di tempo sia di denaro, che richiede l'intervento delle ONG. (NGO Forum on Cambodia, 2015; IWGIA, 2024) Questo procedimento però non è stato accettato in tutti i villaggi perché molti dei proprietari preferivano avere la proprietà diretta dei terreni e non la proprietà in comune con l'intero villaggio. Contemporaneamente a tale provvedimento però continuano le operazioni di sopruso da parte delle multinazionali che favoriscono le immigrazioni delle popolazioni locali. La massiccia emigrazione ha portato alla concentrazione degli indigeni in piccole aree alberate e boschive che gli stessi hanno dovuto convertire in agricole ai fini del loro sostentamento sconvolgendo il paesaggio e il naturale equilibrio dei nuovi insediamenti. (IWGIA, 2024)

DEMOGRAFIA

Secondo uno studio fatto dalla Banca Mondiale, nel 2022 la Cambogia aveva una popolazione di circa 16,8 milioni di abitanti con un tasso di crescita annuo dell'1,1%, La popolazione nel 2026 è stimata a 18.051.219 di persone a metà anno. (United Nations, 2024)

La densità di popolazione è di 102 per Km^2 su una superficie totale è di 176.520 Km^2.

La "piramide demografica" riassume approssimativamente la storia demografica della popolazione. Analizzando i dati del censimento della popolazione cambogiana nel 2019 il 29.4% della popolazione cambogiana aveva circa 15 anni e il 8.9% 60 anni; mentre nel 2008 erano rispettivamente del 33,7% e del 6,3%, questa variazione indica che la popolazione cambogiana sta lentamente invecchiando.

L'età media della popolazione nel 2008 era di circa 22 anni mentre nel 2019 è di circa 27 anni, con una speranza di vita di 71 per le donne e 68 anni per gli uomini.

La fascia di età lavorativa è più numerosa nelle aree urbane rispetto a quelle rurali, dove la percentuale di anziani è superiore. Ciò è dovuto ad un calo dei tassi di fertilità nelle aree rurali ed un aumento nelle aree urbane, nonché di movimenti migratori tra aree rurali e urbane. (National Institute of Statistics, 2019)

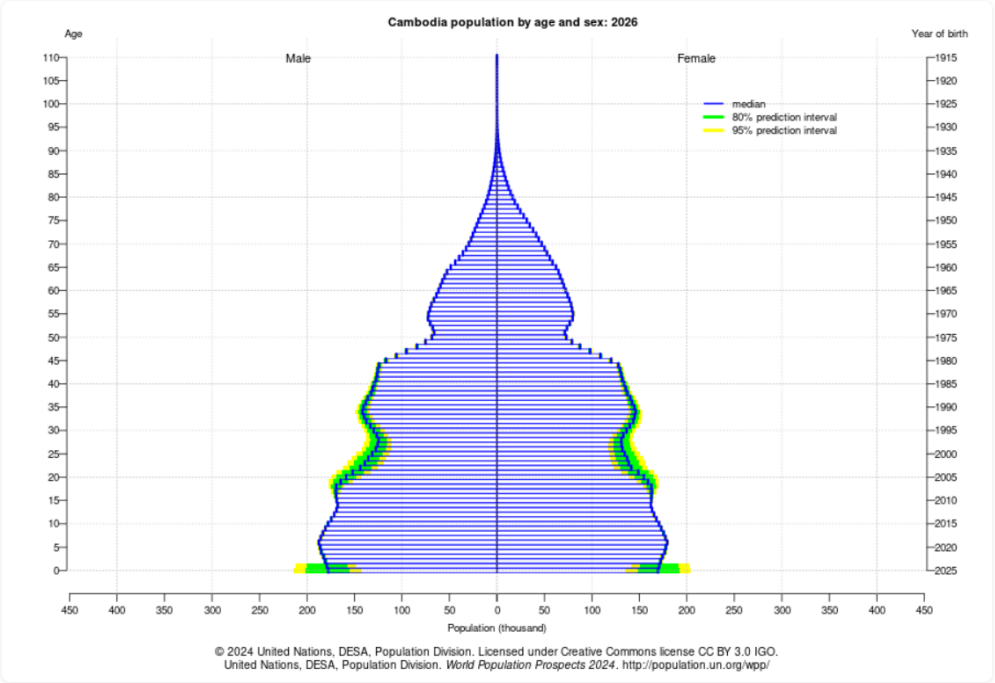


Figura 6- © 2024United Nations DESA, Population Division. Licensed under Creative Commons licence CCBY3.0 Igo: United Nations, DESA, Population Division. World Population Prospect 2020. http//: population.un.or/wpp/

Il 75% della popolazione attualmente vive in aree rurali, più della metà della popolazione urbana risiede nella capitale è Phnom Penh; il tasso annuo di urbanizzazione è circa del 2,9%. (World Bank, 2023) Nel 2008 la popolazione urbana della Cambogia ammontava a 2.614.027 abitanti mentre la popolazione rurale 10.781.655 abitanti, nel 2019 la popolazione urbana è aumentata a 6.135.194 e quella rurale è diminuita a 9.417.017 nel 2019. La popolazione urbana è aumentata dal 19,5% nel 2008 al 39,4% nel 2019; la concentrazione maggiore si ha a Phnom Penh con 2.281.951 abitanti, il 14,7% del totale.

Nel 2019 la regione della Pianura Centrale era la più popolata, con 7.644.295 abitanti, pari al 49,2% della popolazione totale. La regione del Tonlè Sap era la seconda regione più popolata, con 4.852.964 abitanti, pari al 31,2% del totale. La regione dell'Altopiano e delle Montagne era la terza area più popolata, con 1.982.484 abitanti, pari al 12,7%. Infine, la regione costiera e marittima contava 1.072.468 abitanti, pari al 6,9% del totale. (National Institute of Statistics, 2019)

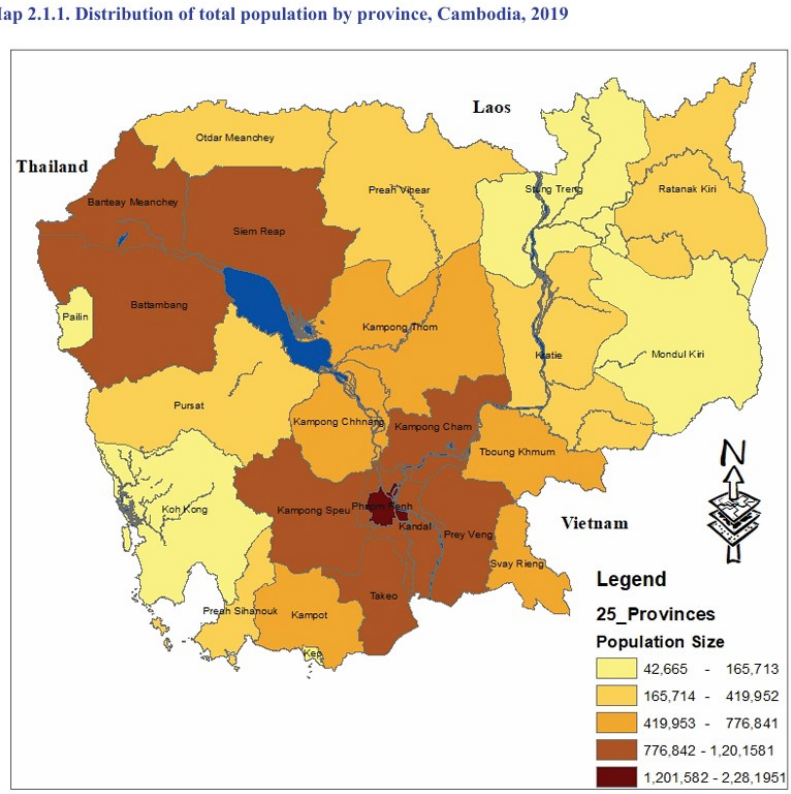


Figura 7- Distribuzione della popolazione totale per provincia in Cambogia. Dati tratti dal General Population Census of the Kingdom of Cambodia 2019 del National Institute of Statistics (NIS)

Il PIL pro-capite è di circa 1.800 dollari ($US attuale). Nel 2014 il 17,7% della popolazione cambogiana viveva al di sotto della soglia nazionale di povertà. (World Bank, 2017) Il settore agricolo (in particolare la coltivazione del riso, la silvicoltura e la produzione ittica) rimane il settore di lavoro dominante, rappresentando il 21,9% del PIL. Attualmente sia la manifattura così come le attività turistiche rappresentano un fattore in crescita dell'economia e del lavoro. (World Bank, 2022)

TAVOLA 1. Indicatori chiave di sviluppo[8]

Indicatori demografici chiave	Valore più recente	Classifica globale
Densità di popolazione (abitanti per km², 2021)	93.98	109 (su 216)
Aspettativa di vita (per la popolazione totale in anni, 2021)	69.58	139 (su 209)
Tasso di fertilità (totale delle nascite per donna, 2021)	2.34	90 (su 210)
Rapporto di dipendenza (a carico per 100 persone in giovane attività, 2022)	53.27	119 (su 217)
Indicatori chiave dello sviluppo economico e sociale	**Valore più recente**	**Classifica globale**
PIL pro capite (in $US attuale 2022)	$1.786,56	149 (su 185)
% di popolazione sotto la soglia di povertà nazionale (2014)[9]	17.7%	83 (su 100)
Tasso di disoccupazione (% della forza lavoro totale, 2022)	0.36%	182 (su 183)
% Occupati in Agricoltura (2021)	38.85%	40 (su 185)
Percentuale di Occupati nell'Industria (2021)	25.43%	42 (su 185)
% di Impiegati nei Servizi (2021)	35.72%	169 (su 185)
% Popolazione con accesso all'elettricità (2021)	82.50%	166 (su 215)
Percentuale di popolazione che utilizza almeno servizi igienici di base (2022)	76.72%	137 (su 191)

I dati per l'anno più recente misurato di ciascun indicatore sono classificati rispetto a tutti i paesi e le entità a livello globale nella colonna di estrema destra, come monitorato dal Data Bank della Banca Mondiale. La classifica globale per la popolazione sotto la soglia nazionale di povertà include solo i paesi classificati come in via di sviluppo dal PNUD.

Tabella 1- Banca Mondiale (2023). Databank – Indicatori di Sviluppo Mondiale. URL: https://databank.worldbank.org/source/world-development-Indicatori .UNDP (2022). Indice Globale Multidimensionale della Povertà 2022. URL: https://hdr.undp.org/system/files/documents/hdp-document/ 2022mpireportenpdf.pdf

PRINCIPALI ATTIVITÀ ECONOMICHE GENERATRICI DI REDDITO

L’economia della Cambogia è basata principalmente sul settore tessile e il turismo, mentre il settore agricolo resta la principale fonte di reddito per la maggior parte dei cambogiani che vivono nelle aree rurali. Altro settore di occupazione è quello dei servizi che è fortemente concentrato sulle attività commerciali e sui servizi legati alla ristorazione. Di recente, c’è stata la scoperta di riserve di petrolio e gas naturale al largo della costa che contribuisce alla crescita economica del paese. Una crescita costante alle esportazioni, in particolare nell'abbigliamento e nel turismo, ha favorito la crescita e la creazione di posti di lavoro nel settore manifatturiero e nei servizi ma nonostante l'aumento dell'occupazione nel settore manifatturiero, l’agricoltura rappresenta il 22 % del PIL della Cambogia e impiega circa 3 milioni di persone, pari a un terzo della forza lavoro. I principali prodotti del settore primario sono riso, gomma, grano, ortaggi, anacardi, tapioca e seta. Nonostante la produzione di riso è aumentata significativamente, trainata dall'aumento della superficie coltivata, il contributo dell'agricoltura alla crescita del Pil rimane limitato, il settore dell’agricoltura continua ad affrontare sfide strutturali, tra cui la dipendenza dalle condizioni meteorologiche e la volatilità dei prezzi delle materie prime. (World Bank, 2023; FAO, 2023)



Figura 8 – Villaggio galleggiante sul lago Tonlè Sap, nei pressi di Chong Khneas, Cambogia.
Fonte: Christophe95, 2018, Wikimedia Commons, licenza CC BY-SA 4.0.

STRATEGIA DI APPROCCIO ALLO STUDIO

ASSETTO TOPOGRAFICO, GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DEL BACINO DEL FIUME MEKONG

Il Mekong è il settimo fiume più lungo del mondo, il dodicesimo in termini di portata (475 km^3 annui) e il più lungo e importante dell'Indocina. La sua lunghezza stimata è pari a 4.880 km e il bacino ha un'ampiezza di 810.000 km^2. Le regioni attraversate dal fiume Mekong sono molto diversificate poiché attraversa una vasta parte del Sud-Est asiatico. Le sue sorgenti si trovano nell'Himalaya a circa 4970 m sul livello del mare e scorre per 4880 km attraverso Cina, Myanmar, Laos PDR, Thailandia, Cambogia (dove è chiamato Tonle Thom, grande fiume), per sfociare nel Mar Cinese Meridionale attraverso il delta in Vietnam. (L. V. Meshkova& al. 2012).

Il profilo altimetrico del Mekong e la sua direzione di scorrimento sono legati alla morfologia dovuta alla collisione continentale tra la placca Indiana (frammento distaccatosi dal Gondwana) e la placca Euroasiatica, iniziata durante l'Eocene medio (circa 45-50 milioni di anni fa). L'imponente sollevamento topografico fino a oltre 5.000 metri s.l.m. ha fornito l'energia potenziale idraulica per l'attivazione della rete drenante del paleo-Mekong che ha contribuito a creare una morfologia dominata da gole montane profonde con pareti sub-verticali e sezioni d'alveo a "V". Il Bacino del Mekong è diviso in Bacino Superiore e bacino inferiore. Nell' alto bacino del Mekong ('UMB) il fiume è chiamato Lancang Jiang, il "fiume delle onde turbolente"; qui il letto fiume è stato inciso nella roccia erodendo le valli montuose che producono oltre il 50% dell'apporto totale di sedimenti al basso bacino del Mekong (LMB). Questa è la principale sorgente del carico sedimentario solido di fondo (sabbie e ghiaie) che storicamente alimentava l'equilibrio del basso corso del Mekong e del Tonlè Sap. (Gupta, A. 2009)

Tra Laos e Thailandia inizia il corso inferiore del Mekong chiamato con il suo nome più famoso: Mekong, la "Madre di tutte le acque". Il corso del fiume rimane inciso nella roccia fino in Cambogia fino a Kratie dove assume una morfologia a canali intrecciati o a più canali fino a raggiungere il delta. (L. V. Meshkova& al. 2012). In Cambogia nei pressi di Phnom Penh, la capitale, si dirama il più grande distributario

del Mekong, il fiume Bassac. I due fiumi insieme entrano nella grande pianura fertile nel sud del Vietnam, dando origine ai “Nove Draghi”, i rami distributari del Mekong e del Bassac che formano il Delta del Mekong.

ASSETTO TETTONICO, TOPOGRAFICO, GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELLA CAMBOGIA

L'attuale assetto del territorio cambogiano, situata all'interno della placca euroasiatica, è dovuto ad un lungo e importante processo tettonico avvenuto dal Paleozoico (541 - 252 milioni di anni fa) al Cenozoico (da 66 milioni di anni fa a oggi). La struttura geologica conserva le evidenze di antichi processi di subduzione, collisione continentale e deformazione crostale che hanno interessato l'intera regione del Sud-est asiatico.

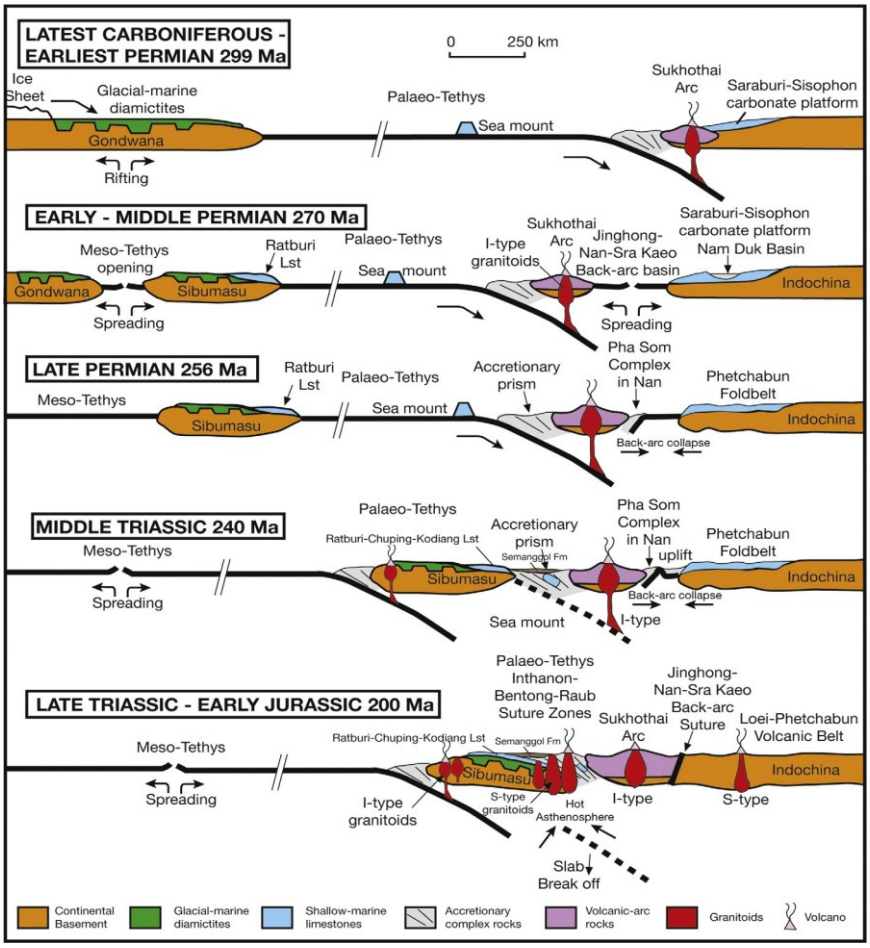


Figura 9 - Cartoon showing the tectonic evolution of Sundaland (Thailand–Malay Peninsula) and evolution of the Sukhothai Arc System during Late Carboniferous–Early Jurassic times (after Ueno and Hisada, 1999; Metcalfe, 2002a; Sone and Metcalfe, 2008; Metcalfe, 2011a, b; Searle et al., 2012).

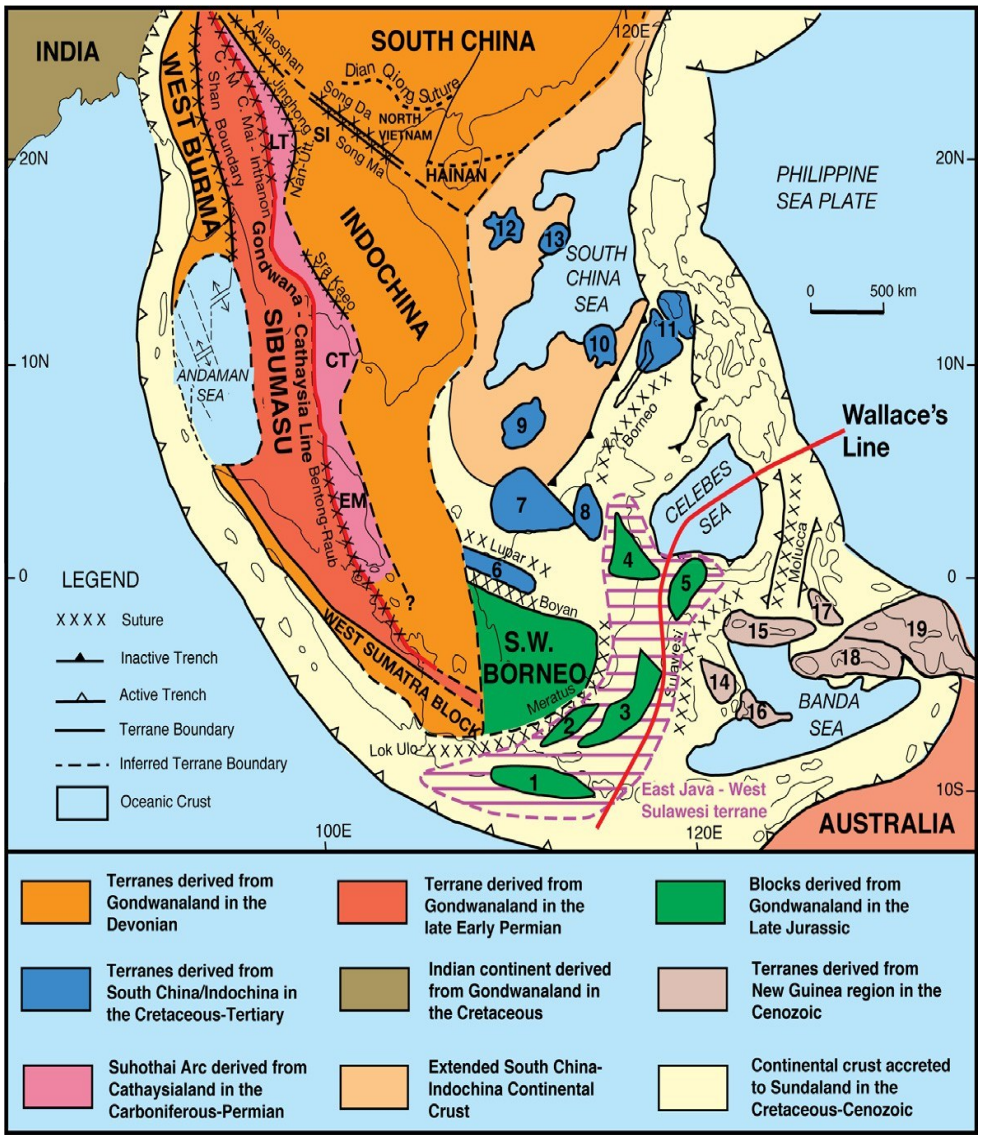


Figura 10 - Distribution of continental blocks, fragments and terranes, and principal sutures of Southeast Asia. Numbered micro-continental blocks, 1. East Java; 2. Bawean; 3. Paternoster; 4. Mangkalihat; 5. West Sulawesi; 6. Semitau; 7. Luconia; 8. Kelabit–Longbowan; 9. Spratly Islands–Dangerous Ground; 10. Reed Bank; 11. North Palawan; 12. Paracel Islands; 13. Macclesfield Bank; 14. East Sulawesi; 15. Bangai–Sula; 16. Buton; 17. Obi–Bacan; 18. Buru–Seram; 19. West Irian Jaya. LT = Lincang Terrane, ST = Sukhothai Terrane and CT = Chanthaburi Terrane, EM = East Malaya. C–M = Changning–Menglian Suture, C.-Mai = Chiang Mai Suture, and Nan–Utt. = Nan–Uttaradit Suture. After Metcalfe (2011b).

L'evento più significativo è rappresentato dalla chiusura dell'oceano Paleo-Tetide durante il Permiano superiore-Triassico (circa 250–220 Ma), in cui la subduzione della litosfera oceanica della Paleo-Tetide culminò con la collisione tra il Terrane Sibumasu e il Terrane Indocinese che avvenne durante il Triassico inferiore-medio, in seguito alla progressiva chiusura della Paleo-Tetide, culminando nella cosiddetta Orogenesi Indosiniana, responsabile della deformazione regionale, del metamorfismo e dell'intrusione di estesi plutoni granitici, avvenuta tra 245 e 230 Ma.

Durante il Cenozoico, furono riattivate le principali strutture tettoniche regionali come conseguenza alla collisione tra la placca Indiana e quella Euroasiatica, iniziata circa 50 milioni di anni fa. Questa collisione provocò la deformazione infracontinentale dell'Asia sud-orientale, favorendo movimenti trascorrenti lungo importanti sistemi di faglia, tra cui la Mae Ping Fault e la Three Pagodas Fault, oltre allo sviluppo di bacini sedimentari e modeste deformazioni estensionali (Metcalfe, 2013)

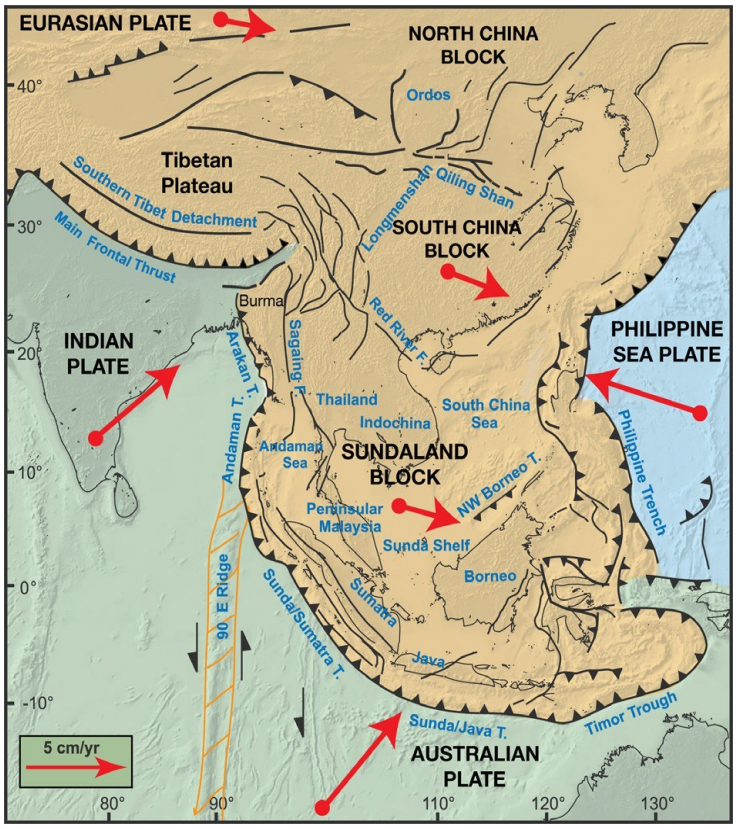


Figura 11 - Topography and main active faults in East Asia and location of SE Asia at the zone of convergence of the Eurasian (pale orange), Philippine (pale blue) and Indian Australian plates (pale green). Large arrows represent absolute (International Terrestrial Reference Frame 2000, Altamimi et al. 2002) motions of plates (After Simons et al., 2007; Metcalfe, 2011a).

La Cambogia, oggi, è dominata da una vasta pianura centrale caratterizzata da depositi quaternari creata dal fiume Mekong e dal lago Tonlè Sap. La zona depressa è circondata vi è una zona di pianure di transizione che si raccorda agli altopiani, in gran parte ricoperte da foreste, ricchi di arenarie continentali mesozoiche a ovest (monti Cardamomi) e da estesi basalti quaternari a nord-est (Ratanakiri), famosi per l'estrazione di gemme. Il Sud-est asiatico, infatti, rappresenta una fonte significativa di gemme corindone e zircone. I depositi di dovuti al vulcanismo basaltico alcalino intraplacca del tardo Cenozoico (<30 Ma) si trovano in Thailandia, Cambogia, Vietnam e Laos, formando una fascia che si estende per oltre 12.000 km

lungo i margini continentali del Pacifico occidentale, estendendosi dal sud dell'Australia fino all'est della Cina e alla Russia a nord. (C.Seng et al., 2024)

La Pianura Centrale, in cui è ubicato il Lago Tonlè' Sap è costituita da sedimenti alluvionali, sabbie, limi e argille, ed è proprio grazie a tali depositi che questa zona rappresenta il cuore agricolo del paese. Negli Altopiani Occidentali rappresentati dai monti Cardamomi e i Monti Dâmrei sono formati prevalentemente da arenarie e conglomerati mesozoici (252-66 milioni di anni fa) continentali mentre negli altopiani orientali e nordorientali, nelle province di Mondulkiri e Ratanakiri prevalgono rocce ignee e basalti del Cenozoico. (C.Seng et al., 2024)

La regione costiera meridionale adiacente al golfo di Thailandia è costituita da una sottile striscia di pianura, ricoperta da fitte foreste e scarsamente popolata, isolata dalla pianura centrale dalle alte terre sud-occidentali.

Dal punto di vista geomorfologico, il bacino quaternario centrale rappresenta l'elemento dominante del territorio cambogiano. Esso si è formato grazie alla continua sedimentazione del Mekong e dei suoi affluenti e comprende la vasta pianura alluvionale del Tonlè Sap, uno degli ambienti deposizionali più estesi del Sud-est asiatico. La continua deposizione di sedimenti fini durante le piene monsoniche ha favorito la formazione di suoli particolarmente fertili e ha contribuito allo sviluppo dell'ecosistema del Tonle Sap e delle pianure agricole circostanti. Tali caratteristiche rendono il bacino centrale il principale ambiente sedimentario della Cambogia e uno degli elementi chiave dell'evoluzione geomorfologica del Bacino Inferiore del Mekong. (General Department of Mineral Resources of Cambodia, 2024)

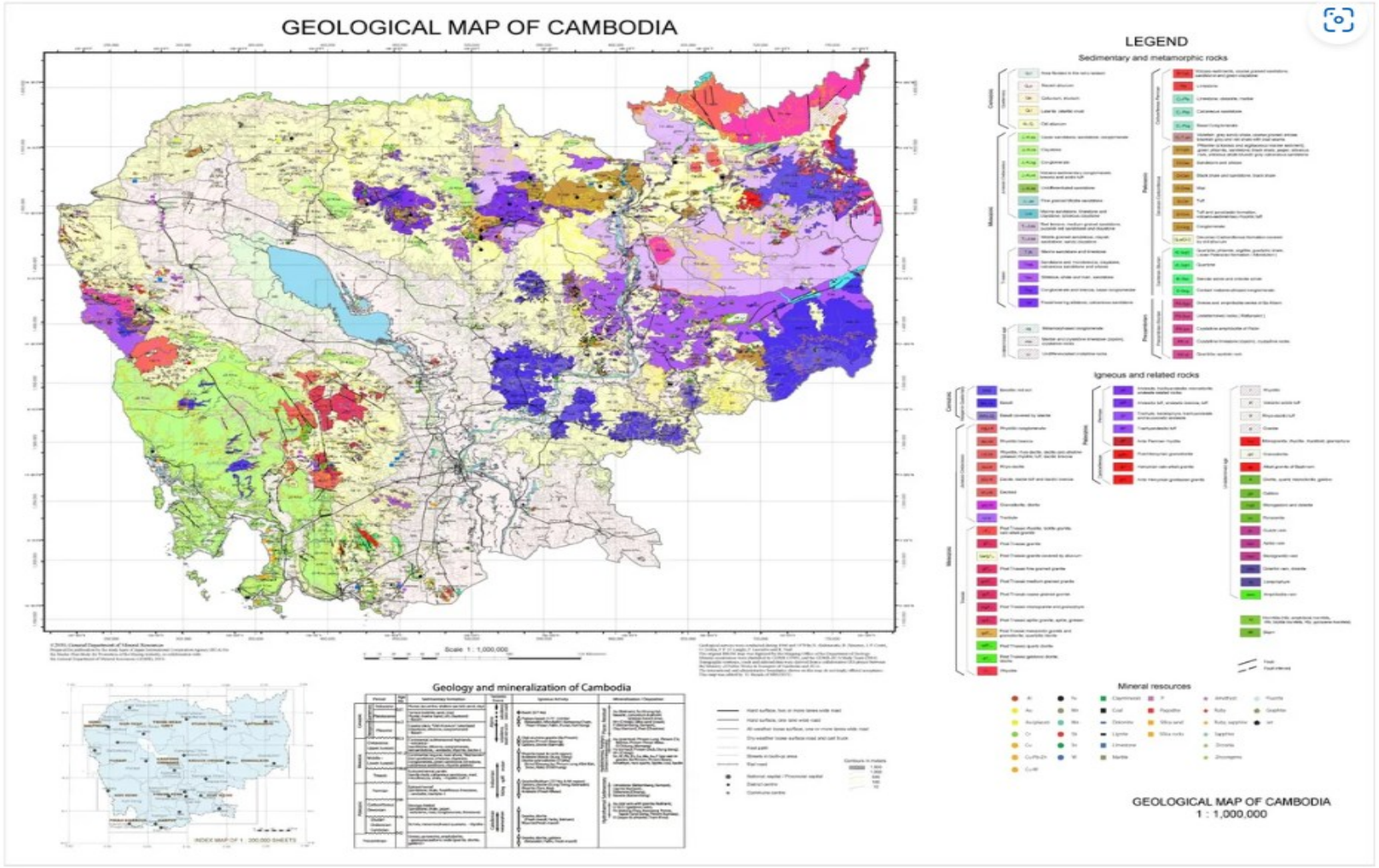


Figura 12- Carta geologia della Cambogia- Ministry of Mines and Energy (MME) [Cambogia] - https://mme.gov.kh/strategic-sectors/mining/potential-mineral-resources/geological-map

SEDIMENTOLOGIA E BILANCIO SEDIMENTARIO DEL SISTEMA MEKONG-TONLE' SAP

Il sistema Mekong–Tonlè Sap rappresenta uno dei più importanti bacini sedimentari del Sud-est asiatico e gran parte di questi sedimenti viene trattenuta nel lago e nella pianura alluvionale, contribuendo alla fertilità dei suoli, alla produttività della pesca e all' equilibrio dell'ecosistema.

Nel bacino del Mekong l'apporto principale proviene dall'erosione dell'Himalaya, dell'Altopiano Tibetano e delle montagne del Laos e della Cina.

I sedimenti vengono trasportati dal fiume come carico sospeso (Suspended Sediment Load, SSL) costituito da argille, limi e sabbie fini; o come carico di fondo (Bed Load) costituito da sabbie grossolane, ghiaie e ciottoli che scorrono sul fondo.

Nel Mekong il carico sospeso rappresenta la componente predominante. (Mekong River Commission 2024).

Secondo la Mekong River Commission, il trasporto sedimentario del bacino del Mekong e del Tonlè Sap ha subito profonde modificazioni ed è in progressiva diminuzione. Il lago Tonlè Sap costituisce il principale bacino di accumulo dei sedimenti della pianura cambogiana e svolge un ruolo fondamentale nella regolazione del bilancio sedimentario del Mekong inferiore e verso il delta del Mekong, con conseguenze sulla fertilità delle pianure alluvionali, sulla produttività della pesca e sulla stabilità del delta.

Uno studio condotto da (Sok et al., 2021) sulla variabilità del trasporto di sedimenti sospesi nel sistema idrografico costituito dal fiume Mekong, dal lago Tonlè Sap e dal fiume Tonlè Sap, nel periodo dal1993 al 2018, confermano queste tendenze.

Lo studio è stato condotto in tre siti di campionamento: Kratie sul fiume Mekong, Chroy Changvar a Phnom Penh e a Prek Kdam del fiume Tonlè Sap.

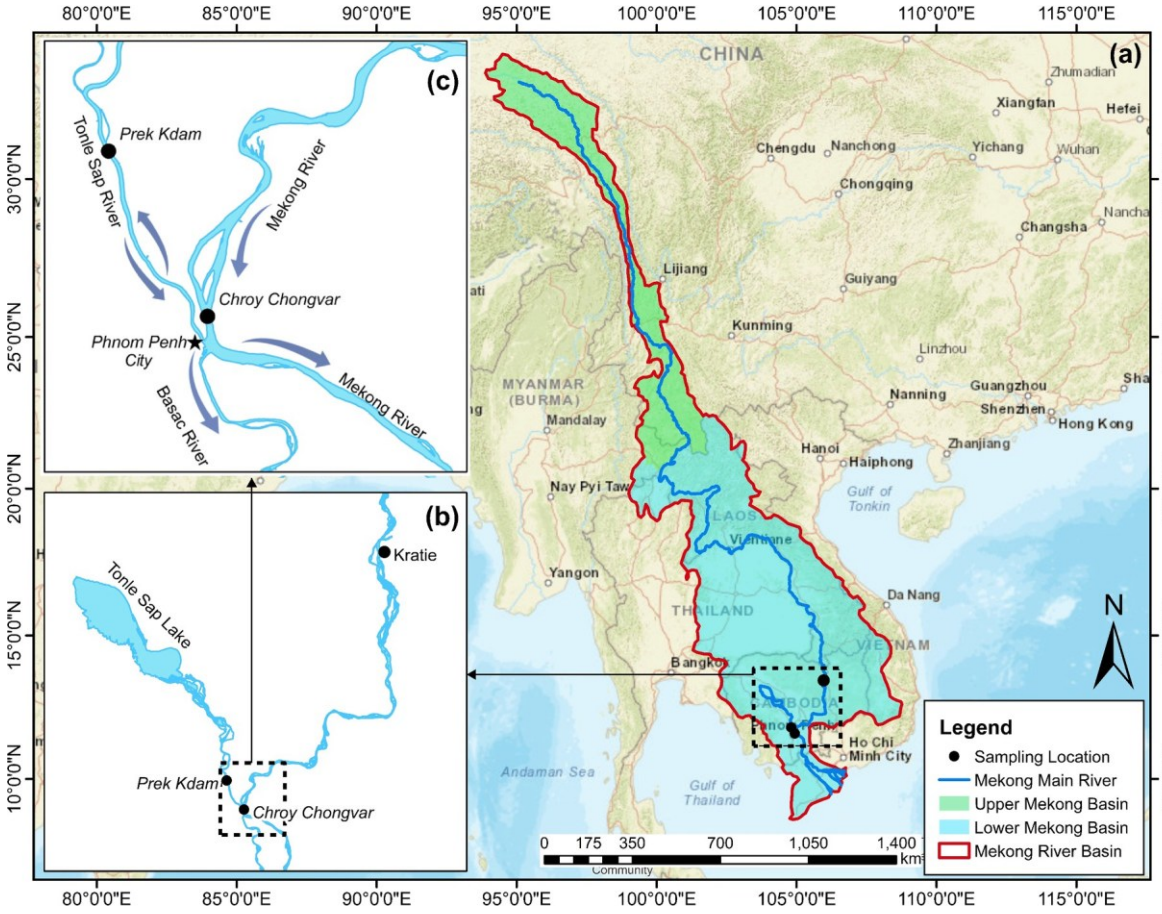


Figura 13 - Mappe dell'area di studio. (a): Il fiume Mekong Basin, (b): tre siti di campionamento situati a Kratie sul fiume Mekong, Chroy Changvar a Phnom Penh e a Prek Kdam del fiume Tonlè Sap. (c). la confluenza con Chatumuk situata vicino alla città di Phnom Penh. (Sok et al., 2021)

Tabella 1

Periodo di copertura dei dati e numero totale di campionamenti di solidi sospesi e scarichi d'acqua.

	Kratie	Chroy Changvar	Via Kdam		Passo temporale
			TSL verso il Mekong	Mekong verso TSL	
TSS (numero di campioni)	246	259	170	72	
Periodo di copertura dati TSS	1995–2018	1993–2017	1995–2018	1995–2018	Mensilio
Dati di scarico	1995–2018	1993–2017	1995–2018	1995–2018	Quotidiano

Tabella 2 - Periodo di copertura dei dati e numero totale di campionamenti di solidi sospesi e portate idriche. (Sok et al., 2021)

Le concentrazioni di TSS (solidi sospesi totali) per il deflusso dal lago al Mekong (da ottobre a marzo) erano in media di 41 mg/l, mentre le concentrazioni di TSS durante i flussi inversi dal fiume Mekong verso TSL (Tonlè Sap Lake) (da maggio a settembre) erano in media di 74 mg/l. Pertanto, le concentrazioni TSS dell'afflusso erano quasi il doppio rispetto a quelle dell'afflusso in uscita dal TSL, implicando un trasferimento netto di sedimenti nel lago.

I risultati evidenziano modificazioni anche nella distribuzione stagionale dei sedimenti sospesi che sono generalmente dominati da limo e argilla.

Durante la stagione delle piogge entra nel lago una quantità inferiore di sedimenti rispetto al passato; durante la stagione secca diminuisce l'apporto di sedimenti dal lago verso il Mekong.

Le stime di carichi a Kratie sono di 72± 38 Mt dal 1993 al 2017 e Chroy Changvar 78 ± 22 Mt dal 1995 fino al 2018.

La prima diga realizzata sul Mekong fu la diga di Manwan sull'Alto Mekong (Lancang) in Cina nel 1993 e ridusse i carichi di sedimenti di circa il 60%. Gli effetti previsti dal completamento di 8 grandi dighe principali sul Lancang hanno stimato una riduzione cumulativa della metà del carico annuo del fiume, pari a 140 milioni di tonnellate. Nel Basso Mekong è prevista la realizzazione di altre 11 dighe principali, di cui tre (Xayaburi, Pak Beng e DonSahong) sono costruite o in costruzione. Il futuro della diga proposta di Sambor nella provincia di Kratie in Cambogia è incerto, ma se costruita come originariamente proposta, probabilmente intrappolerebbe 38 Mt/an. (Sok et al., 2021)

Le dighe non sono solo sul corso principale del Mekong, ma anche lungo il corso dei suoi principali affluenti, circa 140, che nel complesso, intrappoleranno il 96% dei sedimenti naturalmente portati al delta del Mekong (Kondolf et al., 2014)

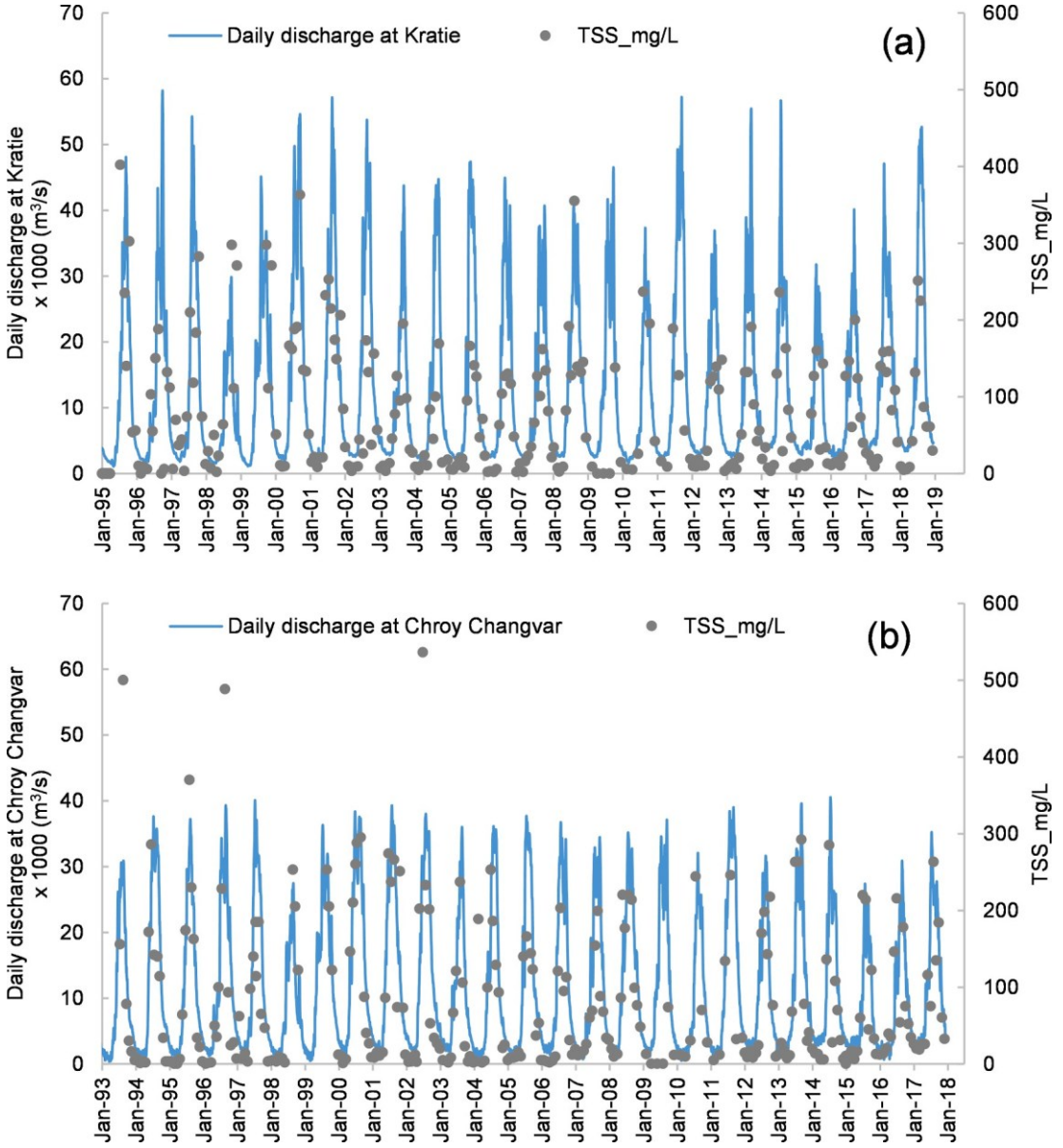


Figura 14 - Variazione della portata d'acqua al passo temporale giornaliero e concentrazione totale di solidi sospesi (intervallo mensile) a (a) Kratie (1995-2018) e (b) Chroy Changvar (1993-2017). Dati dalla Cambogia MOWRAM (Sok et al., 2021)

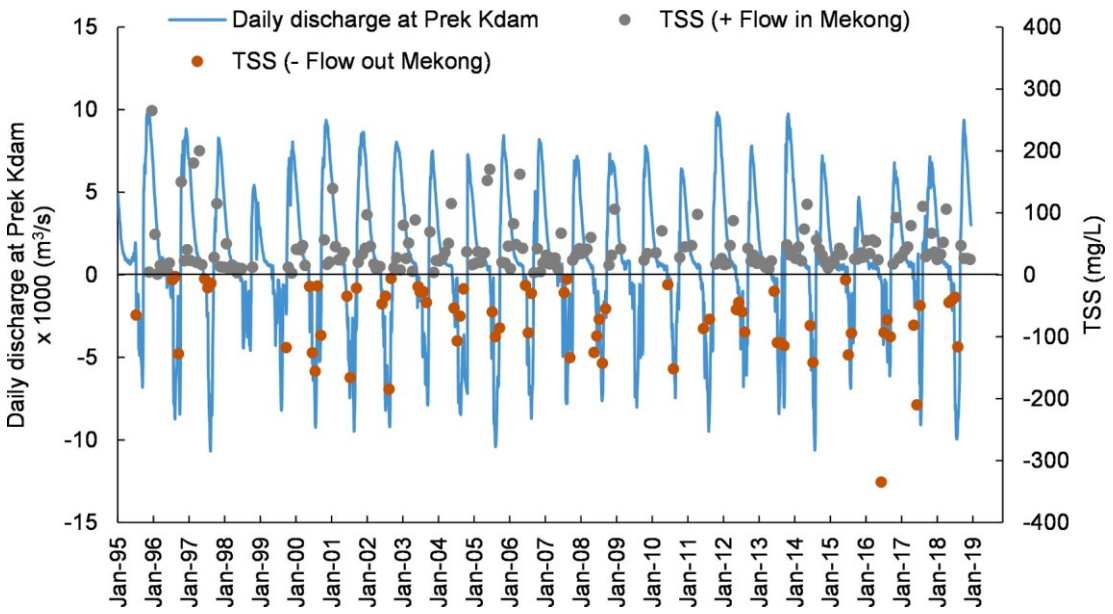


Figura 15 - Variazione della portata d'acqua al passo temporale giornaliero e dei solidi sospesi totali (TSS) al Prek Kdam (passo temporale mensile). I valori negativi di concentrazione e portata sono l'afflusso (inverso) nel TSL dal fiume Mekong, mentre i valori positivi sono l'afflusso dal lago verso il fiume Mekong. Dati dalla Cambogia MOWRAM. (Sok et al., 2021)

Storicamente il Tonlè Sap funzionava sia come deposito sia come sorgente di sedimenti, mentre negli ultimi decenni il lago si comporta prevalentemente come un serbatoio sedimentario. Gli autori stimano che il sistema trattenga mediamente circa 1,35 ± 0,7 milioni di tonnellate di sedimenti ogni anno. (Sok et al., 2021)

Storicamente il lago Tonlè Sap forniva un carico di sedimenti al sistema del Mekong e al delta annualmente di 0,65 ± 0,6 Mt dal 1995 al 2000, ma dal 2001 Tonlè Sap Lake è diventato un bacino di accumulo di sedimenti per circa 1,35 ± 0,7 Mt all'anno, riducendo così il trasporto annuale di sedimenti nel delta del Mekong.

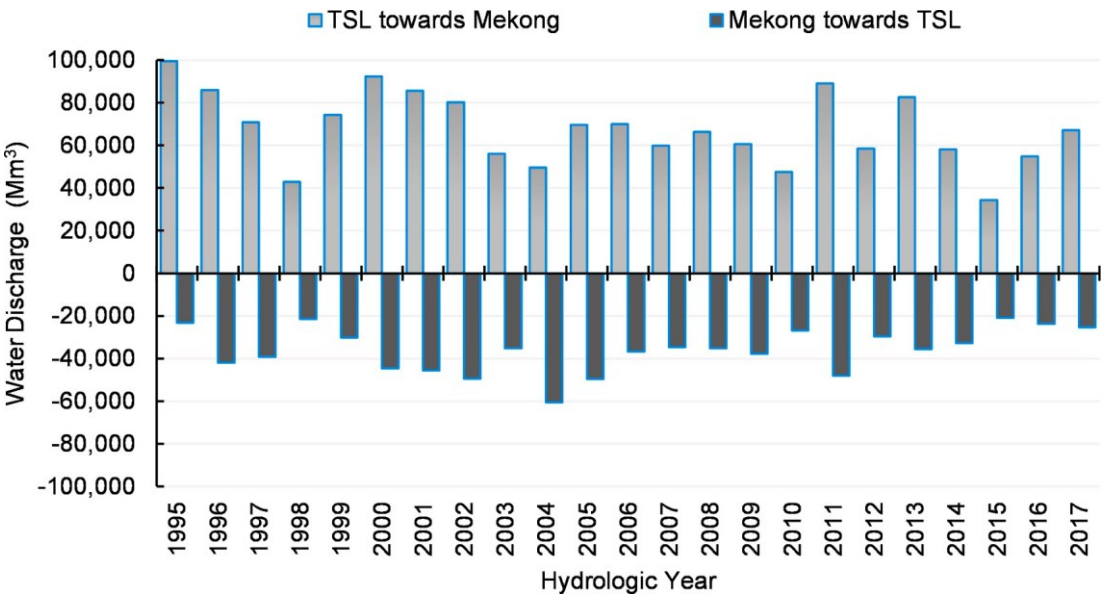


Figura 16 - Scambio stagionale di portata d'acqua tra TSL e Mekong presso la stazione Prek Kdam per l'anno idrologico 1995-2017. I valori negativi della portata sono l'afflusso (inverso) nel lago Tonle Sap dal fiume Mekong, mentre i valori positivi sono l'afflusso dal lago verso il fiume Mekong. (Sok et al., 2021)

Ciò significa che una parte crescente dei sedimenti rimane nel lago invece di essere restituita al Mekong. Questo comporta una diminuzione del carico sedimentario che il fiume distribuisce lungo il suo fluire verso il delta e nel delta, provocando l'arretramento dello stesso e l'avanzare del cuneo salino.

Le cause di questa diminuzione sono imputabili ai cambiamenti climatici, la deforestazione, ma principalmente alla costruzione di dighe e all'estrazione di sedimenti dal letto del fiume.

ELEMENTI DI PEDOLOGIA E CARATTERISTICHE DEI SUOLI CAMBOGIANI

Gran parte della Cambogia è costituita da formazioni sedimentarie silicee, che determina la prevalenza di suoli superficiali sabbiosi. Tale composizione invece non si riscontra nei suoli che costeggiano il lago Tonlè Sap, quelli delle pianure alluvionali lungo i principali fiumi (in particolare il Mekong) e i suoli sviluppati su substrato basaltico. I terreni sabbiosi ad alta permeabilità situati nelle pianure cambogiane sono comunemente utilizzati per la coltivazione del riso anche se tale attività è fortemente vincolata dalla quantità e dall'affidabilità delle precipitazioni durante la prima parte della stagione delle piogge (da aprile a luglio) e la stagione delle piogge principale (da luglio a ottobre), o dalla quantità di acqua immagazzinata dopo il raccolto del riso. Altri rischi significativi che influenzano la coltivazione delle colture nei terreni sabbiosi di pianura sono rappresentati dall'eccesso di acqua e dalle inondazioni e dall'acidità del suolo e la scarsa disponibilità di nutrienti. In Cambogia si trovano altre aree di terreni sabbiosi di alta quota, ma sono poco conosciute e attualmente non ampiamente utilizzate per l'agricoltura probabilmente a causa della bassa fertilità del suolo. Gran parte della Cambogia centrale è dominata dalla presenza di sedimenti alluvionali/lacustri recenti, derivati in parte dal bacino del fiume Mekong e in parte dal bacino del Tonlè Sap, i quali presentano proprietà molto diverse dai suoli sabbiosi. I suoli cambogiani sono stati classificati in base ai loro effetti sulla produzione di riso in pianura, basati sulla loro fertilità, definiti utilizzando la Classificazione Agronomica dei Suoli Cambogiana (CASC), piuttosto che sulla loro genesi che ne ha poi determinato le proprietà. Nei suoli sabbiosi di montagna le principali colture sono rappresentate dal mais, gomma, soia, fagioli mung, manioca, sesamo, arachidi e canna da zucchero. (Seng et al., 2007)

Le principali categorie dei suoli cambogiani

- **Suoli Sabbiosi (Acrisol e Arenosol):**

  Sono molto permeabili, acidi e poveri di materia organica, sono spesso utilizzati per la coltivazione del riso, ma soffrono frequentemente di siccità e dilavamento dei nutrienti. Rappresentano la maggioranza dei tipi di suoli presenti in tutto il territorio nazionale.

- **Suoli Alluvionali:**

  Sono presenti nelle vaste pianure interne e lungo le sponde del fiume Mekong e del lago Tonlè Sap, sono suoli pedologicamente giovani e si arricchiscono di nuovi depositi con le nuove alluvioni. Sono un ottimo substrato per la coltivazione del riso perché sono ricchi di nutrienti.

- **Terre Rosse (Latosol e Ferralsol):**

  Questa tipologia di suoli si trovano principalmente negli altopiani orientali (es. provincia di Kampong Cham) e si sviluppano principalmente attraverso la decomposizione del materiale roccioso sottostante, sono ricchi di ferro e alluminio che conferiscono il tipico colore rosso. Sono tra i terreni più fertili del paese e sono sfruttati soprattutto per piantagioni commerciali come l'albero della gomma.

  Il suolo delle pianure colluviali-alluvionali associati alla coltivazione del riso (P.White e al.2000), che rappresenta una delle principali fonti di reddito per gli agricoltori, in particolare si può dividere in sei gruppi:

  - Prey Khmer profilo sabbioso profondo,
  - Prateah Lang sabbia su argilla
  - Orung (terra o argilla su sabbia)
  - Bakan con presenti sfumature di colore
  - Koktrap presenta un suolo superficiale molto scuro
  - Toul Samroung caratterizzato dalla presenza di ampie crepe in superficie



Figura 17 - Distribuzione dei tipi di suolo in Cambogia (Crocker, 1962)

URL: https://data.opendevelopmentcambodia.net/km/dataset/fd43dcd8-643a-4165-9e34-b38a14a7357f/resource/81ec968e-253d-49b4-9f1d-9888c285770a/download/soil-type.jpg*Rappresentazione dei dati [JPEG]*

ANALISI D’USO DEL SUOLO

Secondo uno studio fatto dalla a Mekong River Commission (MRC, 2023) il paesaggio della Cambogia è per lo più caratterizzato da aree di foreste e zone agricole. Le foreste coprono soprattutto nelle regioni orientali e settentrionali, mentre le aree agricole sono distribuite nelle pianure centrali con maggior concentrazione nel bacino del lago Tonlè Sap e lungo il corso del fiume Mekong. Nelle aree agricole prevale la coltivazione del riso seguita dall’agricoltura intensiva (ad esempio di gomma e manioca). Altre aree prevalenti sono rappresentate dalle foreste allagate e dalle zone umide, corpi idrici e aree urbane.

Negli ultimi decenni la Cambogia ha registrato profonde trasformazioni dell'uso del suolo, determinate dall'interazione tra sviluppo economico, espansione agricola, crescita demografica e variazioni del regime idrologico.

L’aggiornamento della carta dell’uso del suolo ad opera del Mekong River Commission ha evidenziato la conversione delle foreste in superfici agricole, la trasformazione delle aree agricole in piantagioni industriali e la crescita delle aree urbanizzate. Di particolare rilievo sono anche le trasformazioni delle zone umide e delle foreste allagate nell'area del Tonlè Sap, con conseguenti ripercussioni sugli ecosistemi umidi, dovute alle variazioni stagionali del regime idrologico e alle pressioni antropiche. Il bacino del Tonlè Sap è caratterizzato dalla presenza di risaie, foreste allagate, zone umide e aree agricole che subiscono profonde trasformazioni stagionali in funzione del regime idrologico del lago dovuto per lo più alla sua interazione con il fiume Mekong. n questa zona si registrano elevate probabilità di cambiamento nelle foreste allagate e le zone umide, proprio a causa della variazione del ciclo stagionale delle inondazioni da parte delle acque del Mekong, dei cambiamenti climatici e delle alterazioni antropiche. Tali trasformazioni interessano anche le aree nelle immediate vicinanze del fiume Mekong anch’esse dovute all‘interazione dell’impatto antropico, il cambiamento del regime idrologico e ai cambiamenti climatici. (MRC, 2023)

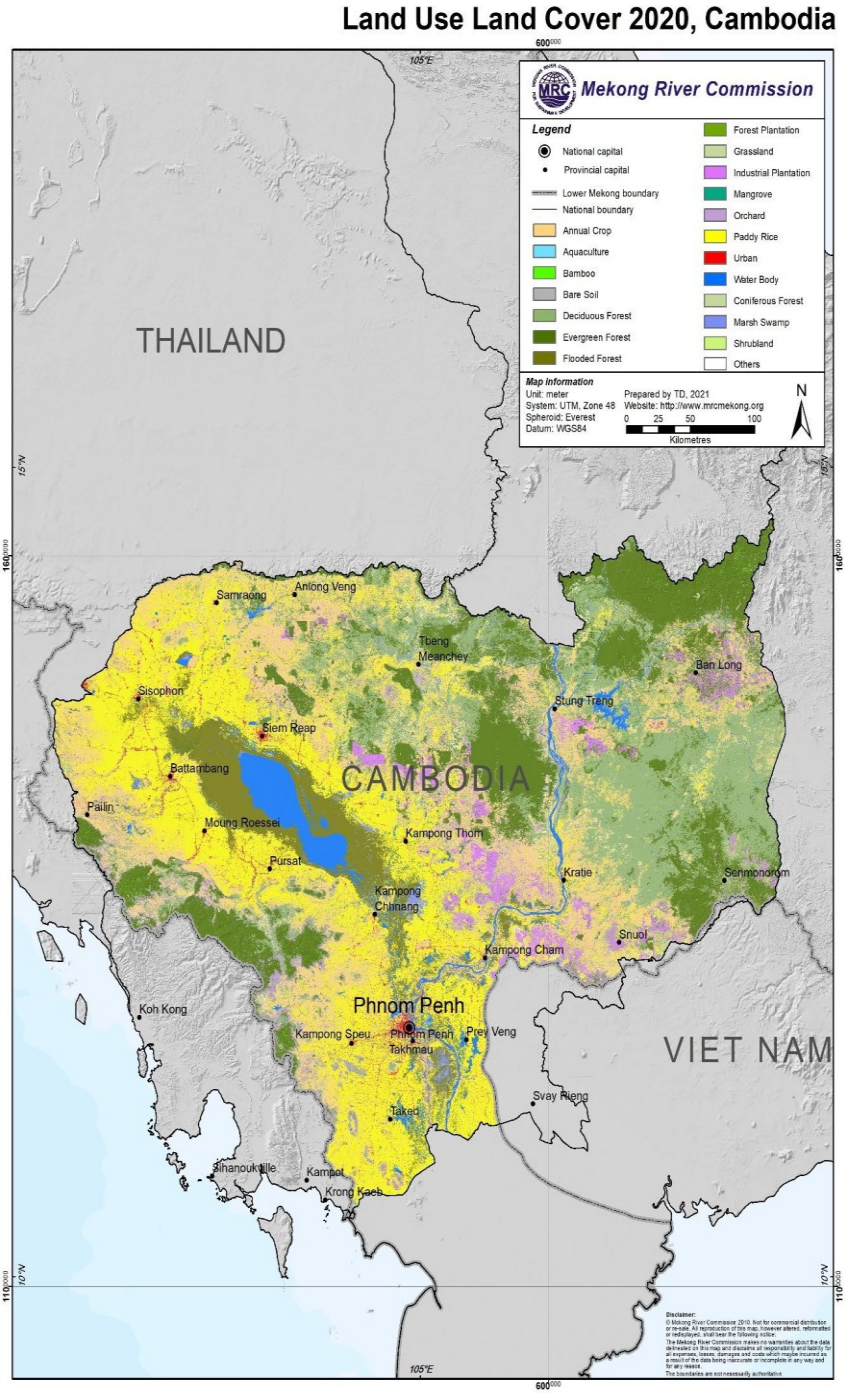


Figura 18 - Land Cover Map 2010 - Enhancing the MRC's Land Use and Land Cover 2020 Mapping Products

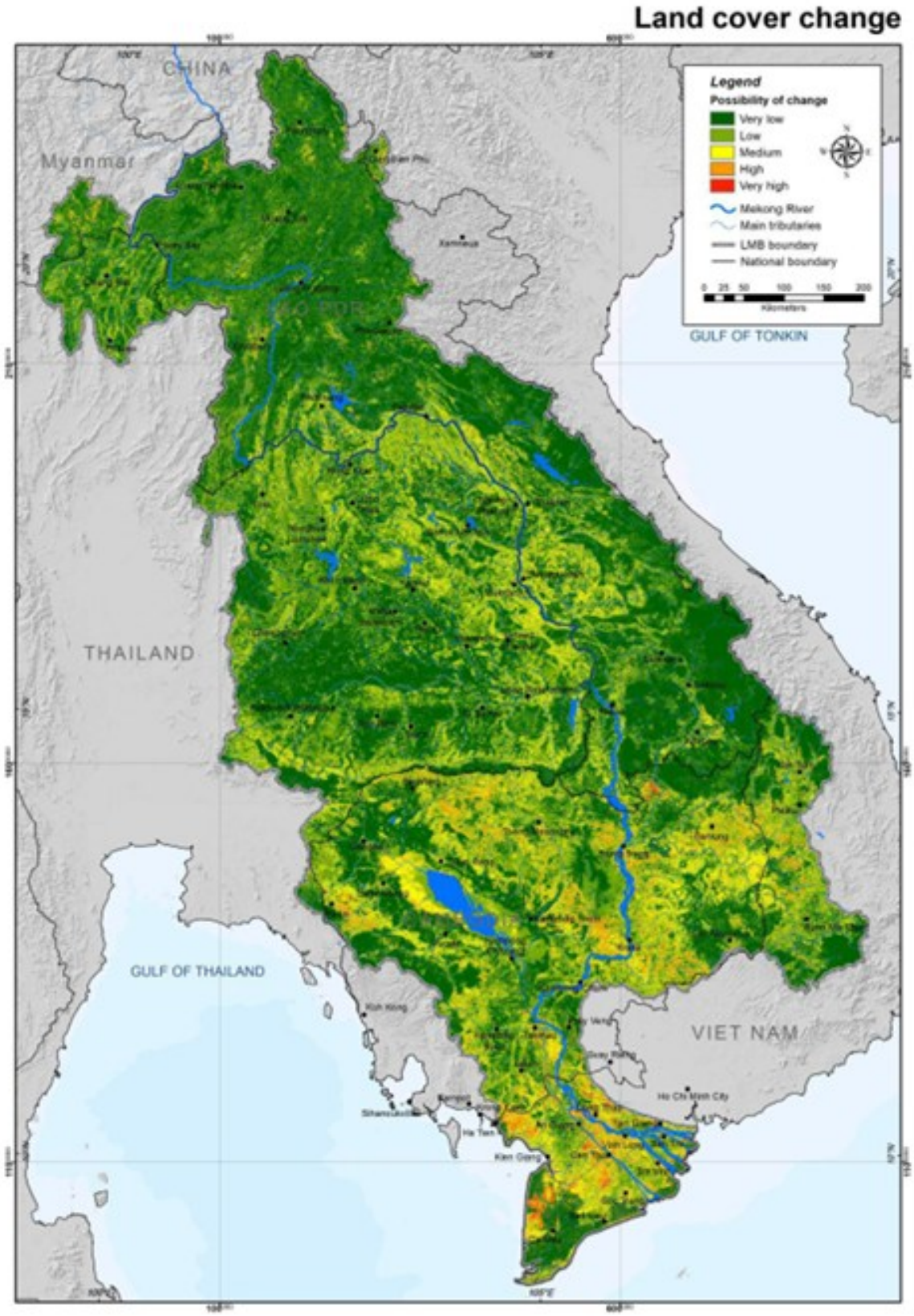


Figura 19 - Map of land cover change - Enhancing the MRC's Land Use and Land Cover 2023

ASSETTO IDROGRAFICO DEL SISTEMA FIUME MEKONG - TONLE' SAP

ASSETTO IDROGRAFICO DEL FIUME MEKONG

Il fiume Mekong è il dodicesimo fiume più lungo del mondo, è lungo circa 4.880 km e il suo bacino idrografico (MRB) si estende per circa 795.000 km^2in sei Paesi: Cina, Myanmar, Laos, Thailandia, Cambogia e Vietnam.

Il suo bacino è suddiviso in Upper Mekong Basin (UMB), che si estende principalmente in Cina e Myanmar, e Lower Mekong Basin (LMB), tra Laos, Thailandia, Cambogia e Vietnam, il quale rappresenta circa il 77% della superficie totale del bacino. (Mekong River Commission, 2023)

La portata media annua del Mekong è di circa 475 km^3 di acqua all'anno, che corrispondono a circa 15.000 m^3/s, valore che colloca il Mekong tra i dieci maggiori fiumi del mondo per volume d'acqua trasportato**.** (Mekong River Commission, 2024)

La maggior parte delle acque è dovuta all'apporto dagli affluenti del Lower Mekong Basin, mentre il tratto cinese contribuisce in media a circa il 16% della portata annua anche se durante la stagione secca il contributo degli affluenti dell'alto Mekong localizzati nell'altopiano tibetano assume maggiore importanza grazie allo scioglimento nivale e glaciale arrivando a contribuire per circa il 20-25% dell'afflusso totale. Al contrario, durante la stagione monsonica, il sistema è dominato dagli afflussi laterali del Lower Mekong Basin, in particolare dai grandi sottobacini del Laos e della Cambogia (Se Kong, Se San e Srepok), che da soli possono contribuire a oltre il 40% della portata totale del mainstream in alcuni tratti del fiume (Mekong River Commission, 2023)

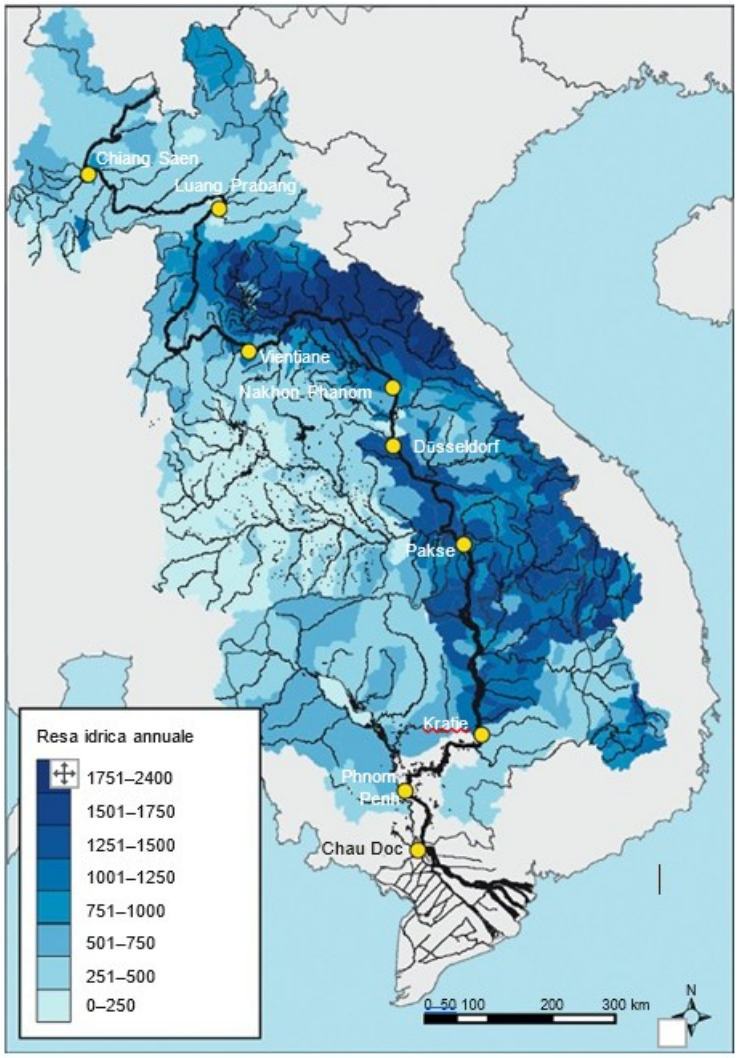


Figura 20- Resa idrica annuale del Basso Bacino del Mekong (da MRC, 2008).

L'alternarsi di questa stagionalità nell'estensione del bacino determina il fenomeno del "flood pulse" il quale regola l'intero ecosistema. Le inondazioni stagionali, infatti, determinano il trasporto e il deposito dei sedimenti che arricchiscono di nutrienti i suoli agricoli, ricaricano le falde acquifere e creano habitat essenziali per la riproduzione e la migrazione di numerose specie ittiche. Tale contributo non riguarda solamente le pianure alluvionali del Mekong ma anche l'intero bacino del sistema Lago -fiume del Tonlè Sap. Negli ultimi decenni il meccanismo del "flood pulse" è stato progressivamente alterato dalla costruzione di dighe idroelettriche lungo il corso Mekong e dai cambiamenti climatici. La realizzazione delle dighe

riduce l'intensità delle piene, ne ritarda l'inizio e modifica la durata delle inondazioni, con ripercussioni negative sul trasporto dei sedimenti, sulla biodiversità e sul funzionamento del sistema Mekong–Tonlè Sap (MRC, 2023)

Nel periodo dal 1940 al 2022, infatti, sono state realizzate 126 grandi dighe nel MRB, per un totale di oltre 600 dighe in tutto il suo bacino; che hanno causato un cambiamento fondamentale nel volume stagionale e nel tempismo del flusso fluviale e condizioni idrologiche estreme. La regolazione della portata del fiume insieme ai cambiamenti climatici hanno aggravato le condizioni di siccità delle zone a valle delle dighe ritardando sostanzialmente l'inizio della stagione delle esondazioni del Mekong, specialmente negli ultimi anni, in particolar modo nel 2019 e 2020. (Dang & Pokhrel, 2024)

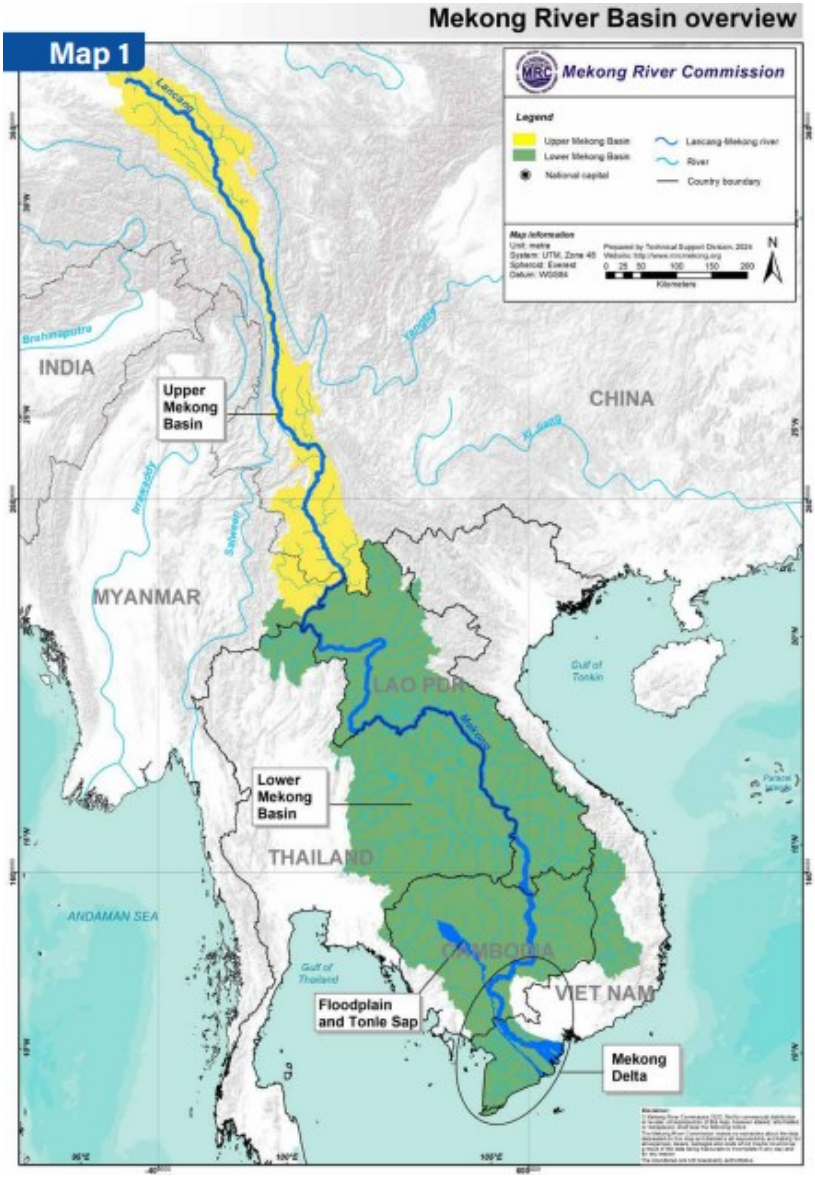


Figura 21- Rete idrografica del bacino del fiume Mekong.
Fonte: Mekong River Commission (2024), The Mekong Atlas 2023.

INTERAZIONE DELL'ASSETTO IDROGRAFICO DEL FIUME MEKONG CON IL SISTEMA LAGO-FIUME TONLÈ SAP

Il sistema idrologico del Mekong e del sistema lago- fiume Tonlè Sap in Cambogia sono strettamente connessi.

La peculiarità del lago Tonlè Sap è rappresenta dal fenomeno dell'inversione stagionale del flusso del fiume Tonlè Sap che lo contraddistingue dagli altri laghi del mondo per le sue caratteristiche idrologiche, ecologiche e socioeconomiche.

La superficie del lago ha una delle più elevate variazioni stagionali del bacino tra i laghi del mondo determinata dal fenomeno del "flood pulse". Durante la stagione secca (gennaio–aprile), il lago occupa mediamente una superficie di circa 2.500 km^2, con una profondità di circa 1–2 m. Durante la stagione delle piogge (giugno–ottobre), l'inversione del flusso del fiume Tonlè Sap, causata dall'aumento delle portate del Mekong, determina una rapida espansione della superficie lacustre fino a circa 15.000 km^2, mentre la profondità raggiunge 8–10 m. L'estensione del lago aumenta quindi di circa sei volte rispetto alla stagione secca, trasformando il Tonlè Sap in uno dei più estesi sistemi di pianura alluvionale del Sud-est asiatico. Con l'inizio della stagione secca, il gradiente idraulico si inverte nuovamente e il lago restituisce lentamente l'acqua immagazzinata al Mekong, contribuendo al mantenimento delle portate fluviali durante il periodo di magra. (Mekong River Commission, 2024)

Qui si trovano habitat rappresentati da foreste allagate, paludi, praterie umide e pianure alluvionali che ospitano una biodiversità tra le più elevate dell'Asia sud-orientale. L'insieme di questi ecosistemi rende Il Tonlè Sap uno dei principali hotspot di biodiversità d'acqua dolce del pianeta, ospitando oltre 1.100 specie di pesci, numerose specie di rettili, anfibi, mammiferi e circa 225 specie di uccelli, molte delle quali minacciate a livello globale.

L'eccezionale valore ecologico del lago è stato riconosciuto dall'UNESCO, che nel 1997 ha designato il Tonlè Sap come Riserva della Biosfera, riconoscendone l'importanza per la conservazione della biodiversità, la regolazione idrologica del bacino del Mekong e il mantenimento dei servizi ecosistemici essenziali per le

comunità locali. (UNESCO, 2024)

Tra gli effetti dovuti alla piena del fiume Mekong nel Tonlè Sap, il flood pulse, di particolare importanza è la ricarica delle falde superficiali e il ruolo svolto nella deposizione dei sedimenti fertili indispensabili per la resa agricola e quindi per il sostentamento della popolazione.

EFFETTI DELLE DIGHE IDROELETTRICHE

Negli ultimi decenni la costruzione delle oltre 600 dighe nel corso nel Mekong, localizzate soprattutto nel bacino superiore e nei principali affluenti ha modificato in modo significativo il regime idrologico naturale del fiume.

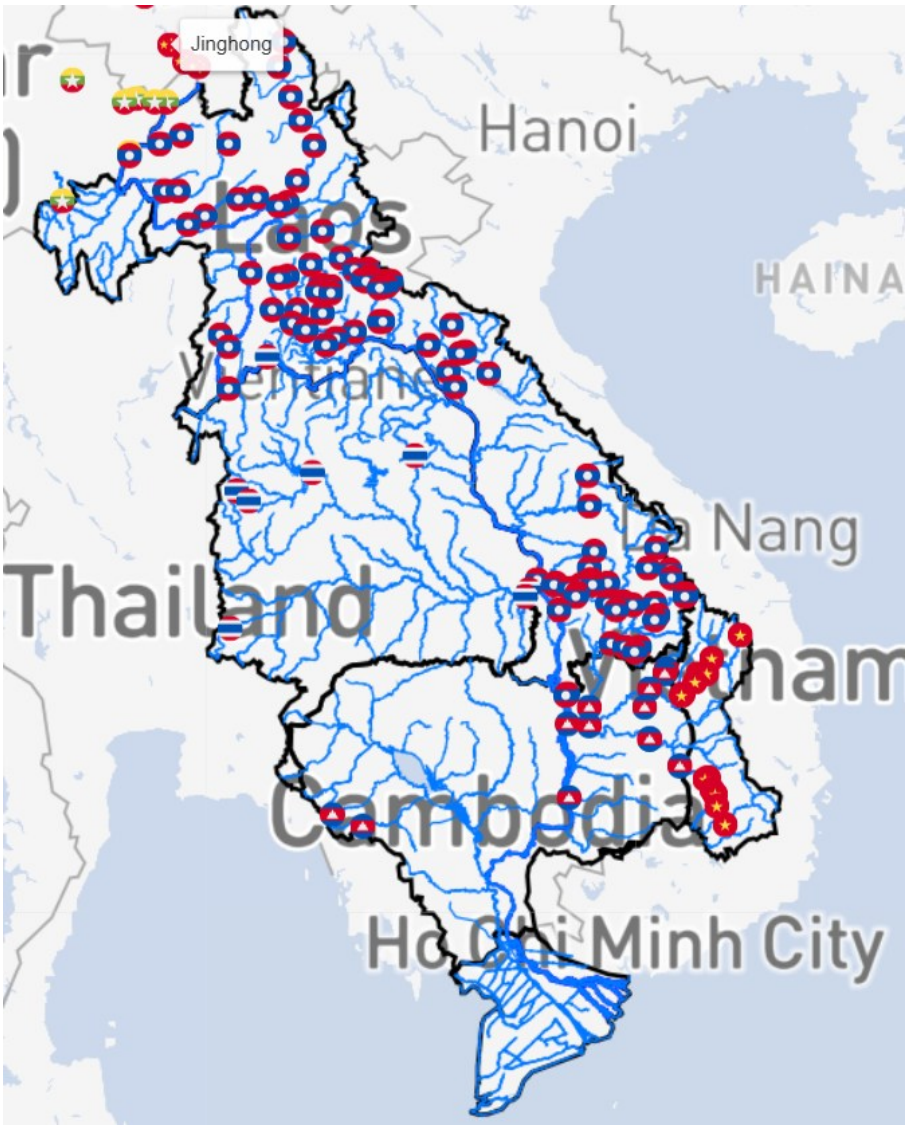


Figura 22 - Distribuzione delle dighe idroelettriche nel bacino del Mekong.
Fonte: Mekong River Commission (2021), Hydropower Database

La loro realizzazione ha alterato la distribuzione stagionale delle portate, riducendo i picchi di piena durante la stagione umida e aumentando le portate nella stagione secca grazie ai rilasci regolati dai serbatoi.

L'alterazione della portata del Mekong si ripercuote anche sul sistema lago-fiume Tonlè Sap. La riduzione delle piene e il ritardo nell'arrivo dell'onda di piena determinano un'inversione del flusso del fiume Tonlè Sap meno intensa e più breve, che a sua volta determina una diminuzione del volume d'acqua che entra nel lago durante la stagione delle piogge, compromettendo quindi il naturale ciclo del *flood pulse*. (Mekong River Commission, 2024)

Il lago Tonlè Sap è alimentato principalmente dal fiume Tonlè Sap (TSR), grazie al suo collegamento diretto con il corso principale del Mekong. In termini di bilancio idrico annuale, ~54% del lago in superficie proviene dal fiume Mekong attraverso il TSR, mentre il restante 34% è dovuto agli altri affluenti del bacino idrografico del lago e il 12% è dovuto alle precipitazioni dirette. Ogni anno, oltre l'80% delle precipitazioni nel MRB(Mekong river basin) si verifica durante la stagione monsonica estiva causando un notevole aumento della portata principale del Mekong. Durante questo periodo umido, che tipicamente inizia tra metà maggio e fine giugno, l'acqua fluisce nel TSL dal Mekong attraverso il TSR. (Kummu e Sarkkula, 2008)

Dal momento che oltre la metà del volume idrico del TSL proviene dal fiume Mekong, ogni variazione delle caratteristiche idrologiche del Mekong causate dalle dighe a monte creano impatti diretti sul bilancio idrico del lago e sulla dinamica delle esondazioni, modificano la distribuzione stagionale delle portate, riducendo l'intensità delle piene naturali e alterano il trasporto dei sedimenti verso la Cambogia e il delta vietnamita. (Dang et al., 2022)

Queste modificazioni incidono direttamente sull'estensione delle aree allagate, sulla produttività della pesca e sulla biodiversità del sistema Mekong–Tonlè Sap (Mekong River Commission, 2023).

Le alterazioni idrologiche combinate con eventi estremi legati al cambiamento climatico stanno alterando il ritmo naturale dell'impulso del Mekong flood, di

conseguenza, l’inversione di flusso TSR. (Kummu e Sarkkula, 2008) A causa di questo cambiamento si sono verificate ripercussioni negative sull’agricoltura e sulla resa della pesca che potrebbero peggiorare con l’aggravarsi della situazione.

Secondo uno studio fatto da Dang et al. (2022), confrontando i livelli dell'acqua dei laghi con delle simulazioni per il periodo dal 1979 al 2016 è emerso che la riduzione dei livelli d'acqua indotta dalle dighe durante la stagione umida prima del 2010 è relativamente piccola (cioè, ~8 cm o <1%). Nel 2010, invece, i valori sono quasi triplicati fino a 23 cm (ovvero il 2,8%); pari ad una riduzione percentuale del ~3%. I cambiamenti causati dalle dighe sono più evidenti durante la stagione secca, specialmente negli anni 2000 e 2010, durante i quali i livelli dell'acqua sono aumentati rispettivamente di 23 cm (13,6%) e 28 cm (22,1%). Gli impatti sul sistema idrografico lago fiume, mostrano una generale diminuzione sia del flusso in entrata che di quello in uscita dal lago, mostrando che la tendenza si fa più marcata con il passare degli anni. La maggior riduzione del flusso d’acqua si è verificata nel 2015 (Dang et al. 2022)

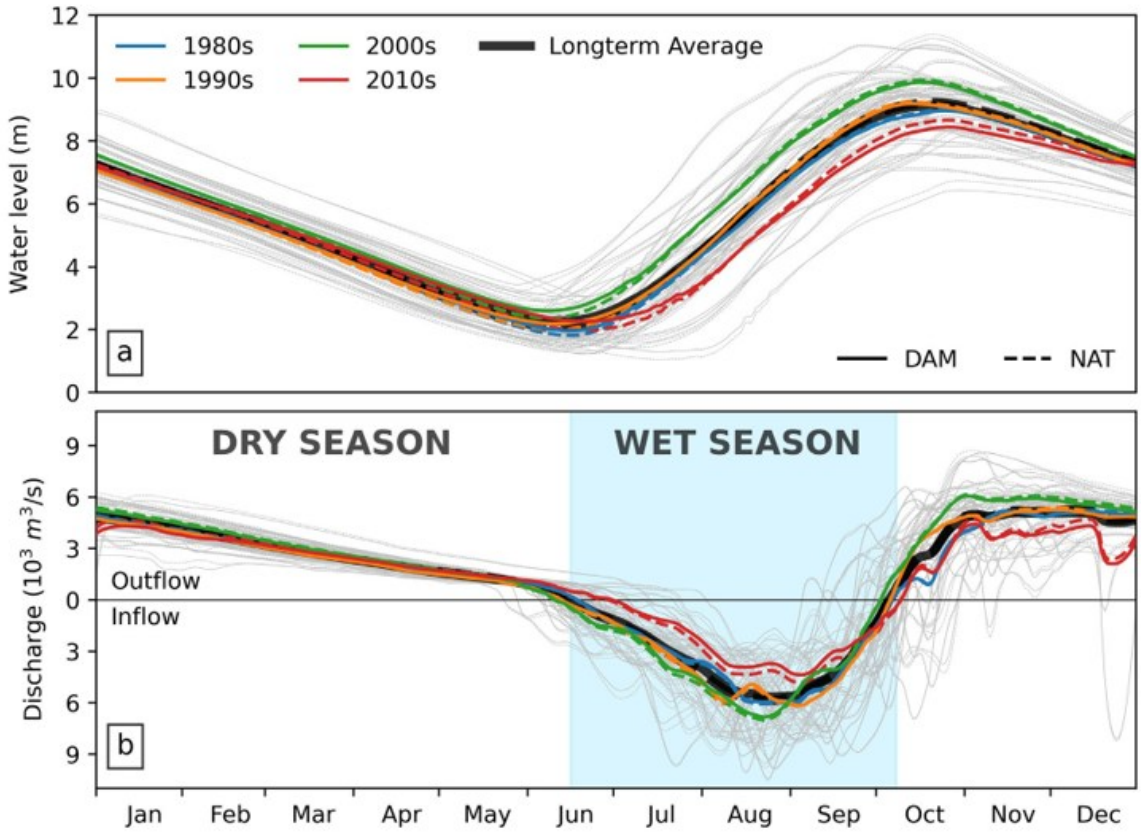


Figura 23 - Valori decennali (linee codificate a colori) e media a lungo termine (linee nere spesse; 1979–2016) dei livelli d'acqua alla stazione KL nel TSL (a) e della portata fluviale alla stazione PK nel TSR (b). Linee continue e tratteggiate rappresentano rispettivamente i risultati della simulazione DAM e NAT. (Dang et al. 2022)

Le simulazioni idrologiche più recenti confermano tali evidenze. Attraverso un modello idrologico-idrodinamico integrato, è stato dimostrato che l'operatività delle dighe ha progressivamente aumentato la propria influenza sul bilancio idrico del Tonlè Sap, soprattutto dopo il 2010. In particolare, la regolazione dei serbatoi ha determinato una riduzione del volume annuo di acqua in ingresso nel lago compresa tra il 10% e il 25%, una diminuzione dei picchi di piena di circa il 7% e un accorciamento della durata delle inondazioni stagionali fino a 15 giorni nelle aree periferiche del lago (Dang et al., 2022)

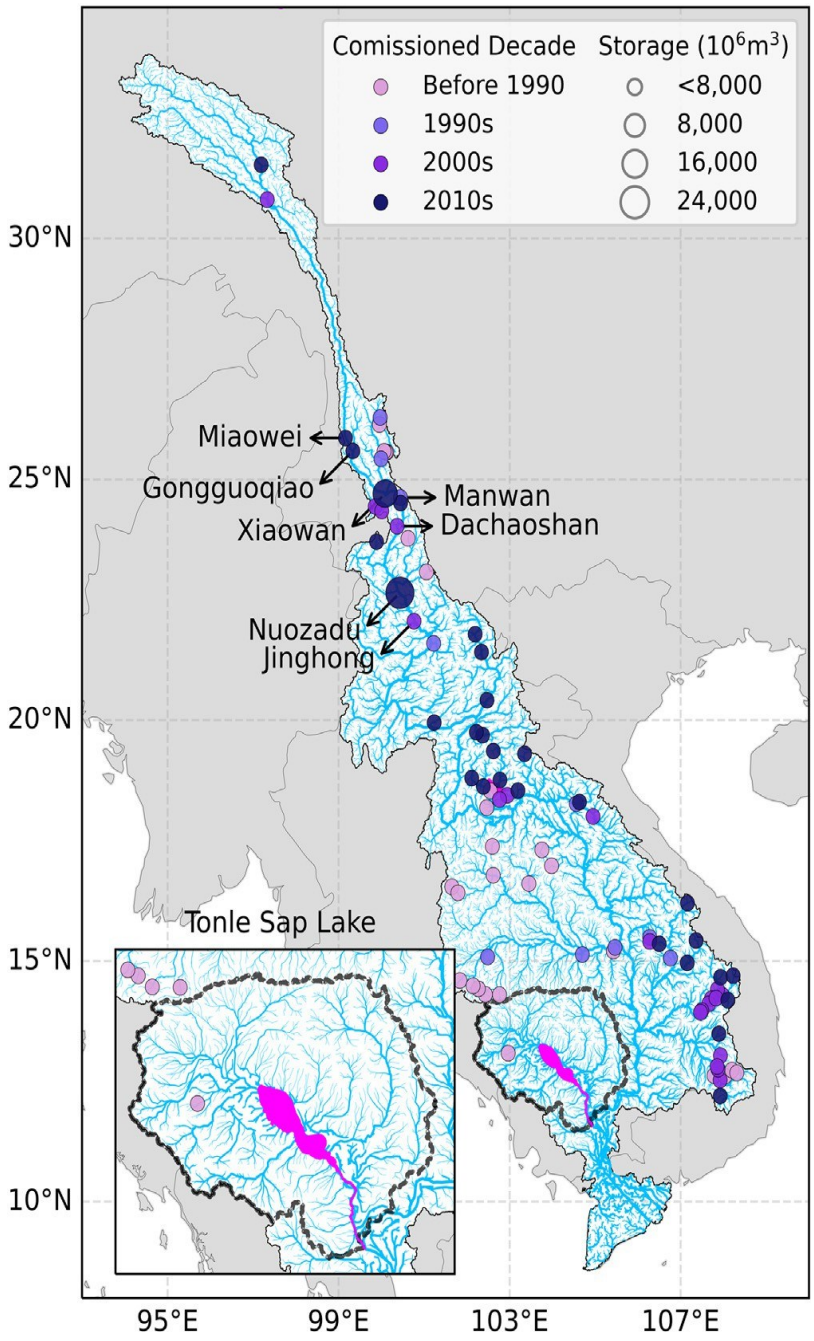


Figura 24 -Una mappa spaziale del MRB che mostra la posizione delle 86 dighe selezionate (cerchi codificati a colori) incluse nel modello. La codifica a colori e la dimensione dei cerchi indicano rispettivamente il decennio di messa in servizio e la capacità massima di stoccaggio. Le dighe situate nel corso principale del Mekong (a partire dal 2016) portano il nome. Lo sfondo mostra la rete fluviale (linee blu) con spessore scalato basato sulla portata media a lungo termine simulata dal 1979 al 2016 con una risoluzione spaziale di 3 arcmin (~5 km). L'incrocio in basso a sinistra mostra la pianura della Cambogia fl, con TSL e TSR indicati in magenta e il confine del bacino idrografico del lago indicato dalla linea nera tratteggiata. (H.Dang et al., 2022)

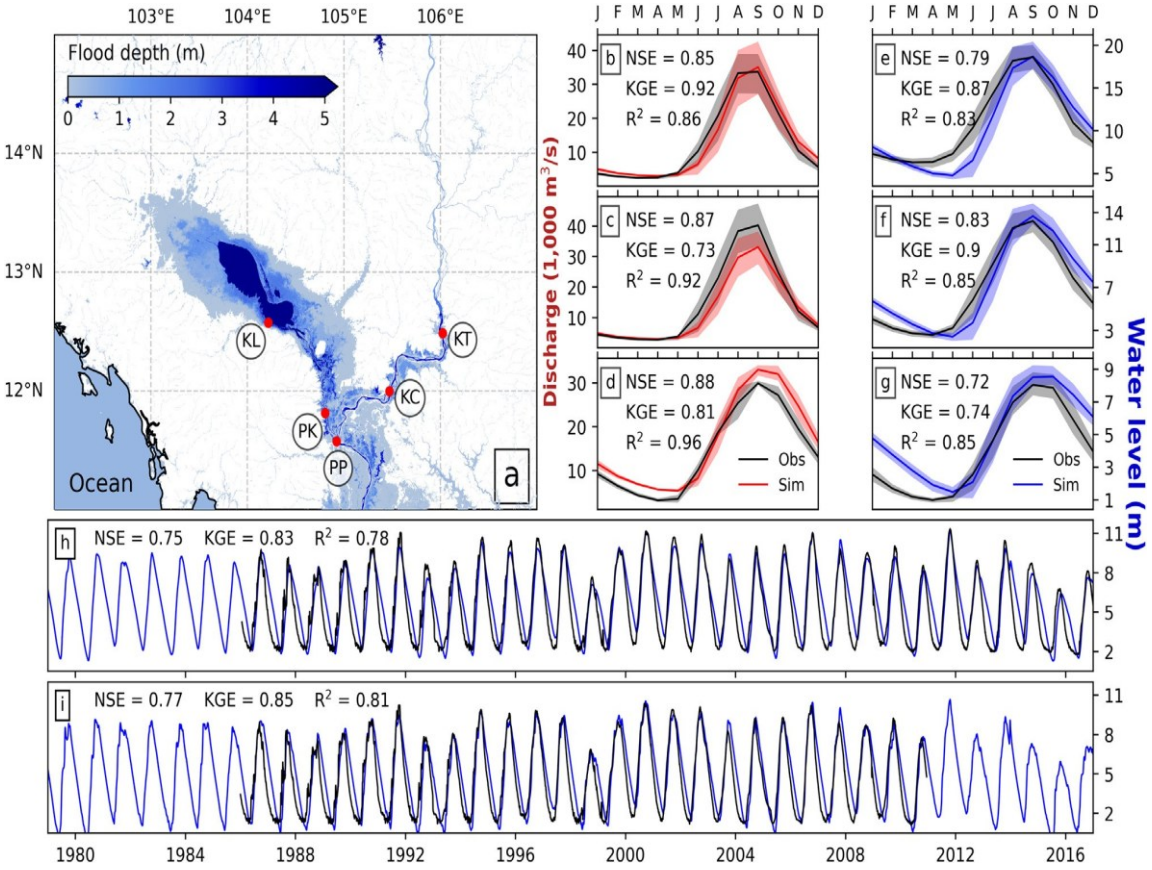


Figura 25 - Media a lungo termine (1979–2016) della profondità simulata di flood sull'area TSL (a). Confronto del ciclo stagionale della portata del fiume simulata (b-d) e dei livelli idrici (e-g) con le osservazioni alle stazioni di Kratie (KT; b ed e), Kompong Cham (KC; c e f) e Phnom Penh Port (PP; d e g). Le ombreggiature (rosso, blu e grigio per la portata simulata del fiume, livello dell'acqua simulato e osservazioni, rispettivamente) indicano la variabilità interannuale presentata come i quantili superiore e inferiore del 25% per ogni mese. Viene inoltre fornita una validazione completa del livello dell'acqua giornaliero alle stazioni di Kompong Luong (KL; h) e Prek Kdam (PK; i). (H.Dang et al., 2022)

Station	Period	Difference in discharge (%)		
		Max	Avg	Min
Kratie	1980–1989	−1.8%	–	+15.6%
	1990–1999	−1.4%	–	+14.1%
	2000–2009	−2.1%	−0.2%	+19.5%
	2010–2016	−7.3%	−1.5%	+31.6%
	Long term average	−2.8%	−0.3%	+15.7%
Kompong Cham	1980–1989	−1.5%	+0.2%	+15.2%
	1990–1999	−1.5%	−0.1%	+13.6%
	2000–2009	−1.9%	+0.3%	+19.2%
	2010–2016	−7.1%	−0.8%	+30.6%
	Long term average	−2.2%	+0.1%	+15.7%
Phnom Penh Port	1980–1989	−1.0%	+0.2%	+8.1%
	1990–1999	−1.2%	+0.2%	+13.2%
	2000–2009	−1.4%	+0.4%	+16.5%
	2010–2016	−4.5%	−0.6%	+14.0%
	Long term average	−1.8%	+0.1%	+12.9%

Tabella 3 - Differenza tra i flow massimo, medio e minimo in tre stazioni principali del Mekong tra simulazioni DAM e NAT. I risultati mostrati sono le medie per ogni decennio e per l'intero periodo dal 1979 al 2016. I valori più alti di riduzione del flow massimo e aumento del flow minimo sono evidenziati rispettivamente in rosa e verde. (H.Dang et al., 2022)

La Tabella 3 rappresenta un riassunto dei cambiamenti indotti dalle dighe nella grandezza della portata fluviale nelle stazioni sul Mekong analizzate per ogni decennio a partire dagli anni '80. Gli studi fatti da H.Dang et al. (2022) mostrano che gli impatti sono molto pronunciati negli anni 2010 rispetto ai decenni precedenti. I livelli dell'acqua TSL durante la stagione delle piogge negli anni 2000 erano superiori alla media degli ultimi 38 anni, così come quelli degli anni '80 e '90, di ~0,74 m al livello massimo (cioè a metà ottobre; Fig. 14a). Al contrario, i livelli medi dell'acqua TSL negli anni 2010 erano sostanzialmente inferiori alla media a lungo termine (cioè di ~0,66 m), il che significa che i livelli dell'acqua negli anni 2010 sono diminuiti di ~1,4 m rispetto agli anni 2000. (H.Dang et al.2022)

La figura 25 b evidenzia che c'è una chiara tendenza all'aumento degli impatti nel tempo, con una grande riduzione del volume del flusso dal 2010 e in particolare la riduzione del flusso di ~25% nel 2015 è la più alta. (H.Dang et al.2022)

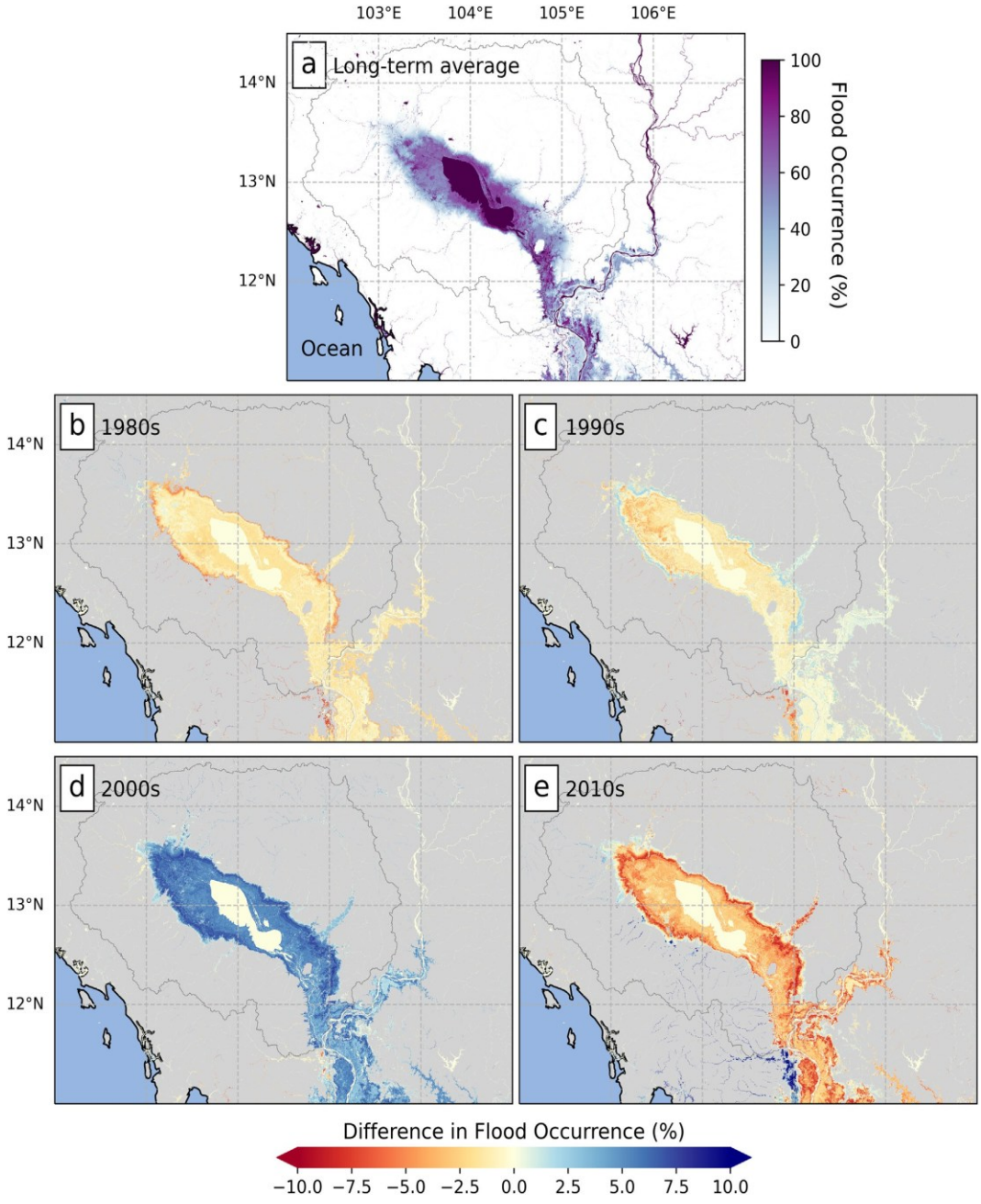


Figura 26- Media a lungo termine (1979–2016) della presenza di flood (a). Differenza tra la media dell'occorrenza flood per ogni decennio e la media a lungo termine nella simulazione NAT: anni '80 (b), '90 (c), 2000 (d) e 2010 (e). La barra colore inferiore si applica ai pannelli b–e, dove i risultati mostrati sono differenze percentuali per un dato decennio rispetto alla media a lungo termine. Le aree senza occorrenza di flood sia nella media a lungo termine sia nel decennio confrontato sono indicate in grigio (b–e). (H.Dang et al.2022)

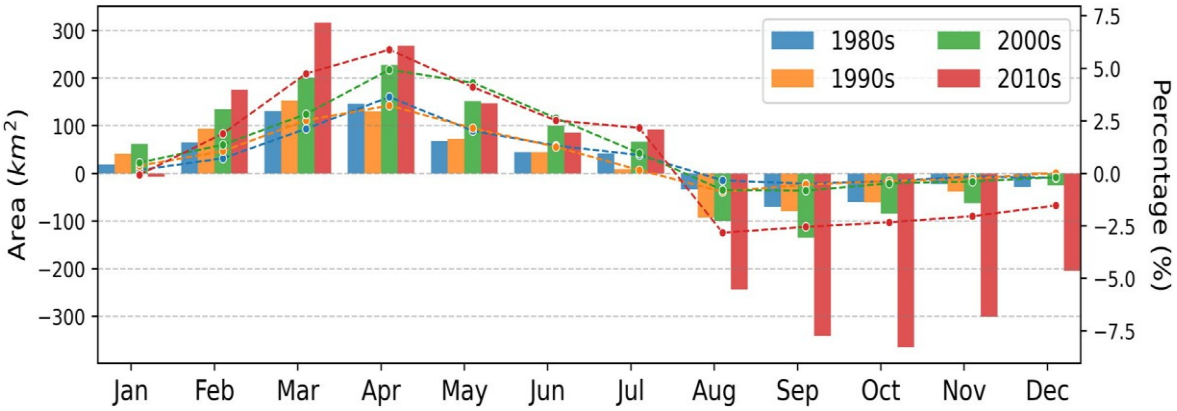


Figura 27 - Differenze nelle aree sommerse a media decadale (barra codificata a colori; asse y sinistro) tra simulazioni DAM e NAT. I risultati mostrati sono la media spaziale per il bacino idrografico del TSL. (H.Dang et al.2022)

ASSETTO IDROGRAFICO DEL FIUME MEKONG, CAMBIAMENTI CLIMATICI E IMPATTO ANTROPICO

Secondo il rapporto dell'Ipcc AR6 (Sixth Assesment Report sviluppato tra il 2021 e il 2023 e secondo il rapporto della World Bank del 2024(Climate Risk Country Profile: Cambodia) la Cambogia rientra tra i Paesi del Sud-est asiatico maggiormente vulnerabili ai cambiamenti climatici. Dal rapporto emerge che ci sarà un aumento delle temperature medie e che il Sud-est asiatico continuerà a riscaldarsi durante tutto il XXI secolo, ci sarà aumento della frequenza, durata e intensità delle ondate di calore e un'intensificazione degli eventi di precipitazione estrema. Il regime monsonico sarà caratterizzato da maggior variabilità e aumenterà il rischio di siccità, con importanti ripercussioni sul bacino del Mekong e sul lago Tonle Sap.

Entro la metà del secolo (2040–2059), la temperatura media potrebbe aumentare di circa 1,5–2,0 °C rispetto al periodo di riferimento 1995–2014 negli scenari emissivi intermedi, mentre negli scenari peggiori il riscaldamento potrebbe superare i 3 °C entro la fine del secolo.

Le precipitazioni monsoniche saranno più intense ed irregolari, aumenteranno gli eventi di pioggia estrema, ci sarà maggior variabilità tra anni piovosi e siccitosi, ma allo stesso tempo ci sarà un aumento degli episodi di siccità soprattutto nel bacino del Mekong e del Tonlè Sap.

L' aumento degli eventi estremi di precipitazione comporteranno una maggiore probabilità di alluvioni di rilievo lungo il Mekong con conseguente aumento del rischio connesso a tali eventi lungo le pianure interessate.

Complessivamente nel lago Tonle Sap il cambiamento climatico comporta la variazione del periodo di inversione del flusso e di conseguenza l'alterazione del regime delle piene, la riduzione della durata delle inondazioni stagionali, la riduzione degli habitat di riproduzione dei pesci e la diminuzione della produttività della pesca e l'alterazione della deposizione dei sedimenti ricchi di nutrienti fondamentali per l'agricoltura. (IPCC 2023; World Bank 2024).

Secondo uno studio fatto dal Mekong River Commission nel 2021, nel 2019 ci sono state variazioni del regime del flusso senza precedenti, attribuibili forti fluttuazioni climatiche che hanno determinato eventi più estremi in brevi periodi di tempo e una notevole deviazione dalle osservazioni storiche. (MRC, 2021)

Questi effetti sono amplificati dalle attività antropiche ed in particolare dalla regolazione del flusso del Mekong attraverso le dighe.

Morovati et al. (2023) hanno analizzato le cause delle modificazioni del regime idrologico del lago Tonle Sap nel periodo compreso tra il 2001 e il 2020, con l'obiettivo di distinguere il contributo della variabilità climatica da quello delle attività antropiche nel bacino del Mekong.

Gli autori hanno sviluppato un approccio innovativo che integra:

- un modello idrologico (THREW), che simula il ciclo dell'acqua nel bacino del Mekong, usando i dati meteorologici e sulle precipitazioni forniti dal MRC e dalla China Meteorological Administration (CMA);

- un modello idrodinamico, che riproduce il movimento dell'acqua tra il Mekong e il lago Tonle Sap;

- algoritmi di machine learning, un insieme di tecniche di intelligenza artificiale che permette a un computer di individuare relazioni e schemi nei dati senza dover essere programmato con regole fisse, gli algoritmi sono stati utilizzati per analizzare grandi quantità di dati idrologici e migliorare l'attribuzione delle variazioni osservate ai diversi fattori clima e attività antropiche.

Questo metodo ha permesso loro di simulare con elevata accuratezza il funzionamento del sistema Mekong–Tonle Sap e di attribuire ai diversi fattori responsabili gli impatti delle alterazioni osservate.

I risultati mostrano che nel periodo 2010-2020 il volume dell'acqua proveniente dal Mekong è diminuito in modo significativo da imputarsi alla variabilità climatica per circa il 5,7%, mentre è stato stimato che le attività antropiche nella parte cinese del bacino (Lancang) abbiano contribuito con un'ulteriore riduzione del 7,3%. L'impatto delle attività sviluppate nel basso Mekong (Laos, Thailandia e Vietnam),

ancora maggiore pari a circa il 9% del flusso diretto verso il Tonle Sap. Complessivamente, quindi, le attività antropiche hanno esercitato un'influenza superiore rispetto alla sola variabilità climatica nel modificare il regime idrologico del lago.

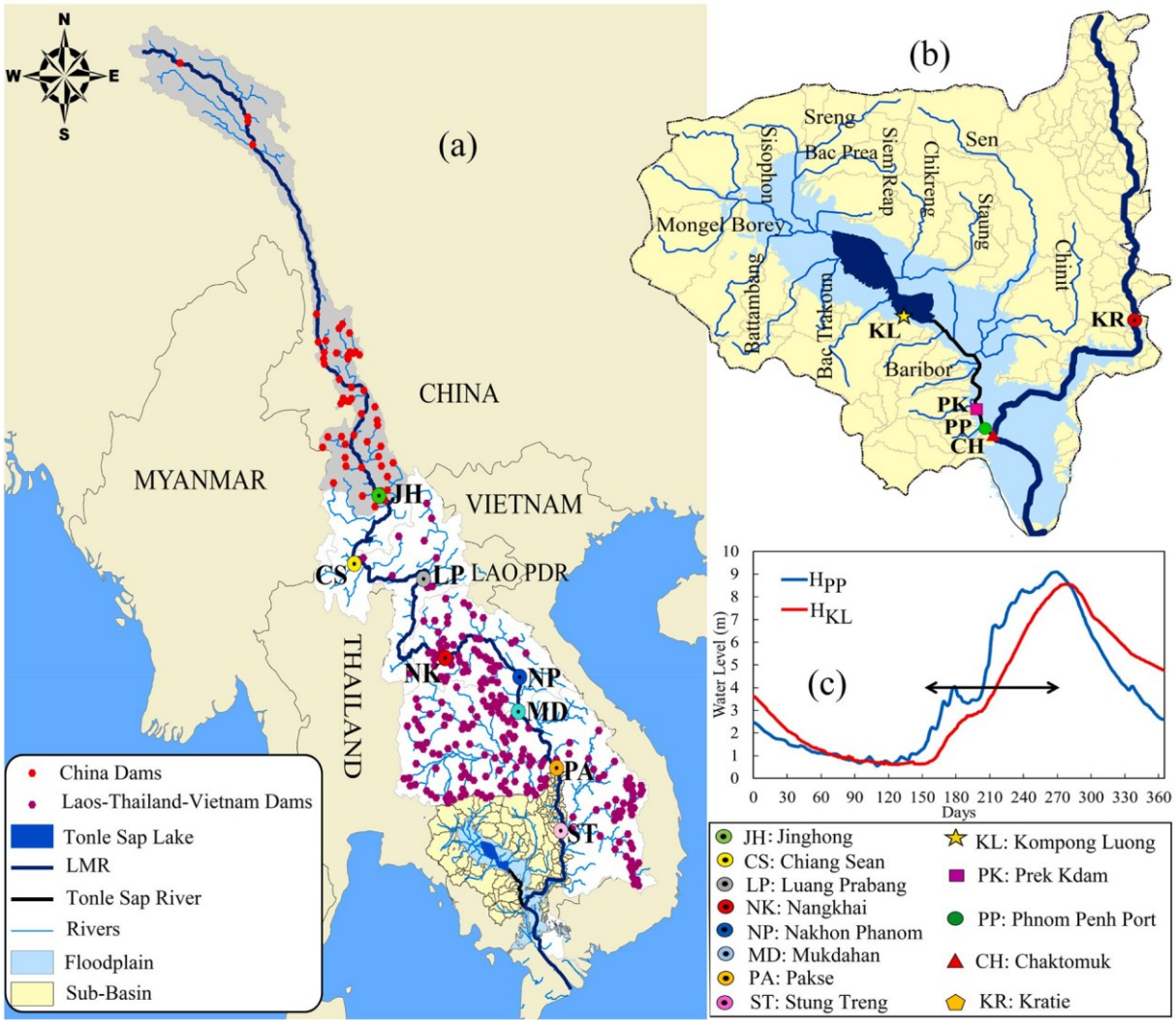


Figura 28 - (a) Mappa del bacino del fiume Lancang-Mekong (LMRB) con dighe e stazioni idrologiche. Le diverse parti dell'area di studio sono anch'esse separate: l'area grigia mostra la parte cinese del bacino; l'area bianca mostra la parte Laos-Thailandia-Vietnam, mentre l'area gialla indica il sistema del lago Tonle Sap, ampliato nella parte b. (b) il sistema di pianura alluvionale del lago Tonle Sap, gli affluenti e la posizione delle stazioni idrologiche per l'analisi del regime di flusso. (c) Confronto dei profili dei livelli dell'acqua nel porto di Phnom Penh (HPP) con le stazioni di Kompong Luong (HKL) e il periodo di flusso inverso per il 2004, indicato dalla linea della freccia nera. Le fonti di dati sul livello dell'acqua e il flusso inverso si trovano sul sito web della Commissione del Fiume Mekong (MRC). I dati sulle dighe si trovano nel CGIAR Research Program on Water, Land, and Ecosystems (https://wle.cgiar.org/thrive/2018/02/13/dams-data-and-decisions). Si noti che il corso superiore del fiume in Cina è chiamato fiume Lancang, mentre il corso a valle è chiamato fiume Mekong. (Per l'interpretazione dei riferimenti al colore in questa leggenda figurativa, il lettore viene indirizzato alla versione web di questo articolo.) (K. Morovati et al. 2023)

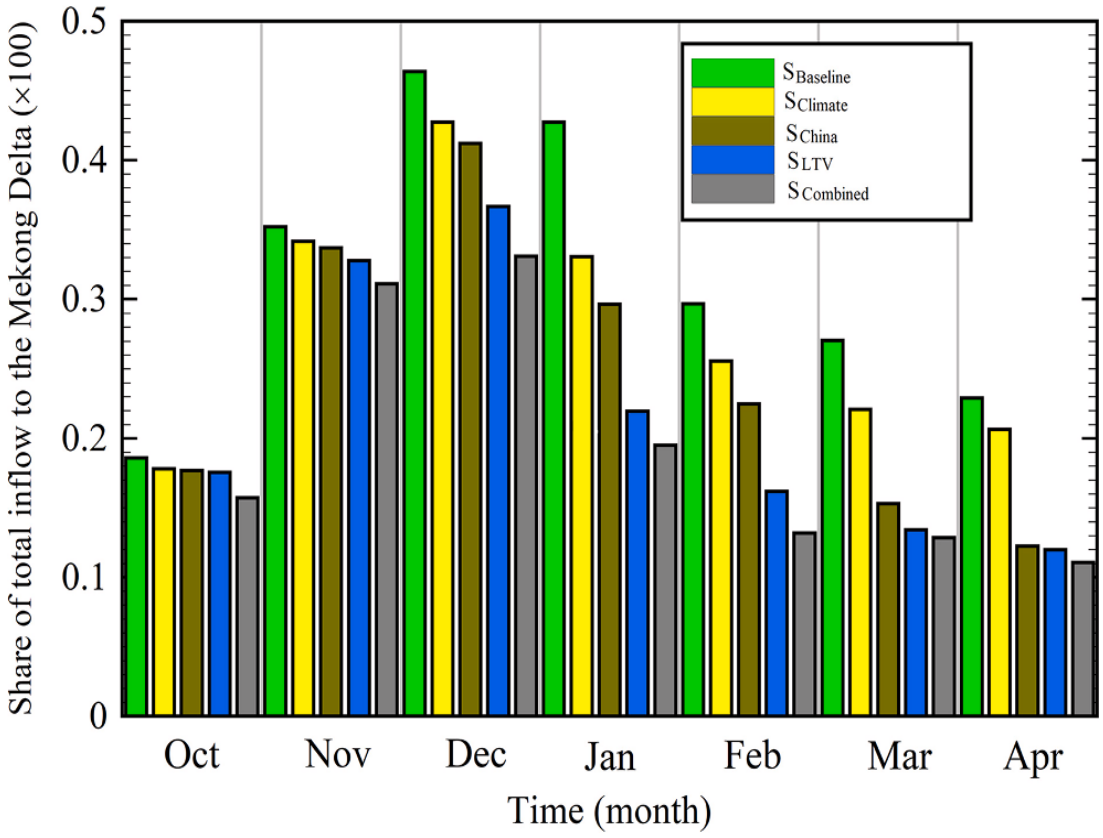


Figura 29 - Riepilogo dei risultati ottenuti sulla quota del lago Tonle Sap nel flusso totale nella confluenza e nel successivo delta del Mekong influenzato da attività umane a monte e cambiamenti climatici. (K. Morovati et al. 2023)

I risultati dello studio indicano che nel decennio 2010-2020 l'area dell'inondazione si è ridotta da 11.917 km2 a 9.967 km2, pari a circa il 16,4% rispetto al decennio precedente 2000- 2009 di cui il 13% della variazione totale è attribuibile al cambiamento climatico e il 50% all'aumento alle attività umane in Cina.

Dallo studio è inoltre emerso che l'afflusso totale annuale nel lago dal fiume Mekong è diminuito del 21.7% con un afflusso di 42,4 km^3/anno (2001–2009) e 33,2 km^3/anno (2010–2020), attribuibile ad attività umane causate dalla Cina Laos-Thailandia-Vietnam.

Il flusso inverso dal Mekong al lago è durato in media 116 giorni durante il periodo di base (2001–2009), e si è ridotto a 107 giorni a causa della variazione climatica e di tutte le attività umane a monte nel periodo 2010–2020

La modificazione del flusso delle acque del sistema Mekong Tonlè Sap si ripercuote anche sulla quantità di acqua che il lago riversa sul delta del Mekong, visto che, secondo gli autori, il 31% delle acque che si riversano sul delta provengono dal lago Tonlè Sap; tale flusso è stato ridotto principalmente a causa delle attività antropiche e secondariamente a causa dei cambiamenti climatici al 23.9%. (K. Morovati et al. 2023)

IMPATTO ANTROPICO- ESTRAZIONE DEI SEDIMENTI

La crescita economica della Cambogia degli ultimi decenni ha portato all'aumento dell'urbanizzazione e delle infrastrutture che hanno avuto come conseguenza l'incremento della richiesta di sabbia destinata all'edilizia. Gran parte di questa risorsa viene estratta direttamente dall'alveo del fiume Mekong e dei suoi principali affluenti.

Con il tempo l'escavazione di sedimenti (ghiaia e sabbia) in alveo ha alterato il bilancio sedimentario e modificato profondamente la dinamica fluviale innescando degli effetti a cascata come l'incisione dell'alveo, l'instabilità delle sponde, la modifica della morfologia del canale, l'insabbiamento del delta e il progressivo avanzare del cuneo salino nelle zone costiere.

Vengono alterati inoltre, il regime idraulico e il trasporto solido, riducendo l'apporto dei sedimenti e delle sostanze nutritive fondamentali per la fauna ittica nel lago Tonlè Sap e l'agricoltura nella sua pianura alluvionale e in quella del fiume Mekong.

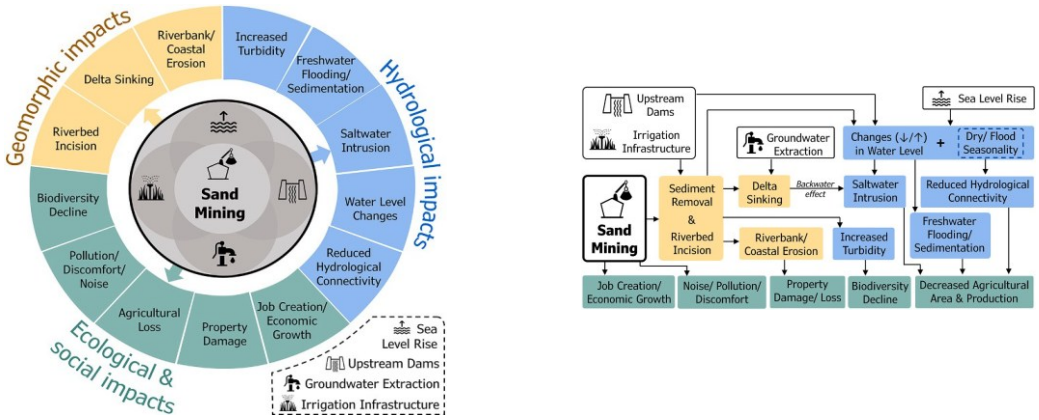


Figura 30 - Principali impatti geomorfologici, idrologici ed ecologici-sociali associati all'estrazione di sabbia nei sistemi fluviali. Fonte: Park (2024)

Il primo effetto dell'estrazione in alveo dei sedimenti si traduce in un abbassamento progressivo del letto del fiume, alterando il gradiente idraulico e modificando il comportamento dell'intero sistema di interscambio di acqua, sedimenti e sostanze nutritive del complesso Tonle Sap-Mekong.

In particolare, questa alterazione del profilo dell'alveo compromette l'ecosistema del lago Tonlè Sap, poiché l'abbassamento del letto del Mekong, riduce l'intensità del flusso inverso stagionale, dal fiume Mekong al lago Tonlè Sap, e l'estensione delle inondazioni (Hackney et al., 2020).

Negli ultimi decenni il bilancio sedimentario del Mekong è stato profondamente alterato a causa dei fattori antropici, come la costruzione di grandi dighe idroelettriche e l'estrazione dei sedimenti che è oggi considerata una delle principali minacce geomorfologiche per il basso Mekong; poiché la quantità di materiale prelevata supera ampiamente la capacità naturale del fiume di rigenerare il proprio carico sedimentario.

Secondo il database United Nations Commodity Trade Statistics Database (UN Comtrade), i dati commerciali indicano che la Cambogia nel 2024 ha esportato 43,59 milioni di tonnellate di sabbie naturali (HS 250590), per un valore di circa 217,96 milioni di dollari statunitensi e il principale mercato di destinazione è stato il Vietnam. Tuttavia, le statistiche doganali delle Nazioni Unite non consentono di identificare la provenienza geografica del materiale e non distinguono la sabbia estratta dall'alveo del Mekong o del Tonle Sap da quella proveniente da altre aree estrattive del Paese.

Nella categoria merceologica "sabbie naturali" (HS 250590) rientrano senza distinzione:

- sabbia estratta dal Mekong;
- sabbia del Tonle Sap;
- sabbia proveniente da altri fiumi;
- sabbia proveniente da cave terrestri.

Non è quindi dimostrabile quale sia l'effettivo contributo delle varie fonti. (World Bank, 2025)

Park (2024) evidenzia che le stime dell'estrazione di sabbia nel delta del Mekong, lungo tutto il suo tragitto; quindi, non solo per la parte che interessa il territorio cambogiano, variano notevolmente in funzione della metodologia utilizzata per il calcolo. Le valutazioni basate su dati amministrativi indicano volumi di circa 8,5 milioni di m^3/anno, mentre i rilievi batimetrici stimano valori compresi tra 17,8 e 20 milioni di m^3/anno. Le analisi più recenti, stimano invece un'estrazione media di 45,73 milioni di m^3/anno nel periodo 2015–2022.

Secondo Hackney et al. (2020), il flusso naturale di sabbia che raggiunge il delta del Mekong è pari a 6,18 ± 2,01 Mt/anno, mentre i tassi di estrazione lungo il basso Mekong sono stimati intorno a 50 Mt/anno. Tale squilibrio determina un progressivo approfondimento dell'alveo (riverbed incision), favorendo l'instabilità delle sponde, l'erosione fluviale. la perdita di habitat acquatici e l'alterazione di tutto il bilancio sedimentario nel suo complesso.

Secondo uno studio fatto da Ng & Park (2021) è emerso che il restringimento del lago non dipende principalmente dalle dighe o dalle variazioni climatiche, ma è in larga misura dovuto all'incisione dell'alveo del Mekong causata dall'intensa estrazione di sabbia e ghiaia, soprattutto nell'area di Phnom Penh.

Gli autori hanno analizzato dati idrologici tra il 1960 e il 2020 provenienti da stazioni situate vicino a Tonlè Sap e lungo il fiume Mekong intorno a Phnom Penh, dati di altimetria radar satellitare tra il 2002 e il 2020, dati sul livello dell'acqua, precipitazioni e portate riuscendo ad individuare le tendenze di tali parametri. Tramite le immagini di Google Earth tra il 2014 e il 2020 hanno stimato il numero di draghe a suzione, pale meccaniche e chiatte di sabbia operanti nei pressi di Phnom Penh.

L'area presa in esame dal loro studio è stata scelta a causa dell'alta concentrazione di attività estrattiva concentrata nei dintorni di Phnom Penh e comprende un tratto di 53 km del corso principale del Mekong, 30 km del fiume Bassac e 14 km del fiume Tonlè Sap analizzando i dati tra il 2014 e il 2020 tramite le immagini di Google Earth.

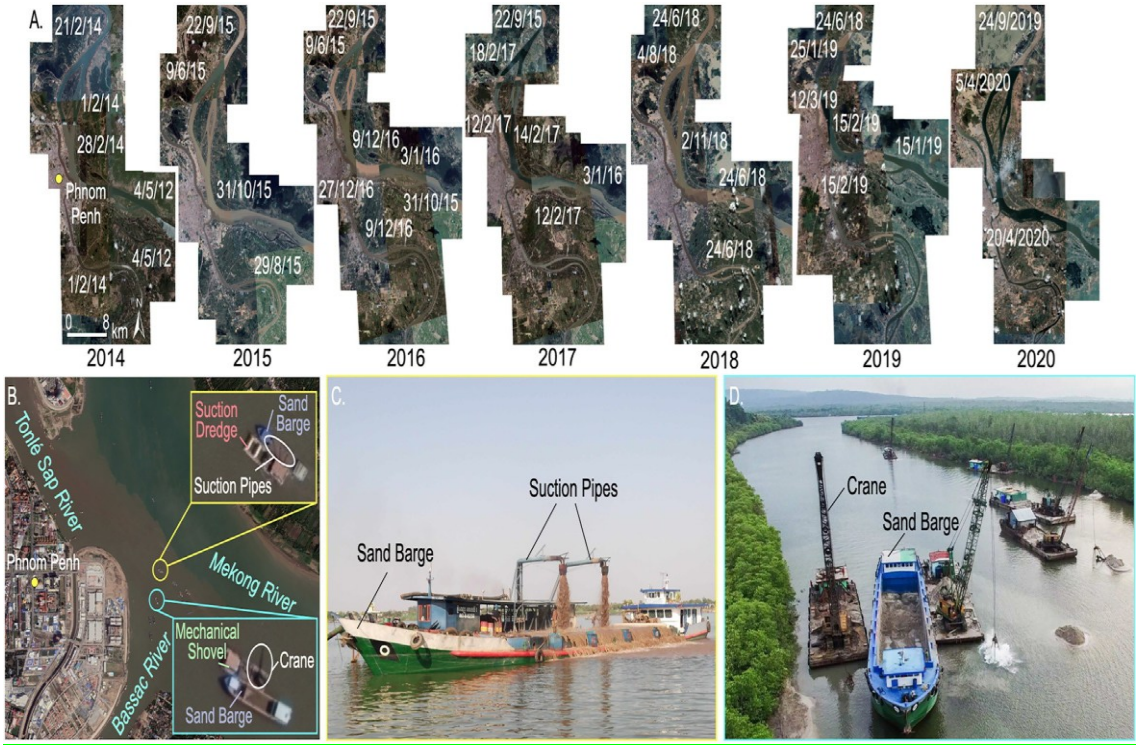


Figura 31 - Compositi annuali dei tratti del Mekong, Bassac e Tonlè Sap dove è stato effettuato un conteggio di draghe a suzione, pale meccaniche e chiatte di sabbia, con date immagini indicate. (Immagine per gentile concessione di CNES/Airbus e Maxar Technologies, via Google Earth) B: Dragaggi a aspirazione, pale meccaniche e chiatte di sabbia che operano nella confluenza del Mekong, Bassac e Tonlè Sap. (Immagine per gentile concessione di Maxar Technologies, via Google Earth) C: Una draga a aspirazione in funzione vicino a Phnom Penh. (Immagine per gentile concessione di Chris Hackney) D: Sabbia dragata con una pala meccanica.

(Immagine per gentile concessione di Kalyanee Mam.) (Ng & Park, 2023)

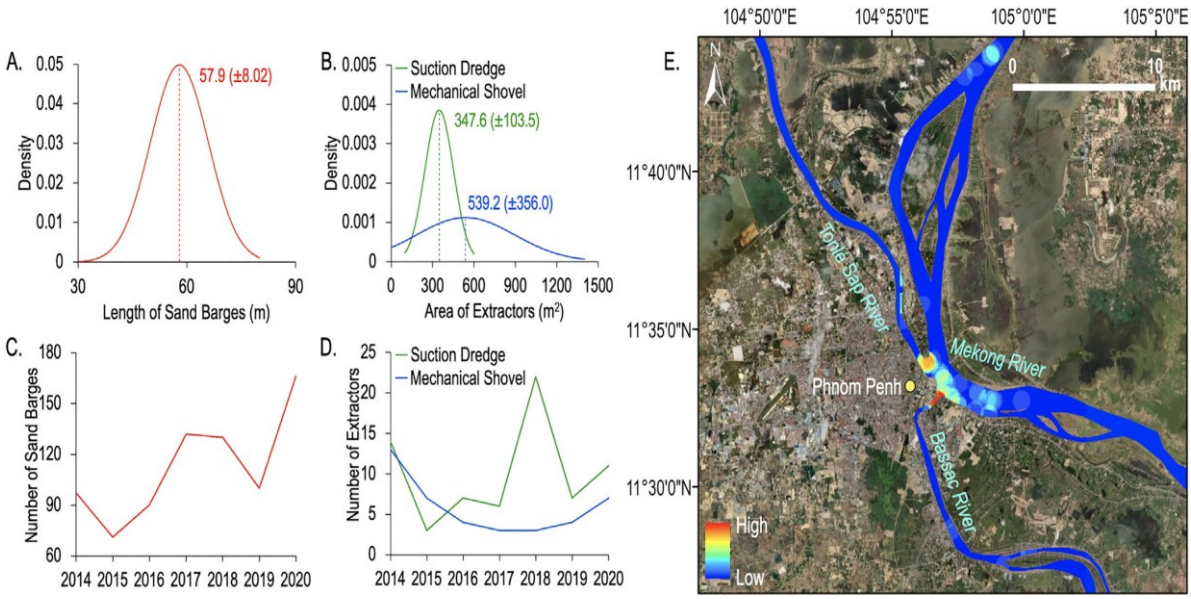


Figura 32 - A&B: Istogrammi di frequenza di chiatte di sabbia, draghe a aspirazione e pale meccaniche operative nelle zone selezionate del Mekong, Bassac e Tonlè Sap dal 2014 al 2020. C&D: Numero di chiatte di sabbia, draghe a suzione e pale meccaniche durante il periodo di indagine. E: Mappa termica composita che mostra la concentrazione complessiva di pale meccaniche e draghe a aspirazione durante il periodo di indagine. (Ng & Park, 2023)

(Crediti del livello di servizio: Esri, DigitalGlobal e GeoEye.)

Le osservazioni hanno mostrato una diminuzione significativa dell'estensione di inondazione del lago tra il 2000 e il 2018, durante la stagione delle piogge.

Nel periodo analizzato però, la portata del Mekong non mostra una diminuzione significativa; questo indica che il problema non è da attribuirsi ad una riduzione della quantità d'acqua che scorre nel fiume, quanto a una modifica della geometria dell'alveo.

L'abbassamento della quota dell'alveo del fiume Mekong ha forti ripercussioni sull'alterazione del sistema Fiume-Lago.

In condizioni di equilibrio, durante il monsone il livello del Mekong supera quello del lago Tonlè Sap e l'acqua risale lungo il fiume Tonlè Sap, alimentando il lago.

Se però, a causa dell'estrazione dei sedimenti in alveo, il letto del Mekong si abbassa, il livello dell'acqua nel Mekong aumenta meno durante la piena e la differenza di quota tra Mekong e Tonlè Sap si riduce e così il gradiente idraulico che genera il flusso inverso diventa meno efficace.

Di conseguenza la quantità d'acqua che entra nel lago diminuisce perché il flusso inverso inizia più tardi e termina prima; quindi, il volume d'acqua complessivo trasferito al Tonlè Sap è minore.

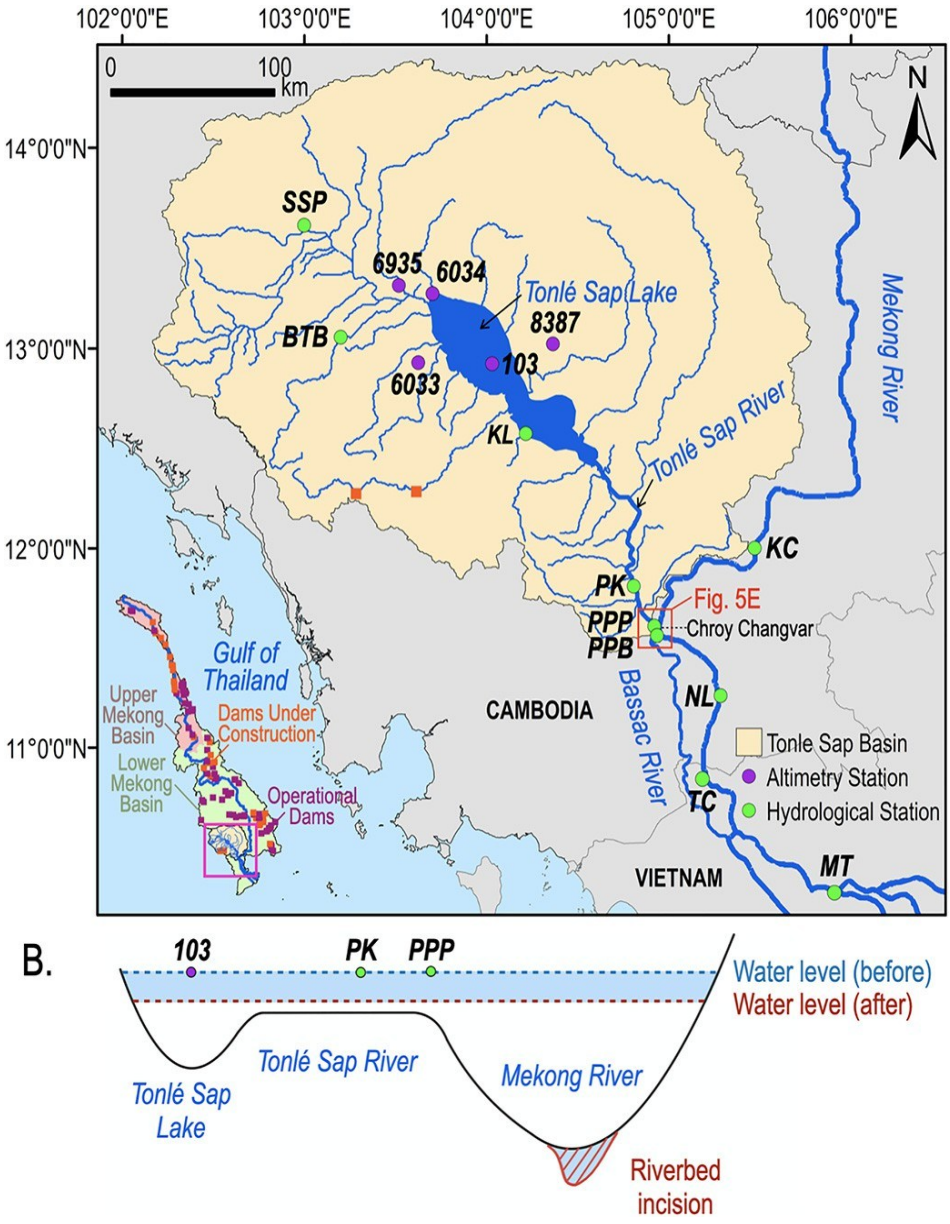


Figura 33 - Mappa dell'area di studio; mappa che mostra il bacino del fiume Mekong e le posizioni delle dighe e dighe operative in costruzione; riquadro rosso che indica i tratti dei fiumi Mekong, Tonlè Sap e Bassac, dove è stato effettuato il conteggio del numero di draghe ad aspirazione, pale meccaniche e chiatte di sabbia tra il 2014 e il 2020 (Fig. 5). B: Modello concettuale della correlazione tra l'estrazione del letto fluviale nella regione di Phnom Penh e il livello dell'acqua di Tonlè Sap: Il livello dell'acqua di Tonlè Sap è controllato dal livello del Mekong. Ciò significa che un calo del livello dell'acqua del Mekong a Phnom Penh dovuto all'incisione del letto del fiume, dovuto all'estrazione del letto fluviale, porterà direttamente al calo dei livelli d'acqua nel Tonlè Sap. (Ng & Park, 2023)

Il fenomeno all'incisione dell'alveo (riverbed incision), è causata dalla rimozione sistematica di sabbia e ghiaia, dovuta un'intensificazione dell'estrazione proprio nel periodo in cui sono diventati più evidenti gli effetti sul regime idrologico del sistema Mekong–Tonlè Sap. (Ng & Park, 2021)

L'alterazione del bilancio sedimentario ha ripercussioni negative sul trasporto dei sedimenti, sulla disponibilità di habitat per la fauna acquatica, sulla produttività della pesca e dell'agricoltura e quindi sulla produttività dei servizi ecosistemici essenziali per il sostentamento della popolazione locale.

Dal punto di vista ecologico, il trasferimento di grandi quantità di sedimenti e nutrienti sostengono uno degli ecosistemi più produttivi del mondo, favorendo la fertilità delle foreste allagate, delle risaie e degli habitat di riproduzione di numerose specie ittiche.

La riduzione ti tali apporti, comporta la perdita di molti servizi ecosistemici su cui fanno affidamento circa 70.000 persone, compromette la produttività delle pianure alluvionali e delle foreste inondate, determina la diminuzione della biomassa ittica e la perdita di habitat fondamentali per numerose specie migratrici (MRC, 2023).

Tutto questo si ripercuote poi sotto il profilo socio-economico. Le comunità locali del Tonlè Sap dipendono in larga misura dalla pesca e dall'agricoltura stagionale; pertanto, la riduzione della fertilità dei terreni e della produttività ittica aumenta la vulnerabilità economica delle popolazioni che vi risiedono.

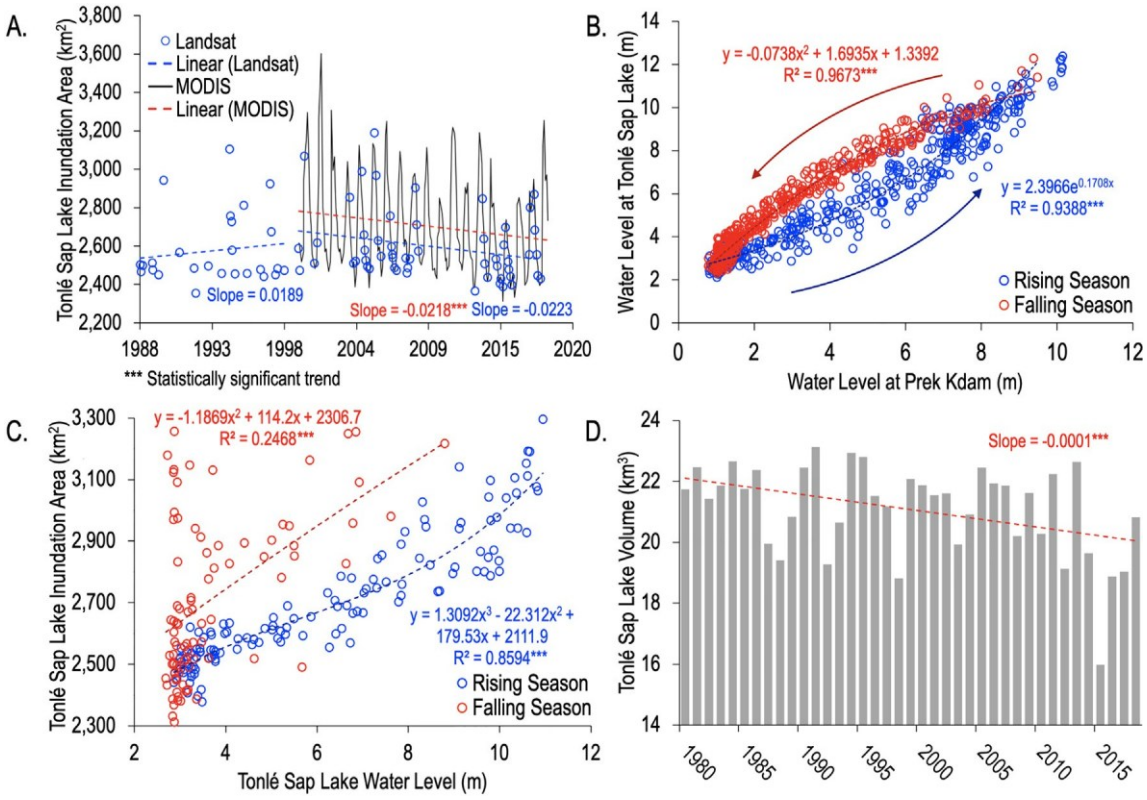


Figura 34 - R: Area media di inondazione mensile del Lago Tonlè Sap dal 1988 al 2018. I prodotti dati Landsat Collection 1 Level-1 (risoluzione 30 m) tra il 1988 e il 2020 sono stati ottenuti dall'USGS. I prodotti (MOD09Q1) di risoluzione () di Riflettanza della Superficie MODIS/Terra Surface Reflectance a 8 giorni () tra il 2000 e il 2019 sono stati acquisiti dal NASA Land Processes Distribution Archive Center. B: Curva di valutazione del livello dell'acqua al Lago Tonlè Sap (dati altimetrici) rispetto al livello dell'acqua a Prek Kdam (dati della stazione di misura) costruita per stimare i livelli dell'acqua al Lago Tonlè Sap; la curva di valutazione ha rivelato una forte correlazione dei livelli d'acqua al Lago Tonlè Sap e a Prek Kdam sia durante la stagione di salita che quella di discesa (R2 = 0,9388 e R2 = 0,9673, rispettivamente). C: Curva di valutazione dell'area di inondazione rispetto al livello dell'acqua del Lago Tonlè Sap, costruita per stimare il volume del Lago Tonlè Sap sopra l'acqua permanente. D: Volume del Lago Tonlè Sap sopra l'acqua permanente dal 1980 al 2018. (Ng & Park, 2023)

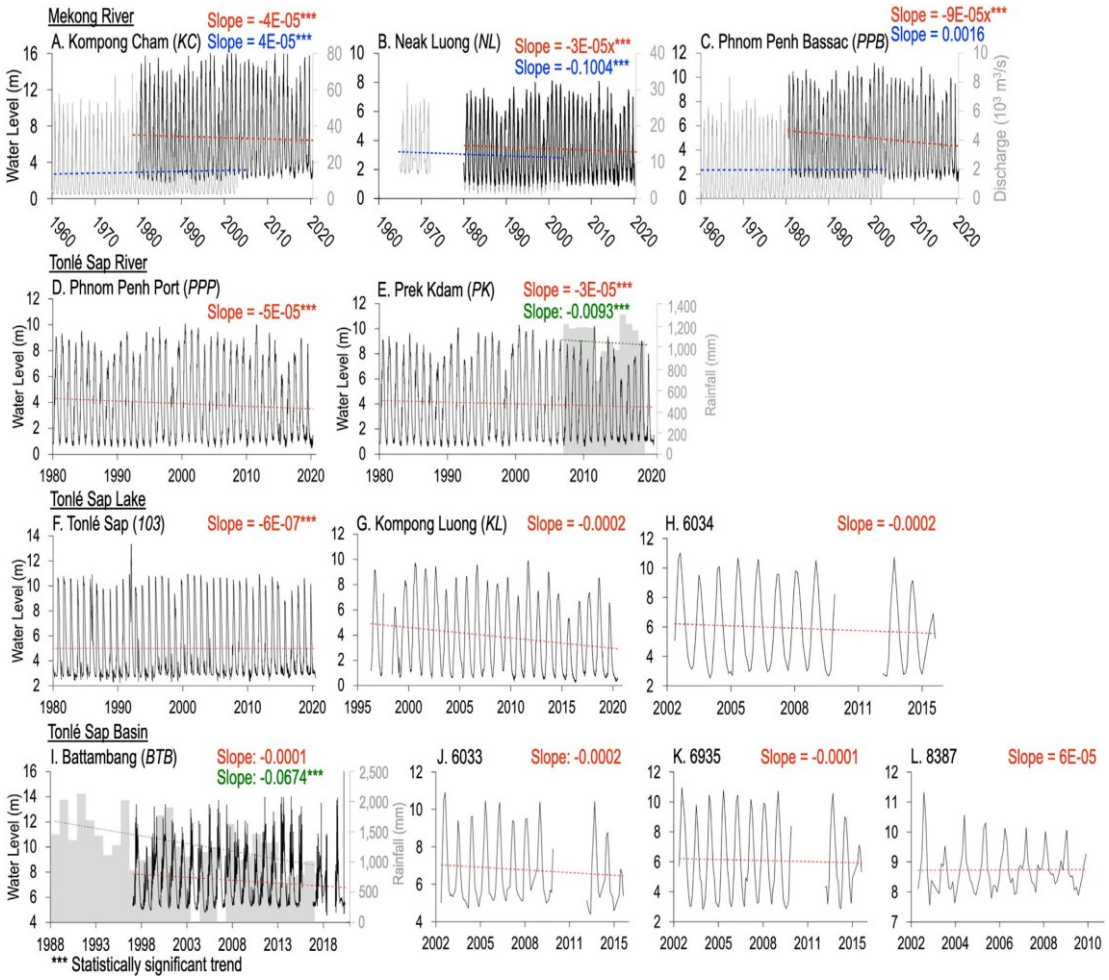


Figura 35 - Serie di stazioni a livello dell'acqua lungo il corso principale del Mekong e il fiume Tonlè Sap, e all'interno del bacino di Tonlè Sap. A–E, G e I sono serie giornaliere provenienti da stazioni a scartamento. F è la serie giornaliera dei livelli dell'acqua del Lago Tonlè Sap ricostruita utilizzando una curva di valutazione del livello dell'acqua a Tonlè Sap (dati altimetrici) rispetto al livello dell'acqua a Prek Kdam (dati della stazione di misura) (Fig. 3B). H e J–L sono serie di livelli d'acqua derivate dall'altimetria radar satellitare. I discarichi giornalieri a Kompong Cham, Neak Luong e Phnom Penh Bassac sono tracciati sullo sfondo (grigio). Le precipitazioni annuali totali a Prek Kdam e Sisophon sono anch'esse rappresentate sullo sfondo (grigio); le precipitazioni a Sisophon sono state tracciate sullo sfondo della serie dei livelli dell'acqua di Battambang, dato che queste due stazioni si trovano molto vicine. (Ng & Park, 2023)

IMPATTO ECONOMICO - SOCIALE

I cambiamenti climatici, lo sviluppo delle infrastrutture idrauliche e in particolar modo l'estrazione dei sedimenti dall'alveo dei fiumi Mekong e Tonlè Sap, modificano il regime idrologico degli stessi con effetti negativi nell' ambito economico e sociale, con effetti più marcati sulle comunità rurali. (World Bank, 2024). Gli impatti più rilevanti riguardano il lago Tonlè Sap, dove gli scenari climatici più severi, accentuati dalla diminuzione dell'effetto del "Flood Pulse" a causa dell'estrazione dei sedimenti in alveo; mostrano una riduzione della produzione ittica e della disponibilità alimentare per le comunità locali. In tali aree le inondazioni, la siccità e le ondate di calore compromettono i mezzi di sussistenza, provocando perdite agricole, la riduzione del reddito e un aumento della vulnerabilità delle famiglie più povere.

La Cambogia è uno dei paesi più poveri dell'Asia orientale e i cambiamenti climatici non fanno che aumentare la precarietà delle comunità rurali più fragili.

L'aumento dei periodi di siccità e il loro alternarsi con le inondazioni più frequenti e intense, sta avendo impatti devastanti sia sull'agricoltura che la pesca e loro attività indotte. Una grave siccità nel 2015-2016 ha colpito 18 delle 25 province e ha avuto un impatto su oltre 2,5 milioni di persone. Le perdite nella produzione di riso causate dalla siccità associata a El Niño nel 2019 sono state stimate in 100 milioni di dollari. Nel settembre 2022, le piogge più intense degli ultimi tre anni hanno causato gravi inondazioni in 14 province, con circa 85.000 famiglie colpite e frane che hanno portato all'evacuazione di 5.000 famiglie.

Le proiezioni climatiche suggeriscono che in Cambogia il rischio di inondazioni e lo stress termico peggioreranno in futuro. Secondo il rapporto della World bank del 2024, senza adeguate misure di adattamento e mitigazione, i cambiamenti climatici potrebbero costare fino al 9% del PIL cambogiano entro il 2050, aumentando al contempo il tasso di povertà fino a 6 punti percentuali entro il 2040. (World Bank, 2024).

Il lago Tonlè Sap costituisce il principale capitale naturale della Cambogia e rappresenta la principale fonte delle risorse alimentari, dell'economia rurale e dei mezzi di sussistenza di milioni di persone. La sua produttività dipende dal caratteristico *flood pulse* del Mekong, che regola l'estensione delle foreste allagate, la riproduzione delle specie ittiche e la fertilità delle pianure alluvionali. Le alterazioni del regime idrologico causato dall' impatto antropico e dai cambiamenti climatici stanno progressivamente riducendo la capacità del lago di fornire i servizi ecosistemici necessari al loro sostentamento.

La MRC, nel 2017, ha valutato l'impatto sociale considerando l'indicatore della sicurezza alimentare, che tiene conto della diversa risposta delle colture e delle risorse ittiche ai cambiamenti nel regime fluviale.

In generale la sufficienza alimentare era adeguata in un anno medio, ma in un anno criticamente secco qualsiasi riduzione significativa dovuta al cambiamento climatico potrebbe causare problemi significativi alle famiglie più povere.

Il cambiamento climatico, infatti, comporta una riduzione di pesce e riso rispetto a quella che si verificherebbe solo grazie allo sviluppo della popolazione:

Scenario	Riso	Pesci
M1-M2	-6%	-32%
M1-M3	-16%	-43%
M1-M3CC	-13%	-40%

Tabella 4- Cambiamenti complessivi nel riso e nella pesca tradizionali rispetto alla base Mekong River Commission 2017

Effetto del cambiamento climatico sulla sicurezza alimentare								
Zona	**Cibo**	**M3**	**CC**	**C2**	**C3**	**CC**	**C2**	**C3**
		Surplus sopra l'autosufficienza (media)				**Variazione del Surplus**		
Zona 4 C Cambogia Kratie al Vietnam	Pesci	34%	34%	34%	32%	0%	0%	-2%
	Riso	58%	63%	57%	57%	5%	-1%	-1%
Zona 5 Un fiume Cambogia-Tonle Sap	Pesci	5%	10%	14%	5%	5%	9%	0%
	Riso	45%	53%	47%	47%	8%	2%	2%
Zona 5 B Cambogia Lago Tonle Sap	Pesci	57%	53%	58%	32%	-4%	1%	-25%
	Riso	88%	89%	88%	88%	1%	0%	0%
Zona 2-Main – Lao PDR	Pesci	-1%	9%	18%	8%	10%	19%	9%
	Riso	43%	38%	38%	36%	-5%	-5%	-7%
Zona 3-Main - Lao PDR	Pesci	11%	14%	20%	12%	3%	9%	1%
	Riso	83%	83%	82%	82%	0%	-1%	-1%
Zona 2 B-Alta Thailandia	Pesci	43%	42%	44%	41%	1%	1%	1%
	Riso	86%	85%	85%	84%	-1%	-1%	-2%
Zona 2 C-Bassa Thailandia	Pesci	84%	83%	83%	83%	-1%	-2%	-1%
	Riso	56%	54%	54%	50%	-2%	-2%	-6%
Zona 3 B Thailandia-Mainstream	Pesci	85%	84%	84%	84%	-1%	-1%	-1%
	Riso	64%	62%	62%	59%	-2%	-2%	-5%
Zona 3 C Thailandia-Songkhram	Pesci	84%	84%	84%	82%	0%	0%	-2%
	Riso	74%	72%	72%	69%	-2%	-2%	-5%
Zona 6 A Delta del Vietnam - acqua dolce	Pesci	61%	63%	64%	62%	2%	3%	1%
	Riso	63%	64%	62%	63%	1%	-1%	0%
Zona 6 B Delta del Vietnam - salina	Pesci	55%	62%	63%	60%	7%	8%	5%
	Riso	51%	52%	51%	51%	1%	0%	0%

Tabella 5 - Effetto del cambiamento climatico sulla sicurezza alimentare Mekong River Commission 2017

Il report prevede uno sviluppo socioeconomico molto significativo nell'orizzonte temporale del 2040, inclusi massicci spostamenti di persone verso le aree urbane per il miglioramento del tenore di vita. Lo studio, tuttavia, evidenzia i rischi per le comunità più fragili e più povere della società che rimangono dipendenti dalle risorse naturali, poiché senza intervento ci si può aspettare un peggioramento della situazione della sicurezza alimentare dovuta alla combinazione degli impatti antropici e climatici.

Lo studio macroeconomico considera l'effetto di diversi scenari su una serie di indicatori come il PIL complessivo, l'occupazione, l'impatto dei diversi settori, ecc. Per tutti gli scenari climatici ipotizzati c'è una significativa riduzione del PIL, ma in particolare per la Cambogia e in particolare se lo scenario più secco dovesse realizzarsi.

	Cambodia	Lao PDR	Thailand	Vietnam	Total LMB
M1 Trend	48.3	39.2	79.8	82.3	249.6
M2	41.8	35.1	73.7	82.7	233.3
M3 (No CC)	39.6	30.2	68.9	82.5	221.2
M3CC	38.5	30.3	70.4	81.3	220.5
C2 (Wet)	36.3	30	69.6	78.9	214.8
C3 (Dry)	36.2	29.9	69.9	78.7	214.7

GDP Projections (average) for 2040 in constant 2017 Prices

Tabella 6 - Proiezioni del PIL (medie) per il 2040 a prezzi costanti del 2017. Mekong River Commission 2017

	Cambodia	Lao PDR	Thailand	Vietnam	Total LMB
	Average	Average	Average	Average	Average
M3CC	3%	0%	-2%	1%	0%
C2 (Wet)	8%	1%	-1%	4%	3%
C3 (Dry)	9%	1%	-1%	5%	3%

% Reduction in GDP Projections for 2040 Due to Climate Change

Tabella 7 - Riduzione percentuale del PIL prevista per il 2040 a causa dei cambiamenti climatici. Mekong River Commission 2017

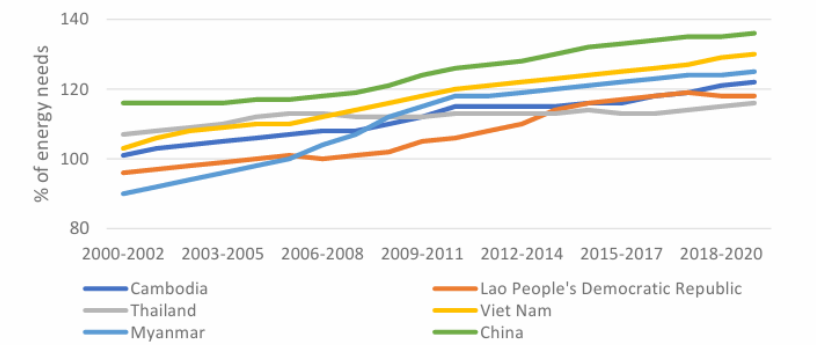


Figure 4.2. Adequacy of Dietary Energy Supply (% of dietary energy needs met by national production) in Mekong River Basin countries from 2000 to 2020

Figura 36 - Adeguatezza dell'apporto energetico alimentare (% del fabbisogno energetico alimentare soddisfatto dalla produzione nazionale) nei paesi del bacino del fiume Mekong dal 2000 al 2020.MRC 2023- FAOSTAT 2023

Secondo il rapporto della MRC del 2023 la malnutrizione in Cambogia è diminuita del 6.3% fino al 2020, tuttavia, a partire dal 2014 circa, in tutti i paesi del bacino del Mekong il tasso di diminuzione è calato. Tutti i paesi presentano ancora una quota significativa della loro popolazione che soffre di malnutrizione.

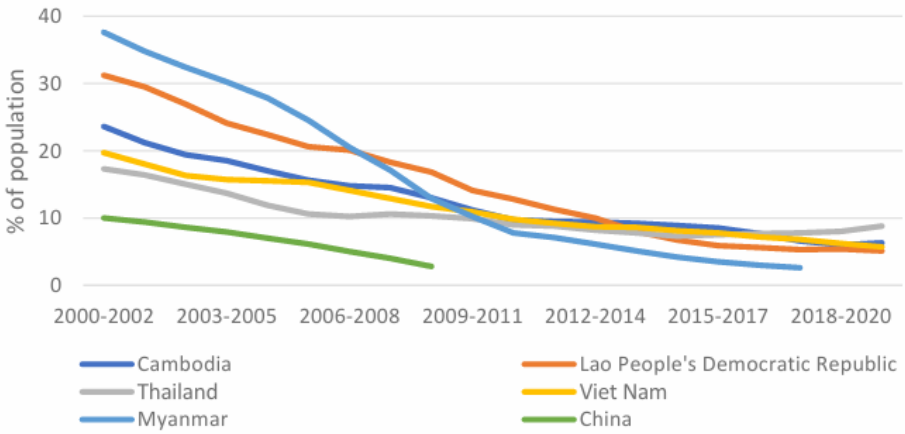


Figura 37- Prevalenza della malnutrizione, in proporzione alla popolazione, nei paesi del bacino del fiume Mekong dal 2000 al 2020. MRC 2023- FAOSTAT 2023

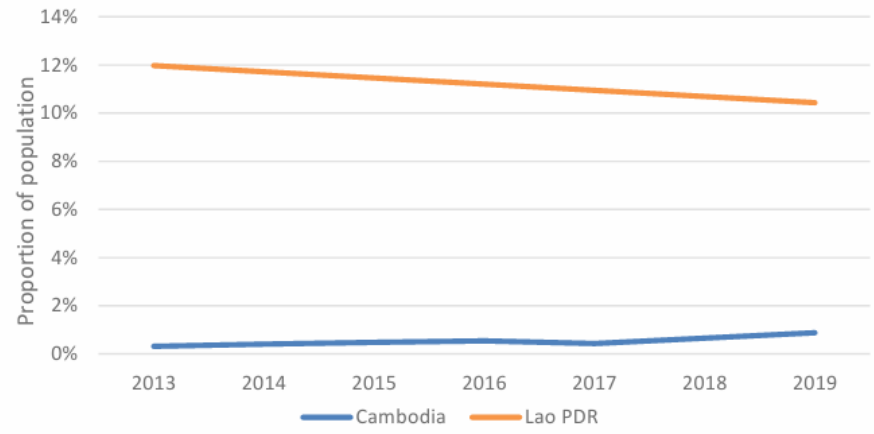


Figura 38 - Prevalenza della malnutrizione in proporzione alla popolazione nei bacini idrografici di Cambogia e Laos dal 2013 al 2019. MRC 2023- FAOSTAT 2023

Il rapporto della MRC del 2023 evidenzia che, le conseguenze risultano particolarmente rilevanti per la Cambogia, dal punto di vista socioeconomico.

Il rapporto sottolinea che la riduzione della durata e dell'estensione delle inondazioni stagionali comporta una diminuzione della produttività delle foreste allagate, della pesca continentale e dell'agricoltura delle pianure alluvionali, con effetti negativi sul reddito delle famiglie, sulla sicurezza alimentare e sulla resilienza delle comunità locali.

Una quota consistente della popolazione rurale dipende direttamente dai servizi ecosistemici forniti dal sistema Mekong–Tonlè Sap e per questo motivo risultano le più vulnerabili, poiché dispongono di limitate possibilità di diversificazione economica.

Secondo la MRC il mantenimento della produttività del Tonlè Sap rappresenta una priorità strategica non soltanto sotto il profilo ambientale, ma anche per la stabilità economica della Cambogia. La tutela del regime naturale delle piene, la gestione sostenibile dei sedimenti, il miglioramento del coordinamento nella gestione delle infrastrutture idrauliche e il rafforzamento delle strategie di adattamento ai cambiamenti climatici costituiscono elementi indispensabili per preservare i servizi ecosistemici del lago e ridurre la vulnerabilità delle comunità che popolano le aree limitrofe ai corsi d'acqua.

In assenza di interventi mirati a ridurre le vulnerabilità e i rischi, gli effetti combinati dei cambiamenti climatici e delle pressioni antropiche sono destinati ad accentuare il peggioramento della qualità degli ecosistemi acquatici e delle pianure alluvionali. con ripercussioni crescenti sulla sicurezza alimentare, sui mezzi di sussistenza e sullo sviluppo socioeconomico della Cambogia. (MRC, 2023)

Il rapporto, tuttavia, non prende in considerazione gli effetti prodotti dall' estrazione dei sedimenti dall'alveo dei fiumi del Mekong e del Tonlè Sap.

Secondo lo studio di Ng & Park (2023), questo sarebbe il fattore predominante sulla riduzione del meccanismo del "Flood Pulse" e pertanto sull'alterazione

degli ecosistemi e sui servizi ecosistemici ad essi collegati nell'area persa in esame.

Alla luce delle loro considerazioni si ritiene che gli impatti dovuti alla modifica del meccanismo delle alluvioni da parte delle acque provenienti dal Mekong, possa avere ripercussioni ancora peggiori sul sistema socio – economico della Cambogia, rispetto a quelle del Report della MRC del 2023.

POSSIBILI SOLUZIONI AGLI EFFETTI DEL SAND MINING

La mitigazione degli effetti dell'estrazione di sedimenti nel fiume Mekong, connessi alla diminuzione delle inondazioni del lago Tonlè Sap, richiede un approccio combinato, di interventi di natura tecnica, gestionale e politico-istituzionale.

La Mekong River Commission (MRC, 2023), ha posto come priorità l'elaborazione di un Piano Integrato di Gestione dei Sedimenti (*Sediment Management Plan*) a scala di bacino, finalizzato a monitorare il trasporto sedimentario, regolamentare le attività estrattive e preservare l'equilibrio morfologico del fiume. Tale strategia è particolarmente importante per il sistema Mekong–Tonlè Sap, poiché l'incisione dell'alveo causata dall'eccessiva estrazione di sabbia riduce il gradiente idraulico necessario all'inversione stagionale del fiume Tonlè Sap, compromettendo il meccanismo del *flood pulse*, da cui dipendono l'espansione delle aree allagate, la produttività della pesca e la fertilità delle pianure circostanti (MRC, 2023; Ng & Park, 2024).

Ad oggi, in Cambogia non esiste un "Piano nazionale di gestione dei sedimenti" specifico per il Mekong o per il sistema Tonlè Sap approvato come politica nazionale. Esistono normative sull'attività estrattiva e concessioni minerarie, ma non un documento organico che disciplini il bilancio sedimentario dell'intero sistema fluviale.

Tale esigenza è invece sottolineata dalla Mekong River Commission, che promuove lo sviluppo di un piano di gestione dei sedimenti a scala di bacino nell'ambito della *Basin Development Strategy 2021–2030* (Mekong River Commission, 2021)

Si ritiene inoltre che sia di particolare importanza specificare per ogni categoria di sedimento la zona di provenienza dello stesso, in modo tale da poter capire quale sono le zone più impattate e le categorie più sensibili di regolamentazione.

Ad oggi la categoria merceologica con cui la sabbia del Mekong viene registrata nelle statistiche di esportazione della Cambogia (World Bank, 2026; UN Comtrade, WITS, Dogane cambogiane), non viene distinta in base all'origine fluviale (Mekong, Tonlè Sap, ecc.), ma secondo il Sistema Armonizzato (HS - Harmonized System) dell'Organizzazione Mondiale delle Dogane (WCO).

La sabbia estratta dal Mekong e dal Tonlè Sap è normalmente registrata ed esportata nella sottovoce HS 250590 – Other natural sands.

Tale categoria è costituita da una miscela di quarzo, feldspati, frammenti litici e altri minerali di origine alluvionale senza distinguere il fiume di provenienza.

Le eventuali esportazioni di ghiaia, prelevate in alveo, sono registrate separatamente, generalmente sotto la voce HS 251710 – Pebbles, gravel, broken or crushed stone. (Harmonized System, HS; World Bank, 2025; World Customs Organization [WCO], 2022)

Si ritiene che ai fini del monitoraggio del sand mining sia fondamentale inserire per ogni lotto di estrazione del sedimento la zona di provenienza dello stesso in modo da riuscire a regolamentare le quantità estratte in ogni singola zona e poter così intervenire nel punto specifico in cui si manifesta la criticità.

La gestione dell’estrazione dei sedimenti dall’alveo è fondamentale per Il monitorare continuamente il trasporto dei sedimenti, valutare sistematicamente l'impatto dell'estrazione di sabbia, integrare il piano nella pianificazione regionale del Mekong.

Ai fini delle risoluzioni delle problematiche connesse al Lago Tonlè Sap, il piano di gestione dei sedimenti permetterebbe di mantenere quote dell'alveo compatibili con la dinamica naturale del flood pulse e quindi limitare l'erosione dell'alveo del Mekong riducendo la perdita di habitat alluvionali.

Secondo la MRC, il problema non può essere affrontato localmente, poiché il trasporto sedimentario interessa l'intero bacino idrografico e coinvolge tutti i Paesi membri.

La gestione del sand mining permetterebbe di essere più consapevoli degli effetti che questa attività produce sull'intera dinamica fluviale. Il corso del fiume, infatti, possiede un proprio equilibro e ogni intervento che si effettua in punto del suo percorso produce degli effetti a catena anche negli altri punti. Studiando gli effetti di un'azione in una zona sarà possibile riuscire a prevedere quali processi questa sarà in grado di scatenare, e quindi sarà possibile provare ad individuare le possibili azioni per contrastare i fenomeni negativi.

Il piano di gestione dei sedimenti sarebbe un utile strumento per regolamentare le quote di estrazione per ogni punto del bacino, inserendo delle limitazioni nelle zone più vulnerabili come nelle zone lungo il fiume Tonlè Sap, nei pressi della confluenza Mekong–Tonlè Sap nelle zone con forte erosione; e dei divieti negli habitat di particolare pregio ambientale e nelle aree ad elevata biodiversità.

Si ritiene di particolare importanza ai fini della gestione, lo sviluppo di un piano di monitoraggio che sia in grado di valutare sia la conformità delle quantità estratte sia l'impatto che tali estrazioni hanno sugli ecosistemi. La sorveglianza costante permetterebbe infatti di poter intervenire in maniera tempestiva qualora si dovessero verificare delle criticità in modo da prevenire o limitare anche l'erosione delle sponde e l'instabilità dell'alveo.

La MRC sottolinea la necessità di ampliare il monitoraggio attraverso:

- rilievi batimetrici periodici;
- misure del trasporto sedimentario;
- immagini satellitari;
- controlli delle draghe;
- banche dati condivise tra i Paesi del bacino.

Un altro aspetto da non sottovalutare riguarda la quantità dei sedimenti intrappolata nei bacini artificiale delle dighe idroelettriche.

Gli invasi artificiali, infatti, trattengono gran parte del carico sedimentario che il fiume in condizioni di equilibrio distribuirebbe lungo il suo percorso fino al delta. Una maggiore disponibilità di sedimenti, quindi, contribuirebbe non solo a limitare l'incisione dell'alveo e a sostenere il funzionamento del flood pulse del Tonlè Sap, ma anche a garantire il maggior apporto degli stessi verso la zona del delta.

In altri bacini fluviali, tra le principali soluzioni già adottate o sperimentate vi è il "sediment flushing", che consiste nello svuotamento controllato dei serbatoi durante periodi di elevata portata per trasferire a valle i sedimenti accumulati ed evitare i fenomeni di riempimento dei bacini retrostanti le dighe. Questa tecnica è stata applicata, ad esempio, in Giappone nella diga di Dashidaira, situata sul fiume Kurobe. dove ha consentito di ridurre l'interramento degli invasi e di ripristinare, almeno parzialmente, il trasporto sedimentario naturale.

Costruita nel 1985, la diga è dotata di grandi paratoie di fondo progettate specificamente per il *sediment flushing*. A causa dell'elevata produzione di sedimenti del bacino montano del Kurobe, infatti, il serbatoio subiva un rapido interramento, con conseguente riduzione della capacità di invaso e della funzionalità dell'impianto idroelettrico. Per contrastare questo fenomeno, dal 1991 vengono effettuate operazioni di drawdown flushing, durante le quali il livello dell'acqua viene abbassato, grazie alle paratoie di fondo, in concomitanza con eventi di piena, trasformando temporaneamente il serbatoio in un alveo a corrente libera. Grazie all'elevata energia della corrente i sedimenti depositati sul fondo vengono trasporti a valle attraverso le paratoie di scarico. Questo sistema, nel tempo, ha contribuito a mantenere la capacità di invaso, a ridurre l'accumulo di sedimenti e a ristabilire, almeno in parte, l'apporto sedimentario verso valle, mitigando i fenomeni di erosione dell'alveo e della costa. (Japan Commission on Large Dams, 2005)

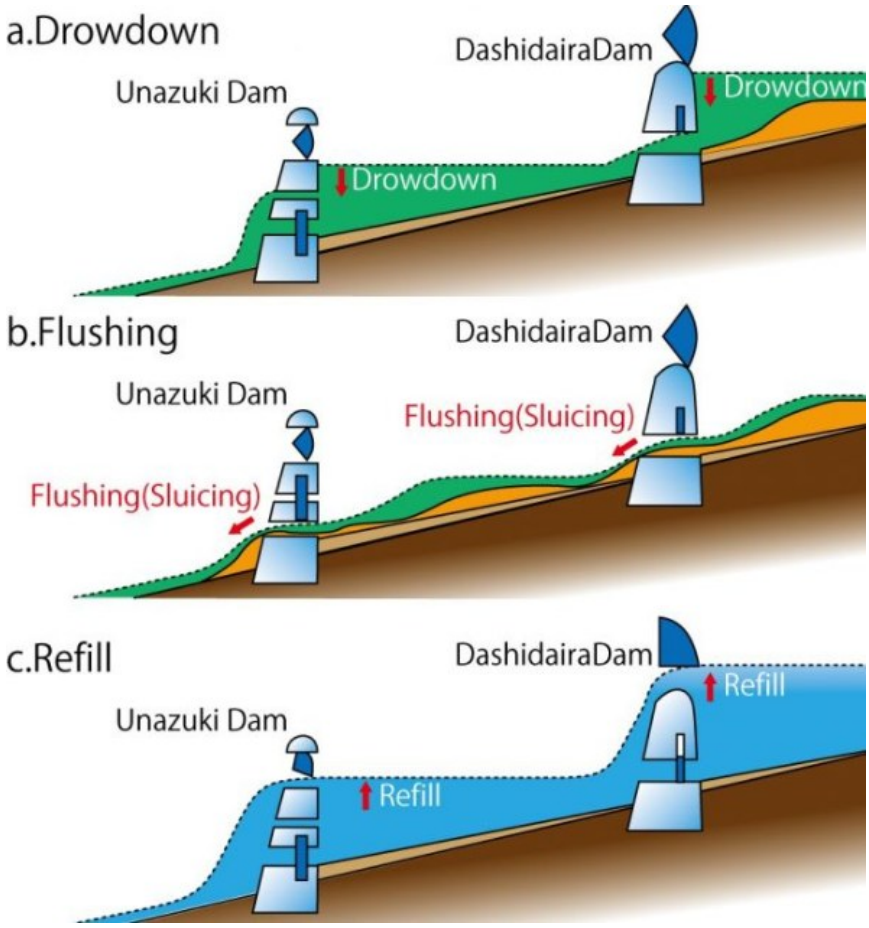


Figura 39 – Procedura di sediment flushing adottata nel sistema delle dighe sul fiume Kurobe, Giappone: abbassamento del livello del serbatoio (drawdown), rilascio dei sedimenti mediante flusso libero (sediment flushing) e successivo ripristino del livello idrico. Fonte: Kanazawa (2005), in Japan Commission on Large Dams (JCOLD, 2005)

Un'altra possibile soluzione è rappresentata dal “sediment bypass tunnel” (SBT), gallerie che deviano le piene torbide attorno al serbatoio evitando la deposizione dei sedimenti.

Questa tecnica consente di ristabilire il trasporto naturale dei sedimenti, contribuendo al mantenimento della morfologia fluviale e degli ecosistemi a valle, senza interrompere in modo significativo l'esercizio dell'impianto idroelettrico.

Un esempio di applicazione dei Sediment Bypass Tunnel (SBT) è rappresentato dal Solis Reservoir, situato nel Canton Grigioni (Svizzera), dove il tunnel di bypass è entrato in funzione nel 2012 per contrastare il progressivo interramento del serbatoio.

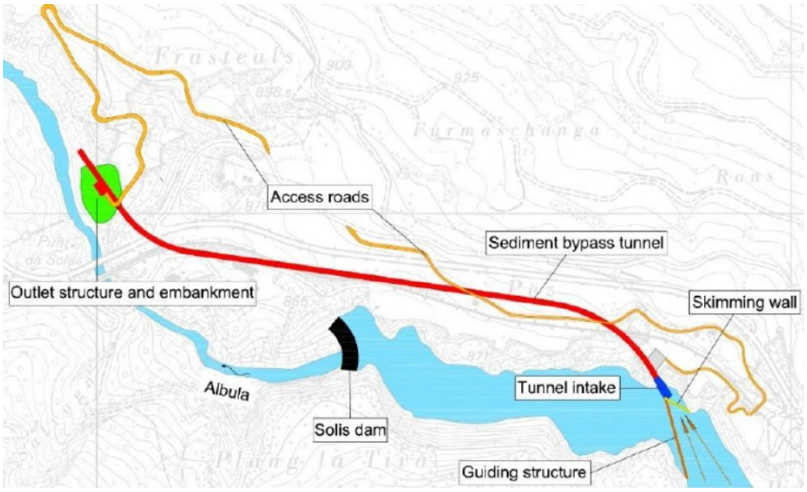


Figura 40 - Planimetria generale del Sediment Bypass Tunnel (SBT) del serbatoio di Solis (Canton Grigioni, Svizzera). Si osservano la struttura d'imbocco (Tunnel intake) posizionata all'interno del bacino (SBT di Tipo B), l'opera di sbarramento (Solis dam), il tracciato della galleria di deviazione e l'opera di restituzione a valle (Outlet structure). Fonte: rielaborato da Dahal et al. (2025) / Auel et al. (2011).

Attraverso campagne di monitoraggio tra il 2018 e il 2021, è stato dimostrato che il funzionamento del tunnel ha incrementato l'efficienza del trasporto dei sedimenti dal 17% (senza bypass) fino a circa 88–89% con il sistema SBT. In tali condizioni è stato possibile ridurre di circa l'89% il potenziale accumulo di sedimenti, evitando una perdita di circa il 9% del volume utile dell'invaso (Dahal et al., 2025)

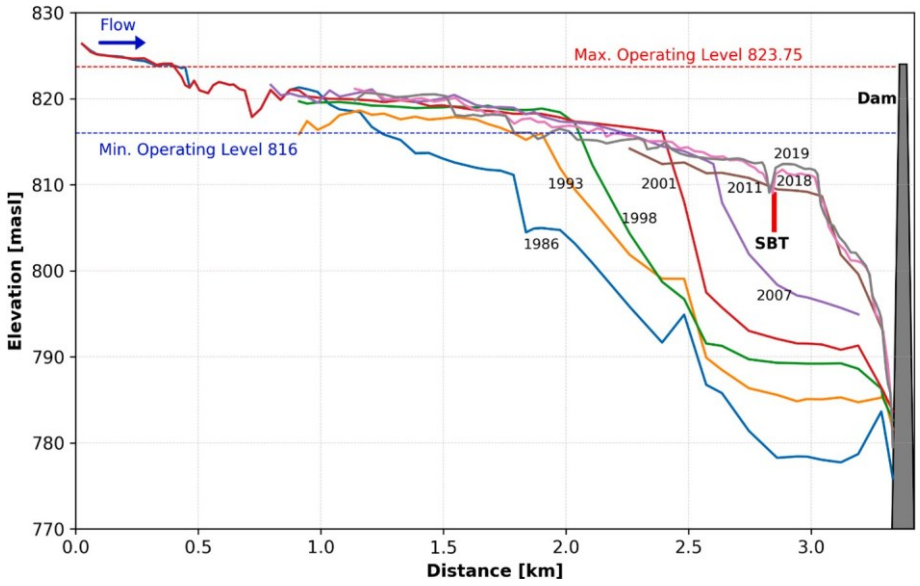


Figura 41 - Evoluzione temporale e spaziale del profilo longitudinale del letto del serbatoio di Solis (talweg) in diversi anni indicati (fonte dati: Dahal et al. (2025).

Un' altra possibile strategia da introdurre per rispondere alla crescente domanda di sabbia per scopi edili potrebbe essere rappresentata dall'utilizzo di materiali alternativi.

Secondo l'United Nations Environment Programme (UNEP), la gestione sostenibile della sabbia deve basarsi sui principi dell'economia circolare, attraverso la riduzione della domanda di materiali vergini, il riutilizzo dei prodotti da costruzione e l'introduzione di aggregati alternativi tecnicamente idonei. Tra le principali alternative individuate figurano gli aggregati riciclati provenienti dai materiali da demolizione, la roccia frantumata (*crushed rock*), il riutilizzo dei materiali derivanti dai processi edilizi e alcuni sottoprodotti industriali opportunamente trattati. Questi materiali possono sostituire parte della sabbia naturale utilizzata nella produzione di calcestruzzo, nelle infrastrutture stradali e nelle opere di riempimento, riducendo la necessità di prelievo dai sistemi fluviali attivi (UNEP, 2022)

Si ritiene che nel caso del sistema Mekong–Tonlè Sap, il ripristino delle condizioni di equilibrio del bilancio sedimentario richieda quindi un approccio

integrato che combini la regolamentazione dell'estrazione dei sedimenti con una gestione adattativa delle infrastrutture idroelettriche. Sebbene l'impatto principale nell'alterazione del meccanismo del "flood pulse" sia da imputarsi all'estrazione dei sedimenti dall'alveo; la sola riduzione del prelievo sedimentario non sarebbe sufficiente a mitigare gli effetti dell'abbassamento della quota dell'alveo del fiume Mekong e la conseguente riduzione del gradiente idraulico in rapporto al Tonlè Sap, dal momento che le dighe presenti nel bacino alterano profondamente la continuità del trasporto solido. Strategie quali il *sediment flushing*, i *sediment bypass tunnel* e una gestione coordinata degli invasi rappresentano possibili strumenti per aumentare il trasferimento dei sedimenti verso valle e limitare l'incisione dell'alveo del Mekong, contribuendo al mantenimento del regime idrologico stagionali.

La concreta attuazione di tali strategie deve poi fare i conti con le notevoli difficoltà di natura geopolitica. Il bacino del Mekong è condiviso da sei Paesi con priorità economiche, energetiche e politiche diverse. In particolare, la Cina, che controlla il tratto superiore del fiume (Lancang Jiang), ha realizzato negli ultimi decenni una serie di grandi impianti idroelettrici strategici per l'approvvigionamento energetico nazionale. Le modalità di gestione di tali infrastrutture rispondono principalmente a interessi nazionali e non sono soggette ai meccanismi decisionali della Mekong River Commission, di cui la Cina non è membro a pieno titolo.

Questo significa che nonostante la Cina controlli la porzione più a monte del Mekong, le decisioni operative sulle dighe non sono vincolate dagli accordi della Mekong River Commission (MRC). Istituito nel 1995 è il principale organismo internazionale incaricato della gestione condivisa delle risorse idriche del basso bacino del Mekong e ne fanno parte Cambogia, Laos, Thailandia e Vietnam, con l'obiettivo di promuovere uno sviluppo sostenibile del fiume attraverso la cooperazione tra gli Stati membri.

La Cina e il Myanmar non sono membri effettivi ma partecipano come Dialogo Partners dal 1996; collaborano con la Commissione attraverso lo scambio di dati e studi congiunti, senza essere giuridicamente vincolati dalle decisioni e

dalle procedure previste dal Mekong Agreement. (Mekong River Commission, 2024)

La Cina ha infatti realizzato diverse dighe nel tratto cinese del Mekong (Lancang), senza interpellare la MRC e senza porsi il problema del loro possibile impatto ambientale.

Qualsiasi strategia di ripristino del bilancio sedimentario in condizioni di equilibrio, richiede necessariamente un accordo politico tra tutti gli Stati interessati.

Di fondamentale importanza è la definizione, lungo tutto il bacino del Mekong, di obiettivi comuni di tutela, dei quantitativi massimi di estrazione e l'individuazione delle zone di particolare tutela.

In assenza di un'effettiva cooperazione, tra gli stati interessati, nella gestione del bacino, la realizzazione di tali misure appare, almeno nel breve periodo, complessa e frammentata. La conservazione del *flood pulse* e dell'equilibrio sedimentario dipenderà pertanto anche dalla capacità di detti Paesi di conciliare gli interessi energetici ed economici con la gestione sostenibile delle risorse condivise.

CONCLUSIONI

Dall'analisi sviluppata in questa tesi emerge che il sistema Mekong–Tonlè Sap rappresenta uno degli ecosistemi fluviali più complessi e produttivi del mondo, il cui equilibrio dipende dall'interazione tra processi climatici, antropici, idrologici, geomorfologici, sedimentari ed ecologici e geopolitici.

Nel tempo il meccanismo del *flood pulse* ha garantito l'apporto stagionale d' acqua, sedimenti e nutrienti tra il Mekong e il lago Tonlè Sap, consentendo la conservazione della biodiversità e dell'ecosistema, della fertilità delle pianure alluvionali e di una delle più importanti produzioni ittiche continentali del pianeta. Tuttavia, negli ultimi decenni questo equilibrio è stato profondamente alterato dall'azione congiunta delle attività antropiche e dei cambiamenti climatici.

La combinazione tra i cambiamenti climatici, che hanno prodotto modifiche nel regime delle precipitazioni e delle temperature e le numerose dighe costruite lungo il bacino del Mekong; che hanno ridotto il trasporto dei sedimenti verso valle, hanno profondamente modificando il naturale regime delle portate. L'intensa estrazione di sabbia dall'alveo ha accelerato l'abbassamento del letto del fiume Mekong, riducendo la sua capacità di alimentare il lago Tonlè Sap durante la stagione delle piene. Ed è proprio il Sand mining incontrollato nel bacino del Mekong il principale responsabile dell'alterazione dell'equilibrio tra il sistema Mekong – Tonlè Sap. La combinazione di tutti questi fenomeni ha determinato una progressiva attenuazione del flusso inverso (flood pulse) del fiume Tonlè Sap e una diminuzione dell'estensione e della durata delle inondazioni stagionali, con effetti a cascata sull'intero ecosistema.

Le conseguenze di tali processi portano alla riduzione della biodiversità, la diminuzione della produttività della pesca, l'impoverimento dei suoli agricoli, l'erosione delle sponde e del delta del Mekong, l'avanzamento del cuneo salino nelle zone del delta e una maggiore esposizione delle popolazioni agli eventi climatici estremi. Il cambiamento climatico amplifica ulteriormente tali criticità, modificando il regime delle precipitazioni, aumentando le temperature e rendendo sempre più frequenti periodi di siccità alternati ad eventi alluvionali intensi.

La tutela di questo patrimonio naturale è quindi non solo una priorità ambientale, ma anche una necessità economica e sociale dal momento che milioni di persone dipendono direttamente dai servizi ecosistemici forniti dal sistema Mekong–Tonlè Sap.

La sicurezza alimentare della Cambogia, la produzione agricola, la pesca e la stabilità delle comunità rurali risultano infatti strettamente legate al mantenimento del naturale funzionamento del sistema fluviale.

È necessario migliorare il coordinamento nella gestione delle dighe, limitare e regolamentare l'estrazione di sedimenti, favorire il ripristino del trasporto sedimentario, proteggere le foreste allagate e le zone umide del Tonlè Sap, promuovere l'impiego di materiali alternativi alla sabbia fluviale e rafforzare i sistemi di monitoraggio e di adattamento ai cambiamenti climatici.

Le possibili soluzioni richiedono un approccio integrato che coinvolga tutti i Paesi del bacino del Mekong, infatti, solo una gestione condivisa delle risorse, e l'individuazione degli obbiettivi minimi di tutela comuni, potrà garantire la conservazione del delicato equilibrio del sistema Mekong–Tonlè Sap e assicurare la disponibilità di usufruire dei servizi ecosistemici ad esso collegati anche alle generazioni future.

BIBLIOGRAFIA E OPERE CITATE

Arias, M. E., Cochrane, T. A., Lawrence, K. S., Killeen, T. J., & Farrell, T. A. (2012). Paying the ecological price for power: Hydropower dams in the Mekong flood pulse system. *Ambio*, 41(7), 682–694. https://doi.org/10.1007/s13280-012-0320-x

Arias, M. E., Holtgrieve, G. W., Ngor, P. B., Dang, T. D., & Piman, T. (2022). Hydrologic balance and inundation dynamics of Southeast Asia's largest inland lake altered by hydropower dams in the Mekong River Basin. *Science of the Total Environment*, 824, 153825. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153825

Baird, I. G. (2011). Turning land into capital, turning people into labour: Primitive accumulation and the arrival of large-scale economic land concessions in the Lao People's Democratic Republic. *New Proposals: Journal of Marxism and Interdisciplinary Inquiry*, 5(1), 10–26.

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, Article 180214. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

Campbell, I. C., Say, S., & Beardall, J. (2009). Tonle Sap Lake, the heart of the Lower Mekong. In I. C. Campbell (Ed.), *The Mekong: Biophysical Environment of an International River Basin* (1st ed., pp. 251–272). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374026-7.00010-3

Central Intelligence Agency. (2024). *The World Factbook: Cambodia*. Central Intelligence Agency. https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/cambodia/

Chandler, D. P. (2008). *A history of Cambodia* (4th ed.). Westview Press.

Christophe95. (2018). *Floating village on the Tonlé Sap* [File d'immagine]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Floating_village_on_the_Tonl%C3%A9_Sap.jpg

Dahal, S., Albayrak, I., & Boes, R. M. (2025). Effect of reservoir management on the efficiency of a sediment bypass tunnel: Case study of Solis Reservoir, Switzerland. *International Journal of Sediment Research*, 40(5), 100680. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2025.100680

Dahal, S., Boes, R. M., Evers, F. M., Albayrak, I., & Vetsch, D. F. (2025). Bypassing efficiency evaluation and optimization of sediment bypass tunnel operation in a narrow reservoir using 1D numerical modelling. *Journal of Hydro-Environment Research*, 60–61, 100668. https://doi.org/10.1016/j.jher.2025.100668

Dang, H., Pokhrel, Y., Shin, S., Stelly, J., Ahlquist, D., & Bui, D. D. (2022). Hydrologic balance and inundation dynamics of Southeast Asia's largest inland lake altered by hydropower dams in the Mekong River basin. *Science of the Total Environment*, 831, 154833. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154833

Dang, H., & Pokhrel, Y. (2024). Evolution of river regimes in the Mekong River Basin over 8 decades and the role of dams in recent hydrological extremes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(15), 3347–3365. https://doi.org/10.5194/hess-28-3347-2024

Encyclopaedia Britannica. (2024). *Cambodia*. Encyclopædia Britannica, Inc. https://www.britannica.com/place/Cambodia

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). *Cambodia country profile*. FAO. https://www.fao.org/countryprofiles/index/en/?iso3=KHM

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). *Irrigation in Southern and Eastern Asia in figures – AQUASTAT Survey 2011* (FAO Water Reports No. 37). FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *FAOSTAT statistical database*. FAO. https://www.fao.org/faostat/

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *FAOSTAT – Cambodia country profile*. FAO. https://www.fao.org/faostat/en/#country/115

General Department of Mineral Resources of Cambodia. (2024). Geology and geomorphological evolution of the Cambodian central basin [Rapporto tecnico].

Ministry of Mines and Energy. https://mme.gov.kh/about-us/our-organisations/general-departments/general-department-of-mineral-resources

Gupta, A. (2009). Geology and landforms of the Mekong Basin. In I. C. Campbell (Ed.), *The Mekong: Biophysical Environment of an International River Basin* (pp. 29–51). Academic Press. doi.org

Hackney, C. R., Darby, S. E., Parsons, D. R., Leyland, J., Best, J. L., Nicholas, A. P., & Aalto, R. (2020). River bank instability from unsustainable sand mining in the Lower Mekong River. *Nature Sustainability*, 3(3), 217–225. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0455-3

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H. Lee & J. Romero, Eds.). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

International Work Group for Indigenous Affairs. (2024). *The Indigenous World 2024: Cambodia*. IWGIA.

Japan Commission on Large Dams. (2005). *Sediment flushing at dams on the Kurobe River*. Paper presented at the 73rd Annual Meeting of the International Commission on Large Dams (ICOLD), Stavanger, Norway.

Juneng, L., & Tangang, F. T. (2005). Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in Southeast Asia and its relationship with atmosphere–ocean variations in the Indo-Pacific sector. *Climate Dynamics*, 25(4), 337–350. https://doi.org/10.1007/s00382-005-0031-6

Kanazawa, H. (2005). Comprehensive sediment management in the Kurobe River. In *Japan Commission on Large Dams (JCOLD), Proceedings of the EADC 2005*. JCOLD.

Kondolf, G. M., Rubin, Z. K., & Minear, J. T. (2014). Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resources Research*, 50(6), 5158–5169. https://doi.org/10.1002/2013WR014651

Kondolf, G. M., Schmitt, R. J. P., Carling, P., Darby, S., Arias, M. E., Bizzi, S., Castelletti, A., Cochrane, T. A., Gibson, S., Kummu, M., Oeurng, C., Rubin, Z., & Wild, T. (2018). Changing sediment budget of the Mekong: Cumulative threats and management strategies for a large river basin. *Science of the Total Environment*, 625, 114–134. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.361

Kummu, M., & Sarkkula, J. (2008). Impact of the Mekong River flow alteration on the Tonle Sap flood pulse. *Ambio*, 37(3), 185–192. https://doi.org/10.2134/ambio37.3.185

Kummu, M., Lu, X. X., Wang, J., & Varis, O. (2014). Basin-wide sediment trapping efficiency of emerging reservoirs along the Mekong. *Geomorphology*, 119, 181–197. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.018

LICADHO. (2023). *Land concessions and indigenous communities in Cambodia*. Cambodian League for the Promotion and Defense of Human Rights.

Mekong River Commission. (2005). *Overview of the hydrology of the Mekong Basin*. Mekong River Commission Secretariat.

Mekong River Commission. (2010). *State of the Basin Report 2010*. Mekong River Commission Secretariat. https://www.mrcmekong.org/

Mekong River Commission. (2021a). *Annual Mekong hydrology, flood and drought report 2019: Drought in the Lower Mekong Basin*. MRC Secretariat. https://doi.org/10.52107/mrc.ajutoy

Mekong River Commission. (2021b). *Basin Development Strategy 2021–2030*. MRC Secretariat.

Mekong River Commission. (2023). *State of the Basin Report 2023*. MRC Secretariat. https://doi.org/10.52107/mrc.c80wb7

Mekong River Commission. (2024). *Mekong River Basin 2023 State of the Basin Report*. MRC Secretariat. https://doi.org/10.52107/mrc.c3epe

Meshkova, L. V., & Carling, P. A. (2012). Geomorphology and channel network patterns of the Mekong River in Cambodia [Tesi di dottorato non pubblicata]. University of Southampton. https://eprints.soton.ac.uk/339991/ [1]

Metcalfe, I. (2013). Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66, 1–33. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.020

Milne, S. (2015). Cambodia's unofficial regime of extraction: Illicit logging in the shadow of transnational governance and investment. *Critical Asian Studies*, 47(2), 200–228. https://doi.org/10.1080/14672715.2015.1041278

Ministry of Mines and Energy. (2024). *Geological map*. General Department of Mineral Resources, Kingdom of Cambodia. https://mme.gov.kh/strategic-sectors/mining/potential-mineral-resources/geological-map

Morovati, K., Tian, F., Kummu, M., Shi, L., Tudaji, M., Nakhaei, P., & Olivares, M. A. (2023). Contributions from climate variation and human activities to flow regime change of Tonle Sap Lake from 2001 to 2020. *Journal of Hydrology*, 616, 128800. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128800

National Institute of Statistics. (2019). *General population census of the Kingdom of Cambodia 2019*. Ministry of Planning, Kingdom of Cambodia.

Neef, A., Touch, S., & Chiengthong, J. (2013). The politics and ethics of land concessions in rural Cambodia. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 26(6), 1085–1103. https://doi.org/10.1007/s10806-013-9446-y

Ng, W. X., & Park, E. (2021). Shrinking Tonlé Sap and the recent intensification of sand mining in the Cambodian Mekong River. *Science of the Total Environment*, 777, 146180. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146180

NGO Forum on Cambodia. (2015). *Communal land titling in Cambodia: A review of progress and challenges*. NGO Forum on Cambodia.

Park, E. (2024). Sand mining in the Mekong Delta: Extent and compounded impacts. *Science of the Total Environment*, 924, 171620. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171620

Quan, L. Q., Hackney, C. R., Vasilopoulos, G., Coulthard, T., Hung, N. N., Darby, S. E., & Parsons, D. R. (2025). Sand-mining-driven reduction in Tonle Sap Lake's critical flood pulse. *Nature Sustainability*, 8(12), 1455–1466. https://doi.org/10.1038/s41893-025-01677-8

Räsänen, T. A., Lehr, C., Mellin, I., Piman, T., & Kummu, M. (2013). Spatiotemporal influences of ENSO on precipitation and flood pulse in the Mekong River Basin. *Journal of Hydrology*, 476, 154–168. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.028

Royal Government of Cambodia. (2001). *Land Law (2001)*. Kingdom of Cambodia.

Seng, C., Seang, S., Kret, K., Hlaing, M. K., & Sam, R. (2024). Petrography and geochemistry of basaltic rock in Mondulkiri and Ratanakiri Province, Northeast Cambodia. *Journal of Earth Resources Engineering*, *12*(1), 45–58. doi.org

Simons, W. J. F., Socquet, A., Vigny, C., Ambrosius, B. A. C., Abu, S. H., Promthong, C., Subarya, C., Sarsito, D. A., Matheussen, S., Morgan, P., & Spakman, W. (2007). A decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sundaland motion and boundaries. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *112*(B6), Article B06420. doi.org

Sok, T., Oeurng, C., Kaing, V., Sauvage, S., Kondolf, G. M., & Sánchez-Pérez, J. M. (2021). Assessment of suspended sediment load variability in the Tonle Sap and Lower Mekong Rivers, Cambodia. *CATENA*, 202, 105291. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105291

Sutton, W. R., Srivastava, J. P., Koo, J., Vasileiou, I., & Pradesha, A. (2019). *Striking a balance: Managing El Niño and La Niña in Cambodia's agriculture*. World Bank. https://doi.org/10.1596/31333

Try, S., Sayama, T., Rom Phy, S., Sok, T., Ly, S., & Oeurng, C. (2023). Assessing the impacts of climate change and dam development on potential flood hazard and damages in the Cambodian floodplain of the Lower Mekong Basin. *Journal of*

Hydrology: Regional Studies, 49, 101508. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101508

UNESCO. (2024). *Tonle Sap Biosphere Reserve*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. https://www.unesco.org/en/mab/tonle-sap

United Nations Environment Programme. (2022). *Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis*. UNEP / GRID-Geneva. https://www.unep.org/resources/report/sand-and-sustainability-10-strategic-recommendations-avert-crisis

United Nations. (2024). *World population prospects 2024*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

United Nations. (2025). *UN Comtrade Database: United Nations Commodity Trade Statistics Database*. United Nations. https://comtradeplus.un.org/

Wang, B., Wu, R., & Fu, X. (2000). Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *Journal of Climate*, 13(9), 1517–1536. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2

White, P. F., Dobermann, A., Oberthür, T., & Ros, C. (2000). The rice soils of Cambodia. I. Soil classification for agronomists using the Cambodian Agronomic Soil Classification system. *Soil Use and Management*, *16*(1), 12–19. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2000.tb00164.x

World Bank. (2017). *Cambodia – Sustaining strong growth for the benefit of all* (Systematic Country Diagnostic No. 115189). World Bank Group. https://hdl.handle.net/10986/27149

World Bank Group, & Asian Development Bank. (2021). *Climate risk country profile: Cambodia*. World Bank Group. https://doi.org/10.1596/36380

World Bank. (2022). *World development indicators: Cambodia*. World Bank Group. https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators

World Bank. (2023). *The World Bank in Cambodia: Overview*. World Bank Group. https://www.worldbank.org/en/country/cambodia/overview

World Bank. (2024a). *Cambodia country climate and development report*. World Bank Group. https://hdl.handle.net/10986/41120

World Bank. (2024b). *Climate risk country profile: Cambodia*. Climate Change Knowledge Portal, World Bank Group. https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/cambodia

World Bank. (2025). *World Integrated Trade Solution (WITS): UN Comtrade trade data for Cambodia (HS 250590)*. World Bank Group. https://wits.worldbank.org/

World Bank. (2026). *Cambodia Trade Statistics: Export of HS Code 250590 – Natural sands, other than metal-bearing*. World Integrated Trade Solution (WITS). World Bank. Consultato il 26 agosto 2026, da World Integrated Trade Solution (WITS)

World Customs Organization. (2022). *HS Nomenclature 2022 edition*. World Customs Organization. https://www.wcotradetools.org

Worldometer. (2024). *Cambodia population (Live)*. Worldometer. https://www.worldometers.info/world-population/cambodia-population/

RINGRAZIAMENTI

Desidero esporre la mia profonda gratitudine alla Professoressa Alessandra Negri, per avermi guidato con grande passione e disponibilità. La sua supervisione è stata fondamentale per la stesura di questo lavoro.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, che mi ha sostenuto e supportato, non senza sacrifici, lungo questo cammino. È stato un impegnativo ma meraviglioso viaggio.

Spero che anche tu, Mattia, non smetta mai di esplorare il mondo con occhi colmi di meraviglia e che ti possa ritrovare ogni volta sorpreso a guardarlo con occhi diversi. Ricorda sempre che il sapere è un tesoro che nessuno potrà mai portarti via. Studia per capire, studia per essere libero.