

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE E DEI
MATERIALI – DICAM**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER
L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO**

TESI DI LAUREA

in

Gestione delle risorse idriche M

**EVOLUZIONE SPAZIO–TEMPORALE DELLA DISTRIBUZIONE
DELLA POPOLAZIONE NEL BACINO DEL LIMPOPO IN RELAZIONE A
EVENTI DI SICCIÀ**

CANDIDATA:

Valeria Amelii

RELATORE:

Chiara.ma Prof. Serena Ceola

CORRELATORI:

Prof. Ing. Giuliano di Baldassarre

Dott.ssa Johanna Mård

Anno Accademico 2017/18

Sessione III

*L'acqua, come la religione e l'ideologia,
ha il potere di muovere milioni di persone.*

*I popoli si spostano quando l'acqua
è troppo scarsa e quando ce n'è troppa.*

I popoli viaggiano sull'acqua.

*I popoli scrivono, cantano, danzano
e sognano l'acqua.*

Mikhail Gorbaciov

Indice

1. INTRODUZIONE.....	13
2. MATERIALI E METODI.....	17
2.1 Analisi dei dati di portata relativi al fiume Limpopo.....	19
2.1.1 Scelta degli anni siccitosi più significativi per il bacino del Limpopo da bibliografia.....	23
2.1.2 Calcolo dell'indicatore di siccità idrologica SRI (Standardized Runoff Index).....	25
2.2 Identificazione del bacino idrografico e del relativo reticolo del fiume Limpopo dal database HydroSHEDS	28
2.3 Dati di popolazione	30
2.3.3 Dati sulla densità di popolazione (GHS POP Data) reperiti dal database europeo GHSL	37
2.4 Identificazione delle classi di distanza all'interno del bacino del Limpopo.....	44
2.4.1 Individuazione delle classi di distanza planimetriche.....	44
2.4.2 Individuazione delle classi di distanza altimetriche.....	52
2.5 Analisi di distribuzione spaziale della popolazione e di evoluzione temporale della distanza media dal Limpopo	56
3. CASO DI STUDIO: IL BACINO DEL FIUME LIMPOPO	62
4. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	66
4.1 Analisi planimetrica della distribuzione della popolazione	67
4.1.2 Risultati relativi ai dati sulla percentuale di edificato (BU)	69
4.1.3 Risultati relativi ai dati di densità di popolazione (GHS POP).....	70
4.1.4 Risultati relativi ai dati di densità di popolazione (GPW)	72
4.2 Analisi altimetrica della distribuzione della popolazione	74
4.2.1 Risultati relativi ai dati di luminosità artificiale notturna (NL)	74

4.2.2	Risultati relativi ai dati sulla percentuale di edificato (BU)	75
4.2.3	Risultati relativi ai dati di densità di popolazione (GHS POP).....	76
4.2.4	Risultati relativi ai dati di densità di popolazione (GPW)	77
4.3	Correlazione tra l'indice di siccità idrologica SRI e la distanza umana media relativa ai dati di luminosità (NL)	78
4.3.1	Stazione di Combomune (E-33).....	80
4.3.2	Stazione di Chókwe (E-35).....	84
4.3.3	Stazione di Rio Dos Elefantes (E-607)	87
5.	CONCLUSIONI E PREVISIONI FUTURE.....	90
6.	BIBLIOGRAFIA.....	96
	Appendice A: Esempio di codice Matlab utilizzato per l'analisi planimetrica della distribuzione della popolazione nel bacino del Limpopo (dati di Built-up)	99
	Appendice B: esempio di codice Matlab utilizzato per l'analisi altimetrica della distribuzione della popolazione nel bacino del Limpopo in relazione ad eventi di siccità (dati di Built-up)	102

Indice delle Figure

Figura 1. Collocazione geografica delle stazioni di misura dei dati di portata per il fiume Limpopo – Fonte: Google Earth.	19
Figura 2. Andamento temporale dei valori di portata nella stazione di Combomune, dal 1° Febbraio 1966 al 31 Agosto 2011.	20
Figura 3. Andamento temporale dei valori di portata nella stazione di Combomune, dal 1° Ottobre 1999 al 30 Aprile 2013.	20
Figura 4. Andamento temporale dei valori di portata nella stazione di Chókwè, dal 20 Giugno 1952 al 31 Maggio 2011.	21
Figura 5. Andamento temporale dei valori di portata nella stazione di Rio Dos Elefantes dal 20 Giugno 1951 al 31 Maggio 2011.	22
Figura 6. Andamento dei valori di SRI (1,3,6 e12 mesi) dal 1980 al 2010, calcolati a partire da dati di deflusso simulati in una stazione di misura (n° 24) all'interno del bacino del Limpopo – Fonte: P. Trambauer et al., 2014.	27
Figura 7. Bacino e reticolo idrografico del fiume Limpopo – Fonte: Lehner et al., 2008.	29
Figura 8. Immagine satellitare a copertura globale dei dati di luce del 1994-1995 – Fonte: Data courtesy Marc Imhoff of NASA GSFC and Cristopher Elvidge of NOAA NGDC. Image by Craig Mayehew and Robert Simmon, NASA GSFC.	32
Figura 9. Dati di luminosità artificiale notturna nel bacino del fiume Limpopo. Nel pannello (a) è riportata l'immagine relativa ai dati di luce del 1992. Nel pannello (b) si mostra l'immagine relativa ai dati di luce del 2013. Nel pannello (c) è stato riportato uno zoom di un'immagine dei dati di luce, in cui si mostrano i pixel contenenti i Digital Number da 0 a 63, come risulta dalla legenda.	33
Figura 10. Rappresentazione del metodo utilizzato dal GHSL, per estrarre le informazioni riguardanti le aree Built-up, a partire dalle immagini satellitari – Fonte: European Commission, Global Human Settlement.	35
Figura 11. Dati di built-up nel bacino del fiume Limpopo. Nel pannello (a) è riportata l'immagine relativa ai dati Built-up del 1975. Nel pannello (b) si mostra l'immagine corrispondente ai dati di luce del 2014. Nel pannello (c) è stato riportato uno zoom di un'immagine dei dati di luce, in cui si mostrano i pixel contenenti i Digital Number da 0 a 1.	36

Figura 12. Rappresentazione del metodo utilizzato dal GHSL per estrarre le informazioni riguardanti la densità di popolazione (GHS POP) a partire dai dati di Built-up – Fonte: European Commission, Global Human Settlement.	38
Figura 13. Immagine relativa ai dati di densità di popolazione, derivanti dai dati di GHS POP del Portale Europeo, riguardante l’anno 2015.	39
Figura 14. Immagine relativa ai dati di densità, derivanti dalla stima della popolazione (<i>The Gridded Population of The World</i>), nella sua quarta versione (GPWv4), per l’anno 2000.	43
Figura 15. Zone concentriche che individuano le 11 classi di distanza planimetrica (da dist-0 a dist-10).	45
Figura 16. Determinazione della reale distanza euclidea (True Euclidean Distance) – Fonte: ArcGis for Desktop Help	49
Figura 17. Illustrazione della funzione “Euclidean Distance” in ArcGis, dal file raster di origine (Source_Ras) al file di output (Euc_Dist) – Fonte: ArcGis for desktop Help.....	49
Figura 18. Rappresentazione della divisione in classi di distanza planimetriche all’interno del bacino del Limpopo.	50
Figura 19. Nel pannello (a) è riportato uno zoom relativo all’immagine risultante dalla classe dist-0, che sta a rappresentare il reticolo idrografico del Limpopo. Nel pannello (b) si mostra l’immagine ingrandita corrispondente alla classe di distanza 3, così come nel pannello (c) è rappresentata la classe dist-6 ed infine nel pannello (d) la classe di distanza 9.....	51
Figura 20. Illustrazione della funzione “Euclidean Allocation” in ArcGis, dal file raster di origine (Source_Ras) al file di output (Euc_Alloc) – Fonte: ArcGis for desktop Help.....	53
Figura 21. Rappresentazione della divisione in classi di distanza altimetrica, all’interno del bacino del Limpopo.	54
Figura 22. Nel pannello (a) è riportata l’immagine relativa alla classe di distanza altimetrica 1 e nel pannello (b) quella corrispondente alla dist_alt-7.....	55
Figura 23. Nel pannello (a) è riportata la matrice che identifica il fiume con la classe dist-0 e le altre classi fino alla dist-5. Nel pannello (b) sono riportati i valori di una matrice 10x10 estratta dai valori di Built-up del 1975.	60

Figura 24. Il bacino del fiume Limpopo e la sua collocazione geografica – Fonte: P. Trambauer et al., 2014.....	62
Figura 25. Andamento medio negli anni dei dati di luminosità artificiale notturna (AONL_plan) per ogni classe di distanza (da dist-0 a dist-10), a livello planimetrico.	67
Figura 26. Evoluzione temporale dal 1992 al 2013 della distanza degli insediamenti umani dal Limpopo, a livello planimetrico, ricavata dai dati di luminosità artificiale notturna (NL).	68
Figura 27. Andamento medio dei dati sulla percentuale di edificato (AOBU_plan) per ogni classe di distanza (da dist-0 a dist10), a livello planimetrico negli anni: 1975, 1990, 2000 e 2014.....	69
Figura 28. Evoluzione temporale della distanza degli insediamenti umani dal Limpopo, a livello planimetrico, ricavata dai dati sulla percentuale di edificato (BU), per gli anni: 1975, 1990, 2000 e 2014.....	70
Figura 29. Andamento medio dei dati di densità di popolazione (AOGHS_plan), per ogni classe di distanza (da dist-0 a dist-10), a livello planimetrico negli anni: 1975, 1990, 2000 e 2015.....	70
Figura 30. Evoluzione temporale della distanza degli insediamenti umani dal Limpopo, a livello planimetrico, ricavata dai dati sulla densità di popolazione (GHS POP) per gli anni: 1975, 1990, 2000 e 2015.	71
Figura 31. Andamento medio dei dati di densità di popolazione (AOGPW_plan), per ogni classe di distanza (da dist-0 a dist10), a livello planimetrico negli anni: 2000, 2005, 2010 e 2015.....	72
Figura 32. Evoluzione temporale della distanza degli insediamenti umani dal Limpopo, a livello planimetrico, ricavata dai dati sulla densità di popolazione (GPW) per gli anni: 2000, 2005, 2010 e 2015.....	73
Figura 33. Andamento medio dei dati di luminosità artificiale notturna (NL) dal 1992 al 2013, per le classi di distanza da dist_alt-1 a dist_alt-7, a livello altimetrico.	74
Figura 34. Andamento medio dei dati sulla percentuale di edificato per le classi di distanza da dist_alt-1 a dist_alt-7, a livello altimetrico negli anni: 1975, 1990, 2000 e 2014.	75

Figura 35. Andamento medio dei dati di densità di popolazione GHS POP per le classi di distanza da dist_alt-1 a dist_allt-7, a livello altimetrico negli anni: 1975, 1990, 2000 e 2015.....	76
Figura 36. Andamento medio dei dati di densità di popolazione GPW per le classi di distanza da dist_alt-1 a dist_alt-7, a livello altimetrico negli anni: 2000, 2005, 2010, 2015.....	77
Figura 37. Collocazione geografica delle stazioni di misura, in funzione della classificazione dei climi di Köppen – Fonte: Limpopo RAK.....	79
Figura 38. Correlazione tra l'indice standardizzato di deflusso SRI e la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità (dist_SONL) nella stazione di Combomune (E-33) dal 1992 al 2011.	80
Figura 39. Andamento dell'indice di siccità SRI nel periodo che va dal 1992 al 2011 nella stazione di Combomune (E-33).	81
Figura 40. Andamento della distanza umana media (dist_SONL) nel periodo che va dal 1992 al 2011 nella stazione di Combomune (E-33), confrontata con l'andamento della media delle distanze ricavate dai dati di luminosità (NL).....	81
Figura 41. Correlazione tra l'indice standardizzato di deflusso SRI e la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità (dist_SONL) nella stazione di Combomune (E-33) dal 1999 al 2013.	82
Figura 42. Andamento dell'indice di siccità SRI nel periodo che va dal 1999 al 2013 nella stazione di Combomune (E-33).	83
Figura 43. Andamento della distanza umana media (dist_SONL) nel periodo che va dal 1999 al 2013 nella stazione di Combomune (E-33), confrontata con l'andamento della media delle distanze ricavate dai dati di luminosità (NL).....	83
Figura 44. Correlazione tra l'indice standardizzato di deflusso SRI e la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità (dist_SONL) nella stazione di Chókwe (E-35) dal 1992 al 2011.....	84
Figura 45. Andamento dell'indice di siccità SRI nel periodo che va dal 1992 al 2011 nella stazione di Chókwe (E-35).....	86
Figura 46. Andamento della distanza umana media (dist_SONL) nel periodo che va dal 1992 al 2011 nella stazione di Chókwe (E-35), confrontata con l'andamento della media delle distanze ricavate dai dati di luminosità (NL).	86

Figura 47. Correlazione tra l'indice standardizzato di deflusso SRI e la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità (dist_SONL) nella stazione di Rio Dos Elefantes (E-607) dal 1999 al 2013.87

Figura 48. Andamento dell'indice di siccità SRI nel periodo che va dal 1999 al 2013 nella stazione di Rio Dos Elefantes (E-607)89

Figura 49. Andamento della distanza umana media (dist_SONL) nel periodo che va dal 1999 al 2013 nella stazione di Rio Dos Elefantes (E-607), confrontata con l'andamento della media delle distanze ricavate dai dati di luminosità (NL).....89

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Tabella riassuntiva degli anni più siccitosi ricavati dall' analisi dei dati di portata, nelle tre stazioni di misura.	23
Tabella 2. Tabella per la classificazione del tipo di siccità in funzione dei valori di SPI/SRI – Fonte: McKee et al., 1993.	26
Tabella 3. Risoluzioni equivalenti in secondi, minuti, gradi e km – Fonte: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).	41
Tabella 4. Valori di riferimento in gradi e km per ogni classe di distanza planimetrica.	46
Tabella 5. Matrice simmetrica completa dei valori in gradi, appartenenti alle classi di distanza.	47
Tabella 6. Intervalli di riferimento a livello planimetrico per ogni classe, espressi in gradi.	48
Tabella 7. Intervalli di riferimento a livello altimetrico per ogni classe, espressi in metri.	52
Tabella 8. Denominazione delle grandezze calcolate, in funzione del tipo di dato. In Tabella (a) sono riportate le sigle per identificare le grandezze riguardanti i dati di luce (Nightlight). In Tabella (b) le sigle che identificano le grandezze ricavate dai dati sulla percentuale di edificato (BU), in tabella (c) si trovano le sigle per quanto riguarda i dati di densità di popolazione GHS POP, del Portale Europeo ed infine in tabella (d) le sigle che si riferiscono ai dati sulla densità di popolazione dei dati GPW, gestiti dalla NASA.	58
Tabella 9. Esempio di calcolo di $SOL_j(x,t)$, $SOL_{TOT}(x,t)$, $AOL_j(x,t)$, $dsOL(x,t)$ per una matrice 10x10, estratta dai dati di Built-up del 1975.	61
Tabella 10. Tabella riassuntiva delle aree e delle percentuali di Bacino occupate nei 4 Paesi – Fonte: LBPTC 2010.	63
Tabella 11. Valori di precipitazione annuale (mm) per Paese, nel bacino del fiume Limpopo – Fonte: CGIAR 2003.	64

1. INTRODUZIONE

Un disastro naturale è definito come un qualsiasi processo che avviene in natura, in grado di produrre un pericolo per la vita umana e le infrastrutture. Fenomeni naturali come terremoti ed eruzioni vulcaniche, provocati dall'interno della crosta terrestre, non sono in alcun modo prevedibili ed influenzati dalle attività umane. Eventi idrologici, quali inondazioni e condizioni siccitose, sono invece influenzati da diversi fattori, tra cui la crescita esponenziale della popolazione, che non è chiaramente possibile limitare in alcun modo, ed i cambiamenti climatici in corso, che stanno avendo un sempre maggiore impatto su milioni di persone, andando a danneggiare la produzione alimentare e minacciando specie di importanza vitale [Di Baldassarre, 2017]. Tali eventi idrologici coinvolgono più di 100 milioni di persone l'anno in tutto il mondo, provocando circa 25 000 vittime e fino a 15 miliardi di danni economici in media ogni anno.

Ricerche sui cambiamenti climatici [IPCC, 2014] suggeriscono che in molte regioni del mondo potrebbero verificarsi, nel prossimo futuro, condizioni prolungate di siccità seguite da eventi alluvionali estremi. In particolare, il continente destinato a subire sempre più frequenti e diffusi eventi catastrofici di tipo idrologico e climatologico risulta essere l'Africa, già in condizioni di vita precarie. Una serie di studi recenti [Di Baldassarre et al., 2010; Winsemius et al., 2015], hanno dimostrato, ad esempio, che la crescita della popolazione nelle aree di pianure alluvionali è stato il principale motivo del crescente rischio di alluvione in Africa, mentre il cambiamento climatico ha finora giocato un ruolo minore. Tutto ciò ha portato a credere sempre di più alla teoria che come la società influenza e forma le caratteristiche degli eventi alluvionali, anch'essi (a loro volta) formano la società in termini di istituzioni, governi e demografia [e.g., Myers et al., 2008]. Infatti, in seguito all'impatto di eventi alluvionali, la popolazione coinvolta risponde e si adatta agli estremi idrologici attraverso una combinazione di processi spontanei e di strategie, che può portare a cambiamenti nella vulnerabilità della società stessa. Tra questi processi rientra, ad esempio, la scelta di migrare temporaneamente o in modo permanente, allontanandosi dalle zone classificate come a rischio e quindi più prossime ai fiumi. Gli studi effettuati finora si sono focalizzati principalmente sulle alluvioni, non considerando pertanto l'ipotesi plausibile che, in alcuni casi, il cambiamento climatico potrebbe aver portato a condizioni di siccità più lunghe e più gravi, che a loro volta hanno aumentato il bisogno delle comunità di avvicinarsi ai fiumi, rendendole maggiormente esposte alle inondazioni.

Per cui, dopo l'analisi della coevoluzione di inondazioni e società, c'è la necessità di collegare le alluvioni a ricerche antropiche sulla siccità. Tale necessità nasce dal fatto che non sono ancora note le dinamiche per cui diverse sequenze di eventi siccitosi ed inondazioni possano influenzare le dinamiche di rischio idrogeologico. Questa ricerca offre, dunque, un approfondimento sulla modellazione di società ed eventi di siccità e rappresenta un tentativo che permette di comprendere come affrontare in modo ottimale problemi di questo tipo, in Paesi in via di sviluppo come l'Africa, nonostante le criticità legate all'incremento della popolazione e al degrado ambientale.

Generalmente, la siccità viene definita come un deficit di risorsa idrica rispetto a normali condizioni. Ciò che dovrebbe essere considerato "normale" dipende fortemente dall'uso che si fa dell'acqua e poiché tale risorsa è utilizzata in diversi settori, la siccità ha una vasta gamma di impatti ed è per questo che la definizione varia in funzione di tali effetti e non ne esiste una universale [Van Loon, 2015]. A scala globale, l'impatto complessivo della siccità è testimoniato da una serie di dati storici che suggeriscono che nel periodo compreso tra il 1900 ed il 2013 si sono verificati 642 eventi di siccità in tutto il mondo, con un totale di 12 milioni di vittime e 135 miliardi di danni economici [EM-DAT, 2014]. La siccità è tutt'oggi considerata un grave disastro che causa enormi danni all'umanità, all'ambiente e all'economia, nonostante i notevoli progressi in materia di monitoraggio, previsione e mitigazione in tutto il mondo. La mancanza di successo nell'impiego di tali misure può essere attribuita a diverse ragioni, tra cui il fatto che la siccità è un fenomeno molto complesso che varia, di volta in volta, in termini di data d'inizio, intensità, durata e copertura geografica. È proprio per questo che la consapevolezza del rischio delle persone può essere limitata, anche in funzione di carenze normative da parte dei governi, i quali non intervengono con provvedimenti finanziari e istituzionali, al fine di fornire misure di mitigazione a lungo termine [Masih et al., 2014].

L'impatto futuro di eventi di tipo idrologico dipenderà sempre più dal modo in cui le società si adatteranno e risponderanno al verificarsi di eventi di grande portata e sul metodo di gestione del rischio che decideranno di adottare. L'opzione risolutiva di ricollocazione della popolazione lontano da zone a rischio, pianificando rifugi o migrazioni permanenti, se da un lato ha il vantaggio di proteggere gli abitanti da future alluvioni, dall'altro lato, li espone maggiormente al pericolo della siccità, che si estende su scale temporali maggiori rispetto a quelle caratteristiche degli eventi alluvionali e può provocare gravi danni a lungo termine legati alla malnutrizione, alla salute e alla degradazione del suolo. È quindi urgente e necessario progredire su vari fronti di mitigazione della siccità, come la previsione e il cosiddetto "early warning", ponendo le basi per il raggiungimento di società resilienti.

L'obiettivo di questo elaborato è innanzitutto quello di verificare se il fenomeno della migrazione, ampiamente diffuso in caso di inondazioni, si verifichi in senso opposto anche nel caso di eventi siccitosi con un riavvicinamento ai fiumi, dettato dal fatto che con il tempo avviene il decadimento della cosiddetta "memoria sociale", legata all'esperienza di eventi alluvionali [Di Baldassarre, 2017]. In particolare, verrà preso in considerazione uno dei bacini idrografici più grandi del Sud dell'Africa, il Bacino del Limpopo, il secondo fiume per lunghezza dell'Africa australe. Il clima prevalentemente arido limita notevolmente la disponibilità di risorsa idrica all'interno del bacino: le precipitazioni medie a lungo termine risultano infatti di gran lunga inferiori ai valori di evaporazione potenziale. Inoltre, il bacino del Limpopo è influenzato dalle attività antropiche legate all'utilizzo di risorsa idrica che limitano ulteriormente la disponibilità d'acqua.

L'impiego di immagini satellitari contenenti informazioni riguardanti la distribuzione spaziale della popolazione, espressa attraverso dati di luminosità artificiale notturna, densità abitativa e percentuale di edificato, permetterà di valutare la distribuzione degli insediamenti umani durante lunghi periodi di siccità, cercando di comprendere il modo in cui gli uomini si adattano e reagiscono ad eventi di questo genere. L'analisi verrà effettuata studiando l'evoluzione temporale della distanza dai corsi d'acqua sia a livello planimetrico che altimetrico, data la geomorfologia del territorio all'interno dell'area di studio, in cui alcuni punti raggiungono anche i 2000 metri di quota.

La combinazione tra i diversi tipi di dati e gli approcci considerati permetterà dunque di effettuare uno studio a larga scala in grado di conservare una buona risoluzione e allo stesso tempo di ottenere una conoscenza precisa sul legame tra i fenomeni di siccità e le dinamiche di sviluppo antropico. È infatti importante capire che è proprio a partire dalla comprensione delle abitudini e dei meccanismi di difesa attuati dalla popolazione dopo tali eventi, che si può giungere a metodi risolutivi efficaci che possano migliorare la qualità di vita delle persone, anche a lungo termine. Nello specifico, il lavoro di tesi si articola come segue:

- Nel *secondo capitolo*, che segue questa introduzione, vengono mostrati tutti i materiali ed i metodi utilizzati. Vengono presentati i dati di portata utilizzati per l'identificazione degli anni più siccitosi all'interno del bacino del Limpopo, nonché il reticolo idrografico ed il bacino afferente del Limpopo, reperito dal database HydroSHEDS. A seguire, vengono presentati i diversi tipi di dati riguardanti la popolazione ed il metodo utilizzato per la divisione in classi di distanza, sia dal punto di vista planimetrico che altimetrico. Il capitolo termina poi con la spiegazione del metodo applicato per effettuare l'analisi di distribuzione spaziale della popolazione e di evoluzione temporale della distanza media dal Limpopo.
- Nel *terzo capitolo*, è descritto il bacino del Limpopo in merito all'estensione e alla collocazione geografica, alla geomorfologia ed al clima, alle precipitazioni medie annue e agli utilizzi del suolo, con un focus sugli eventi alluvionali e siccitosi verificatisi nel corso degli anni e alle politiche adottate per la gestione e la prevenzione di tali fenomeni.
- Nel *quarto capitolo*, che si colloca subito prima delle conclusioni, sono riportati i risultati più significativi, ottenuti dall'analisi dell'evoluzione spazio-temporale di distribuzione della popolazione sia a livello planimetrico che altimetrico, per tutte le tipologie di dati prese in considerazione. In seguito, verrà mostrata la correlazione tra l'indice di siccità idrologica SRI e la distanza media degli insediamenti umani dal fiume, per i dati di luminosità artificiale notturna, da poter confrontare con i risultati mostrati precedentemente.

2. MATERIALI E METODI

Per meglio comprendere i cambiamenti spazio-temporali legati ai rischi di natura idrologica e climatologica, è necessario determinare il modo in cui la popolazione decide di affrontare tali pericoli. Innanzitutto, è importante capire quali siano stati gli anni più drastici per quanto riguarda gli eventi siccitosi, all'interno del bacino del Limpopo. A tale scopo è stata effettuata una valutazione dei dati di portata relativi al fiume considerato, provenienti da tre stazioni di misura differenti. L'analisi è stata svolta considerando un intervallo temporale che va dal 1951 al 2013, estraendo così gli anni corrispondenti ai valori più bassi di portata. I risultati ottenuti sono stati, inoltre, confrontati con gli anni ritenuti più siccitosi da bibliografia ed estratti dal database DEWFORA (*Drought Early Warning and FORecasting*). Si è poi passati al calcolo di un indicatore di siccità idrologica, il cosiddetto Standardized Runoff Index, SRI, per poter identificare il tipo di siccità registrata negli anni individuati e permettere una successiva valutazione del legame tra tale indicatore e l'evoluzione della distanza umana media dal fiume Limpopo.

Dopo di che, si è giunti all'identificazione del bacino e del reticolo idrografico del fiume Limpopo, attraverso il portale HydroSHEDS, ad una risoluzione di 30 secondi di grado. Il reticolo idrografico è stato definito considerando come pixel canalizzati solamente quei pixel con un valore minimo di area contribuyente pari a 5000 km², a monte del bacino. Dallo stesso Portale è stato inoltre estratto il modello digitale di elevazione (DEM), che servirà per l'analisi altimetrica.

A questo punto, è stato necessario scegliere i dati che meglio caratterizzassero l'obiettivo, ossia quello di valutare quanto la popolazione si fosse realmente avvicinata al fiume Limpopo nei periodi più siccitosi, in contrasto con l'allontanamento che avviene nel caso delle alluvioni. In tale contesto, i dati di luminosità artificiale notturna misurata da satellite possono essere utilizzati per studiare il rapporto tra i cambiamenti a lungo termine degli spostamenti della popolazione rispetto ai fiumi ed il verificarsi di eventi catastrofici. Si tratta di dati di luminosità artificiale rilevati di notte, provenienti da centri abitati e attività produttive, disponibili per un orizzonte temporale compreso tra il 1992 e il 2013. Tali valori permettono di identificare l'evoluzione temporale della distribuzione spaziale di insediamenti umani e di attività economiche nelle vicinanze di un fiume.

Oltre ai dati di luminosità artificiale notturna, sono stati presi in esame anche alcuni dati provenienti dal progetto GHSL (*Global Human Settlement Layer*), sostenuto dalla Commissione Europea che si avvale di nuove tecnologie per la produzione automatica di dati globali di presenza umana, provenienti da satelliti, da censimenti e da dati volontari di informazione geografica. La metodologia generale che sta alla base del progetto GHSL introduce i concetti di BUILT-UP GHS e GHS POP, entrambi considerati nella seguente ricerca. I dati Built-up (aree edificate), sono misurati direttamente da Landsat, una costellazione di satelliti per il telerilevamento e stanno ad indicare la percentuale di edificato all'interno dell'area che si vuole considerare. A partire da ciò, il metodo GHS combina le informazioni provenienti dal censimento della popolazione con i built-up in una griglia ad 1 km di risoluzione, a seconda della presenza o meno di costruzioni nella cella. Le informazioni combinate sfociano in un nuovo prodotto, sempre ad 1 km di risoluzione, conosciuto come GHS POP, in cui POP sta per "population grid", che ignora i confini amministrativi e rappresenta la densità di popolazione.

Altre informazioni significative sulla densità di popolazione, che sono state prese in considerazione, derivano dal dataset GPW (*Gridded Population of the World*), nato per la prima volta come conseguenza di un Workshop demografico globale, tenutosi alla CIESIN (*Center for International Earth Science Information Network*) della Columbia University, nel 1994. I dati ricavati, ad 1 km di risoluzione, stanno ad indicare la densità di popolazione e gli input essenziali dai quali sono estratti, sono tabelle di censimento della popolazione e confini geografici corrispondenti. Lo scopo, in questo caso, è quello di fornire dati di popolazione disaggregati nello spazio, compatibili con insiemi di dati provenienti da discipline sociali, economiche, di telerilevamento e nell'ambito delle scienze della terra.

I dati estratti dai database elencati sono però tutti a livello globale, per cui è stato necessario ritagliarli per il bacino di riferimento, attraverso il software ArcGis. Successivamente, sono state definite le classi di distanza planimetriche rispetto al reticolo idrografico, per poi svolgere l'analisi della distribuzione degli insediamenti umani all'interno del bacino, nel corso degli anni considerati. L'analisi della distribuzione altimetrica degli insediamenti umani è invece basata su dati di elevazione reperibili dal DEM (*Digital Elevation Model*), a partire dai quali sono state identificate delle classi di distanza altimetrica, EAND (*Elevation Above Nearest Drainage*), ossia l'elevazione rispetto al punto canalizzato più vicino.

2.1 Analisi dei dati di portata relativi al fiume Limpopo

Per identificare gli anni più significativi in termini di siccità, sono stati considerati dati di portata, espressi in m^3/s . I valori sono stati ricavati da tre stazioni di misura all'interno del bacino del fiume Limpopo. Le stazioni sono: Combomune (E-33) e Chókwe (E-35), entrambe situate nella Provincia di Gaza, e Rio Dos Elefantes (E-607), situata nella Provincia del Limpopo, come mostrato in **Figura 1**.



Figura 1. Collocazione geografica delle stazioni di misura dei dati di portata per il fiume Limpopo – Fonte: Google Earth.

Relativamente alle portate della stazione di Combomune, sono state considerate due serie di dati giornaliere: la prima, più estesa, che va dal 1° Febbraio 1966 al 31 Agosto 2011 e la seconda, dal 1° Ottobre 1999 al 30 Aprile 2013. È stato riscontrato che nei giorni degli anni in comune tra le due serie, i valori di portata sono diversi, in quanto misurati in punti del fiume con coordinate differenti. In ogni caso, è stato calcolato l'idrogramma annuale per entrambe le serie di dati, che hanno prodotto i seguenti risultati:

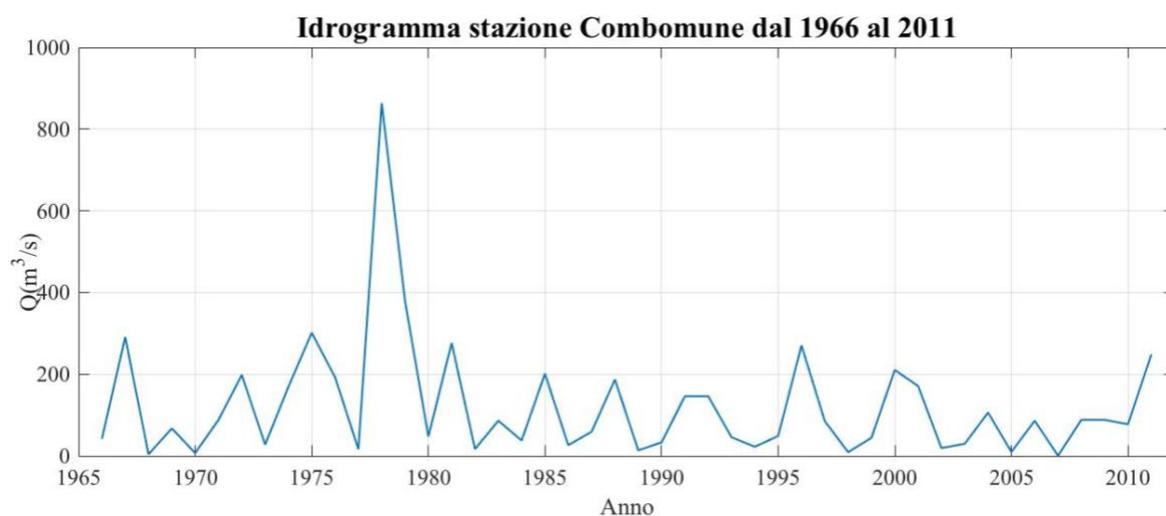


Figura 2. Andamento temporale dei valori di portata nella stazione di Combomune, dal 1° Febbraio 1966 al 31 Agosto 2011.

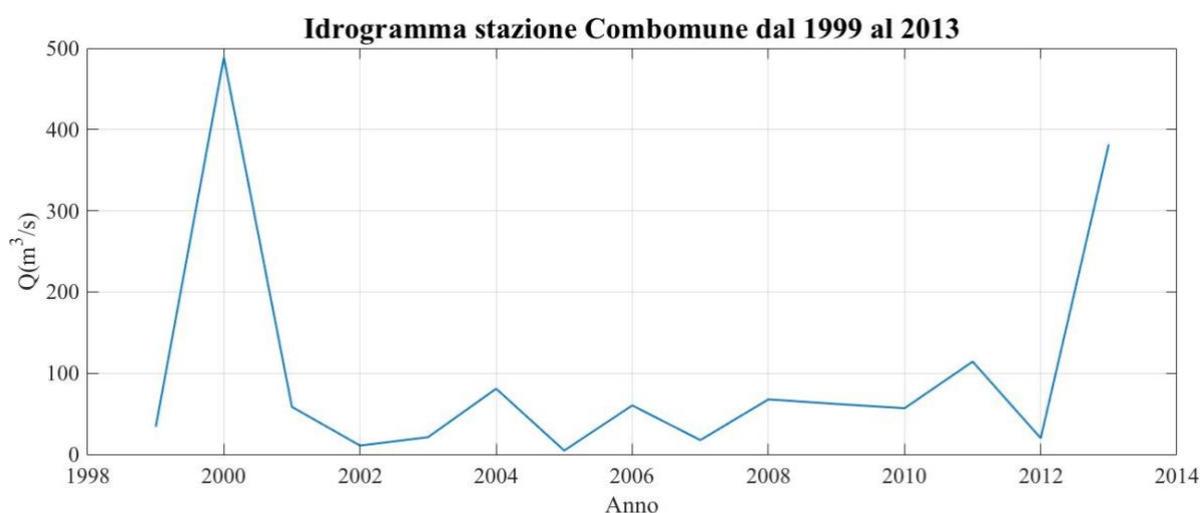


Figura 3. Andamento temporale dei valori di portata nella stazione di Combomune, dal 1° Ottobre 1999 al 30 Aprile 2013.

Nell'idrogramma della serie di dati che va dal 1966 al 2011 (**Figura 2**), si può notare come la portata vari complessivamente da 0 a circa 900 m³/s, presentando diverse fluttuazioni nell'arco dei 45 anni considerati. In particolare, si distingue un evidente picco di massimo che raggiunge precisamente il valore di 863.62 m³/s nel 1978, seguito da picchi minori che si mantengono tutti all'incirca sui 200 m³/s. Mentre, i picchi di minimo, di nostro interesse, si collocano nei seguenti anni: 1970, 1977, 1982, 1986, 1989, 1998, 2002, 2005 e 2007, tutti corrispondenti a valori di portata molto bassi, che variano da 0.461 m³/s, nel 2007, a 19.172 m³/s, nel 2002.

Tale risultato è stato confermato anche dall'analisi condotta sulla seconda serie di portate, più recente (**Figura 3**), in cui si distinguono anni siccitosi nel 2002, 2005, 2007 e 2012, anche se con valori differenti pari, rispettivamente, a 10.84 m³/s, 4.72 m³/s, 17.59 m³/s e 19.98 m³/s. L'analisi delle portate nella seconda stazione compresa nella Provincia di Gaza, di nome Chókwè, ha ulteriormente confermato gli anni di siccità evidenziati nella stazione precedente, con alcune aggiunte. L'intervallo temporale considerato in questo caso, è più ampio e si estende dal 20 Giugno 1951 al 31 Maggio 2011. Come si può notare dalla **Figura 4**, il primo anno in cui si è evidenziata una forte carenza d'acqua è il 1965, seguito dal 1970, 1982-1983 e da un lungo periodo di siccità negli anni novanta, che va dal 1990 al 1995.



Figura 4. Andamento temporale dei valori di portata nella stazione di Chókwè, dal 20 Giugno 1952 al 31 Maggio 2011.

Il picco di massimo più evidente si registra invece nel 2000, quando effettivamente le popolazioni del bacino del Limpopo, furono coinvolte in una delle più catastrofiche alluvioni a cui avessero mai assistito, in cui infatti, si registra una portata di circa 890.9 m³/s. Negli ultimi decenni invece, gli eventi siccitosi più significativi osservati in questa stazione, corrispondono esattamente agli stessi anni trovati a Combomune, ossia il 2002, 2005 e 2007, con valori di portata intorno ai 20 m³/s.

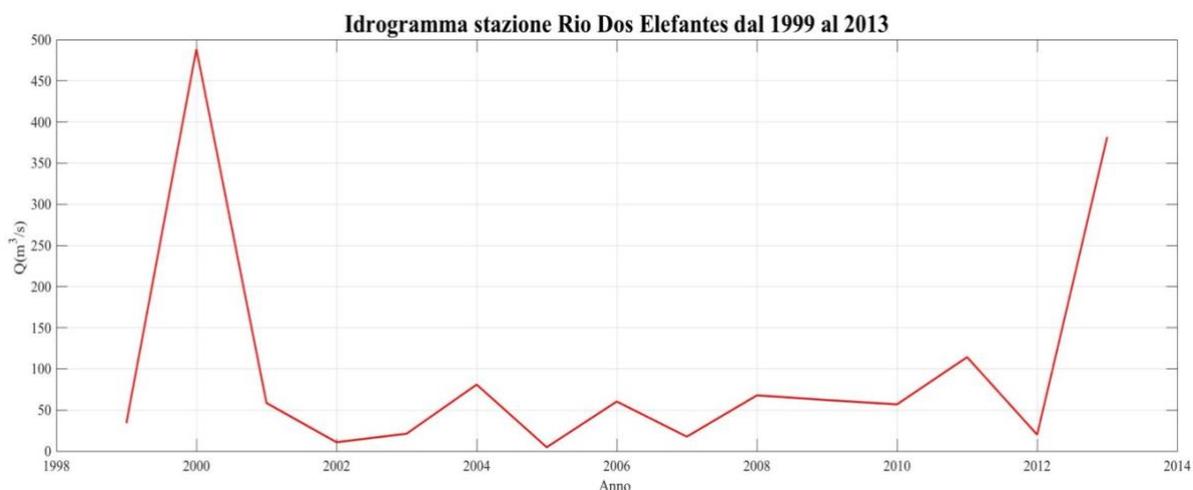


Figura 5. Andamento temporale dei valori di portata nella stazione di Rio Dos Elefantes dal 20 Giugno 1951 al 31 Maggio 2011.

Infine, per la stazione a Rio Dos Elefantes, posizionata in un'altra Provincia e più ad Ovest rispetto alle altre, la disponibilità di dati di portata va dal 1999 al 2013. L'idrogramma in **Figura 5** rivela problemi di siccità più accentuati nel 2002-2003 e 2005, seguiti dal 2007 e 2012, in cui si distinguono due picchi di minimo anche se meno evidenti. Allo stesso modo, c'è una corrispondenza con il picco di massimo nel 2000 ed in aggiunta un picco nel 2013, altro anno in cui si ricorda una tragica alluvione con centinaia di morti. Anche questa verifica rispecchia, dunque, i risultati ottenuti dalle precedenti serie di dati analizzate, in particolare quella a Combomune in cui veniva preso lo stesso periodo di riferimento.

2.1.1 *Scelta degli anni siccitosi più significativi per il bacino del Limpopo da bibliografia*

Riassumendo, i risultati ottenuti dagli idrogrammi annuali di portata nelle tre stazioni di misura mostrano che complessivamente dal 1951 al 2013, gli anni più siccitosi che hanno coinvolto il territorio del bacino del Limpopo sono:

Combomune	Chókwè	Rio Dos Elefantes
<ul style="list-style-type: none"> • 1970; • 1977; • 1982/1983 • 1986; • 1989; • 1998; • 2002; • 2005; • 2007; • 2012; 	<ul style="list-style-type: none"> • 1965; • 1982/1983; • 1986; • Dal 1990 al 1995; • 2005; • 2007; • 2012; 	<ul style="list-style-type: none"> • 2002/2003; • 2005;
Bacino del Limpopo		
<ul style="list-style-type: none"> • 1970; • 1977; • 1982/1983; • 1986; • 1989; • dal 1990 al 1995; • 1998; • 2002/2003; • 2005; • 2007; • 2012 		

Tabella 1. Tabella riassuntiva degli anni più siccitosi ricavati dall'analisi dei dati di portata, nelle tre stazioni di misura.

Inoltre, il database DEWFORA (*Drought Early Warning and FORecasting*) nell'anno 2012, ha riferito che nel periodo che va dal 1980 al 2000, la regione del Sud Africa è stata colpita da quattro grandi siccità, in particolare negli anni:

- 1982/1983;
- 1986/1987;
- 1991/1992;
- 1994/1995;

La siccità del 1991/1992 è stata la più severa della regione, nella storia recente. Mentre, dopo l'anno 2000, fino al 2010, importanti siccità includono gli anni:

- 2002/2003;
- 2004/2005;
- 2006/2007;

Effettuando, infine, un definitivo confronto tra gli anni forniti da DEWFORA e gli anni estratti dagli idrogrammi di portata, si può notare come gli anni risultanti coincidano quasi perfettamente [Trambauer et al., 2014]. Motivo per cui, d'ora in poi, gli anni siccitosi di riferimento saranno esattamente quelli riassunti in **Tabella 1**.

2.1.2 *Calcolo dell'indicatore di siccità idrologico SRI (Standardized Runoff Index)*

Il bacino del fiume Limpopo risulta essere uno dei bacini caratterizzati da marcato stress idrico in tutto il continente africano. Gli scenari futuri prevedono che il bacino del Limpopo debba affrontare problemi di penuria idrica ancora più gravi, andando ad accentuare la carenza d'acqua su scala regionale e locale e a limitare lo sviluppo economico nel bacino. Per tale motivo, le operazioni di monitoraggio rappresentano un passo fondamentale nella gestione della siccità, che richiede l'individuazione di indicatori appropriati, da cui possono essere identificati diversi tipi di siccità. Tali indici possono essere di tre tipi: meteorologici, irrigui ed idrologici. L'indicatore di siccità più noto è il cosiddetto indice di precipitazione standardizzato SPI (Standardized Precipitation Index) [McKee et al., 1993], appartenente alla categoria meteorologica e basato quindi solo su dati di precipitazione [Trambauer et al., 2014].

Nel seguente studio, si è scelto di far riferimento ad un indice di siccità di tipo idrologico, ossia prendendo in esame il cosiddetto indicatore di deflusso standardizzato SRI (Standardized Runoff Index) che segue lo stesso concetto dell'SPI, ma è più adatto a rappresentare l'impatto dovuto all'uso del suolo e ai cambiamenti climatici. Nello specifico, SRI è definito come una "deviazione normale standard unitaria associata al percentile del deflusso idrologico accumulato su una durata specifica" [Shukla e Wood, 2008]. Generalmente, per il calcolo di tale indicatore, si possono utilizzare dati di portate osservate, nonché valori di deflusso simulati attraverso un modello idrologico.

Applicando lo stesso concetto impiegato da McKee ed al. nel 1993 per SPI, la procedura di calcolo di SRI si può definire attraverso i seguenti step:

1. La serie temporale dei deflussi viene adattata ad una funzione di densità di probabilità, che in questo caso è la distribuzione di Weibull (i.e. distribuzione cumulata).
2. La funzione è usata per stimare la probabilità cumulata di un valore di deflusso di interesse per durate caratteristiche (un mese, un trimestre, un semestre o un anno). Nel seguente studio si è ritenuto opportuno valutare solo il caso annuale, avendo a disposizione dati annuali sulla presenza antropica.

3. La probabilità cumulata viene quindi convertita in una distribuzione normale standardizzata (con media zero e varianza unitaria), in tal caso calcolata tramite la funzione “norminv” di Matlab. I numeri ottenuti per ogni probabilità cumulata, che possono essere sia negativi che positivi, rappresentano i valori di SRI.

Valori positivi andranno a classificare condizioni moderatamente, severamente umide o riconducibili a vere e proprie alluvioni, mentre i valori negativi definiscono i diversi tipi di siccità. Per cui, a partire dai risultati estratti, avviene la classificazione della siccità tramite la stessa tabella utilizzata da McKee et al. nel 1993 per SPI e riportata di seguito:

Valori di SPI / SRI	Tipo di siccità
Da 0 a -0.99	Lieve
Da -1.00 a -1.49	Moderata
Da -1.50 a -1.99	Severa
≤ -2.00	Estrema

Tabella 2. Tabella per la classificazione del tipo di siccità in funzione dei valori di SPI/SRI – Fonte: McKee et al., 1993.

In **Figura 6**, è mostrato l’esempio di un grafico relativo al bacino del Limpopo, in cui sono riportati i valori di SRI (1,3,6 e 12 mesi) dal 1980 al 2010, calcolati a partire da dati di deflusso simulati, relativi ad una stazione di misura. Si considera il valore di soglia pari a -1 (linea tratteggiata), corrispondente secondo la **Tabella 2** ad una siccità moderata e si osserva che il periodo siccitoso inizia quando l’indicatore di siccità scende al di sotto della soglia e si conclude quanto SRI va al di sopra di -1. Seguendo tale criterio, si può notare che SRI identifica chiaramente la grave siccità idrologica del 1982-83 e del 1991-92, in quanto i valori di SRI risultano sotto la soglia e pari circa a -2 e -3. Analogamente, sono riconoscibili gli anni alluvionali del 1999-2000, in cui si evidenzia un picco positivo che raggiunge il valore di circa 4.

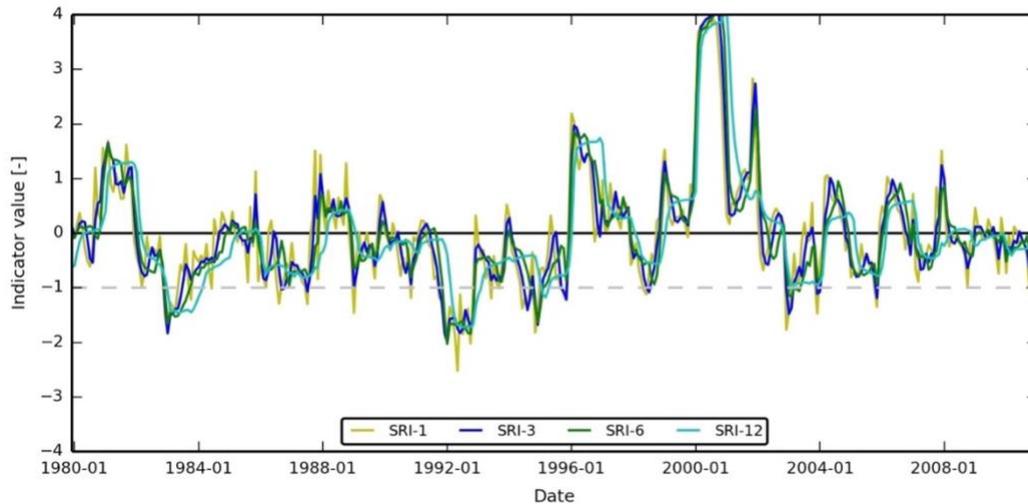


Figura 6. Andamento dei valori di SRI (1,3,6 e12 mesi) dal 1980 al 2010, calcolati a partire da dati di deflusso simulati in una stazione di misura (n° 24) all'interno del bacino del Limpopo – Fonte: P. Trambauer et al., 2014.

Nello specifico, nella seguente ricerca si è scelto di calcolare i valori di SRI per i dati di deflusso osservati in tutte e tre le stazioni di misura considerate (Combomune, Chókwè e Rio Dos Elefantes), in funzione degli anni di portata a disposizione e dell'arco temporale dei dati di luminosità artificiale notturna (dal 1992 al 2013). Il successivo calcolo della correlazione tra i valori di SRI e l'evoluzione della distanza umana media dal fiume, verrà infatti effettuato solo con i risultati ottenuti dai dati di luminosità, escludendo quelli riguardanti la densità di popolazione e le aree edificate, dato che sono riferiti solo a 4 anni differenti. Per cui, alla fine si otterranno i valori di SRI associati alle portate misurate dal 1992 al 2011 e dal 1999 al 2013 per Combomune (E-33), dal 1992 al 2011 per Chókwè (E-35) ed infine dal 1999 al 2011 per Rio Dos Elefantes (E-607). Tutto ciò permetterà di avere un'ulteriore analisi del rapporto tra l'effetto migratorio post evento siccitoso e la siccità stessa, da poter confrontare con i risultati ottenuti dal vero e proprio studio sull'evoluzione spazio-temporale della distribuzione della popolazione in relazione ad eventi di siccità.

2.2 Identificazione del bacino idrografico e del relativo reticolo del fiume Limpopo dal database HydroSHEDS

Il Database HydroSHEDS (*Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales*) fornisce informazioni idrografiche per applicazioni regionali e su scala globale. Offre, cioè, un insieme di dati georeferenziati (in formato vettoriale o raster) a varie scale, tra cui reti fluviali, confini spartiacque e direzioni di drenaggio. HydroSHEDS si basa su dati di elevazione ad alta risoluzione, ottenuti durante una missione di volo nello spazio denominata SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), a cura della NASA. Esso è nato dalla collaborazione di diversi enti, quali: *World Wildlife Fund* (WWF), *U.S. Geological Survey* (USGS), *International Centre for Tropical Agriculture* (CIAT), *The Nature Conservancy* (TNC), *McGill University* (Montreal, Canada), *the Australian National University* (Canberra) and *the Center for Environmental Systems Research* (CESR).

L'obiettivo principale dei realizzatori di HydroSHEDS era quello di generare dati che sostenessero analisi di modellistica idrologica ad una risoluzione ed estensione, che in precedenza non erano stati realizzabili. Infatti, le risoluzioni disponibili variano da 3 secondi di grado (all'incirca 90 m all'Equatore) a 5 minuti (approssimativamente 10 km all'Equatore). La precisione di tale database supera significativamente quella di spartiacque globali e mappe fluviali esistenti, ma gli utenti devono essere informati di determinate caratteristiche dei dati quali la risoluzione, l'esattezza ed il metodo di produzione, per poterne giudicare l'idoneità all'applicazione specifica. Infatti, la qualità complessiva dei dati estratti da HydroSHEDS dipende principalmente dalle caratteristiche del modello di elevazione, basato su SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Essendo un prodotto radar, i valori SRTM sono influenzati dalla vegetazione e da altre caratteristiche superficiali che condizionano i derivati idrografici.

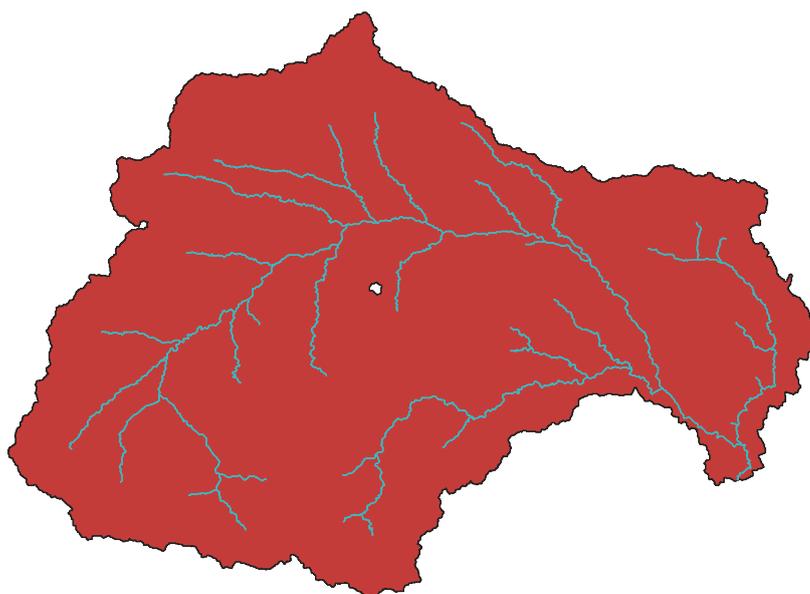


Figura 7. Bacino e reticolo idrografico del fiume Limpopo – Fonte: Lehner et al., 2008.

All'interno di HydroSHEDS, è possibile trovare la sezione denominata HydroBASINS, in cui si distinguono una serie di strati poligonali che rappresentano i confini spartiacque e le delineazioni dei sottobacini, a scala globale. Tramite queste applicazioni, si è riusciti ad ottenere bacino e reticolo idrografico del fiume Limpopo, ad una risoluzione di 30 secondi di grado (circa 1 km all'Equatore) e considerando un'area cumulata minima di 5000 km². Il prodotto finale è visibile in **Figura 7**.

In secondo luogo, dallo stesso database, è stato ricavato il *Digital Elevation Model* (DEM), ossia la rappresentazione della distribuzione delle quote del territorio del bacino, in formato digitale. Nello specifico, il modello digitale di elevazione è stato prodotto in formato raster, associando a ciascun pixel l'attributo relativo alla quota assoluta. I modelli più raffinati di DEM sono prodotti attraverso tecniche di telerilevamento ed impiegati in ambiente GIS e hanno numerose applicazioni nello studio del territorio, con particolare riguardo alle indagini per la mitigazione dei rischi naturali [Wikipedia].

2.1 Dati di popolazione

Nel panorama bibliografico, vi sono diversi database che si occupano del rilevamento della popolazione e dei suoi spostamenti. Esistono quindi grandi quantità di dati che si distinguono per accuratezza, metodo di calcolo e modalità di rappresentazione. Per ottenere risultati innovativi, si è scelto di utilizzare tre database, ognuno riferito a tipi di dati differenti, in modo da avere un'idea completa della distribuzione della popolazione africana, all'interno del bacino. L'utilizzo variegato dei dati permette inoltre, in alcuni casi, di effettuare un confronto tra i risultati, verificandone la compatibilità e la coerenza. I dati in questione, sono i seguenti:

- Dati di luminosità artificiale notturna (*Nighttime light dataset*);
- Dati sulla percentuale di edificato nel territorio (*GHS BUILT – UP Data*);
- Dati sulla densità di popolazione, provenienti dal Portale Europeo (*GHS POP Data*);
- Dati sulla densità di popolazione, gestiti dalla NASA (*GPW Data*);

2.3.1 Dati di luminosità artificiale notturna (*Nighttime light dataset*)

Le serie temporali di luce notturna vengono fornite dall'agenzia meteorologica delle forze militari degli Stati Uniti (*US Air Force Weather Agency*), secondo il programma militare americano DMSP, OLS (*Defense Meteorological Satellite Program, Operational Linescan System*). Sono liberamente disponibili come prodotti digitali, dal centro di dati geofisici del NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*). Tali dati, prodotti su base annua dal 1992 al 2013, rappresentano una luminosità notturna priva di nuvole, proveniente da siti con illuminazione prolungata, come città, cittadine e combustione di gas. Dati illuminati dal sole e al chiaro di luna e osservazioni da fenomeni come incendi, sono esclusi dal set di dati. I valori di luce sono espressi attraverso un valore digitale medio DN, che va da 0 (completamente buio) a 63 (area illuminata che corrisponde ad una grande o piccola città).

Ci possono essere tuttavia diverse limitazioni nell'utilizzo di tale dataset, tra cui la saturazione del pixel (luce) in aree urbane altamente popolate e la sopravvalutazione della zona illuminata, a causa di una risoluzione grossolana e riflessione da corpi idrici in grandi aree metropolitane, così come l'incapacità di catturare insediamenti con poca o nessuna disponibilità di energia elettrica, come le zone rurali in Africa. In ogni caso, le serie luminose di dati rappresentano una valida proposta per determinare la presenza di insediamenti umani e di attività economiche in ogni parte del mondo e negli ultimi decenni, sono state infatti ampiamente impiegate per diversi scopi dimostrativi, economici ed ambientali. Ceola et al. nel 2014 li hanno utilizzati proprio per mostrare che la presenza di luci vicino a corsi d'acqua e fiumi è significativamente connessa alle perdite economiche, dovute agli eventi alluvionali. In particolare, hanno scoperto che i danni alluvionali più significativi hanno avuto luogo nelle aree più illuminate. Sei diversi satelliti hanno raccolto il set complessivo di dati di luce notturna ma per alcuni anni, due diversi satelliti sono stati operativi simultaneamente e hanno prodotto due distinti prodotti notturni. Per cui, per ottenere un valore di luce notturna unico e rappresentativo per ogni pixel e per ogni anno, è stata valutata la luminosità notturna media dai due insiemi di dati sovrapposti, effettuando una preliminare calibrazione attraverso una procedura ampiamente applicata nella letteratura scientifica [Elvidge et al., 2009; Chen e Nordhaus, 2011]. Nello studio di Ceola et al., 2014 come nella presente ricerca, sono stati esclusi tutti i dati associati alla combustione di gas, considerati irrilevanti per l'analisi della vicinanza umana a corsi d'acqua e fiumi.

Dati di questo genere, coprono quasi tutto il mondo (fino a 180°W – 180°E di longitudine e 75°N – 65°S di latitudine), come mostrato in **Figura 8** e sono disponibili come prodotti raster ad una risoluzione spaziale molto dettagliata di circa 30 secondi di grado, corrispondente a circa 1 km all'Equatore.



Figura 8. Immagine satellitare a copertura globale dei dati di luce del 1994-1995 – Fonte: Data courtesy Marc Imhoff of NASA GSFC and Christopher Elvidge of NOAA NGDC. Image by Craig Mayehew and Robert Simmon, NASA GSFC.

Una volta scaricati i dati a livello globale, è stato dunque necessario ritagliare i dati di luminosità artificiale notturna per il bacino del Limpopo. Innanzitutto, grazie ad ArcGis, sono stati convertiti in raster bacino e reticolo idrografico, tramite la funzione “*Feature To Raster*”, che permette di visualizzare una qualsiasi figura in formato raster e dunque sottoforma di pixel. Dopo di che, sempre all’interno di ArcGis, è stato possibile ritagliare i dati per il bacino, attraverso la funzione “*extract by mask*”, in grado di estrarre le celle di un raster, che corrispondono alle aree definite da una maschera. Dopo aver salvato i nuovi dati in formato .tif, sono stati analizzati in Matlab, ambiente di calcolo numerico, in cui è stato possibile visualizzarli attraverso il comando “*geotiffread*”, come mostrato in **Figura 9**, dove compaiono le immagini relative al 1992 nel pannello (a) e al 2013 nel pannello (b). Si può notare come nelle due immagini, la differenza di luci sia evidente: molto più accentuate e distribuite nel 2013 rispetto al 1992, il che sta ad indicare oltre che l’aumento della popolazione, anche in che modo si è distribuita all’interno del bacino, nel corso degli anni.

Nel pannello (c), si mostra invece uno zoom di un'immagine dei dati di luce, in cui si evidenziano i pixel, corrispondenti ognuno ad 1 km² e a cui vengono associati i digital number da 0 a 63, contenuti nella matrice 811x1114, risultante dalla lettura dei dati su Matlab.

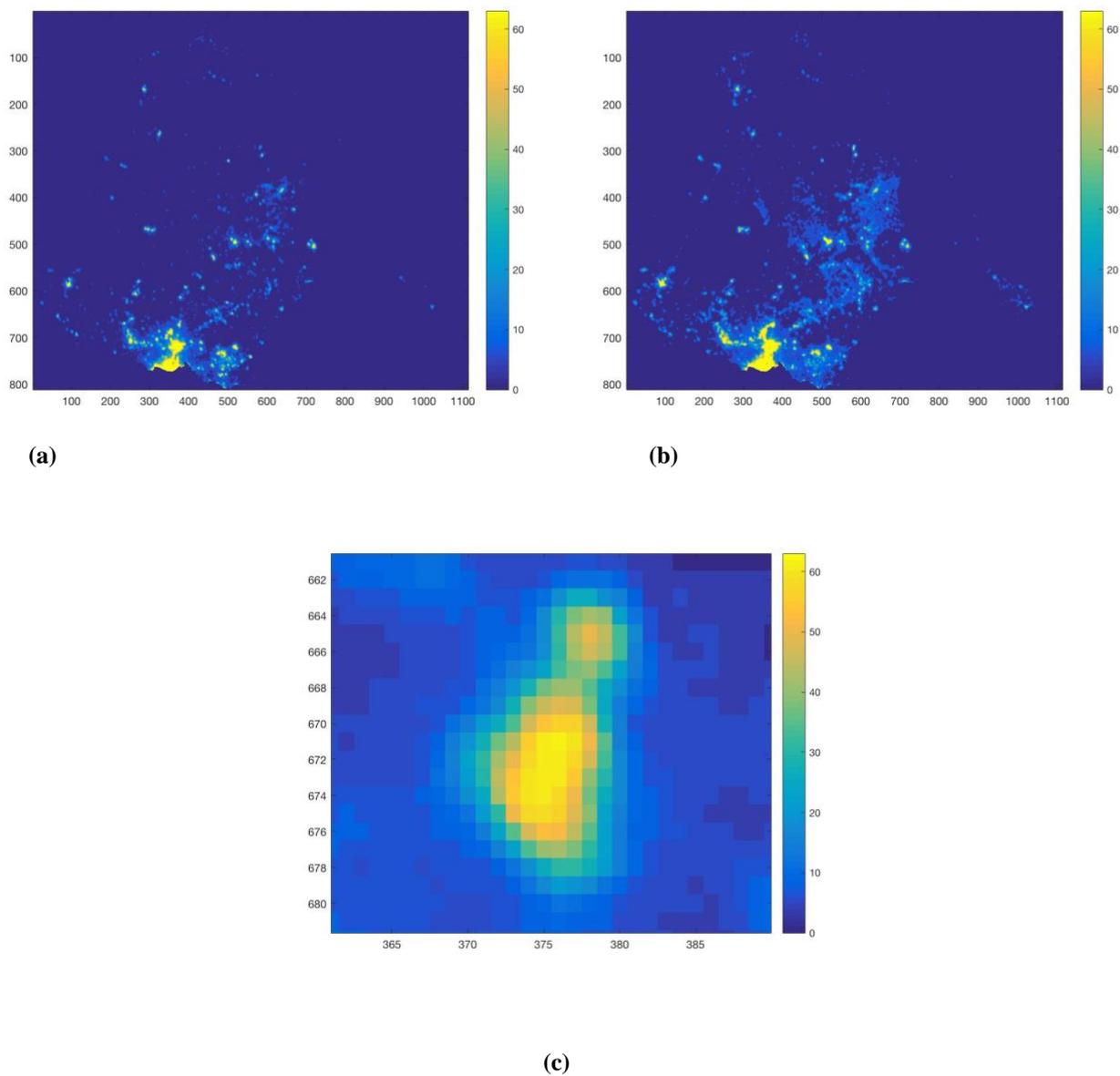


Figura 9. Dati di luminosità artificiale notturna nel bacino del fiume Limpopo. Nel **pannello (a)** è riportata l'immagine relativa ai dati di luce del 1992. Nel **pannello (b)** si mostra l'immagine relativa ai dati di luce del 2013. Nel **pannello (c)** è stato riportato uno zoom di un'immagine dei dati di luce, in cui si mostrano i pixel contenenti i Digital Number da 0 a 63, come risulta dalla legenda.

2.3.2 *Dati sulla percentuale di edificato nel territorio (Built-up Data) reperiti dal database europeo GHSL*

La possibilità di risalire alla percentuale di edificato all'interno di un territorio, attraverso immagini da satellite, rappresenta un'altra grande possibilità di visualizzare la distribuzione umana e delle attività economiche, nel luogo preso in considerazione. Questa grande opportunità è stata fornita dal progetto *Global Human Settlement Layer (GHSL)*, che ha permesso la mappatura della distribuzione e della densità delle aree urbane del mondo, con una copertura spaziale ed una risoluzione senza precedenti. Il GHSL produce, infatti, geoinformazioni basate su evidenze che descrivono la presenza umana nel Pianeta e si avvale di nuove tecnologie di *data mining* spaziali, che consentono di elaborare automaticamente ed estrarre analisi da grandi quantità di dati eterogenei, tra cui dati di censimento e fonti di informazione geografica.

I primi dati ad essere stati prodotti dal GHSL, prendono il nome di GHS BUILT-UP e corrispondono a file raster riguardanti le aree edificate ed estratti a partire da un insieme di immagini da satellite. Nello specifico, il metodo utilizzato dal *Global Human Settlement Layer* per ricavare questo tipo di informazione, riassunto e mostrato in **Figura 10**, è il seguente:

1. Si estraggono le immagini satellitari, definite come file raster che rappresentano la superficie terrestre. A questo punto, per ottenere informazioni utili sugli insediamenti urbani, è necessario prima attuare una serie di procedure che riguardano la georeferenziazione, la calibrazione spettrale, la correzione radiometrica ed un orto – rettifica.
2. Tutti gli insediamenti umani sono caratterizzati da oggetti costruiti ed artificiali, come edifici, strutture ed opere civili. Per cui, una volta modificate le immagini da satellite, per effettuare l'analisi degli insediamenti, verranno definite all'interno dell'area chiamata Built-up, la posizione e la dimensione spaziale di tutte le superfici occupate da queste strutture.
3. Per cui, l'impronta di area edificata (*Built-up area*), sarà espressa con valori continui (da 0 a 1) che rappresentano la porzione di superficie occupata dagli edifici all'interno della dimensione totale della cella (1 km²).

GHSL basic concept. From Earth's surface to built-up area

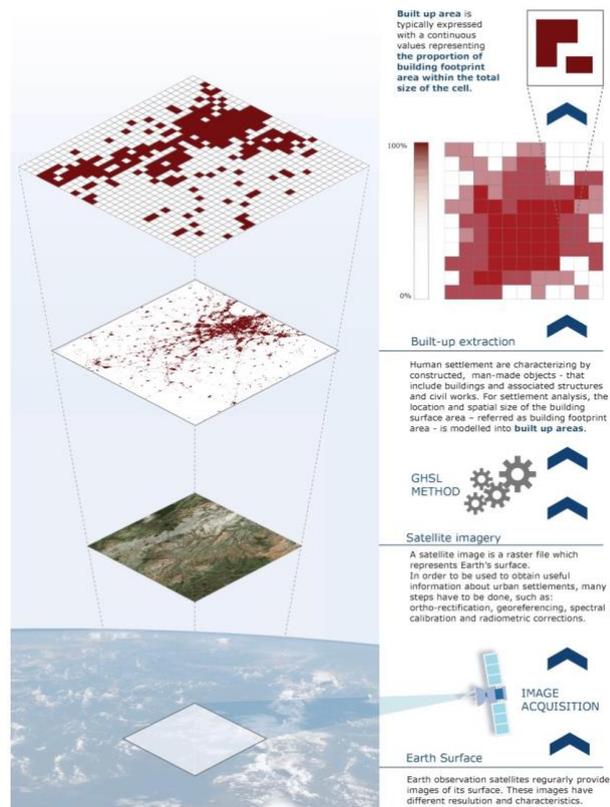


Figura 10. Rappresentazione del metodo utilizzato dal GHSL, per estrarre le informazioni riguardanti le aree Built-up, a partire dalle immagini satellitari – Fonte: European Commission, Global Human Settlement.

Di conseguenza la distribuzione della popolazione, sarà espressa in funzione della porzione di occupazione di tutto ciò che c'è di costruito in ciascun pixel. Il prodotto principale disponibile e scaricabile gratuitamente è una griglia incorporata multi-temporale per gli anni: 1975, 1990, 2000, 2014 e prodotta ad alta risoluzione (circa 38 m). Questo dataset è stato poi utilizzato per derivare ulteriori layer per ogni epoca, offerti ad alta, media e bassa risoluzione (circa 38m in sferico Mercator, 250 m in Mollweide e 1 km in Mollweide, rispettivamente).

Nella seguente ricerca, si è ritenuto opportuno utilizzare una risoluzione pari ad 1 km, in proiezione Mollweide, considerando tutte le 4 classi temporali. In questo modo, è stato possibile uniformare i dati alla risoluzione degli altri database e visualizzare la distribuzione della popolazione ad un raggio più ampio. I valori di Built-up vanno da 0, corrispondente alla totale assenza di edificato, ad 1, rappresentativo della massima percentuale di costruito in un'area.

Le immagini risultanti visibili nel pannello (a) per il 1975 e nel pannello (b) per il 2014, in **Figura 11**, estratte da Matlab, hanno dunque valori in legenda da 0 (in blu) a 1 (in giallo), che corrispondono ai valori contenuti nei pixel, mostrati in modo più chiaro nel pannello (c).

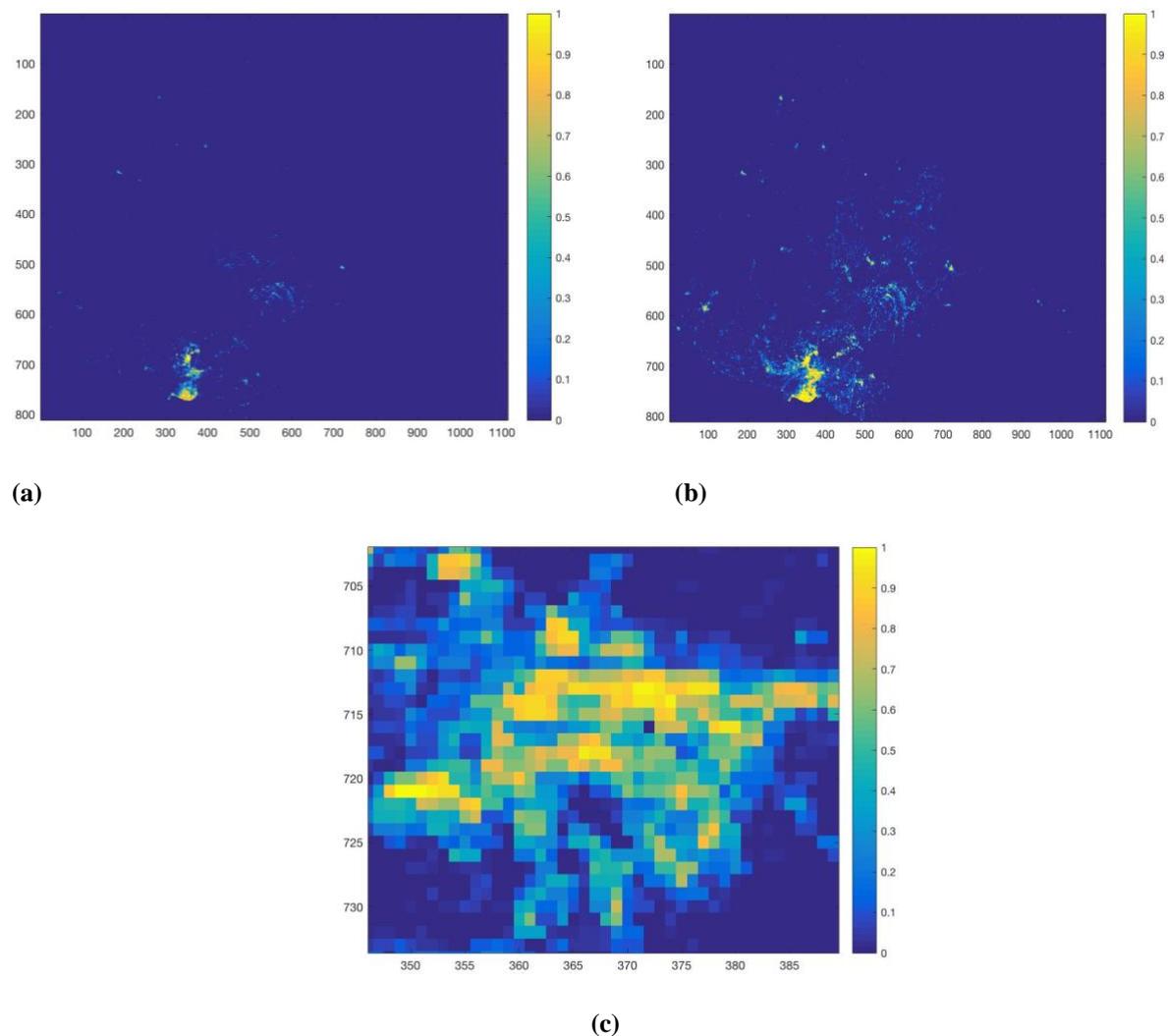


Figura 11. Dati di built-up nel bacino del fiume Limpopo. Nel **pannello (a)** è riportata l'immagine relativa ai dati Built-up del 1975. Nel **pannello (b)** si mostra l'immagine corrispondente ai dati di luce del 2014. Nel **pannello (c)** è stato riportato uno zoom di un'immagine dei dati di luce, in cui si mostrano i pixel contenenti i Digital Number da 0 a 1.

2.3.3 Dati sulla densità di popolazione (GHS POP Data) reperiti dal database europeo GHSL

È importante però avere informazioni anche sull'effettivo numero di persone che popolano il bacino del Limpopo, facendo riferimento in particolar modo alla densità di popolazione, per capire la distribuzione reale degli abitanti all'interno dell'area di riferimento. A questo proposito, il progetto GHSL (*Global Human Settlement Layer*), comprende anche il concetto di GHS POP, che sta per "*Global Human Settlement - population grid*" ed indica la densità di popolazione a livello comunale, stimata attraverso i dati di Built-up. L'evoluzione temporale è calcolata mediante un modello di crescita esponenziale, a partire dai dati di GPW (*Gridded Population of The World*) del 2010 e si tratta, per cui, di dati stimati e non misurati. La procedura di estrapolazione dei dati di densità dai dati di Built-up è mostrata in **Figura 12** e si articola nei seguenti passaggi:

3. Si utilizzano come file di input, i dati di Built-up che usufruiscono di piccole celle di una griglia per misurare gli insediamenti umani, indipendentemente dai confini amministrativi.
3. Dopo di che, i dati sui censimenti della popolazione forniscono accurate informazioni sul numero di residenti nell'area d'interesse.
3. A questo punto, attuando una sovrapposizione dei dati di Built-up e di censimento in una griglia ad 1 km di risoluzione, si ottiene un nuovo prodotto, conosciuto come GHS POP, sempre ad 1 km di risoluzione, che ignora i confini amministrativi e rappresenta la presenza e la densità di popolazione. Per cui, i valori all'interno delle celle della griglia che rappresentano i dati GHS POP, corrispondono esattamente al numero assoluto di abitanti che si trovano in quel km².

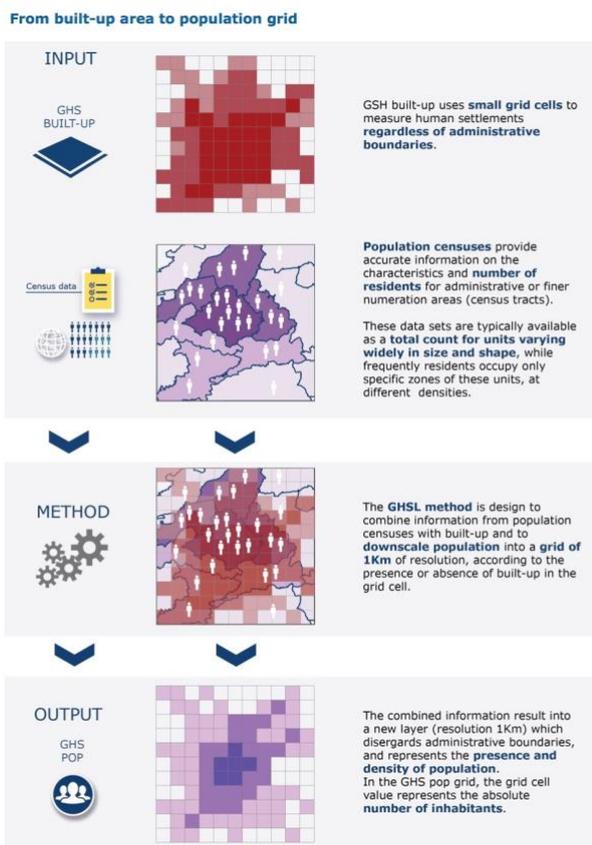


Figura 12. Rappresentazione del metodo utilizzato dal GHSL per estrarre le informazioni riguardanti la densità di popolazione (GHS POP) a partire dai dati di Built-up – Fonte: European Commission, Global Human Settlement.

I dati di densità disponibili e scaricabili gratuitamente si riferiscono agli anni: 1975, 1990, 2000 e 2015, prodotti a media e bassa risoluzione (250 m ed 1 km rispettivamente), in proiezione Mollweide (EPSG: 54009) e formato .tif. Si riporta di seguito, in **Figura 13**, un esempio di immagine ottenuta dalla lettura dei dati su Matlab, relativa al 2015. Il valore massimo di abitanti per km² riportato in legenda, è di circa 7×10^4 ab/km², che è poco affidabile. È tuttavia comprensibile il fatto che, a volte, tali sistemi producano picchi non realistici di densità di popolazione, dovuti ad errori interni e legati probabilmente al fatto che si tratta di una stima e che si lavora con una notevole quantità di dati. Complessivamente però, i dati di densità sono comunque da considerare validi, in quanto il valor medio di densità registrato è di 47.49 ab/km², molto vicino all'ultimo valore di densità abitativa pari a 45.5 ab/km², registrato da studi recenti [Statistics South Africa].

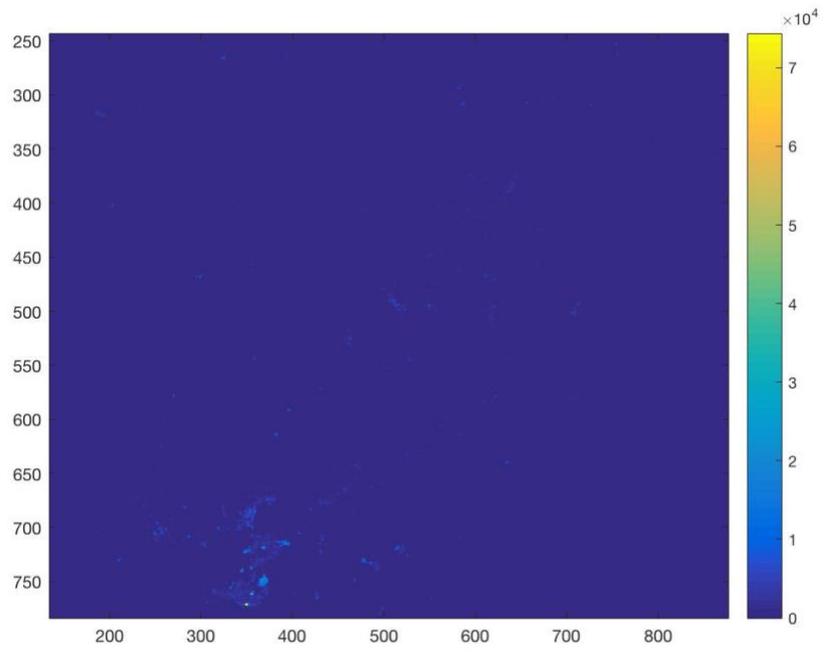


Figura 13. Immagine relativa ai dati di densità di popolazione, derivanti dai dati di GHS POP del Portale Europeo, riguardante l'anno 2015.

2.3.4 Dati sulla densità di popolazione (GPW) reperiti dal database CIENSIN-NASA

Un altro tipo di informazione che riguarda la densità di popolazione, altrettanto valida, è rappresentata dal dataset GPW che sta per *Gridded Population of the World*. La produzione di tale tipologia di dati, deriva dalla collaborazione di più enti, tra cui il centro nazionale di informazione ed analisi geografica (NCGIA), l'Università di Santa Barbara in California e l'Università Columbia di New York, sotto la gestione della NASA (*U.S National Aeronautics and Space Administration*). I dati di stima della popolazione (*The Gridded Population of The World*), ora nella sua quarta versione (GPWv4), modella la distribuzione della popolazione umana, su una superficie raster continua. Nello specifico, si tratta di una raccolta di dati della popolazione nazionale integrata a livello mondiale, proveniente dai censimenti di abitazioni e di abitanti, svolte tra il 2005 ed il 2014. Le stime demografiche vengono create estrapolando dai dati di input di censimento grezzo, stime di popolazione per gli anni target: 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.

Tutte le stime sono proporzionalmente assegnate a celle raster (in questo caso, pixel), utilizzando un approccio uniforme per la ponderazione areale della popolazione. La raccolta di dati dell'ultima versione v4, viene prodotta utilizzando più insiemi di dati di input e non solo quelli di censimento, inclusi i confini geografici, le stime della popolazione delle Nazioni Unite e il *the Global Water Mask (GWM)*, un nuovo prodotto che si basa su dati di distribuzione delle acque superficiali e dei corpi idrici. Inoltre, i dati nativi di 30 secondi di grado, sono stati aggregati in quattro risoluzioni inferiori (2.5, 15, 30 e 60 minuti), per consentire una più veloce elaborazione globale dei dati e sono disponibili sia in formato ASCII, che geoTiff, come mostrato in **Tabella 3**.

Secondi (sec) e Minuti (min)	Gradi	Chilometri (km)
30 sec	0.008333	~ 1 km
2.5 min	0.041667	~ 5 km
15 min	0.25	~ 30 km
30 min	0.5	~ 55 km
60 min	1	~ 110 km

Tabella 3. Risoluzioni equivalenti in secondi, minuti, gradi e km – Fonte: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).

Per facilitare il conteggio globale dei Paesi che effettuano i loro censimenti in tempi diversi, i tassi di crescita annualizzati sono stati utilizzati per adeguare i conteggi del censimento all'anno obiettivo del 2010 e consentirne un confronto globale. I tassi di crescita sono stati calcolati per ciascuna unità amministrativa, facendo corrispondere la popolazione totale dai dati di input, a quelli di una precedente rilevazione del censimento. I tassi di variazione annualizzati sono stati calcolati come segue:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{t} \quad (1)$$

dove r è il tasso di crescita annualizzato, P_1 è il conteggio della popolazione al tempo del primo censimento, P_2 la popolazione corrispondente all'ultimo censimento e t è il numero di anni trascorso tra i due conteggi. In seguito, le stime delle popolazioni sono state adattate agli anni obiettivo come segue:

$$P_x = P_2 e^{rt} \quad (2)$$

dove P_x rappresenta la stima della popolazione nell'anno obiettivo [SEDAC].

Tra i dataset scaricabili dal centro dati SEDAC (*Socioeconomic Data and Applications Center*) della NASA, c'era la possibilità di scegliere tra diverse tipologie di dati, tra cui:

- Population count v4.10;
- Population Density v4.10;
- UN WWP-Adjusted Population Count v4.10;
- UN WWP-Adjusted Population Density v4.10;
- Basic Demographic Characteristics v4.10;

La scelta è ricaduta su Population Count v4.10 per gli anni 2000, 2005, 2010 e 2015, che costituisce la stima della popolazione in numero di persone per pixel, coerentemente ai registri della popolazione e ai censimenti nazionali, ad una risoluzione massima di 30 secondi di grado (1 km all'Equatore). Anche in questo caso, è stato necessario ritagliare i dati globali per il bacino specifico tramite ArcGis. Dopo di che, la lettura dei dati in formato .tif su Matlab ha prodotto un'immagine per ogni anno considerato, con i diversi valori di densità in legenda. Si riporta, a titolo di esempio, l'immagine relativa all'anno 2000 in **Figura 14**. Si può notare che, come nel caso del GHS POP, il valore massimo di abitanti per km² risulta essere un valore troppo alto e non plausibile, pari a circa 4×10^4 ab/km². Ciò è dovuto al fatto che il database utilizzato produce, a volte, picchi non realistici di densità di popolazione, dovuti probabilmente ad errori sistematici e all'inaffidabilità del sistema. I risultati possono essere tuttavia considerati validi, in quanto il calcolo del valore medio di densità, a livello di bacino, risulta pari a 37.51 ab/km² sempre per l'anno 2000, che risulta coerente con le statistiche generali dell'Africa. [Statistics South Africa].

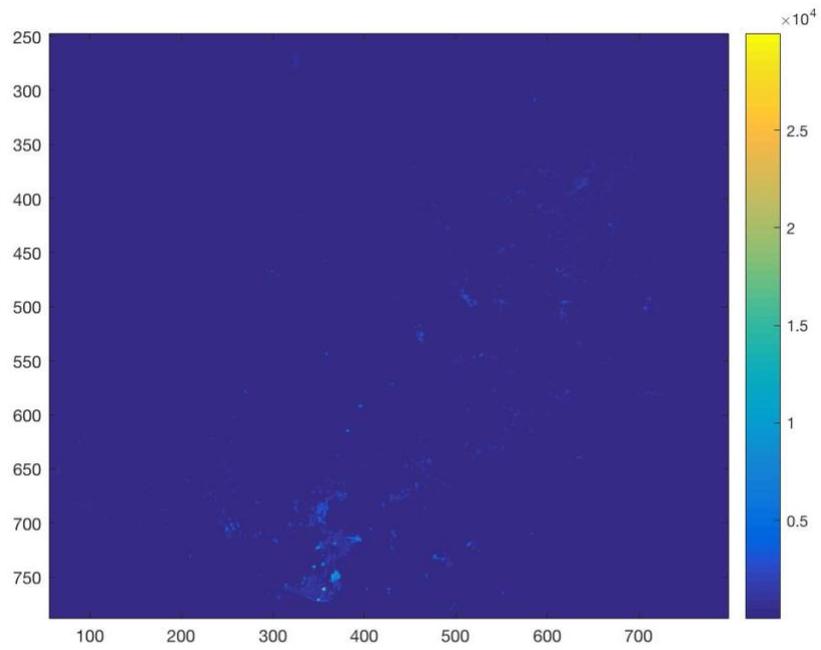


Figura 14. Immagine relativa ai dati di densità, derivanti dalla stima della popolazione (*The Gridded Population of The World*), nella sua quarta versione (GPWv4), per l'anno 2000.

2.4 Identificazione delle classi di distanza all'interno del bacino del Limpopo

Per identificare i cambiamenti temporali e spaziali della distribuzione umana in prossimità al fiume, sono state distinte delle classi di distanza, sia in termini planimetrici che altimetrici. Prerogative fondamentali di questo processo sono stati i formati del bacino idrografico e del relativo reticolo, rigorosamente in raster, per poter distinguere in modo chiaro i pixel all'interno dell'area e formare le classi proprio a partire dalla loro assegnazione. Nel caso planimetrico, sono state scelte 11 classi di distanza dal Limpopo da 0 a 10 km, con 1 km di incremento graduale (come la risoluzione dei dati). Mentre nel caso altimetrico, sono state distinte meno classi (da distanza-1 a distanza-7) non andando oltre i 30 m di differenza di quota, data la minore probabilità di spostamento da parte delle popolazioni verso monti ed alture, nel caso di eventi siccitosi, rispetto alle inondazioni.

2.4.1 Individuazione delle classi di distanza planimetriche

Nel caso planimetrico, è stata scelta la seguente classificazione: i pixel corrispondenti al reticolo idrografico del Limpopo, sono stati definiti con la classe di distanza-0, tutti i pixel adiacenti al fiume sono stati ordinati come pixel di distanza-1, mentre i pixel di distanza-2, distanza-3, distanza-4 fino all'ultima classe di distanza-10 sono stati classificati da zone concentriche, come indicato in **Figura 15**.

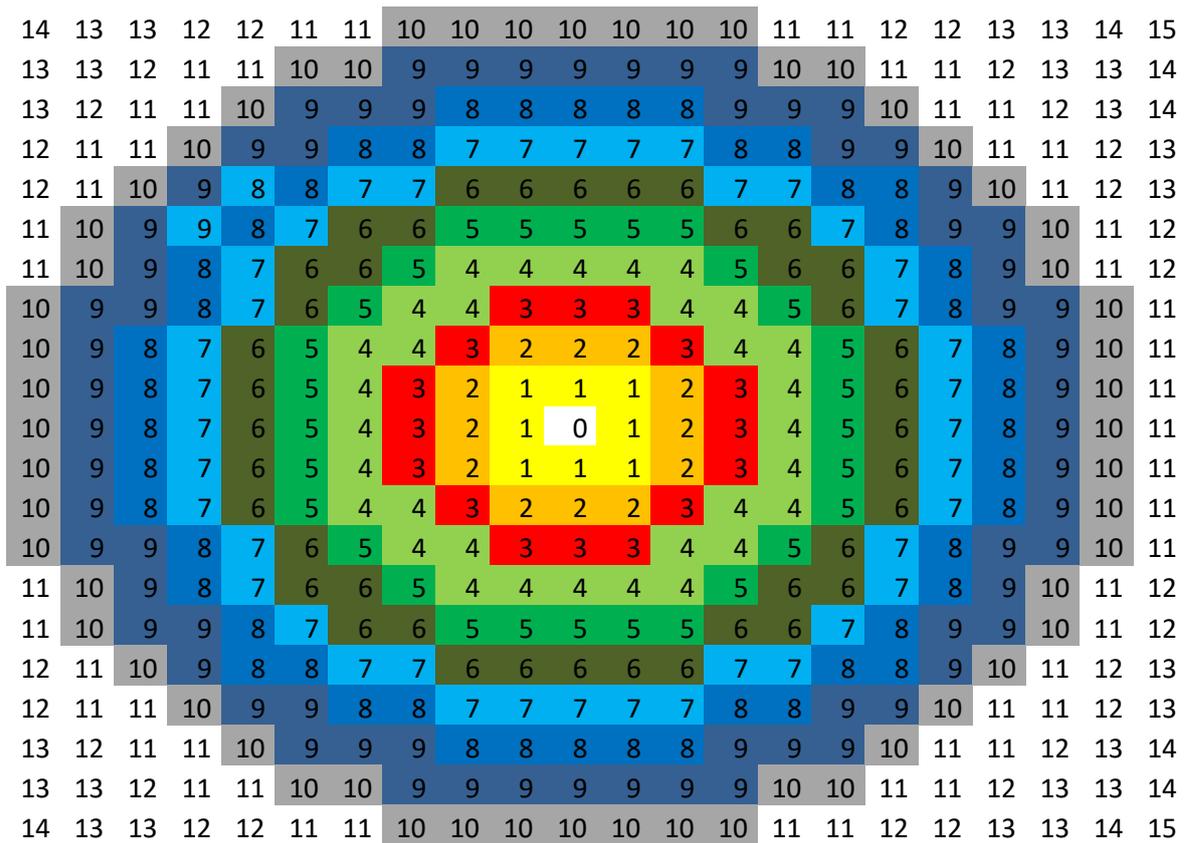


Figura 15. Zone concentriche che individuano le 11 classi di distanza planimetrica (da dist-0 a dist-10).

Pixel con una distanza maggiore della classe di distanza-10 sono stati esclusi dall'analisi, dal momento che essi rappresentano meno del 10% dell'area di studio [Ceola et al., 2014]. Per descrivere più nello specifico la classificazione, è necessario partire dalla risoluzione dei dati scaricati, ossia 30 secondi di grado, corrispondenti ad una distanza di 1 km all'Equatore. Convertendo i 30 secondi in gradi, dividendo cioè per 3600 secondi, si ottiene un valore di 0.00833° . A questo punto, si parte dalla classe dist-0, a cui corrisponderanno i valori pari a zero e coincidenti con il reticolo, per poi passare alla dist-1, a cui viene associato il valore di riferimento pari a 0.00833° , dato dalla moltiplicazione tra 0.00833° e 1 (classe di appartenenza). Così come alla classe dist-2, apparterrà il valore pari a 0.01667 , dato dalla moltiplicazione tra 0.00833° e 2. E così via per tutte le classi fino alla dist-10, come visibile in **Tabella 4**, in cui si mostrano i valori corrispondenti ad ogni classe in km e gradi, tutti calcolati come prodotto tra la classe di appartenenza ed il valore iniziale di conversione pari a 0.00833° , a partire dai quali verranno estratti gli intervalli di riferimento per ogni classe.

Classi	Valore (°)	Valore (km)
0	0	0
1	0.00833	1
2	0.01667	2
3	0.02500	3
4	0.03333	4
5	0.04167	5
6	0.05000	6
7	0.05833	7
8	0.06667	8
9	0.07500	9
10	0.08333	10

Tabella 4. Valori di riferimento in gradi e km per ogni classe di distanza planimetrica.

Trasponendo i valori da colonne a righe, è stato possibile calcolare il resto dei valori appartenenti alle classi, andando a definire dei veri e propri intervalli.

Ciò è stato possibile utilizzando la seguente formula:

$$n = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

Dove x e y rappresentano i numeri che identificano nella matrice, la posizione del valore che si intende calcolare, come mostrato nel seguente esempio, in riferimento alla **Tabella 5**, dove sono riportati tutti i risultati ottenuti:

$$0.0186 = \sqrt{0.0083^2 + 0.0167^2} \quad (4)$$

	0	0.0083	0.0167	0.0250	0.0333	0.0417	0.0500	0.0583	0.0667	0.0750	0.0833
0.0000	0	0.0083	0.0167	0.0250	0.0333	0.0417	0.0500	0.0583	0.0667	0.0750	0.0833
0.0083		0.0118	0.0186	0.0264	0.0344	0.0425	0.0507	0.0589	0.0672	0.0755	0.0837
0.0167			0.0236	0.0300	0.0373	0.0449	0.0527	0.0607	0.0687	0.0768	0.0850
0.0250				0.0354	0.0417	0.0486	0.0559	0.0635	0.0712	0.0791	0.0870
0.0333					0.0471	0.0534	0.0601	0.0672	0.0745	0.0821	0.0898
0.0417						0.0589	0.0651	0.0717	0.0786	0.0858	0.0932
0.0500							0.0707	0.0768	0.0833	0.0901	0.0972
0.0583								0.0825	0.0886	0.0950	0.1017
0.0667									0.0943	0.1003	0.1067
0.0750										0.1061	0.1121
0.0833											0.1179

Tabella 5. Matrice simmetrica completa dei valori in gradi, appartenenti alle classi di distanza.

Sulla base dei valori trovati e riportati in **Tabella 5**, sono stati costruiti gli intervalli di riferimento per ogni classe, mostrati in **Tabella 6**.

Classe	Intervallo (gradi)	Intervallo (km)
Dist-0	0 – 0	0 - 1
Dist-1	0.0083 - 0.0118	1.01 - 1.41
Dist-2	0.016 - 0.020	1.42 – 2.24
Dist-3	0.023 – 0.027	2.25 – 3.16
Dist-4	0.030 - 0.038	3.17 – 4.47
Dist-5	0.040 – 0.045	4.48 – 5.39
Dist-6	0.047 – 0.054	5.40 – 6.32
Dist-7	0.055 – 0.061	6.33 – 7.28
Dist-8	0.063 – 0.071	7.29 – 8.25
Dist-9	0.071 – 0.080	8.26 – 9.49
Dist-10	0.080 – 0.088	9.50 – 10.44

Tabella 6. Intervalli di riferimento a livello planimetrico per ogni classe, espressi in gradi e in km.

Una volta ottenuti gli intervalli di valori per ogni classe, si passa all'utilizzo di Arcgis per determinare la distanza euclidea, ossia la distanza di ogni cella del file raster di input, dal punto di riferimento più vicino, che in questo caso è rappresentato dal fiume Limpopo. Quando i dati di origine di input sono in formato raster, il set di celle d'origine è costituito da tutte le celle del raster di input, che hanno valori validi. Le celle che contengono NoData non sono incluse nel set iniziale ed il valore 0 viene considerato una fonte attendibile. Per cui, la distanza euclidea è calcolata dal centro della cella di origine, al centro di ognuna delle celle circostanti. Concettualmente, l'algoritmo euclideo funziona come segue: per ogni cella, la distanza dalla cella di origine viene determinata calcolando l'ipotenusa di un triangolo che ha come cateti x_{max} e y_{max} , come mostrato in **Figura 16**.

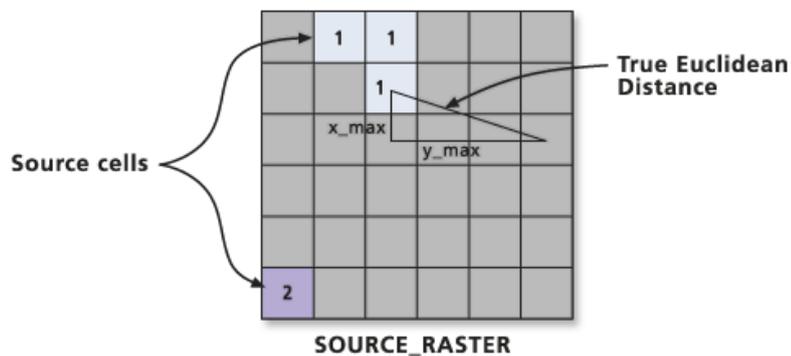


Figura 16. Determinazione della reale distanza euclidea (True Euclidean Distance) – Fonte: ArcGis for Desktop\Help

Da questo processo deriva il calcolo della reale distanza euclidea, piuttosto che della distanza delle celle. Per cui, a questo punto, viene calcolata la distanza più breve dalla fonte di origine e se questa risulta inferiore alla distanza massima, il valore viene assegnato automaticamente alla posizione della cella sul file raster di output, come visibile in **Figura 17.**



Figura 17. Illustrazione della funzione “Euclidean Distance” in ArcGis, dal file raster di origine (Source_Ras) al file di output (Euc_Dist) – Fonte: ArcGis for desktop\ Help

Prima di utilizzare tale funzione, è però necessario identificare con una sola classe e dunque un solo colore il reticolo idrografico (ad esempio classe 1). Successivamente, si passa a classificare anche il bacino inserendo tutti zero, in modo da poterli sommare tramite la funzione “*raster calculator*” di Arcgis, dandogli la stessa dimensione. Ora, è possibile impostare gli intervalli stabiliti e mostrati in **Tabella 5** con diversi colori, così da poter essere riconoscibili e si procede finalmente all’utilizzo della funzione Euclidean Distance, ottenendo il seguente file di output:

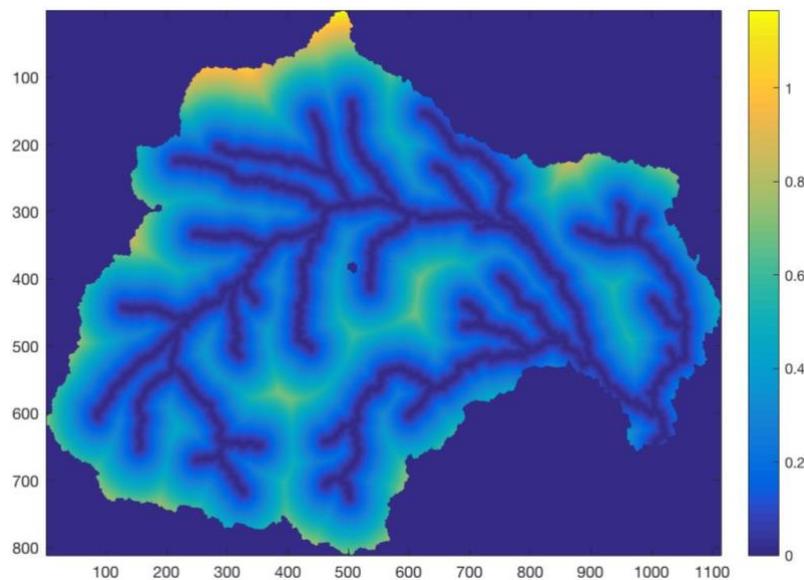
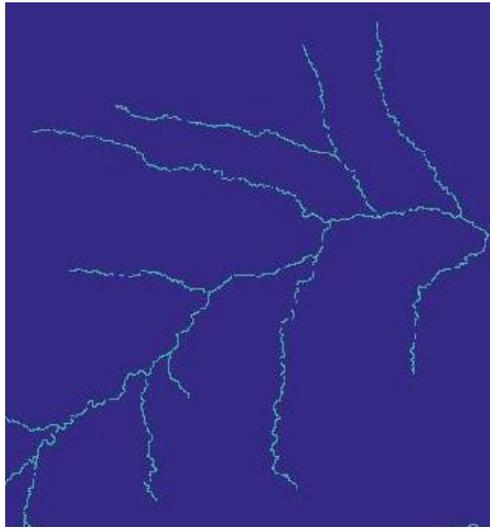
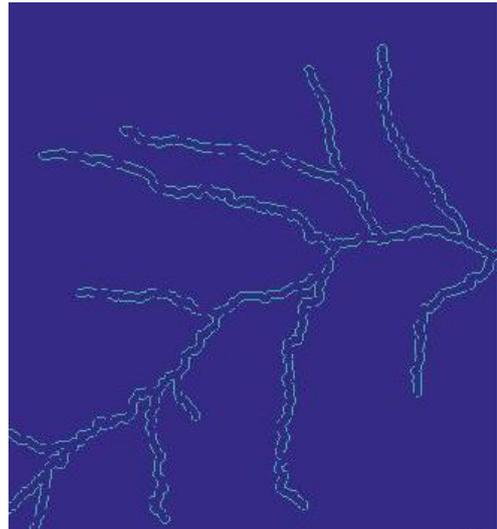


Figura 18. Rappresentazione della divisione in classi di distanza planimetriche all’interno del bacino del Limpopo.

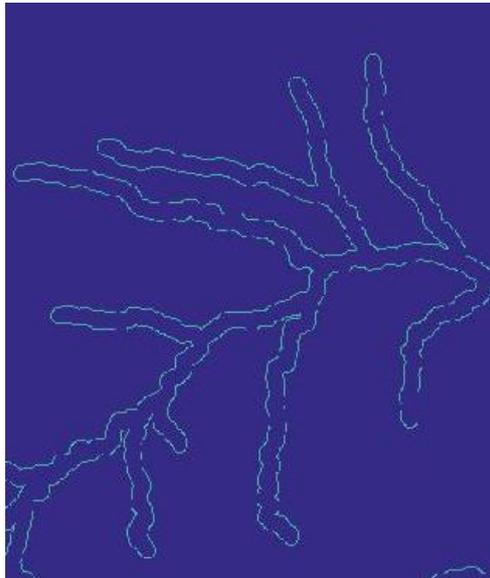
A partire dal file di output ottenuto, verranno definite le classi di distanza planimetriche all’interno del codice Matlab. Si riportano di seguito, a titolo di esempio, degli zoom delle immagini ottenute per le classi di distanza planimetriche 3,6 e 9, mostrate rispettivamente nei pannelli (b), (c) e (d) in **Figura 19** e messe a confronto con il reticolo idrografico identificato dalla classe dist-0, rappresentato nel pannello (a). In questo modo, si avrà un’idea più chiara delle aree incorporate da ogni classe di distanza planimetrica e di come crescano man mano che ci si allontana dal Limpopo.



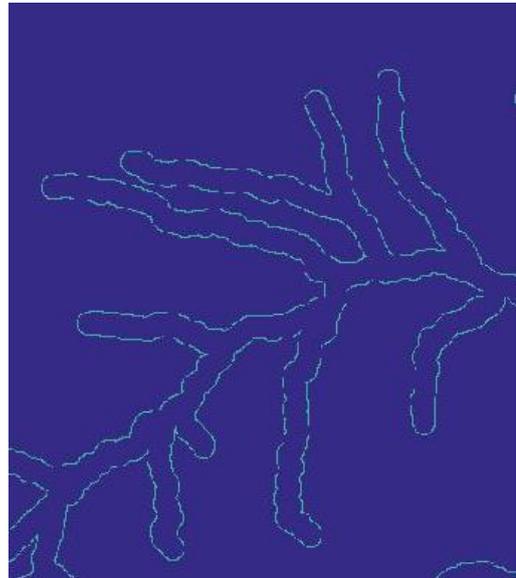
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 19. Nel **pannello (a)** è riportato uno zoom relativo all'immagine risultante dalla classe dist-0, che sta a rappresentare il reticolo idrografico del Limpopo. Nel **pannello (b)** si mostra l'immagine ingrandita corrispondente alla classe di distanza 3, così come nel **pannello (c)** è rappresentata la classe dist-6 ed infine nel **pannello (d)** la classe di distanza 9.

2.4.2 Individuazione delle classi di distanza altimetriche

Per la determinazione delle classi di distanza altimetriche, si è deciso di fare riferimento a dati di elevazione di tipo EAND, estratti direttamente dal DEM (*Digital Elevation Model*), precedentemente scaricato da HydroSHEDS. La sigla EAND, sta a significare letteralmente *Elevation above nearest drainage*, ossia l'elevazione sopra il pixel canalizzato più vicino e rappresenta un descrittore del terreno, che produce un nuovo DEM normalizzato, in cui i valori dei pixel rappresentano le altitudini rispetto al pixel canalizzato locale, invece del livello medio del mare. In questo caso, si lavora dunque con delle quote e non delle distanze e l'obiettivo è quello di allocare i valori di elevazione ai pixel, rispetto al pixel canalizzato locale [Elshorbagy et al., 2017]. Dopo aver identificato la rete di drenaggio del Limpopo, sono state stabilite le classi di elevazione da considerare, riassunte in **Tabella 7**.

Classe	Intervallo EAND (m)
Dist_alt-1	-11 – 2
Dist_alt-2	2 – 5
Dist_alt-3	5 - 10
Dist_alt-4	10 - 15
Dist_alt-5	15 - 20
Dist_alt-6	20 - 25
Dist_alt-7	25 – 30

Tabella 7. Intervalli di riferimento a livello altimetrico per ogni classe, espressi in metri.

Come si può notare dalla tabella sovrastante, si è scelto di limitare le classi ad un'elevazione massima di 30 m, ottenendo così 7 classi di distanza altimetrica. Tali intervalli di valori, sono stati inseriti in ArcGis dopo aver sommato tramite “*raster calculator*” reticolo e bacino, come nel caso planimetrico.

È stato così creato un nuovo raster, utilizzando lo strumento di allocazione euclideo (*Euclidean Allocation*), disponibile nella Toolbox spaziale Analyst di ArcGis (visibile in **Figura 20**).

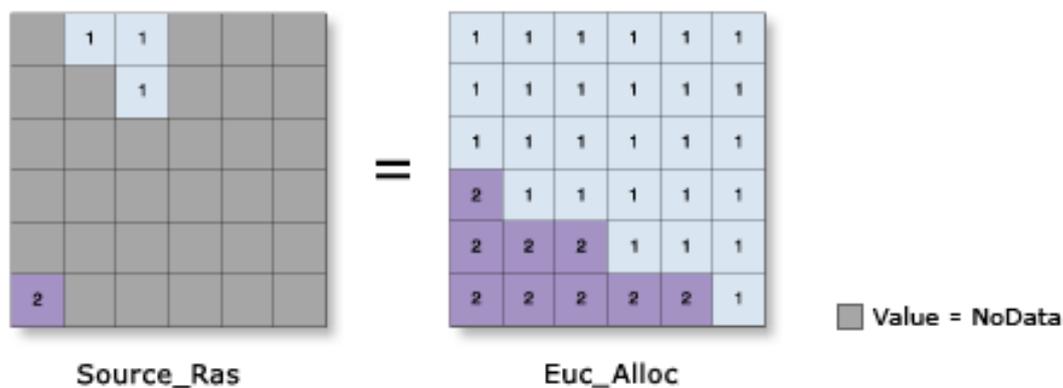


Figura 20. Illustrazione della funzione “Euclidean Allocation” in ArcGis, dal file raster di origine (Source_Ras) al file di output (Euc_Alloc) – Fonte: ArcGis for desktop| Help.

La sua funzione è quella di saper calcolare, per ogni cella, la fonte più vicina in base alla distanza euclidea. Ogni cella, nel file raster di output, è assegnata al valore di origine a cui è più vicina, come determinato dall’algoritmo di distanza euclidea. Ogni cella in un’allocazione riceve il valore della zona a cui verrà assegnata e per fonte si intende una qualsiasi cella o insieme di celle con lo stesso valore o appartenenti alla stessa zona. Se una zona viene disconnessa, il valore assegnato alle celle allocate a tale zona risulta essere la regione più vicina.

Per cui, a tutti i pixel all'interno della trama sono stati assegnati i nuovi valori di elevazione, che corrispondono ai valori di elevazione del più vicino pixel di drenaggio, basato sulla distanza euclidea. Infine, questo file di output è stato sottratto dai prospetti originali per ottenere la mappa EAND per l'area di studio. I valori negativi di EAND potrebbero essere osservati perché vi erano depressioni più in basso rispetto al flusso più vicino [Elshorbagy et al., 2017].

L'immagine risultante, nominata "Limpopo_EAND" è riportata in **Figura 21**.

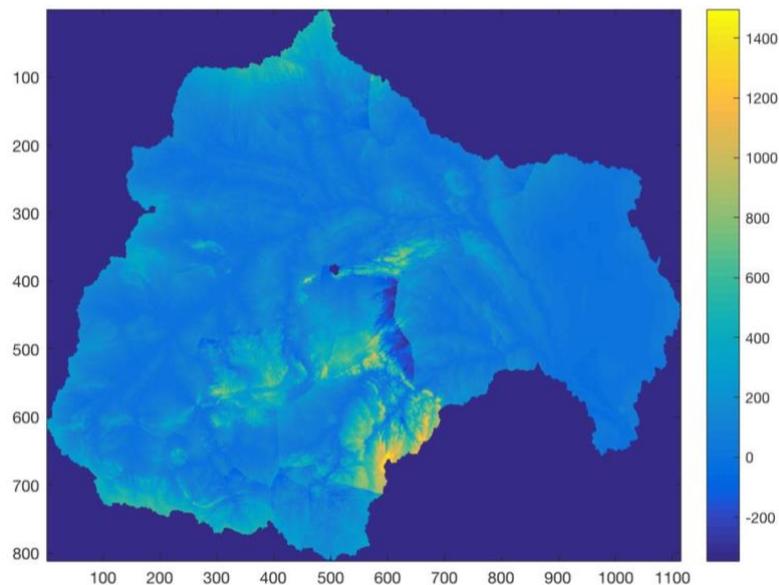
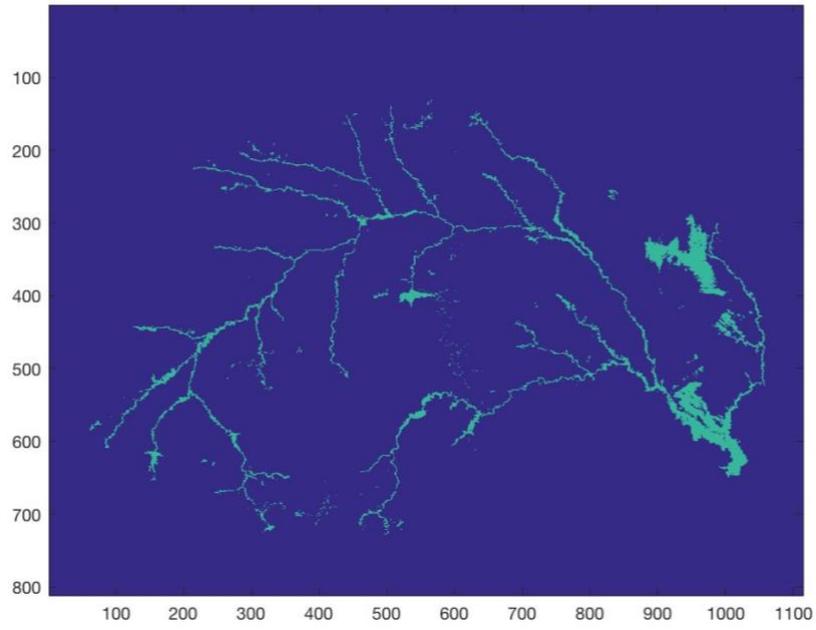
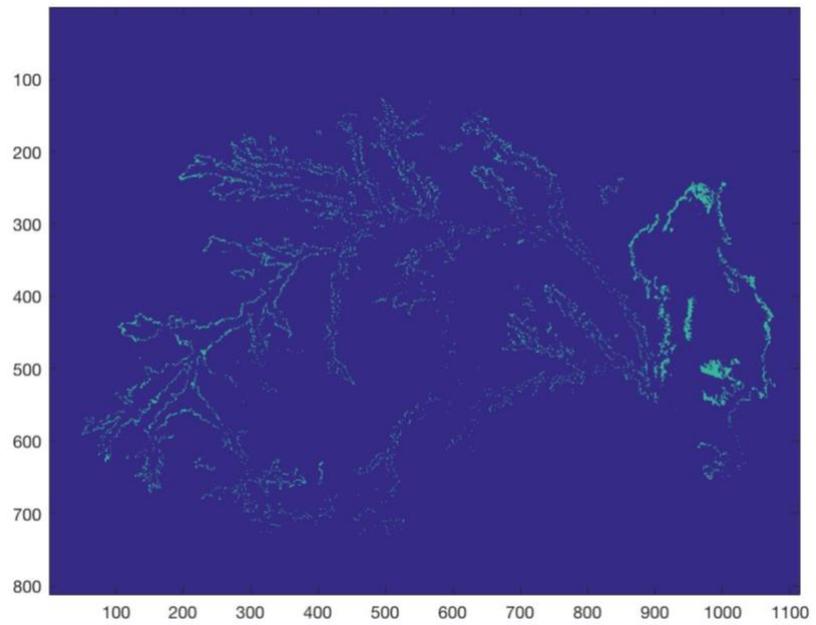


Figura 21. Rappresentazione della divisione in classi di distanza altimetrica, all' interno del bacino del Limpopo.

A partire dal file di output mostrato in **Figura 21**, verranno definite anche in questo caso su Matlab, le classi di distanza altimetriche. Si mostrano di seguito in **Figura 22**, due immagini relative alle classi `dist_alt-1` nel pannello (a) e `dist_alt-7` nel pannello (b), sempre in riferimento allo stesso reticolo idrografico (`dist-0`), utilizzato nel caso delle distanze planimetriche. Osservando le immagini riportate, sarà possibile capire meglio come si evolvono le classi altimetriche, allontanandosi dal Limpopo.



(a)



(b)

Figura 22. Nel **pannello (a)** è riportata l'immagine relativa alla classe di distanza altimetrica 1 e nel **pannello (b)** quella corrispondente alla `dist_alt-7`.

2.5 Analisi di distribuzione spaziale della popolazione e di evoluzione temporale della distanza media dal Limpopo

Per tutto il bacino del Limpopo sono stati esaminati come i singoli pixel ed i valori di luminosità artificiale notturna (NL), di edificato (BU) e di densità di popolazione (GPW e GHS POP) associati, vengano distribuiti tra le classi di distanza considerate, sia planimetriche che altimetriche. A partire da ciò, sono state calcolate diverse grandezze per poter condurre l'analisi di distribuzione spaziale della popolazione e di evoluzione temporale della distanza media dal fiume.

Innanzitutto, è stato calcolato il numero di pixel $n_j(x)$ appartenenti ad ogni classe di distanza, dove j varia da 0 a 10 nel caso planimetrico e da 1 a 7 nel caso altimetrico, così come il numero totale di pixel $n_{tot}(x)$, definito come segue:

$$n_{tot}(x) = \sum_{j=0}^n n_j(x) \quad (5)$$

Dopo di che, per tenere conto della distribuzione umana attraverso le classi di distanza di ogni tipo di dato, è stata calcolata la somma assoluta dei dati di luce, di edificato e di densità di popolazione, per ogni anno considerato:

$$SOL_j(x, t) = \sum_{i=1}^{n_j(x)} DN_i(x, t) \quad (6)$$

dove $DN_i(x,t)$ identifica il tipo di valore considerato associato ad un pixel i e $n_j(x)$ rappresenta sempre il numero di pixel per ogni classe. Fino a calcolare la somma totale data da:

$$SOL_{TOT}(x, t) = \sum_{j=0}^{10} SOL_j(x, t) \quad (7)$$

nel caso planimetrico, e in quello altimetrico da:

$$SOL_{TOT}(x, t) = \sum_{j=1}^7 SOL_j(x, t) \quad (8)$$

Tali grandezze sono di fondamentale importanza per poter determinare rispettivamente, il valore medio relativo ed assoluto di ogni tipo di dato, con le seguenti formule generali:

$$AOL_j(x, t) = \frac{SOL_j(x, t)}{n_j(x)} \quad (9)$$

e

$$AOL_{TOT}(x, t) = \frac{SOL_{TOT}(x, t)}{n_{TOT}(x)} \quad (10)$$

Per poi arrivare a ricavare la distanza umana media rispetto alla rete fluviale, considerando esseri umani casuali, calcolata dalle seguenti formule per i 2 casi, rispettivamente planimetrico ed altimetrico:

$$d_{SOL}(x, t) = \sum_{j=0}^{10} \frac{j * SOL_j(x, t)}{SOL_{TOT}(x, t)} \quad (11)$$

e

$$d_{SOL}(x, t) = \sum_{j=1}^7 \frac{j * SOL_j(x, t)}{SOL_{TOT}(x, t)} \quad (12)$$

dove t rappresenta un generico anno tra quelli considerati e la distanza umana dal fiume (d_{SOL}), misurata in pixel, è definita come una media ponderata del totale di luminosità, densità e percentuale di edificato per ogni classe di distanza ed il rapporto tra $SOL_j(x, t)$ e $SOL_{tot}(x, t)$, rappresenta il peso [Ceola et al., 2014].

Le grandezze elencate sono state calcolate per ogni anno ed ogni classe di distanza assumendo un nome opportuno, in funzione della tipologia di dato considerata, come mostrato in **Tabella 8**.

Nightlight (NL)			
Planimetrico	SONL_plan	AONL_plan	Dist_SONL
Altimetrico	SONL_alt	AONL_alt	Dist_SONL_alt

(a)

Built – up (BU)			
Planimetrico	SOBU_plan	AOBU_plan	Dist_SOBU
Altimetrico	SOBU_alt	AOBU_alt	Dist_SOBU_alt

(b)

Global Human Settlement Population grid (GHS POP)			
Planimetrico	SOGHS_plan	AOGHS_plan	Dist_SOGHS
Altimetrico	SOGHS_alt	AOGHS_alt	Dist_SOGHS_alt

(c)

Gridded Population of The World (GPW)			
Planimetrico	SOGPW_plan	AOGPW_plan	Dist_SOGPW
Altimetrico	SOGPW_alt	AOGPW_alt	Dist_SOGPW_alt

(d)

Tabella 8. Denominazione delle grandezze calcolate, in funzione del tipo di dato. In **tabella (a)** sono riportate le sigle per identificare le grandezze riguardanti i dati di luce (Nightlight). In **tabella (b)** le sigle che identificano le grandezze ricavate dai dati sulla percentuale di edificato (BU), in **tabella (c)** si trovano le sigle per quanto riguarda i dati di densità di popolazione GHS POP, del Portale Europeo ed infine in **tabella (d)** le sigle che si riferiscono ai dati sulla densità di popolazione dei dati GPW, gestiti dalla NASA.

Data la consistente mole di dati, si è scelto di utilizzare il calcolatore numerico Matlab per effettuare automaticamente e velocemente i calcoli di tutte le grandezze contenute in **Tabella 8**, applicando lo stesso codice per ogni tipo di dato, riportato nelle appendici A e B. Tutti gli script ottenuti, sia planimetrici che altimetrici, hanno prodotto i seguenti risultati significativi:

- Una matrice totale 811×1114 per ogni tipo di dato (NL, BU, GHS e GPW), contenente tutti i valori (rispettivamente da 0 a 1, da 0 a 63, e da 0 al valore massimo di densità di popolazione) all'interno del bacino;
- Una matrice 811×1114 per ogni classe di distanza, ognuna contenente i pixel appartenenti alla classe presa in considerazione, che sono stati imposti pari a 1, per permettere poi la moltiplicazione con i valori reali appartenenti ad ogni classe di distanza. Il risultato di tale operazione corrisponde ad una matrice $811 \times 1114 \times 11$ nel caso planimetrico, in cui si trovano 11 classi e $811 \times 1114 \times 7$ nel caso altimetrico (7 classi) ed è identificata all'interno del codice Matlab, con la sigla NL_dist, BU_dist, GHS_dist e GPW_dist.
- Una matrice 11×4 (per BU, GHS e GPW) e 11×22 (per NL), contenente i risultati relativi al calcolo delle sommatorie SOBU, SOGHS, SOGPW e SONL;
- Una matrice 11×4 (per BU, GHS e GPW) e 11×22 (per NL) contenente i risultati relativi al calcolo dei valori medi AOBU, AOGHS, AOGPW e AONL;
- Una matrice 1×4 (per BU, GHS e GPW) e 1×22 (Per NL) contenenti i risultati relativi al calcolo della distanza umana media: dist_SOBU, dist_SOGHS, dist_SOGPW e dist_SONL;
- Una matrice 1×4 (per BU, GHS e GPW) e 1×22 (Per NL) contenenti i valori totali di luminosità, edificato e densità di popolazione: SOBU_tot, SOGHS_tot, SOGPW_tot e SONL_tot.

Per meglio comprendere il metodo utilizzato, si riporta di seguito un esempio di matrice 10x10, estrapolata dalla matrice 811x1114 dei dati di Built – up del 1975.

4	3	2	2	2	2	2	3	4	4
3	2	1	1	1	1	1	2	3	4
2	1	1	0	0	0	1	1	2	3
1	1	0	1	1	1	0	1	1	2
1	0	1	1	2	1	1	0	1	2
0	1	1	2	3	2	1	0	1	2
1	1	2	3	3	2	1	0	1	1
2	2	3	3	3	2	1	1	0	1
3	3	4	4	4	3	2	1	1	0
4	4	4	5	4	4	3	2	1	0

(a)

0	0	0.0244	0.0162	0.0162	0.0005	0	0	0	0
0	0.0023	0.0648	0.0705	0.0705	0.0229	0.0025	0	0	0.0054
0	0.0005	0.070	0	0	0	0.0003	0.0016	0.0016	0
0	0.030	0	0.0118	0.0013	0	0	0.020	0	0
0	0	0.0029	0.0098	0.0081	0	0	0	0	0
0	0.0006	0.0006	0	0	0.0020	0	0	0	0
0.0004	0.0004	0	0.0074	0	0	0	0	0	0
0.0024	0.0024	0	0.0055	0.0329	0.0329	0.0046		0	0
0	0	0	0.0007	0.1926	0.1926	0.0974	0.0254	0	0
0	0	0	0.0116	0.0116	0.0643	0.2597	0.0212	0	0

(b)

Figura 23. Nel pannello (a) è riportata la matrice che identifica il fiume con la classe dist-0 e le altre classi fino alla dist-5. Nel pannello (b) sono riportati i valori di una matrice 10x10 estratta dai valori di Built-up del 1975.

La matrice (a) identifica 5 classi di distanza in funzione dell’andamento del Limpopo (rappresentato dagli zero) a partire da dist-1, a ridosso del fiume, fino a dist-2, dist-3, dist-4 e dist-5, via via più lontane. La matrice (b) contiene dei valori random da 0 a 1, relativi ai dati di Built-up del 1975 ed ogni casella corrisponde ad un pixel dell’immagine Built-up, letta tramite la funzione “geotiffread”, in Matlab.

La sovrapposizione delle due matrici, permette di identificare la classe a cui appartiene ogni valore, consentendo così il calcolo del numero di pixel per ogni classe $n_j(x)$ e di conseguenza delle grandezze utili $SOL_j(x,t)$, $SOL_{TOT}(x,t)$, $AOL_j(x,t)$ e $dsOL(x,t)$, come riportato in **Tabella 9**.

classe j	$n_j(x)$	$SOL_j(x,t)$	$SOL_{tot}(x,t)$	$AOL_j(x,t)$	$dsOL_j(x,t)$
0	13	0	1.423	0	2.471
1	37	0.411		0.011	
2	22	0.228		0.010	
3	15	0.498		0.033	
4	12	0.275		0.023	
5	1	0.012		0.012	

Tabella 9. Esempio di calcolo di $SOL_j(x,t)$, $SOL_{TOT}(x,t)$, $AOL_j(x,t)$, $dsOL(x,t)$ per una matrice 10x10, estratta dai dati di Built-up del 1975.

I dati in **Tabella 9**, possono essere così interpretati: la classe dist-1, ad esempio, più vicina al fiume, è caratterizzata da 37 pixel, la sommatoria dei valori di Built-up contenuti in tali pixel è di 0.411, mentre la media è di circa 0.011. Infine, la somma totale dei valori di BU di tutte le classi è di 1.423 e la distanza umana media rispetto al Limpopo, considerando esseri umani casuali ed i dati utilizzati, è di circa 2.471 km. Lo stesso concetto è stato applicato alle 11 classi planimetriche ed alle 7 classi altimetriche per gli anni dal 1992 al 2013 delle Nightlight, 1975, 1990, 2000 e 2014 dei dati Built-up; 1975, 1990, 2000 e 2015 per i dati GHS POP e 2000, 2005, 2010 e 2015 per i dati GPW, all'interno del bacino del fiume Limpopo.

3. CASO DI STUDIO: IL BACINO DEL FIUME LIMPOPO

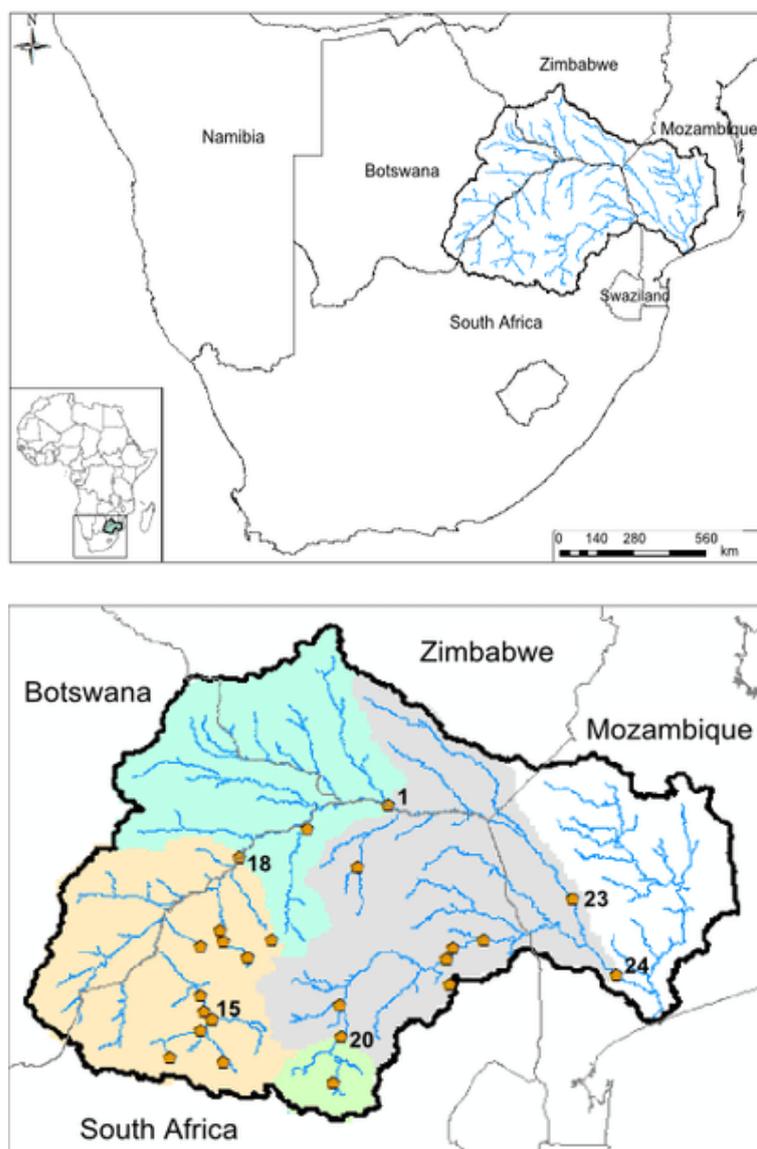


Figura 24. Il bacino del fiume Limpopo e la sua collocazione geografica – Fonte: P. Trambauer et al., 2014.

Il bacino del fiume Limpopo ha un'area di drenaggio di circa 408 250 km², che lo rende uno dei bacini idrografici più vasti della regione SADC (The Southern African Development Community). Il Limpopo percorre una distanza di oltre 1750 km, a partire dalla confluenza dei fiumi Marcio e Cocardile in Sud Africa, fino all'Oceano Indiano in Mozambico. Lungo il suo percorso segna per 640 km il confine tra il Sud Africa sulla riva destra e il Botswana e lo Zimbabwe, rispettivamente a Nord-Est e a Nord, prima di passare per Pafuri, in Mozambico.

Il bacino è dunque condiviso da quattro Paesi: Sud Africa (45%), Botswana (20%), Mozambico (20%) e Zimbabwe (15%), come mostrato in **Tabella 10**.

Paese	Area occupata dal Bacino in ogni Paese (km²)	Percentuale di Bacino
Botswana	81 400	20 %
Mozambico	79 800	20 %
Sud Africa	184 150	45 %
Zimbabwe	62 900	15 %
Totale	408 250	

Tabella 10. Tabella riassuntiva delle aree e delle percentuali di Bacino occupate nei 4 Paesi – Fonte: LBPTC 2010, [Limpopo RAK].

La morfologia del bacino è costituita da una serie di pianure, a cui si alternano diversi monti ed alte montagne. Il punto più alto dell'intero bacino è nelle montagne Drakensberg, nella parte Nord del Sud Africa, a circa 2328 m s.l.m. Segue in Zimbabwe, il secondo punto più elevato a circa 1609 m ed in Botswana, vicino Lobatse, a 1510 m [Limpopo RAK]. Il clima nel bacino varia lungo il percorso del fiume, da clima temperato nella parte occidentale a clima subtropicale nella foce del fiume in Mozambico. Anche se la maggior parte del bacino si trova in una zona semi-arida, la parte superiore si trova nel deserto del Kalahari, dove è particolarmente arido. Le regioni aride e semi-aride, sono generalmente caratterizzate da un'elevata variabilità interannuale delle precipitazioni, che risultano essere irregolari [Wikipedia].

Le piogge nel bacino sono definibili infatti come stagionali, causa sia di frequenti siccità, che di alluvioni. La piovosità all'interno del bacino varia generalmente da 250 a 1050 mm/anno, con una media annua di circa 530 mm/anno ed i mesi più piovosi risultano essere quelli estivi (da ottobre ad aprile). In **Tabella 11**, sono mostrati esattamente i valori di precipitazione annuale minimi, massimi e medi in mm per tutti i Paesi che comprendono il bacino del Limpopo. I rimanenti mesi dell'anno sono completamente secchi. Durante tali periodi, un sole torrido prosciuga i letti dei fiumi e non mancano annate di vera e propria carestia.

Paese	Precipitazioni annuali nell' area del bacino (mm)		
	Min	Max	Medio
Botswana	250	555	425
Mozambico	355	865	535
Sud Africa	290	1050	590
Zimbabwe	300	635	465
Bacino del Limpopo	250	1050	530

Tabella 11. Valori di precipitazione annuale (mm) per Paese, nel bacino del fiume Limpopo – Fonte: CGIAR 2003, [Limpopo RAK].

Nel bacino del Limpopo vivono circa 14 milioni di persone e si distinguono due province: la provincia del Limpopo in Sudafrica e la provincia di Gaza in Mozambico. La densità di popolazione risulta essere pari a circa 40 ab/km² e spesso la richiesta d'acqua eccede la riserva d'acqua, rappresentata dal Limpopo stesso. Molti degli abitanti del bacino, vivono in povertà e la fame e la malnutrizione li affliggono durante la siccità e nei periodi di cattivo raccolto. Le acque del Limpopo hanno, inoltre, un corso lento e sabbioso, a causa delle piogge stagionali ed imprevedibili. Negli anni di siccità, la parte superiore del Limpopo scorre solo per una quarantina di giorni o anche meno. Generalmente, l'area del bacino idrografico viene suddivisa in due parti: quella superiore arida, corrispondente al deserto del Kalahari ed il bacino inferiore, costituito da un'area fertile e densamente popolata, occasionalmente interessata dalle alluvioni della stagione delle piogge [Limpopo RAK].

Nel Febbraio del 2000, nel Sud del Mozambico si è verificato l'evento alluvionale più grande a cui avessero mai assistito. Morirono 800 persone, più di 4.5 milioni di persone vennero colpite, per un totale di US\$541 milioni di danni. Nel 2008, la diga riabilitata di Massingir, sul Limpopo, impedì inondazioni che avrebbero potuto colpire gravemente la città di Chókwe, ma la condizione attuale delle infrastrutture di controllo da alluvioni è ancora in disperato bisogno di riparazioni ed implementazioni. Nel Gennaio del 2013, infatti, il bacino del Limpopo, fu protagonista di un'altra importante inondazione. Tale evento richiamava esattamente quello del 2000 in termini di impatto idrologico, ma ci furono meno danni, con una riduzione delle vittime dall' 83% al 77%, così come delle perdite economiche e dei danni. Questo fu attribuito al fatto che le comunità avevano imparato la lezione dal 2000 e da lì fu implementato un programma sull'educazione al rischio idrologico e sulla filosofia di ricollocazione delle comunità più lontano dal fiume [Mård et al., 2018].

La lontananza dal fiume, in queste terre, si traduce però in lontananza dalla fonte primaria di sopravvivenza: l'acqua. Soprattutto in un'area in cui la richiesta d'acqua per irrigazione prende la più grande parte e le attività agricole costituiscono la maggiore porzione d'uso del suolo nel bacino. Per cui, il susseguirsi di eventi siccitosi, dopo l'allontanamento della popolazione dal Limpopo, ha spesso procurato maggiori danni e morti, rispetto agli eventi alluvionali. È stato infatti verificato che, nel bacino del Limpopo, il coefficiente di deflusso ($RC = \text{deflusso}/\text{precipitazione}$) è notevolmente basso. Per una delle stazioni di misura con la più grande area di drenaggio, Chókwe, il coefficiente di deflusso è solo 4,3% per il deflusso naturalizzato e un mero 1,7% per il deflusso osservato (senza naturalizzazione). Questi coefficienti sono sorprendentemente bassi, in quanto significa che su 539 mm/anno di pioggia annua, solo 23 mm/anno (bacino medio) si trasformano annualmente in deflusso, compresa l'estrazione. La domanda totale stimata presente nel bacino, è di circa $4700 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$. Il deflusso naturale totale generato dalla pioggia è di circa $7.200 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, per cui una parte significativa del deflusso generato nel bacino è attualmente utilizzato. La domanda maggiore di acqua arriva in particolare dalla parte sudafricana, dove circa 244 000 ettari di terreno hanno bisogno di irrigazione. Ed è proprio questo continuo alternarsi di eventi siccitosi ed alluvionali che genera gravi danni a tale settore e dunque alla popolazione, costretta al costante allontanamento ed avvicinamento al fiume, solo per poter sopravvivere [Trambauer et al., 2014].

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Da qui in poi, si riportano i risultati più significativi, ottenuti dall'analisi della distribuzione della popolazione in prossimità del fiume Limpopo. Come illustrato nel Capitolo 2, la distribuzione antropica è analizzata sia da un punto di vista planimetrico che altimetrico. Innanzitutto, verranno mostrati i risultati ottenuti prendendo in considerazione le classi di distanza planimetriche. Si analizzeranno dapprima quelli di luminosità artificiale notturna (AONL_plan), mostrando l'andamento dei valori medi di luminosità negli anni tra il 1992 e il 2013, nonché l'evoluzione temporale della distanza umana media dal Limpopo (Dist_SONL). Allo stesso modo verranno illustrati i risultati relativi ai dati sulla percentuale di edificato (AOBU_plan e dist_SOBU) e di densità di popolazione (AOGHS_plan, dist_SOGHS e AOGPW_plan, dist_SOGPW).

Successivamente si passerà ai risultati derivanti dall'analisi altimetrica che mostreranno, invece, solo l'andamento medio dei vari tipi di dati (AONL_alt, AOBU_alt, AOGHS_alt e AOGPW_alt), al fine di fornire un'idea di come e se la popolazione si sia spostata anche in quota. Verrà infine mostrata la correlazione tra l'indice di siccità idrologico SRI e la distanza media degli insediamenti umani dal fiume, prendendo in considerazione solamente i dati di luminosità artificiale notturna.

4.1 Analisi planimetrica della distribuzione della popolazione

4.1.1 Risultati relativi ai dati di luminosità artificiale notturna (NL)

L'andamento medio dei dati di luminosità artificiale notturna (Nighttime light data), che vanno dal 1992 al 2013, è rappresentato in **Figura 25**:

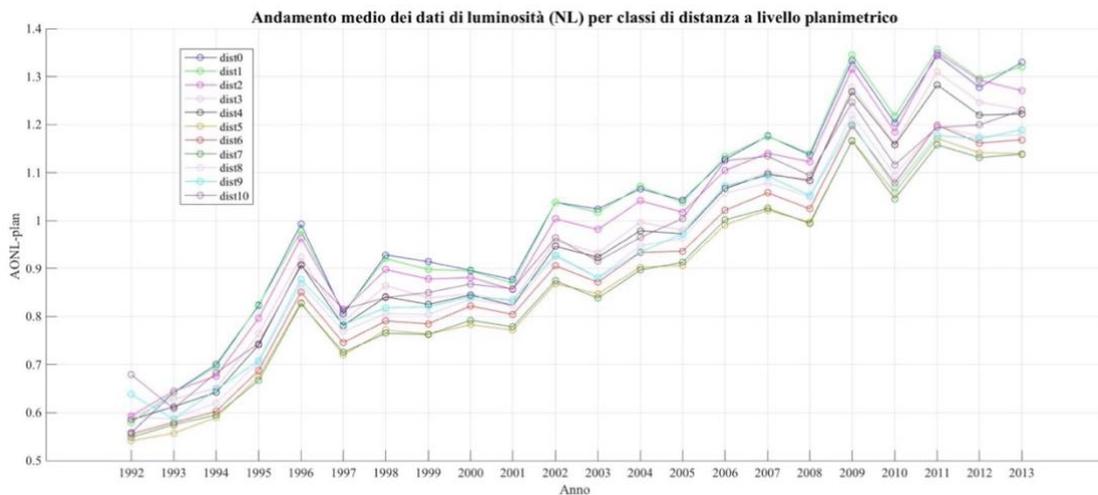


Figura 25. Andamento medio negli anni dei dati di luminosità artificiale notturna (AONL_plan) per ogni classe di distanza (da dist-0 a dist-10), a livello planimetrico.

Come si può notare dalla **Figura 25**, per ogni classe di distanza, l'andamento è complessivamente crescente negli anni, con picchi più evidenti di massimo nel 1996, 2002, 2009 e 2011. Non si registrano dunque grandi differenze tra le classi di distanza, in quanto i trend per ogni classe si mantengono più o meno vicini dal 1992 al 2013. L'evoluzione temporale della distanza media degli insediamenti umani dal Limpopo, presentata in **Figura 26**, ci informa del fatto che la distanza globalmente diminuisce dal 1992 al 2013, ma con diverse fluttuazioni nel corso degli anni. Si riconoscono, infatti, dei minimi locali negli anni 1995, 1998, 2003 e 2011 e dei massimi locali nel 1997, 2001, 2006 e 2013.

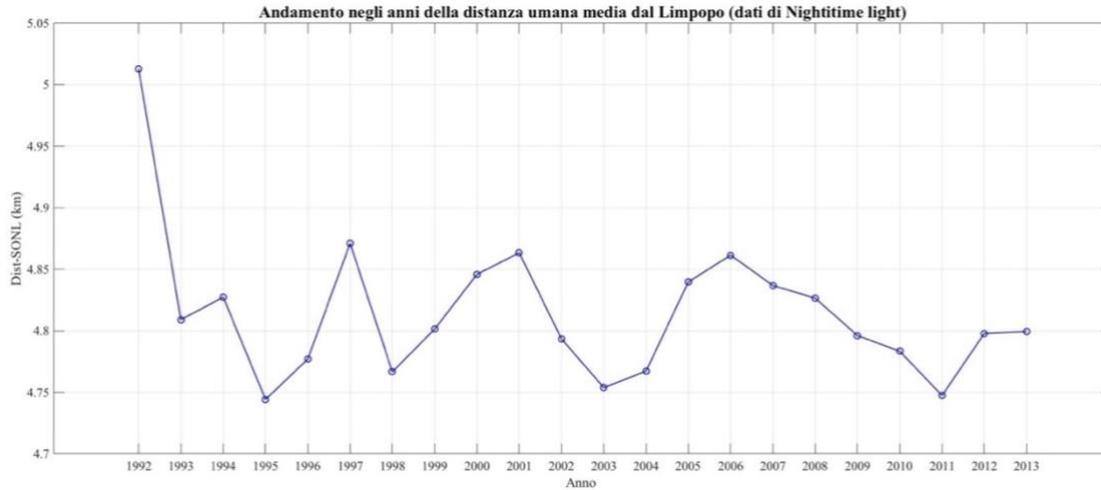


Figura 26. Evoluzione temporale dal 1992 al 2013 della distanza degli insediamenti umani dal Limpopo, a livello planimetrico, ricavata dai dati di luminosità artificiale notturna (NL).

Per cui, si nota che la distanza dal fiume registrata nel 1992 pari a circa 5.013 km, diminuisce fino a 4.744 km nel 1995, per poi aumentare nuovamente nel 1997 e tornare a 4.767 km nel 1998 e tale andamento si ripete con le stesse fluttuazioni fino al 2013. Anche se le differenze tra le distanze negli anni sono in realtà pari a circa 250 – 300 m, i riavvicinamenti al fiume, avvengono proprio negli anni individuati come siccitosi per il bacino del Limpopo.

4.1.2 Risultati relativi ai dati sulla percentuale di edificato (BU)

Il calcolo dei valori medi di Built-up (BU) per ogni classe di distanza planimetrica all'interno del bacino del Limpopo, considerando gli anni 1975, 1990, 2000 e 2014, ha prodotto il seguente risultato (**Figura 27**):

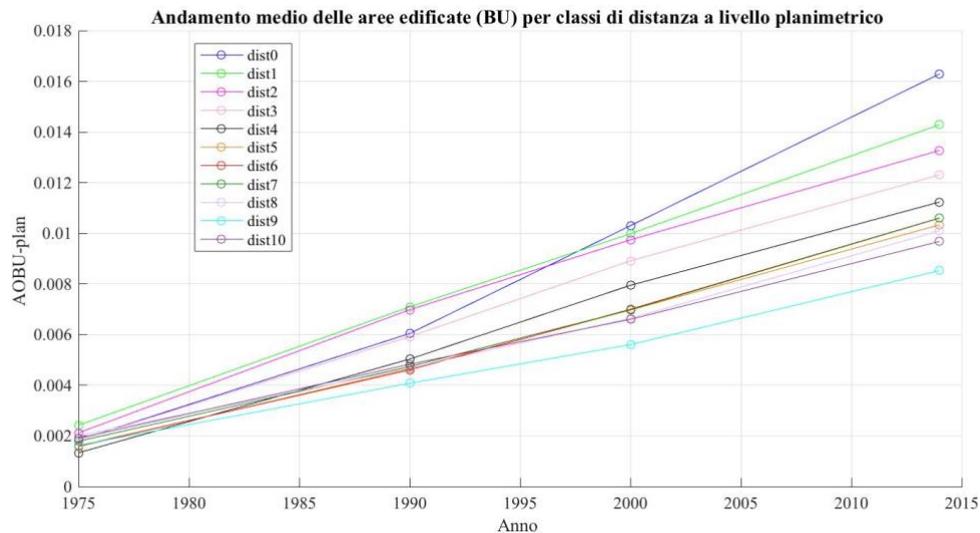


Figura 27. Andamento medio dei dati sulla percentuale di edificato (AOBU_plan) per ogni classe di distanza (da dist-0 a dist10), a livello planimetrico negli anni: 1975, 1990, 2000 e 2014.

Se si osservano i cerchietti che indicano i valori per ogni anno di riferimento, si può notare come questi si allontanino sempre di più nel corso degli anni, non mantenendosi più o meno costanti come nel caso dei dati di luminosità. L'aumento più significativo si registra nell'area corrispondente al fiume, la classe dist-0 evidenziata in blu e in cui le aree edificate passano dallo 0.18 % nel 1975, all' 1.6 % nel 2014. Il meno evidente è invece per una delle classi più lontane dal fiume (dist-9), in cui si passa dallo 0.16 % allo 0.85% di aree edificate.

Il grafico riguardante l'andamento della distanza umana media dal Limpopo, è riportato in **Figura 28** e mostra che, anche in questo caso, la distanza complessivamente diminuisce nel corso degli anni. In particolare, subisce una diminuzione di quasi 400 m dal 1975 al 2000, seguita da un insignificante incremento dal 2000 al 2014. Essendo gli anni a disposizione molto distanti tra loro, non è possibile effettuare un'analisi dettagliata anno per anno, come nel caso dei dati di luminosità, ma si può osservare che la diminuzione più importante c'è stata nell'arco temporale in cui sono stati rilevati il maggior numero di eventi di siccità e le siccità più severe (1982-83, 1986-87, 1991-92, 1994-95) all'interno del bacino del Limpopo.

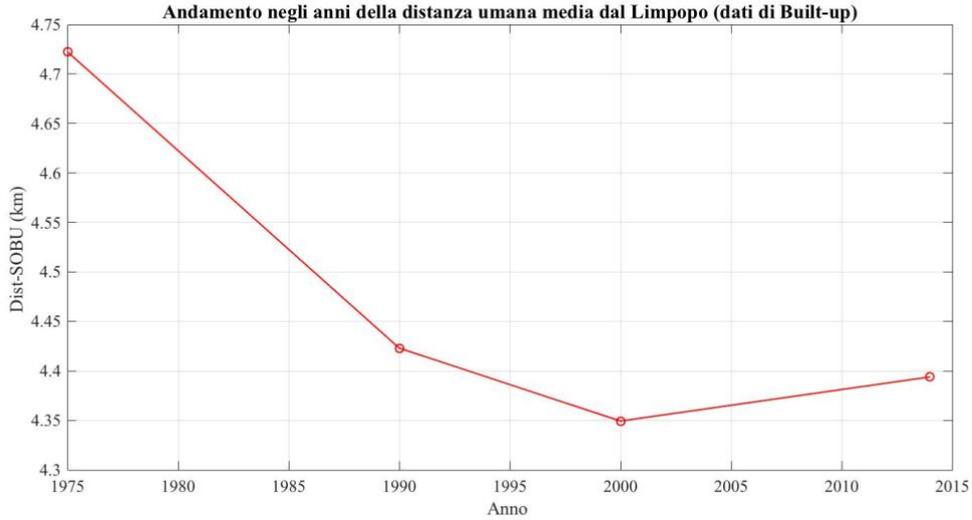


Figura 28. Evoluzione temporale della distanza degli insediamenti umani dal Limpopo, a livello planimetrico, ricavata dai dati sulla percentuale di edificato (BU), per gli anni: 1975, 1990, 2000 e 2014.

4.1.3 Risultati relativi ai dati di densità di popolazione (GHS POP)

Per quanto riguarda l'andamento medio dei dati sulla densità di popolazione estratti dal database europeo GHSL per gli anni: 1974, 1990, 2000 e 2015, il risultato finale è il seguente (**Figura 29**):

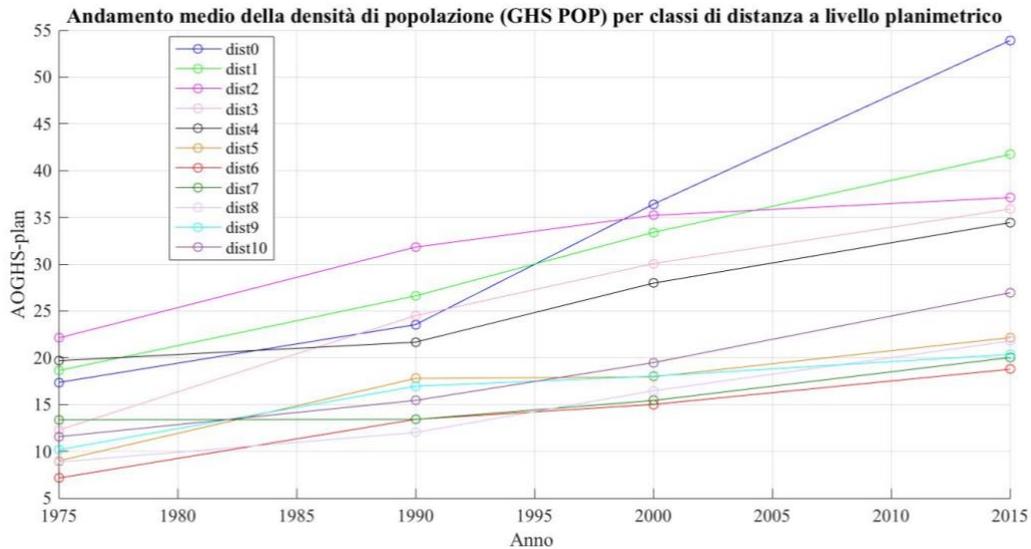


Figura 29. Andamento medio dei dati di densità di popolazione (AOGHS_plan), per ogni classe di distanza (da dist-0 a dist-10), a livello planimetrico negli anni: 1975, 1990, 2000 e 2015.

Globalmente, anche in questo caso, la densità di popolazione aumenta in tutte le classi di distanza nel corso degli anni. L'incremento più significativo si ha sempre nella classe dist-0, corrispondente al fiume Limpopo, per cui gli abitanti per km² passano da 17.35 ab/km² a 53.89 ab/km² ed a seguire le classi più in prossimità del fiume: dist-2, dist-1, dist-4. Mentre, gli incrementi meno evidenti si hanno dalla classe dist-6 alla classe dist-10 e dunque più lontane dal fiume.

In **Figura 30**, viene presentato, invece, il grafico relativo all'evoluzione temporale della distanza umana media:

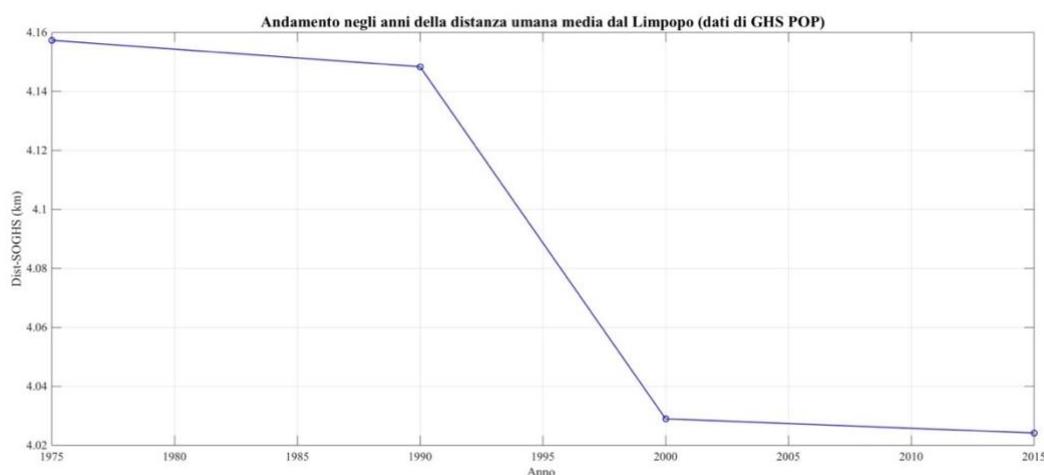


Figura 30. Evoluzione temporale della distanza degli insediamenti umani dal Limpopo, a livello planimetrico, ricavata dai dati sulla densità di popolazione (GHS POP) per gli anni: 1975, 1990, 2000 e 2015.

Anche se complessivamente la distanza diminuisce sempre nel corso del tempo, gli spostamenti registrati attraverso i dati di densità di popolazione GHS POP sono in realtà minimi. Infatti, la diminuzione massima che si osserva dal 1975 al 2015 è solo di 130 m e quella dal 1990 al 2000, di circa 120 m (da 4.148 km a 4.029 km).

4.1.4 Risultati relativi ai dati di densità di popolazione (GPW)

Infine, si mostrano i grafici relativi ai risultati ricavati dai dati di densità di popolazione provenienti dal database CIENSIN-NASA (GPW), a partire dall'andamento medio dei dati GPW negli anni: 2000, 2005, 2010 e 2015 (**Figura 31**):

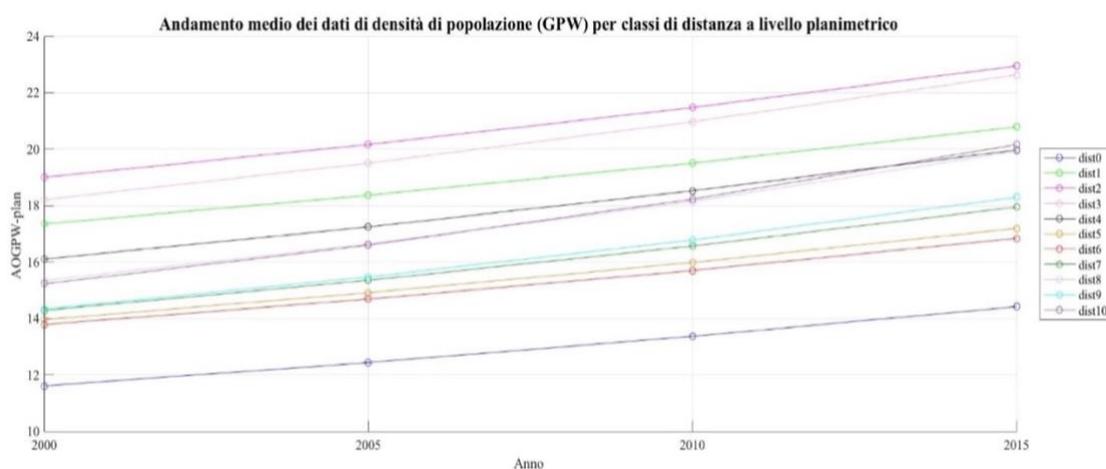


Figura 31. Andamento medio dei dati di densità di popolazione (AOGPW_plan), per ogni classe di distanza (da dist-0 a dist10), a livello planimetrico negli anni: 2000, 2005, 2010 e 2015.

Il diverso andamento rispetto ai precedenti risultati, riconducibile ai valori che si distribuiscono su una retta lineare per ogni classe, deriva dal fatto che si tratta di una densità di popolazione uniforme a livello comunale. Per il resto, anche in questo caso, vi è un andamento complessivamente crescente, il che indica un incremento di abitanti per km², in ogni classe di distanza dal 2000 al 2015. I trend temporali si mantengono molto simili e le classi mediamente più popolate risultano essere la dist-2 e dist-3. L'unico risultato anomalo rispetto ai precedenti, è che la classe densamente meno popolata è la dist-0, che negli altri casi è risultata sempre quella che ha subito gli incrementi più significativi.

L'andamento della distanza umana media dal Limpopo, è riportato in **Figura 32**.

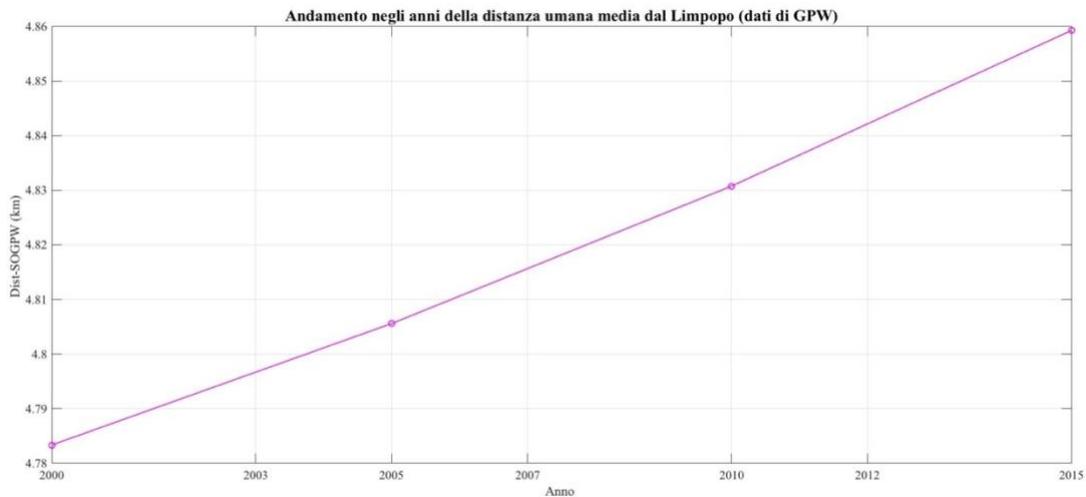


Figura 32. Evoluzione temporale della distanza degli insediamenti umani dal Limpopo, a livello planimetrico, ricavata dai dati sulla densità di popolazione (GPW) per gli anni: 2000, 2005, 2010 e 2015.

La distanza media degli insediamenti umani dal fiume è in questo caso crescente, anche se di poco, in quanto si passa da 4.78 km a 4.86 km nell'arco di 15 anni. Ciò può essere dovuto agli eventi alluvionali che hanno colpito il bacino del Limpopo nel 2000 e 2013 e che hanno portato complessivamente ad un allontanamento delle popolazioni dal fiume. Anche se in questo caso trattandosi di pochi metri, i risultati possono essere considerati poco significativi.

4.2 Analisi altimetrica della distribuzione della popolazione

4.2.1 Risultati relativi ai dati di luminosità artificiale notturna (NL)

Per quanto riguarda l'analisi altimetrica relativa ai dati di luminosità (NL), mostrati in **Figura 33**, si può notare come tutti gli andamenti siano crescenti, con due massimi locali più evidenti nel 1996 e 2009. I pixel più illuminati, oltre a quelli appartenenti alla classe dist_alt-1 che comprende la quota corrispondente al fiume Limpopo, sono posti ad un dislivello compreso tra 10 e 30 m, seguiti dai pixel con quota tra 0 e 10 m.

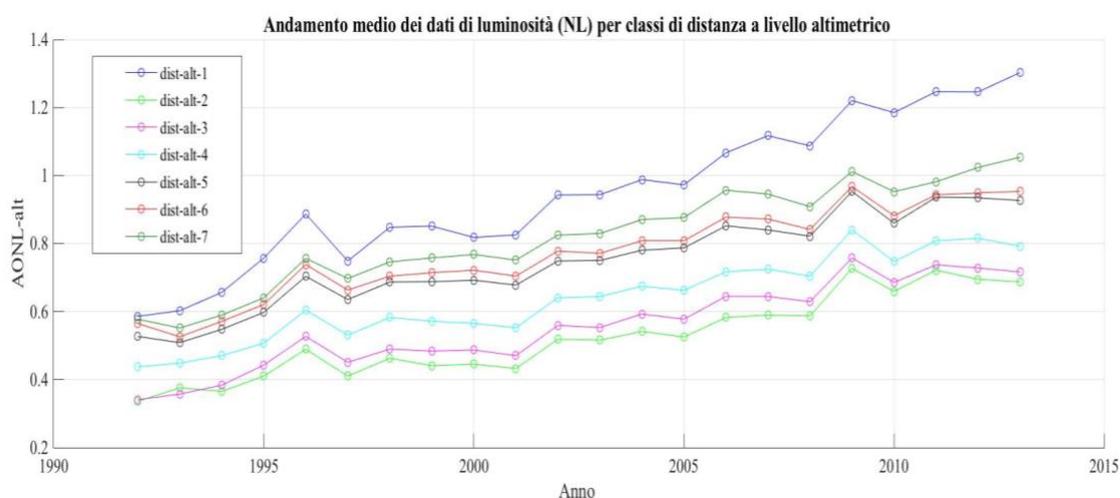


Figura 33. Andamento medio dei dati di luminosità artificiale notturna (NL) dal 1992 al 2013, per le classi di distanza da dist_alt-1 a dist_alt-7, a livello altimetrico.

4.2.2 Risultati relativi ai dati sulla percentuale di edificato (BU)

Anche nel caso dei dati sulla percentuale di edificato (BU), i risultati relativi all'analisi altimetrica, illustrati in **Figura 34**, mostrano un andamento globalmente crescente negli anni per tutte le classi di distanza. In particolare, la classe più densamente abitata risulta essere la dist_alt-1, comprendente i pixel con quota pari a quella del fiume Limpopo (fino ad un dislivello di 2 m). Si può notare sul grafico, infatti, l'aumento di valori più marcato per la retta in blu (dist_alt-1) rispetto agli altri andamenti più o meno simili. Le classi meno abitate risultano essere la dist_alt-2 e dist_alt-3, che presentano un andamento quasi coincidente.

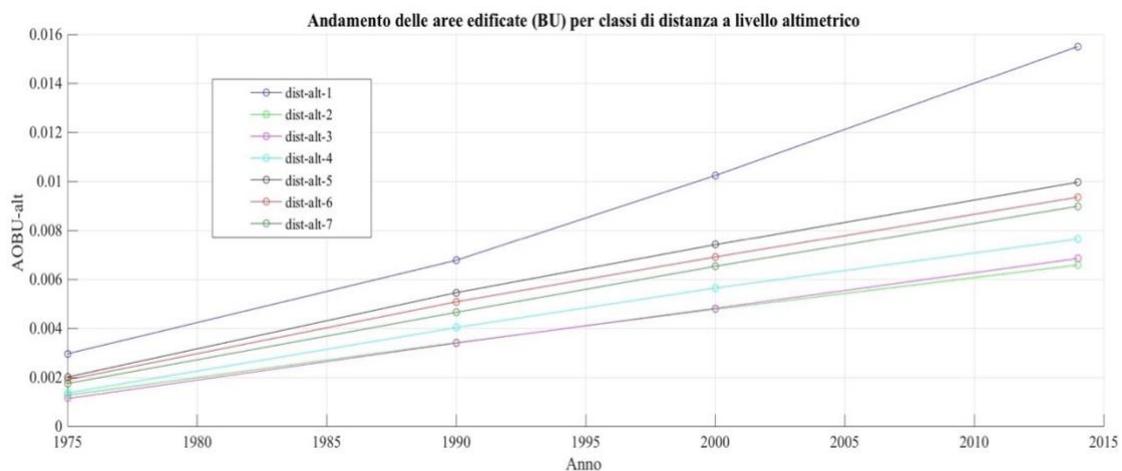


Figura 34. Andamento medio dei dati sulla percentuale di edificato per le classi di distanza da dist_alt-1 a dist_alt-7, a livello altimetrico negli anni: 1975, 1990, 2000 e 2014.

4.2.3 Risultati relativi ai dati di densità di popolazione (GHS POP)

Il grafico corrispondente all'andamento medio dei dati di densità di popolazione provenienti dal database europeo GHSL, in **Figura 35**, mette nuovamente in evidenza il distacco tra la prima classe di distanza altimetrica dist_alt-1, che risulta essere la classe più in crescita negli anni e più densamente popolata. Subito dopo, si trova la classe dist_alt-2 che comprende un dislivello che va dai 2 ai 5 m rispetto alla quota del fiume Limpopo e a seguire il resto delle classi che presentano un andamento molto simile. Fino alla classe meno popolata che è la dist_alt-3, che racchiude i dislivelli tra i 5 e i 10 m.

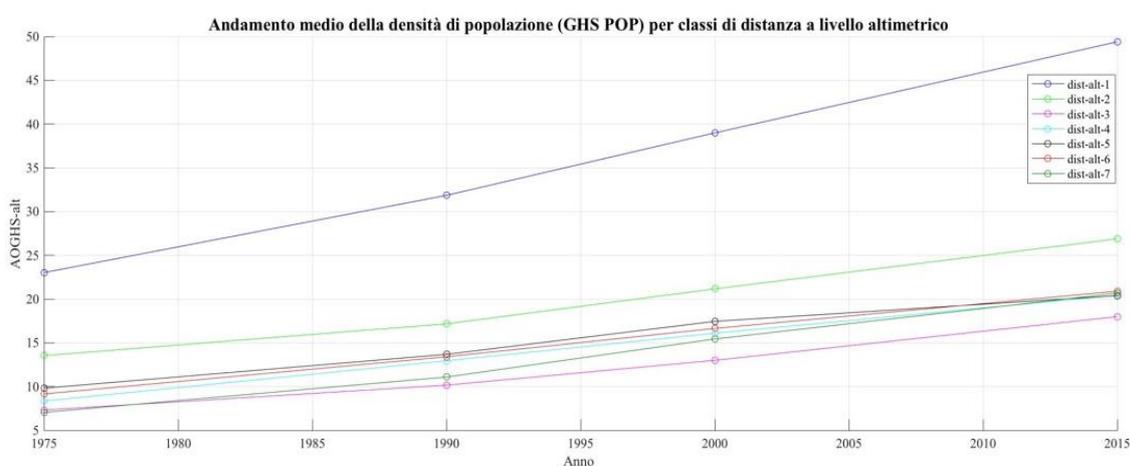


Figura 35. Andamento medio dei dati di densità di popolazione GHS POP per le classi di distanza da dist_alt-1 a dist_allt-7, a livello altimetrico negli anni: 1975, 1990, 2000 e 2015.

4.2.4 Risultati relativi ai dati di densità di popolazione (GPW)

Infine, i risultati riguardanti i dati di densità di popolazione GPW provenienti dal database CIENSIN-NASA, in **Figura 36**, hanno ulteriormente confermato ciò che era stato trovato precedentemente. Anche in questo caso, la classe più densamente popolata è la dist_alt-1 che comprende un dislivello fino a 2 m, in cui rientra la quota del reticolo idrografico del Limpopo. A seguire, molto distaccate dalla prima classe altimetrica, si trova il resto delle classi in ordine da dist_alt-7 a dist_alt-3, che è invece la meno popolata.

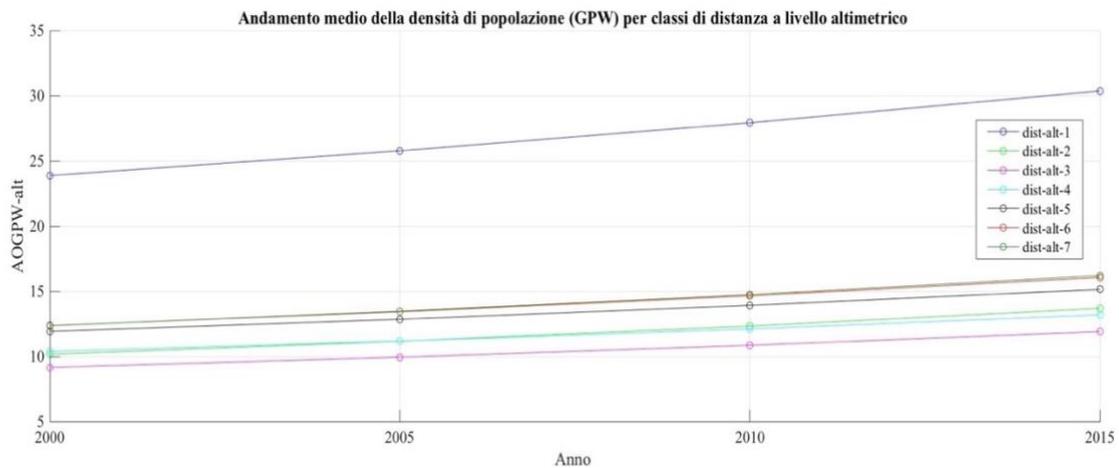


Figura 36. Andamento medio dei dati di densità di popolazione GPW per le classi di distanza da dist_alt-1 a dist_alt-7, a livello altimetrico negli anni: 2000, 2005, 2010, 2015.

4.3 Correlazione tra l'indice di siccità idrologica SRI e la distanza umana media relativa ai dati di luminosità (NL)

Da qui in poi, verranno riportati i risultati relativi al possibile legame tra l'indice di siccità idrologica (SRI) e i dati di luminosità (NL), nel seguente ordine:

- Correlazione tra SRI e la distanza umana media dal fiume (dist_SONL), per ogni stazione di misura, nei periodi considerati;
- Andamento dell'SRI negli anni, in funzione delle serie temporali in uso per ogni stazione di misura, da confrontare con l'andamento nel tempo della distanza umana media dal fiume (dist_SONL).

In questo modo, si riuscirà ad avere un quadro completo della correlazione tra le grandezze d'interesse (SRI e dist_SONL), al fine di fornire un'ulteriore valutazione dell'evoluzione spazio-temporale della distribuzione della popolazione in relazione ad eventi di siccità.

Prima della presentazione dei risultati, si mostra nuovamente in **Figura 37** la collocazione geografica delle stazioni di misura in relazione alla classificazione climatica di Köppen e si riportano alcune caratteristiche delle diverse aree prese in considerazione, che serviranno in seguito, per effettuare delle valutazioni sui risultati.

La stazione di Chókwe, situata nella regione inferiore del Limpopo che si estende fino alla città di Xai-Xai, si colloca in una zona dominata dalla pianura alluvionale del fiume, occupata con elevata densità di popolazione nei centri urbani. All'interno della zona vige un clima tropicale della Savana (di tipo As) che si contraddistingue per l'alternanza di una stagione secca ed una umida. L'area è dunque influenzata da gravi inondazioni, causate dai cicloni tropicali del canale del Mozambico, così come da periodi di siccità significativi. La vulnerabilità maggiore in quest'area deriva però principalmente dalle precipitazioni intense e dalla bassa capacità adattativa della popolazione alle alluvioni [Petrie et al., 2014].

La stazione di Combomune si trova, invece, in una zona con un clima steppico di tipo BSh, ossia semi-arido caldo, con temperatura media annua uguale o superiore a 18°C. Si caratterizza per evapotraspirazione superiore alla quantità di precipitazioni che, nel complesso risultano piuttosto scarse [Wikipedia].

Infine, la stazione di Rio Dos Elefantes è compresa in due zone, quella semi-arida di tipo Bsh ed una più temperata di tipo Cwa, caratterizzata cioè da inverni secchi e piogge concentrate per lo più in estate, che risulta comunque molto calda [Wikipedia]. Il Rio Dos Elefantes è uno dei maggiori contributori di acqua nel sistema del fiume Limpopo ma è anche uno dei corsi maggiormente caratterizzati da inquinamento idrico, derivante da effluenti industriali ed infrastrutture fognarie inefficienti. La qualità dell'acqua in queste zone risulta sempre più scarsa e la capacità di adattamento significativamente bassa, con degradazione del suolo, erosione del terreno e riduzione della produttività degli ecosistemi [Petrie et al., 2014].

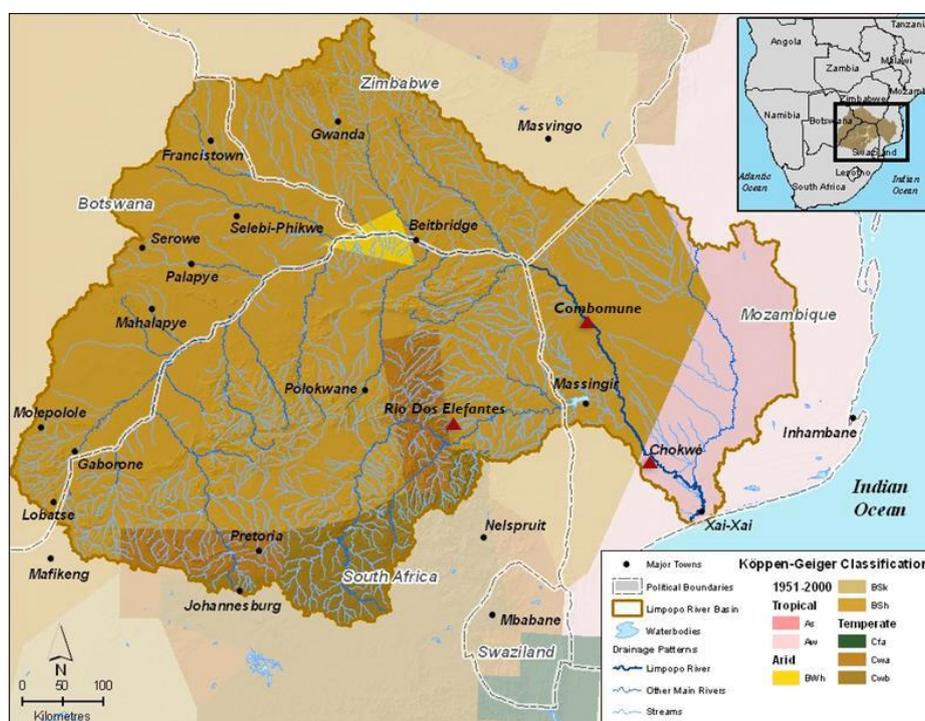


Figura 37. Collocazione geografica delle stazioni di misura, in funzione della classificazione dei climi di Köppen – Fonte: Limpopo RAK.

4.3.1 Stazione di Combomune (E-33)

Per la prima serie di portate osservate dal 1992 al 2011 nella stazione di Combomune (E-33), situata nella zona semi-arida, i risultati relativi alla correlazione tra SRI e dist_SONL, sono mostrati in **Figura 38**.

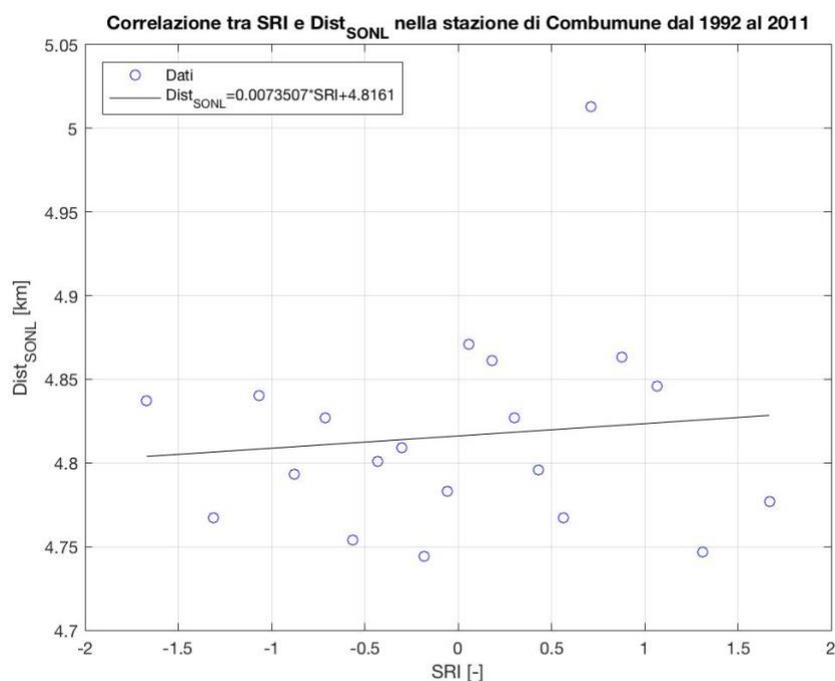


Figura 38. Correlazione tra l'indice standardizzato di deflusso SRI e la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità (dist_SONL) nella stazione di Combomune (E-33) dal 1992 al 2011.

Si può notare come per valori di SRI positivi, le distanze corrispondenti siano più alte rispetto ai valori di SRI negativi, che rappresentano condizioni di siccità. Si rileva, dunque, una correlazione positiva tra i dati, come ci si aspetterebbe, dato che ad un SRI più alto deve corrispondere una distanza maggiore, affinché sia verificata l'ipotesi di riavvicinamento al fiume nei periodi di siccità. Tuttavia, le differenze tra le distanze dal fiume sono ancora troppo piccole (100 – 200 m) e la pendenza della linea di tendenza troppo lieve (pari a 0.00735) per poter utilizzare tali risultati a favore dell'ipotesi testata in questo studio. Tutto ciò è ancora più evidente nei grafici riportati in **Figura 39** e **40**, il cui confronto è utile per comprendere meglio la correlazione tra SRI e dist_SONL.

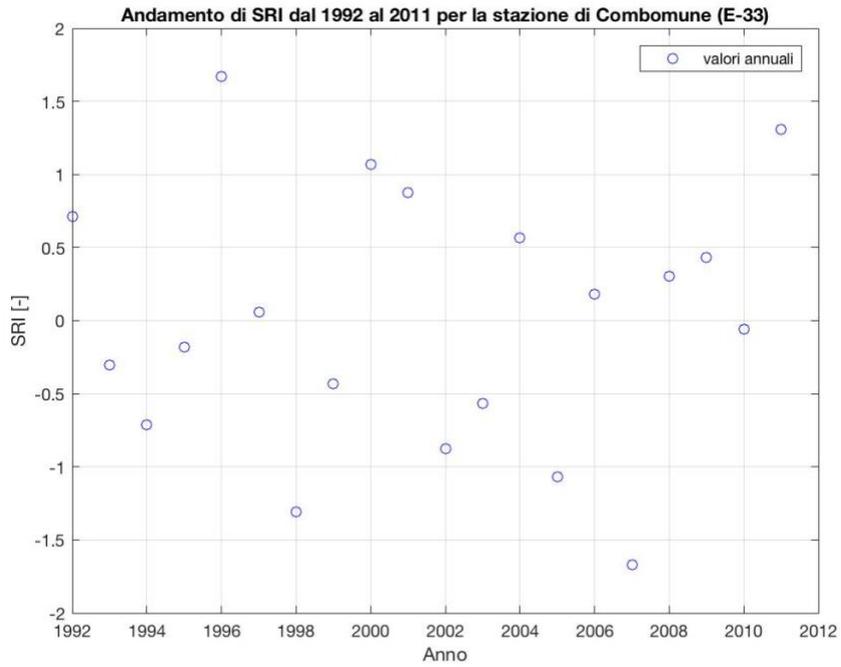


Figura 39. Andamento dell'indice di siccità SRI nel periodo che va dal 1992 al 2011 nella stazione di Combomune (E-33).

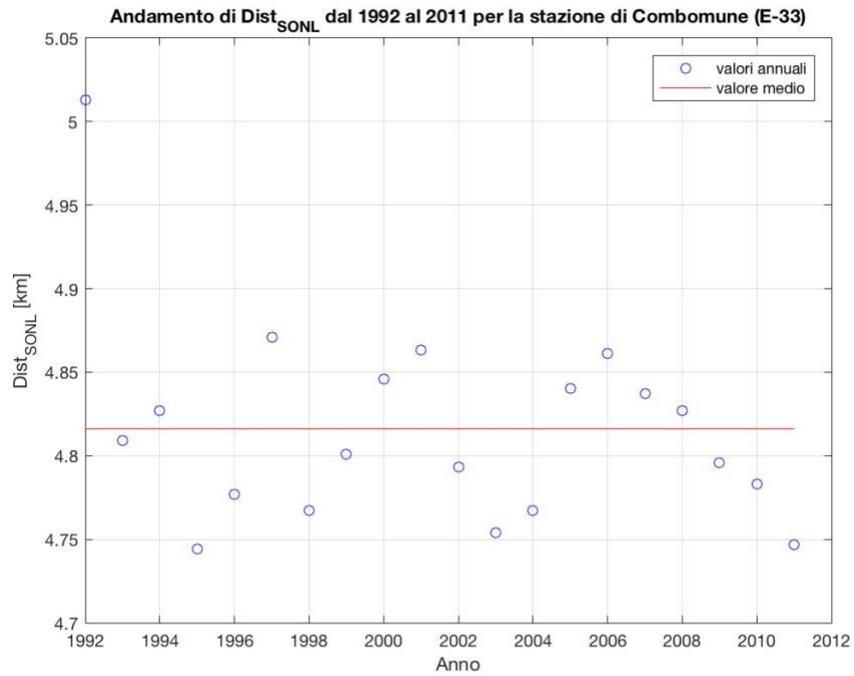


Figura 40. Andamento della distanza umana media (dist_SONL) nel periodo che va dal 1992 al 2011 nella stazione di Combomune (E-33), confrontata con l'andamento della media delle distanze ricavate dai dati di luminosità (NL).

La comparazione tra i grafici in **Figura 39 e 40** permette di analizzare gli andamenti anno per anno e di verificare se ogni valore di SRI corrisponde ad un valore di distanza che si colloca sotto o sopra la media delle distanze estratte dai dati di luminosità, rappresentata dalla retta in rosso in **Figura 40**. In questo modo, sarà possibile capire se negli anni individuati come siccitosi per il bacino del Limpopo, si siano verificati effettivamente dei riavvicinamenti al fiume, come trovato nella valutazione dell'evoluzione spazio-temporale sulla popolazione. In questo caso, per alcuni anni è verificata l'ipotesi, mentre in altri no. Ad esempio, il 1998 presenta un valore di SRI pari a -1.3 (moderata siccità) e la distanza umana dal fiume corrispondente è al di sotto della media e pari a 4.76 km. Così come il 2002 e 2003, a cui sono associate lievi siccità e distanze medie, rispettivamente di 4.793 km e 4.754 km, minori della distanza media che equivale a 4.816 km. Ciò non è verificato però nel 2007 che presenta il valore di SRI più basso (-1.66) e a cui però equivale una distanza al di sopra della media pari a 4.837 km, anche se di poco. In ogni caso, si trova una corrispondenza tra gli anni individuati come siccitosi dal calcolo dell'indice di siccità e l'analisi dei dati di portata condotta nel Capitolo 2, dove risultavano periodi di siccità nel 1998, 2002, 2005 e 2007 per la stazione di Combomune. Anche l'analisi condotta sui dati dal 1999 al 2013 nella stessa stazione, ha portato a risultati discordanti (**Figura 41**).

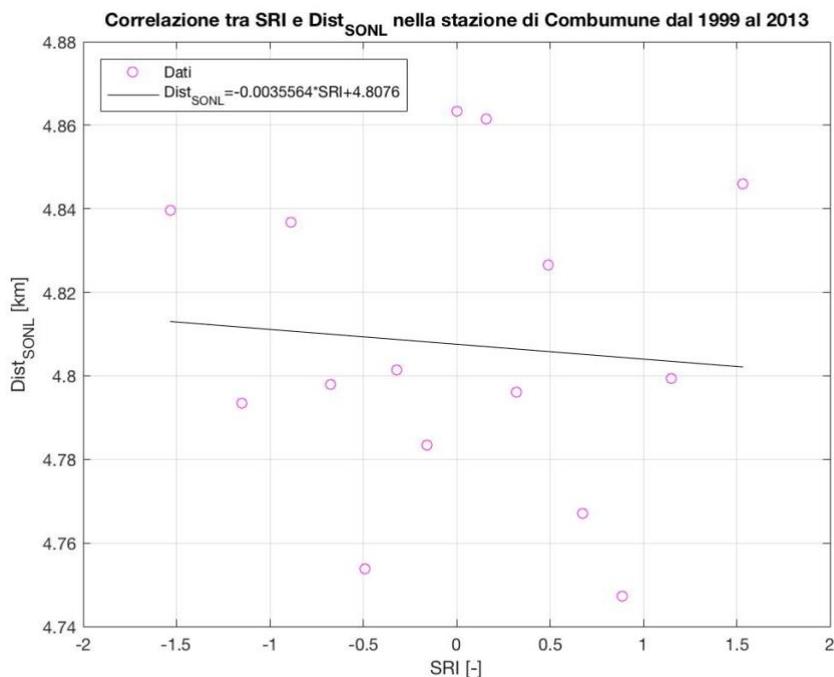


Figura 41. Correlazione tra l'indice standardizzato di deflusso SRI e la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità (dist_SONL) nella stazione di Combomune (E-33) dal 1999 al 2013.

In questo caso, la correlazione risulta essere globalmente negativa come dimostrato dalla linea di tendenza rappresentata sul grafico in **Figura 41**, che ha però una pendenza molto bassa di circa 0.0036 e si riconosce che per valori negativi di SRI, le distanze non sono molto più basse di quelle corrispondenti a valori positivi dell'indice di siccità. Ciò, è confermato dai grafici in **Figura 42 e 43**, in cui è possibile riconoscere la debole correlazione tra SRI e dist_SONL, anno per anno.

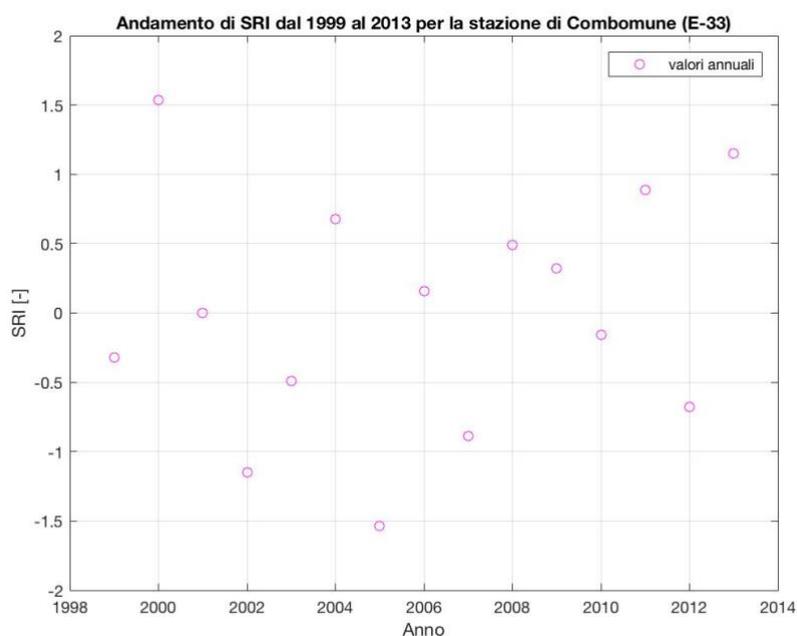


Figura 42. Andamento dell'indice di siccità SRI nel periodo che va dal 1999 al 2013 nella stazione di Combomune (E-33).

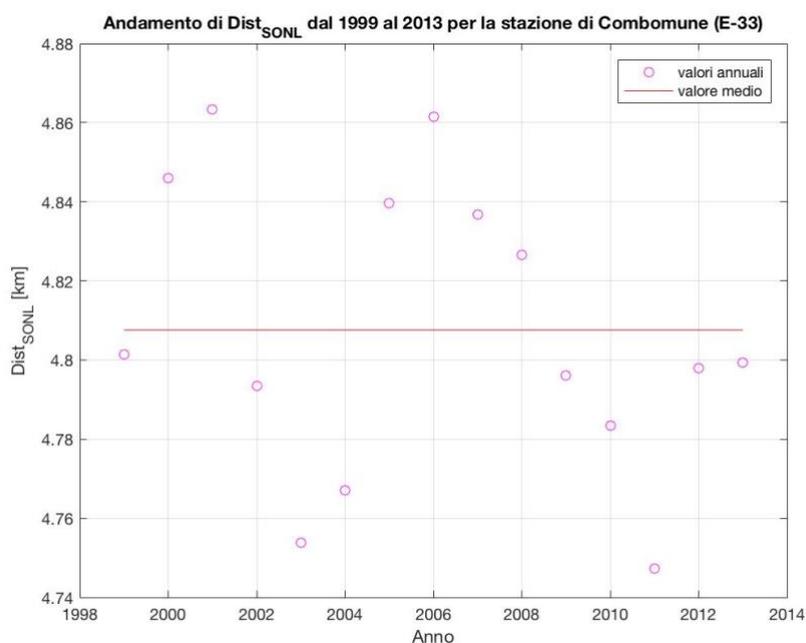


Figura 43. Andamento della distanza umana media (dist_SONL) nel periodo che va dal 1999 al 2013 nella stazione di Combomune (E-33), confrontata con l'andamento della media delle distanze ricavate dai dati di luminosità (NL).

In questo caso, il 2002 è l'unico anno a cui corrispondono sia un valore basso di SRI (-1.15) che di distanza (al di sotto della media e pari a 4.79 km). Mentre, si ritrova lo stesso problema per l'anno in cui si rileva il valore più basso di SRI pari a -1.53 nel 2005, in quanto la distanza è uguale a 4.84 km, leggermente maggiore della media. Anche in questo caso viene però mantenuta la corrispondenza tra gli anni siccitosi trovati nell'analisi dei dati di portata e gli anni con un SRI negativo (2002, 2005 e 2007).

4.3.2 Stazione di Chókwe (E-35)

La stazione di misura di Chókwe, posizionata nell'area del basso Limpopo e dunque più a Sud di Combomune, presenta una correlazione negativa tra SRI e dist_SONL valutata dal 1992 al 2011 con una pendenza della linea di tendenza di 0.0242, come si nota in **Figura 44**.

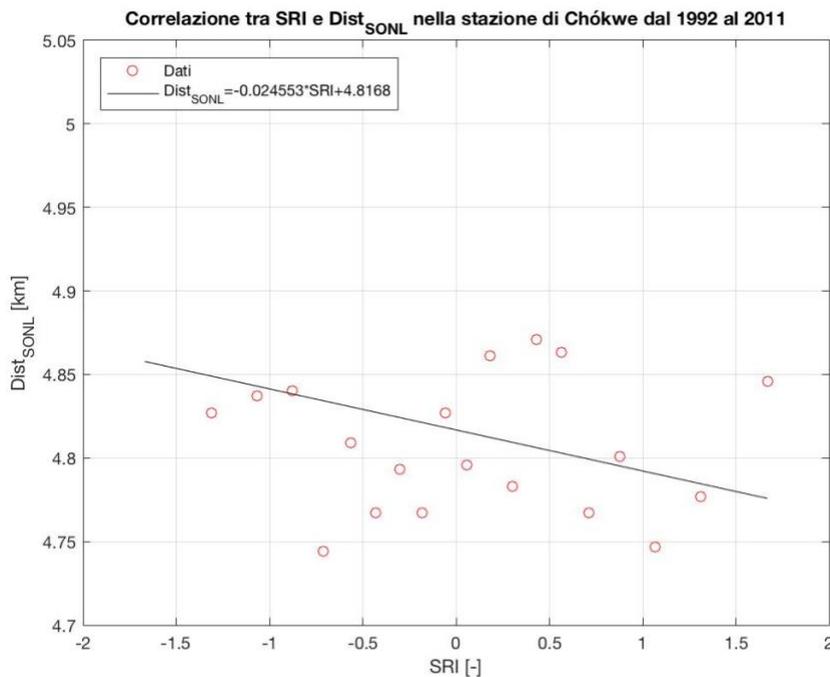


Figura 44. Correlazione tra l'indice standardizzato di deflusso SRI e la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità (dist_SONL) nella stazione di Chókwe (E-35) dal 1992 al 2011.

Il tutto è confermato dal confronto tra gli andamenti nel tempo di SRI e dist_SONL, (**Figura 45 e 46**) in cui si riconosce solo il 1995 come anno moderatamente siccitoso a cui corrisponde una distanza minore della media ed alcuni anni di lieve siccità (1998 e 2003) associati a piccoli valori di distanza. Si può notare inoltre, come il 1992 sia associato al valore più alto di dist_SONL (5.013 km) e ad un valore negativo e molto basso di SRI, il che coincide con la siccità severa che ha interessato il bacino in quell'anno. Il tutto dunque a conferma della validità del calcolo dell'indice SRI ma anche a sfavore dell'ipotesi testata in questo studio. Tuttavia, tali risultati possono essere considerati plausibili, in quanto la stazione di Chókwe, come visto precedentemente, è collocata nella pianura alluvionale del basso Limpopo dal clima tropicale e caratterizzata soprattutto da alluvioni frequenti e molto severe, che hanno incoraggiato le persone ad allontanarsi verso terre più alte o verso la costa. Come si può notare dal grafico in **Figura 45**, i valori di SRI si concentrano di più nella parte superiore del grafico, corrispondente a condizioni umide ed alluvionali, in cui si inseriscono occasionalmente valori negativi di SRI. Tutto ciò ha portato ad uno sconvolgimento della migrazione della popolazione e dunque della distanza umana media dal Limpopo, il cui andamento è caratterizzato da continui allontanamenti ed avvicinamenti al fiume, dovuti alla costante alternanza di sequenze di siccità ed inondazioni.

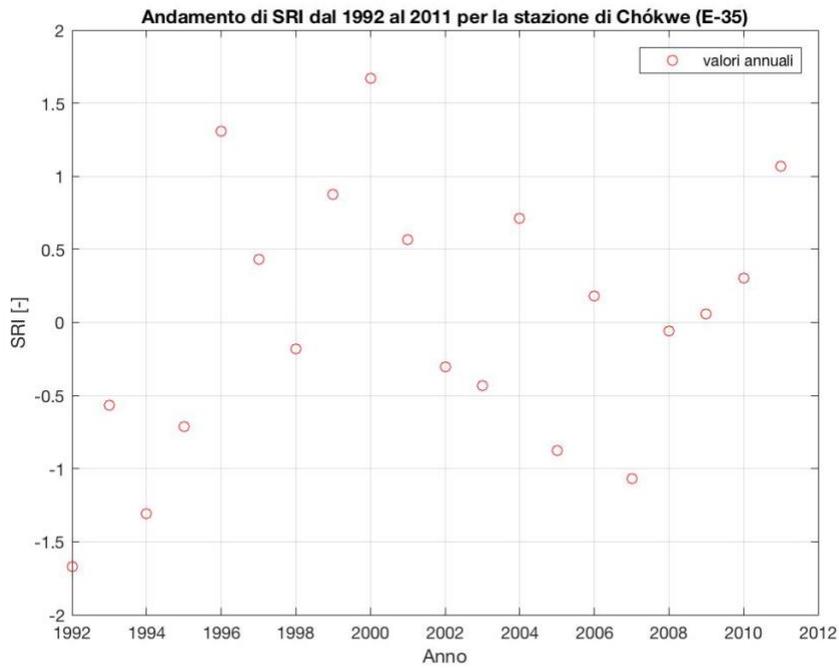


Figura 45. Andamento dell'indice di siccità SRI nel periodo che va dal 1992 al 2011 nella stazione di Chókwe (E-35).

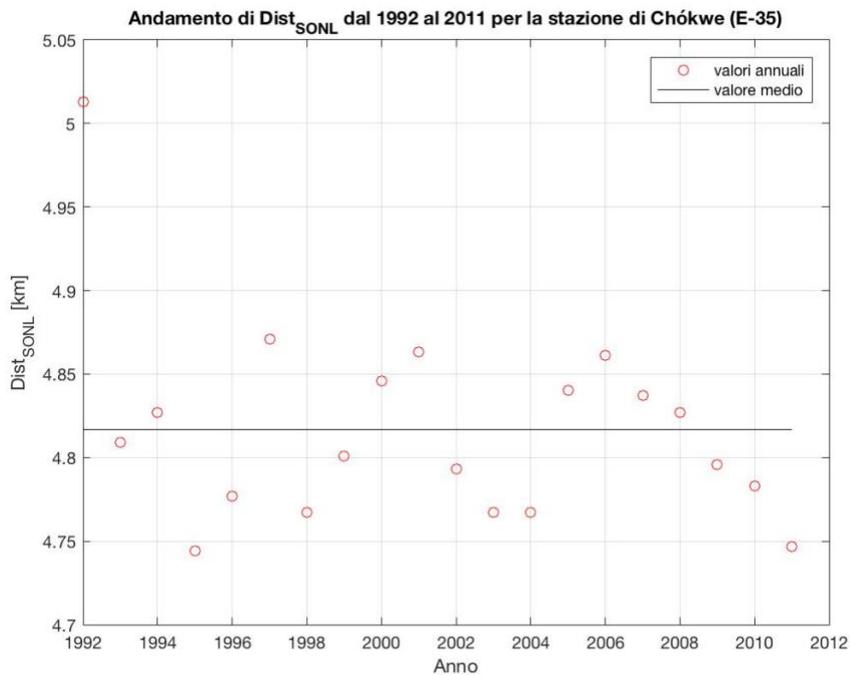


Figura 46. Andamento della distanza umana media (dist_SONL) nel periodo che va dal 1992 al 2011 nella stazione di Chókwe (E-35), confrontata con l'andamento della media delle distanze ricavate dai dati di luminosità (NL).

4.3.3 Stazione di Rio Dos Elefantes (E-607)

Risultati diversi sono stati ottenuti per l'ultima stazione di misura Rio Dos Elefantes (E-607), collocata più ad Ovest rispetto alle altre due. La correlazione tra SRI e dist_SONL, mostrata in **Figura 47** è infatti positiva come ci si aspetterebbe, anche se le differenze tra le distanze sono solo dell'ordine di 100 m.

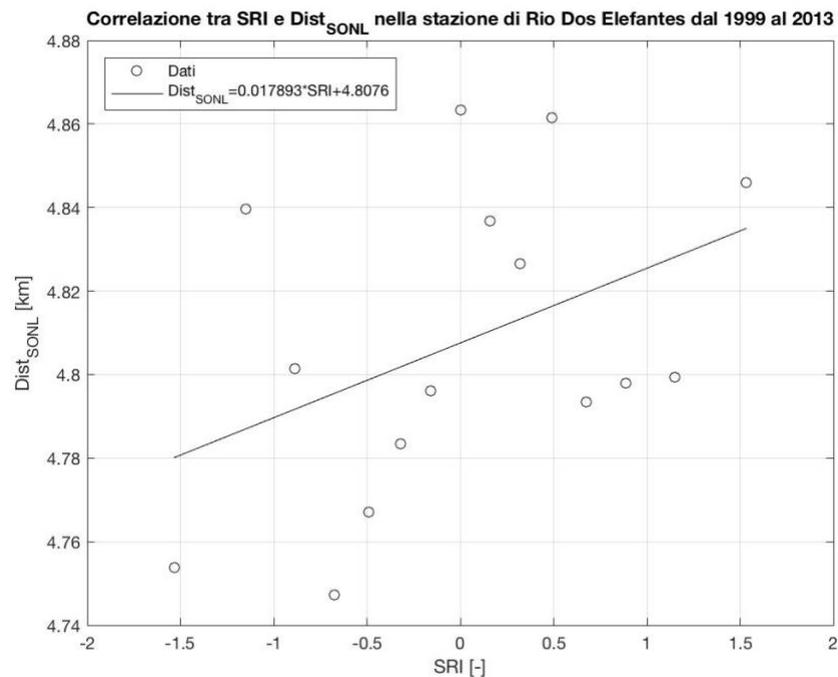


Figura 47. Correlazione tra l'indice standardizzato di deflusso SRI e la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità (dist_SONL) nella stazione di Rio Dos Elefantes (E-607) dal 1999 al 2013.

Per valori negativi di SRI, si riconoscono due punti di minimo locale in cui la distanza è bassa e pari a 4.754 km e 4.747 km ed un solo punto di massimo locale, in cui subisce un incremento di circa 100 m. Mentre, è evidente che per valori positivi dell'indice di siccità le distanze aumentano e raggiungono valori pari a 4.86 km. Per risalire agli anni corrispondenti a tali valori negativi di SRI, si utilizzano i grafici mostrati in **Figura 48 e 49**. Il valore più basso di SRI pari a -1.53 corrisponde al 2003, a cui è associata una distanza di 4.754 km. Al 1999, è associato invece l'altro valore negativo pari a -0.88 che corrisponde ad una lieve siccità e ad una distanza dal fiume al di sotto della media pari a 4.808 km ed evidenziata dalla retta in rosso in **Figura 49**.

La condizione di siccità moderata rilevata nel 2005 (SRI pari a -1.15), non è invece associata ad una distanza minore della media, bensì ad un valore leggermente più alto e pari a 4.84 km. Essendo una zona del Limpopo caratterizzata da scarse precipitazioni ed inverni secchi, è più probabile che la popolazione abbia deciso negli anni di avvicinarsi al fiume come si può notare soprattutto in **Figura 49**, dal 2006 al 2011, in cui si registra un'evidente diminuzione della distanza associata a bassi valori dell'indice di siccità SRI.

Gli allontanamenti potrebbero essere invece legati anche alla qualità dell'acqua sempre più scarsa, con alte concentrazioni di acidità e metalli pesanti che spesso precipitano nei sedimenti fluviali rilasciati durante le inondazioni e trasportati fino a valle. Ma essendo le differenze tra i valori di dist_SONL minime anche in questo caso, sarebbero necessarie analisi più localizzate per poter effettuare valutazioni più specifiche.

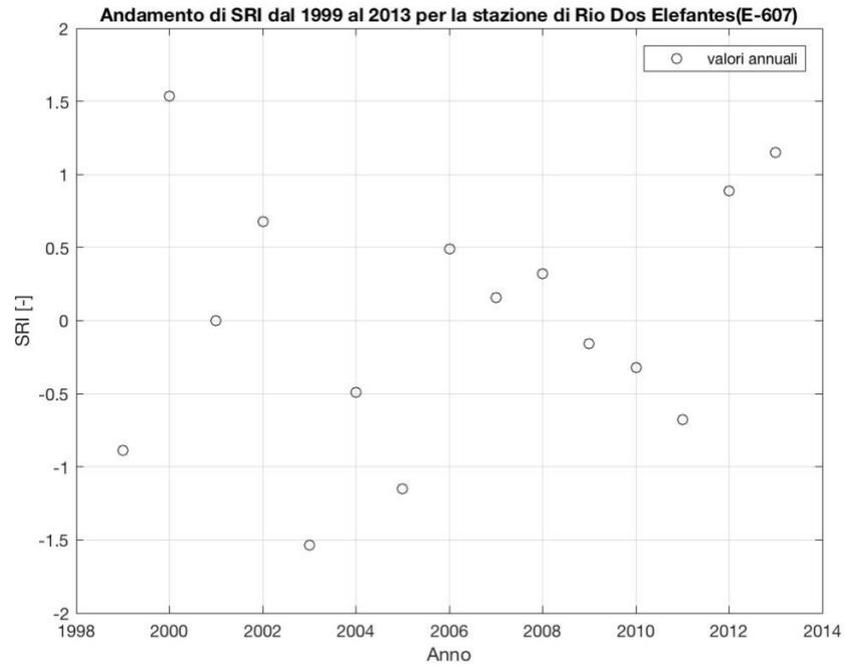


Figura 48. Andamento dell'indice di siccità SRI nel periodo che va dal 1999 al 2013 nella stazione di Rio Dos Elefantes (E-607)

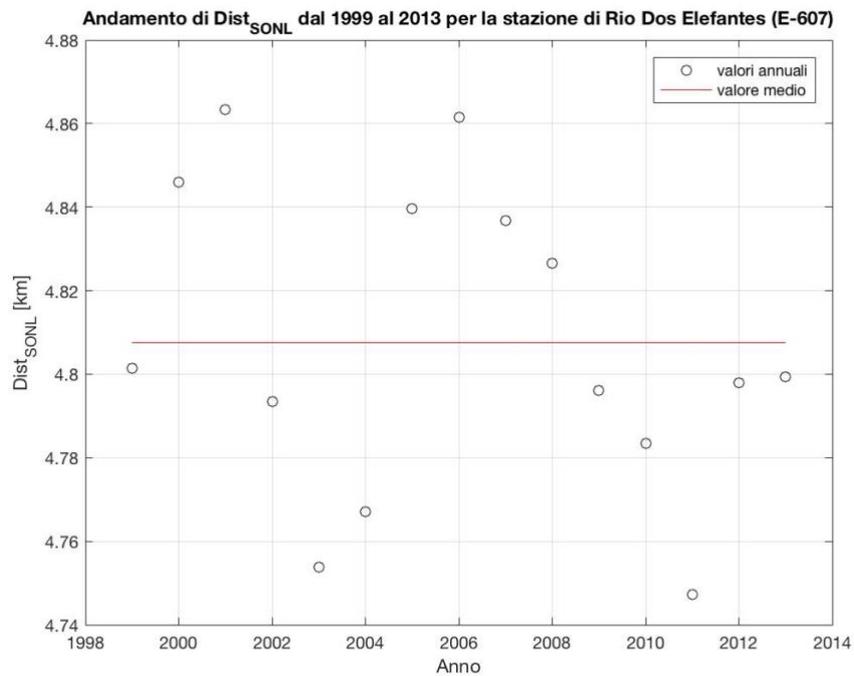


Figura 49. Andamento della distanza umana media (dist_SONL) nel periodo che va dal 1999 al 2013 nella stazione di Rio Dos Elefantes (E-607), confrontata con l'andamento della media delle distanze ricavate dai dati di luminosità (NL).

5. CONCLUSIONI E PREVISIONI FUTURE

Lo scopo del lavoro presentato è stato quello di valutare l'evoluzione spazio-temporale della distribuzione della popolazione nel bacino del Limpopo dal 1975 al 2013, in relazione ad eventi di siccità. Il bacino è stato scelto per via delle sue caratteristiche che inducono la popolazione a dipendere estremamente dal Limpopo e dai suoi affluenti e al tempo stesso ad essere esposta al rischio di alluvioni e siccità. Negli anni, molti studi hanno scelto come oggetto di studio tale bacino, concentrandosi maggiormente sugli aspetti legati al rischio da alluvione, amplificati dalla crescita esponenziale della popolazione sempre più portata ad allontanarsi dalle zone a rischio.

In questi contesti, è bene però considerare anche gli effetti del riscaldamento globale che hanno messo in evidenza la plausibile ipotesi secondo cui, alla base delle frequenti alluvioni, ci siano lunghi e severi periodi di siccità, che spingano a loro volta la popolazione a tornare indietro e a riavvicinarsi al fiume. È per questo che si è scelto di approfondire l'aspetto legato agli eventi siccitosi, al fine di comprendere meglio come i cambiamenti climatici e le diverse sequenze di siccità ed alluvioni possano influenzare la dinamica del rischio idrologico e della migrazione [Di Baldassarre et al., 2013].

L'attuale proliferazione di dataset satellitari in tutto il mondo offre un'opportunità senza precedenti di eseguire tali studi e la particolarità di questo lavoro consiste proprio nell'uso di quattro diversi tipi di dati (luminosità notturna, aree edificate e due tipi di densità di popolazione) che mostrano un ottimo grado di dettaglio ed una buona copertura temporale, che hanno consentito di studiare l'intero territorio del Limpopo con una risoluzione di 1 km.

L'analisi della distribuzione della popolazione è stata effettuata sia a livello planimetrico che altimetrico, associando i valori di luminosità notturna, di aree edificate e di densità di popolazione alla posizione dei pixel, situati in 11 classi planimetriche da 0 a 10 km di distanza dal corso del fiume Limpopo e 7 classi altimetriche fino a 30 m di dislivello rispetto alla quota del fiume. L'approccio utilizzato ha permesso di formulare osservazioni dettagliate sulla distribuzione media antropica nel bacino, ma soprattutto di rilevare l'evoluzione temporale della distanza media umana dal fiume, ricavata dalla somma totale di tutti i valori corrispondenti ad ogni tipo di dato osservato, considerando individui selezionati casualmente.

Come ulteriore verifica, è stato calcolato l'indice di siccità idrologica SRI ed è stata valutata la rispettiva correlazione con la distanza umana media ricavata dai dati di luminosità notturna, nelle tre stazioni di misura del bacino (Combomune, Chókwe e Rio Dos Elefantes).

I risultati planimetrici riguardanti l'andamento medio antropico hanno sottolineato chiaramente un incremento complessivo della popolazione dal 1975 al 2013, individuando la classe dist-0 che si trova nell'area corrispondente al fiume Limpopo, come la più densamente popolata, mentre quelle più distanti dal fiume (dalla classe dist-6 alla dist-10) come meno abitate. L'analisi più recente dal 2000 al 2015, condotta con i dati sulla densità di popolazione GPW, ha individuato invece un leggero allontanamento verso le classi dist-2 e dist-3, ossia fino a 3.16 km dal fiume, probabilmente legato alle tragiche alluvioni che hanno interessato il bacino nel 2000 e nel 2013, i cui ingenti danni hanno costretto ad allontanare gli abitanti dalle zone interessate e vicine al Limpopo e hanno avuto un forte impatto sulla psicologia delle persone. Ma, considerando l'arco temporale dei 38 anni, si può affermare che nonostante i diversi flussi migratori verificatisi nel corso del tempo a seguito di estremi idrologici, i risultati si sono dimostrati coerenti tra loro nel confermare che la popolazione continua a vivere vicino al fiume, risorsa che assume tutt'oggi un'importanza fondamentale in Paesi poveri come l'Africa.

Il tutto è stato confermato dalla valutazione dell'evoluzione temporale della distanza planimetrica media degli insediamenti umani dal fiume, che ha subito globalmente una diminuzione negli anni, registrando diverse occasioni di allontanamenti e riavvicinamenti. In particolar modo, nel periodo che va dal 1975 al 2000, secondo i dataset di luminosità notturna e di aree edificate, c'è stato un riavvicinamento di circa 400 m che corrisponde esattamente all'arco temporale in cui rientrano il maggior numero di eventi di siccità anche gravi (1982-83, 1986-87, 1991-92, 1994-95, 1998). I risultati ottenuti dai dati sulla densità di popolazione si sono rivelati invece poco significativi, in quanto hanno evidenziato spostamenti minimi.

L'analisi altimetrica ha sottolineato la vicinanza degli insediamenti umani al fiume anche in quota e ha ulteriormente confermato l'incremento della popolazione negli anni, mostrando, in tutti i casi, pixel più illuminati per la classe dist_alt-1 che rappresenta un dislivello fino a 2 m e racchiude la quota in cui si identifica il reticolo idrografico del Limpopo.

La verifica effettuata valutando la possibile correlazione tra l'indice di siccità idrologica SRI e la distanza media umana ricavata dai dati di luminosità notturna nelle tre diverse stazioni di misura, ha prodotto invece risultati contrastanti. Visti gli esiti ottenuti dall'analisi spazio-temporale di distribuzione della popolazione a favore della tesi sostenuta in questo studio, ci si aspettava di trovare una correlazione positiva tra l'indice di siccità e la distanza, in modo da poter avere una corrispondenza tra i valori negativi di SRI che identificano eventi di siccità e valori di dist_SONL minimi, così come distanze massime associate a valori positivi di SRI (condizioni moderate e severe di umidità). In realtà non è stato così per tutte le stazioni di misure prese in considerazione.

Nell'analisi dei dati dal 1992 al 2011 condotta sulla stazione di Combomune, posta in una zona semi – arida, si è registrata una correlazione positiva anche se molto lieve e per valori di distanza dell'ordine dei 100 m. In ogni caso, come previsto, ci sono stati anni come il 1998 e 2002-2003 in cui si è verificata la corrispondenza tra valori negativi di SRI e valori di distanza al di sotto della media. Con eccezione per il 2007, anno più siccitoso, in cui la distanza supera leggermente la media. L'analisi più recente dal 1999 al 2013 condotta sulla stessa stazione, ha infatti mostrato una correlazione lievemente negativa e con valori di distanze tendenzialmente alti rispetto ai valori negativi di SRI.

Anche i risultati relativi alla stazione di Chókwe, nel basso Limpopo, non si sono rivelati particolarmente positivi ai fini dello studio, in quanto la maggior parte dei valori di dist_SONL sono alti rispetto ai valori negativi di SRI. Ad eccezione del 1995, 1998 e 2003, in cui però si registrano differenze lievi rispetto alla media.

L'unica stazione di misura in cui si è riscontrata la correlazione che ci si aspettava è quella di Rio Dos Elefantes, più ad Ovest e in una zona più temperata rispetto alle altre due. In questo caso, tutti i valori negativi di SRI risultano associati a distanze al di sotto della media, come per il 1999 e 2003, ad eccezione solo del 2005 la cui condizione di moderata siccità corrisponde ad una distanza leggermente al di sopra della media. Si può notare, inoltre, un particolare avvicinamento al fiume legato a bassi valori di SRI dal 2006 al 2011.

Per risalire ad una spiegazione sulle incoerenze rilevate in questi ultimi risultati, è bene considerare l'esatta collocazione geografica delle stazioni, in funzione delle condizioni climatiche e delle caratteristiche morfologiche dei territori in cui si trovano. Combomune, ad esempio, è posta in una zona semi-arida del bacino con temperature molto alte tutto l'anno e si presuppone che gli abitanti siano più abituati a gestire situazioni di siccità rispetto ad eventi di inondazioni, in cui sarebbe più probabile un atteggiamento di panico ed istintivo allontanamento dal fiume. Ed è questo, probabilmente, il motivo per cui si registrano più spostamenti per valori positivi che negativi di SRI.

Al contrario l'area del basso Limpopo, in cui si colloca Chókwe, è da sempre conosciuta come particolarmente vulnerabile agli eventi alluvionali, anche se il clima tropicale la rende esposta ad una continua alternanza di sequenze di siccità ed inondazioni. Tutto ciò rende dunque difficile la valutazione degli spostamenti della popolazione, in costante lotta con questi tipi di disastri naturali.

Ed infine, i risultati positivi riguardanti la stazione di Rio Dos Elefantes, potrebbero essere giustificati dal fatto che si trova tra un'area semi-arida in cui vige un clima temperato di tipo sinico, con inverni secchi ed almeno un mese estivo che ha più del decuplo delle precipitazioni del mese invernale più secco [Wikipedia]. Per cui, la penuria idrica nel periodo invernale potrebbe aver spinto la popolazione a vivere il più possibile vicino al fiume e ad allontanarsi occasionalmente nei casi di abbondanti precipitazioni estive, spinti anche dai problemi legati alla scarsa qualità dell'acqua che interessa da anni il Rio Dos Elefantes. Valutazioni di questo tipo richiederebbero però indagini più dettagliate tramite il calcolo non solo di indici di siccità idrologica ma anche di indicatori irrigui e soprattutto meteorologici, che sono quelli più ampiamente utilizzati per l'identificazione della siccità.

Nel prossimo futuro, si prevede che a causa dei cambiamenti climatici in corso, nelle aree del basso Limpopo si possano verificare un aumento del 10% delle precipitazioni annue ed una diminuzione dei cicloni tropicali che però risulteranno più intensi e capaci di causare danni significativi e violente alluvioni. Inoltre, è previsto un innalzamento del livello del mare e del rischio siccità nell'entroterra. Allo stesso modo, l'area abitativa di Rio Dos Elefantes sarà coinvolta in un incremento delle temperature di circa 2°C, con una diminuzione del 10% delle precipitazioni annue con conseguente riduzione del numero medio di giorni di pioggia ed aumento del rischio di siccità ed inondazioni.

L'incremento delle temperature vedrà un calo dell'umidità del suolo, diminuendo la copertura vegetativa e riducendo i flussi idrici, attraverso una maggiore evaporazione. Così le preoccupazioni in materia di qualità dell'acqua diventeranno una sfida ancora più grande e questi sono solo alcuni esempi di zone che fanno parte del bacino del Limpopo e che si trovano in situazioni di criticità ambientale [Petrie et al., 2014].

C'è dunque un urgente bisogno di intervenire in materia di mitigazione dei rischi, soprattutto in zone come queste, in cui i problemi ambientali sono esasperati da un basso livello di istruzione della popolazione, dalla povertà e da politiche governative di gestione del territorio inappropriate. Per questo è importante capire che in zone altamente instabili come il bacino del Limpopo, prima di poter sostenere livelli più elevati di protezione da alluvioni o predisporre l'utilizzo di serbatoi per mitigare la siccità, è necessario considerare altri fattori. Oltre il fatto che tali interventi spesso scontati ed economicamente accessibili in alcuni contesti come i Paesi Bassi, potrebbero risultare insostenibili in questi ambiti, bisogna tener conto che le misure di protezione sebbene riducano la frequenza e le conseguenze degli eventi idrologici, non garantiscono mai una protezione totale, soprattutto in considerazione dei cambiamenti climatici e socioeconomici che stanno sempre più sconvolgendo le dinamiche di tali eventi [Mård et al., 2018]. Tenendo conto che la vulnerabilità del continente africano è destinata ad aumentare a causa delle popolazioni in rapida crescita, dell'incremento della richiesta d'acqua e del degrado delle risorse del suolo, il seguente studio suggerisce una visione risolutiva più a lungo termine che richiede un'azione molto più seria ed impegnata da parte delle comunità, dei governi ed anche delle organizzazioni internazionali. Ad esempio, il bacino del Limpopo fornisce una risorsa condivisa da quattro Paesi e data la scarsità d'acqua che interessa tutta l'area, sarebbe necessaria un'attenta allocazione e gestione della risorsa ma anche la costruzione della resilienza della società a livello transfrontaliero, piuttosto che paese per paese. Istituzioni resilienti rappresentano fattori indiscutibili di successo per rafforzare la capacità adattiva e di risposta da disastri naturali, da cui dipenderà sempre di più l'impatto futuro di eventi di grande portata [Petrie et al., 2014].

Un sistema altamente vulnerabile è infatti, allo stesso tempo, molto più sensibile agli effetti dei cambiamenti climatici che potrebbero essere appena percettibili ed ininfluenti in altre zone del mondo. Tutto ciò limita maggiormente la capacità di adattamento e di ripresa delle popolazioni che, se non sono ben istruite, potrebbero reagire attraverso azioni istintive come appunto l'abbandono delle proprie abitazioni e la scelta di migrare temporaneamente o in modo permanente, che spesso portano ad esporle a rischi ancora maggiori. Per questo la politica di pianificazione e mitigazione della siccità in tali zone, richiederebbe una maggiore attenzione non solo alla "gestione della crisi" ma anche alla "gestione del rischio".

Ricerche come queste che approfondiscono lo studio degli eventi storici di siccità, della coevoluzione di siccità e società e di come questa influenzi e si faccia influenzare da eventi di questo genere, potrebbero rappresentare una buona base per guidare in modo significativo nuove strategie non solo di previsione e mitigazione della siccità, ma anche di costruzione di società forti e consapevoli, al di là delle possibilità economiche e governative di un Paese.

6. BIBLIOGRAFIA

Ceola, S., Laio, F., Montanari A. (2015), Human-impacted waters: New perspectives from global high-resolution monitoring, *Water Resources Research*, doi:10.1002/2015WR017482.

Chen, X., and W. Nordhaus (2011), Using luminosity data as a proxy for economic statistics, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 108(21), 8589–8594, doi:10.1073/pnas.1017031108.

Di Baldassarre G. (2017), *Socio-Hydrology of Floods*, Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science, doi: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.264.

Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L., & Blöschl, G. (2010). Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, 37(22), L22402.

Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J.L., Bloeschl, G. (2013), *Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions*, *Hydrology and Earth System Sciences*, <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>.

Elshorbagy A., Bharath R., Lakhanpal A., Ceola S., Montanari A. and Lindenschmidt K. E. (2017). Topography- and nightlight-based national flood risk assessment in Canada, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 2219–2232, 2017 doi:10.5194/hess-21-2219-2017.

Elvidge, C., P. Sutton, T. Ghosh, B. Tuttle, K. Baugh, B. Bhaduri, and E. Bright (2009), A global poverty map derived from satellite data, *Comput. Geosci.*, 35(8), 1652–1660, doi: 10.1016/j.cageo.2009.01.009.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.

Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A. (2008): New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, AGU*, 89(10): 93-94.

Mård, J., Di Baldassarre, G., Mazzoleni, M. (2018), Nighttime light data reveal how flood protection shapes human proximity to rivers, *Science Advances*, doi: 10.1126/sciadv.aar5779.

Masih, S. Maskey, F. E. F. Mussá, and P. Trambauer (2014). A review of droughts on the African continent: a geospatial and long-term perspective, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3635–3649, doi: 10.5194/hess-18-3635-2014.

McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J. (1993). The Relationship of drought frequency and duration to time, *Eighth Conference on Applied Climatology*.

Myers, C., Slack, T., and Singelmann (2008). J.: Social vulnerability and migration in the wake of disaster: the case of Hurricanes Katrina and Rita, *Popul. Environ.*, 29, 271–291, doi: 10.1007/s11111-008-0072-y.

Petrie, B., Chapman, A., Midgley, A. and Parker, R. (2014). Risk, Vulnerability and Resilience in the Limpopo River Basin System: Climate change, water and biodiversity – a synthesis. For the USAID Southern Africa “Resilience in the Limpopo River Basin” (RESILIM) Program. OneWorld Sustainable Investments, Cape Town, South Africa.

Shukla S. and Wood A. (2007). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought, *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L02405, doi:10.1029/2007GL032487, 2008

Trambauer P., S. Maskey, M. Werner, F. Pappenberger, L. P. H. van Beek, and S. Uhlenbrook (2014). Identification and simulation of space–time variability of past hydrological drought events in the Limpopo River basin, southern Africa, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2925–2942, doi: 10.5194/hess-18-2925-2014.

Van Loon Anne F. (2015). Hydrological drought explained, *WIREs water*, 2:359–392, doi: 10.1002/wat2.1085.

Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H., Van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F. P., Bouwman, A., Jongman, B., et al. (2015). Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change*, 6(4), 381–385.

Siti internet consultati

ARCGIS Desktop Help:

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/get-started/main/get-started-with-arcmap.htm>;

DEWFORA, Drought Early warning and Forecasting:
<https://www.ecmwf.int/en/research/projects/dewfora>;

EM-DAT, The International Disaster Database:
<https://emdat.be>;

GHS, Global Human Settlement: <http://ghsl.jrc.ec.europa.eu>.;

HYDROSHEDS, Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales:
<http://hydrosheds.org/page/overview>;

JRC, Joint Research Centre Earth Observation Data and Processing Platform:
<https://cidportal.jrc.ec.europa.eu/home/>;

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration:
<https://www.noaa.gov>;

RAK Limpopo, River Awareness Kit:
http://www.limpopo.riverawarenesskit.org/LIMPOPORAK_COM/EN/RIVER/CLIMATE_AND_WEATHER/CLIMATE_OF_THE_LIMPOPO_RIVER_BA/WATER_SCARCITY_IN_THE_BASIN.HTM;

SEDAC, Socioeconomic Data and Applications Center:
<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v3/sets/browse;>

STATS SA, Statistics South Africa:
<http://www.statssa.gov.za;>

WIKIPEDIA, Classificazione dei climi di Köppen:
https://it.wikipedia.org/wiki/Classificazione_dei_climi_di_Köppen;

WIKIPEDIA, Clima Steppico:
https://it.wikipedia.org/wiki/Clima_steppico;

WIKIPEDIA, Limpopo:
<https://it.wikipedia.org/wiki/Limpopo;>

WIKIPEDIA, Modello Digitale di Elevazione:
https://it.wikipedia.org/wiki/Modello_digitale_di_elevazione;

Appendice A: Esempio di codice Matlab utilizzato per l'analisi planimetrica della distribuzione della popolazione nel bacino del Limpopo (dati di Built-up)

```
clear all
close all
clc

%lettura Euclidean distance
[Euc_dist,R]=geotiffread('Limpopo_EucDist_final');
Euc_dist=double(Euc_dist);
Euc_dist(Euc_dist==min(Euc_dist(:)))=NaN;
figure
imagesc(Euc_dist)

num_dist_plani=11;%numero classi di distanza
dist_plani_list=0:num_dist_plani-1; %elenco classi di distanza

dist0=NaN*ones(size(Euc_dist)); %matrice vuota
dist0(Euc_dist==0)=1;
figure
imagesc(dist0)

% range in secondi
dist1=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist1(Euc_dist>0 & Euc_dist<=0.016)=1;
figure
imagesc(dist1)

dist2=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist2(Euc_dist>0.016 & Euc_dist<=0.020)=1;
figure
imagesc(dist2)

dist3=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist3(Euc_dist>0.020 & Euc_dist<=0.027)=1;
figure
imagesc(dist3)

dist4=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist4(Euc_dist>0.027 & Euc_dist<=0.038)=1;
figure
imagesc(dist4)

dist5=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist5(Euc_dist>0.038 & Euc_dist<=0.045)=1;
figure
imagesc(dist5)

dist6=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist6(Euc_dist>0.045 & Euc_dist<=0.054)=1;
figure
imagesc(dist6)

dist7=NaN*ones(size(Euc_dist));
```

```

dist7(Euc_dist>0.054 & Euc_dist<=0.061)=1;
figure
imagesc(dist7)

dist8=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist8(Euc_dist>0.061 & Euc_dist<=0.071)=1;
figure
imagesc(dist8)

dist9=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist9(Euc_dist>0.071 & Euc_dist<=0.080)=1;
figure
imagesc(dist9)

dist10=NaN*ones(size(Euc_dist));
dist10(Euc_dist>0.080 & Euc_dist<=0.088)=1;
figure
imagesc(dist10)

%matrici 3d classi di distanza
matrix_all_dist=zeros(size(Euc_dist,1),size(Euc_dist,2),num_dist_plani);
matrix_all_dist(:,:,1)=dist0;
matrix_all_dist(:,:,2)=dist1;
matrix_all_dist(:,:,3)=dist2;
matrix_all_dist(:,:,4)=dist3;
matrix_all_dist(:,:,5)=dist4;
matrix_all_dist(:,:,6)=dist5;
matrix_all_dist(:,:,7)=dist6;
matrix_all_dist(:,:,8)=dist7;
matrix_all_dist(:,:,9)=dist8;
matrix_all_dist(:,:,10)=dist9;
matrix_all_dist(:,:,11)=dist10;

BuiltUp_list={'Limpopo_BuiltUp_1975';'Limpopo_BuiltUp_1990';...
'Limpopo_BuiltUp_2000';'Limpopo_BuiltUp_2014'};

vec=[1975,1990,2000,2014];

SOBU_dist=zeros(num_dist_plani,size(BuiltUp_list,1));
AOBU_dist=zeros(num_dist_plani,size(BuiltUp_list,1));

SOBU_tot=zeros(1,size(BuiltUp_list,1));
dist_SOBU=zeros(1,size(BuiltUp_list,1));

for id_BuiltUp=1:size(BuiltUp_list,1)
    %ciclo for per i vari files di BuiltUp
    filename=BuiltUp_list{id_BuiltUp}

    %carico BU relativo ad un singolo anno
    [BU,R]=geotiffread(filename);
    BU=double(BU);
    BU(BU==min(BU(:)))=NaN; %elimino aree al di fuori del bacino del
Limpopo
    figure
    imagesc(BU)

    %calcolo BU per ogni classe di distanza
    BU_dist=NaN*ones(size(BU,1),size(BU,2),num_dist_plani);
    for it_dist=1:num_dist_plani

```

```

        dist=matrix_all_dist(:, :, it_dist);
        BU_dist(:, :, it_dist)=dist.*BU;
        figure
        imagesc(BU_dist(:, :, it_dist))
    end

    %calcolo SOBU e AOBU
    for it_dist=1:num_dist_plani
        app=BU_dist(:, :, it_dist);
        SOBU_dist(it_dist, id_BuiltUp)=nansum(app(:));
        AOBU_dist(it_dist, id_BuiltUp)=nanmean(app(:));
    end

    SOBU_tot(id_BuiltUp)=sum(SOBU_dist(:, id_BuiltUp));

    dist_SOBU(id_BuiltUp)=dist_plani_list*SOBU_dist(:, id_BuiltUp)/SOBU_tot(i
    d_BuiltUp);

    %close all

end

figure
hold on
plot(vec, AOBU_dist(1, :), 'ob')
plot(vec, AOBU_dist(2, :), 'og')
plot(vec, AOBU_dist(3, :), 'om')
plot(vec, AOBU_dist(4, :), 'oc')
plot(vec, AOBU_dist(5, :), 'ok')
plot(vec, AOBU_dist(6, :), 'or')
plot(vec, AOBU_dist(7, :), 'or')
plot(vec, AOBU_dist(8, :), 'or')
plot(vec, AOBU_dist(9, :), 'or')
plot(vec, AOBU_dist(10, :), 'or')
plot(vec, AOBU_dist(11, :), 'or')

figure
plot(vec, dist_SOBU(1, :), 'or')
hold on
plot(vec, dist_SOBU(2, :), 'or')
plot(vec, dist_SOBU(3, :), 'or')
plot(vec, dist_SOBU(4, :), 'or')

```

Appendice B: esempio di codice Matlab utilizzato per l'analisi altimetrica della distribuzione della popolazione nel bacino del Limpopo in relazione ad eventi di siccità (dati di Built-up)

```
clear all
close all
clc

%lettura Elevation Above Nearest Drainage
[EAND,R]=geotiffread('Limpopo_EAND');
EAND=double(EAND);
EAND(EAND==max(EAND(:)))=NaN;
figure
imagesc(EAND)

%lettura Euclidean Distance
[Euc_dist,R]=geotiffread('Limpopo_EucDist_final');
Euc_dist=double(Euc_dist);
Euc_dist(Euc_dist==min(Euc_dist(:)))=NaN;
RN=NaN*ones(size(Euc_dist));
RN(Euc_dist==0)=1;
figure
imagesc(RN)

num_dist_alt=7;%numero classi di distanza
dist_alt_list=1:num_dist_alt; %elenco classi di distanza

% range in metri
dist1=NaN*ones(size(EAND));
dist1(EAND>-11 & EAND<=2)=1;
figure
imagesc(dist1)

dist2=NaN*ones(size(EAND));
dist2(EAND>2 & EAND<=5)=1;
figure
imagesc(dist2)

dist3=NaN*ones(size(EAND));
dist3(EAND>5 & EAND<=10)=1;
figure
imagesc(dist3)

dist4=NaN*ones(size(EAND));
dist4(EAND>10 & EAND<=15)=1;
figure
imagesc(dist4)

dist5=NaN*ones(size(EAND));
dist5(EAND>15 & EAND<=20)=1;
figure
imagesc(dist5)

dist6=NaN*ones(size(EAND));
dist6(EAND>20 & EAND<=25)=1;
```

```

figure
imagesc(dist6)

dist7=NaN*ones(size(EAND));
dist7(EAND>25 & EAND<=30)=1;
figure
imagesc(dist7)

%matrice 3d classi di distanza
matrix_all_dist=zeros(size(EAND,1),size(EAND,2),num_dist_alt);
matrix_all_dist(:,:,1)=dist1;
matrix_all_dist(:,:,2)=dist2;
matrix_all_dist(:,:,3)=dist3;
matrix_all_dist(:,:,4)=dist4;
matrix_all_dist(:,:,5)=dist5;
matrix_all_dist(:,:,6)=dist6;
matrix_all_dist(:,:,7)=dist7;

BuiltUp_list={'Limpopo_BuiltUp_1975';'Limpopo_BuiltUp_1990';...
'Limpopo_BuiltUp_2000';'Limpopo_BuiltUp_2014'};

vec=[1975,1990,2000,2014];

SOBU_dist_alt=zeros(num_dist_alt,size(BuiltUp_list,1));
AOBU_dist_alt=zeros(num_dist_alt,size(BuiltUp_list,1));

SOBU_tot=zeros(1,size(BuiltUp_list,1));
dist_SOBU_alt=zeros(1,size(BuiltUp_list,1));

for id_BuiltUp=1:size(BuiltUp_list,1)
    %ciclo for per i vari files di BuiltUp
    filename=BuiltUp_list{id_BuiltUp}

    %carico BU relativo ad un singolo anno
    [BU,R]=geotiffread(filename);
    BU=double(BU);
    BU(BU==min(BU(:)))=NaN; %elimino aree al di fuori del bacino del
Limpopo
    figure
    imagesc(BU)

    %calcolo BU per ogni classe di distanza
    BU_dist=NaN*ones(size(BU,1),size(BU,2),num_dist_alt);
    for it_dist=1:num_dist_alt
        dist=matrix_all_dist(:,:,it_dist);
        BU_dist(:,:,it_dist)=dist.*BU;
        figure
        imagesc(BU_dist(:,:,it_dist))
    end

    %calcolo SOBU e AOBU
    for it_dist=1:num_dist_alt
        app=BU_dist(:,:,it_dist);
        SOBU_dist_alt(it_dist,id_BuiltUp)=nansum(app(:));
        AOBU_dist_alt(it_dist,id_BuiltUp)=nanmean(app(:));
    end

    SOBU_tot(id_BuiltUp)=sum(SOBU_dist_alt(:,id_BuiltUp));

```

```
dist_SOBU_alt(id_BuiltUp)=dist_alt_list*SOBU_dist_alt(:,id_BuiltUp)/SOBU  
_tot(id_BuiltUp);
```

```
end
```

```
figure  
hold on  
plot(vec,AOBU_dist_alt(1,:), 'ob')  
plot(vec,AOBU_dist_alt(2,:), 'og')  
plot(vec,AOBU_dist_alt(3,:), 'om')  
plot(vec,AOBU_dist_alt(4,:), 'oc')  
plot(vec,AOBU_dist_alt(5,:), 'ok')  
plot(vec,AOBU_dist_alt(6,:), 'or')  
plot(vec,AOBU_dist_alt(7,:), 'or')
```