

Impiego dell'informazione climatica e del remote sensing nella valutazione regionalizzata della disponibilità idrica

Giovanni Laguardia¹ e Pierluigi Claps²

¹*Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, Università degli Studi della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza.*

²*Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino.*

SOMMARIO. Nell'ambito delle analisi statistiche regionali finalizzate alla valutazione delle risorse idriche è utile indagare le connessioni tra parametri climatici e grandezze idrologiche, allo scopo di introdurre basi fisiche nella determinazione della variabilità spaziale di queste ultime. In questo lavoro, alle grandezze climatiche usualmente considerate nella definizione di indici di aridità/umidità, sono state aggiunte informazioni derivanti da osservazione remota da satellite. Lo scopo è quello di tentare di minimizzare le informazioni disponibili da reti al suolo per migliorare le stime di grandezze idrologiche in bacini privi di dati. La grandezza di più facile osservazione con tecniche di telerilevamento e più strettamente connessa al clima è la vegetazione, generalmente caratterizzata dall'indice Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). La distribuzione spaziale del NDVI annuo e le sue aggregazioni su gruppi omogenei di pixel e su alcuni bacini idrografici di Puglia e Basilicata qui esaminati, mostra che tale indice è significativamente legato ad indici climatici di aridità. Tale legame si estende anche alle variabili descrittive della disponibilità idrica (media e varianza del deflusso annuo), evidenziando interessanti prospettive in ordine alla possibilità di introdurre informazioni da sensori remoti nelle analisi regionali di grandezze idrologiche.

1 INTRODUZIONE: UTILIZZO DELL'INFORMAZIONE CLIMATICA NELL'ANALISI REGIONALE

Per clima, in generale, si intende lo stato medio dell'atmosfera determinato dalle condizioni e variazioni stagionali di fattori quali la temperatura e l'umidità dell'aria, la quantità e la qualità delle precipitazioni (pioggia e neve), la durata dell'insolazione, la nuvolosità, la direzione e velocità del vento, ed altri fenomeni atmosferici ricorrenti, come nebbia, gelo e temporali.

È possibile ottenere una classificazione dei climi prendendo come base un fattore limitante, che, secondo la definizione dei geobotanici, è un «fattore ecologico sfavorevole, il quale al di là di un certo valore critico si comporta come se fosse il solo regolatore della vita vegetale». Un fattore limitante della vegetazione fra i più tipici è rappresentato dall'aridità che si protrae per un periodo più o meno lungo dell'anno. La quantità delle precipitazioni, la temperatura e l'entità dell'evaporazione rappresenta-

no parametri indispensabili da conoscere al fine di valutare il grado di aridità (Pinna, 1977).

L'uso dell'informazione climatica nell'ambito di analisi regionali di grandezze idrologiche è abbastanza recente, nonostante l'attinenza sia intuitivamente elevata. Iacobellis et al. (1998) e Claps e Mancino (2002) citano le poche fonti pregresse e presentano applicazioni relative rispettivamente all'analisi statistica delle piene e dei deflussi annui. In particolare, viene mostrato (Iacobellis et al., 1998) che il clima medio concorre a spiegare la riduzione del numero medio annuo di piene indipendenti rispetto al corrispondente numero di eventi meteorici significativi, e che (Fiorentino e Iacobellis, 2001) mediante l'indice climatico di Thornthwaite è possibile discriminare la modalità prevalente di formazione del deflusso di piena (dunniano o hortoniano). In relazione a scale temporali più ampie e con riferimento al territorio della regione Basilicata, Claps e Mancino (2002) hanno osservato che l'indice radiativo di Budyko (1956) è significativamente legato a media e varianza del deflusso

annuo. Tra i molti indici proposti in letteratura Claps e Mancino osservano come l'indice di Budyko, per le caratteristiche di sensibilità nelle zone aride, sia il più adatto a discriminare a fini idrologici le caratteristiche del territorio della regione in studio. La sensibilità in zone aride è importante in relazione al fatto che, al diminuire dell'umidità, la non linearità della trasformazione afflussi-deflussi aumenta, in quanto l'evapotraspirazione effettiva si allontana sempre più da quella potenziale. Ciò rende più variabili, in senso statistico, i fenomeni di formazione dei deflussi, medi e di piena, in zone aride e semi-aride.

2 INDICI CLIMATICI DA STAZIONI A TERRA E INDICI DA SENSORI REMOTI

Per una adeguata ricostruzione del clima di una regione è necessaria una non esigua collezione di informazioni di base. Se alcune grandezze, come la temperatura e la radiazione netta, presentano caratteristiche di stabilità interannuale abbastanza marcate, altre (ad es. la precipitazione) presentano ben maggiore variabilità temporale e spaziale.

Claps e Mancino (2002) hanno esaminato la problematica della determinazione indiretta delle variabili necessarie al calcolo dell'indice di aridità radiazionale di Budyko, espresso come:

$$I_B = \frac{R_n}{\lambda \cdot P} \quad (1)$$

in cui R_n = radiazione netta annua, λ = calore latente di vaporizzazione e P = precipitazione media annua. Riscontri positivi sono risultati sulla valutazione indiretta della temperatura media e della radiazione solare globale, in mancanza di serie di dati significativi riferiti alla radiazione netta. Le grandezze effettivamente utilizzate per la determinazione di I_B sono state: precipitazione, quota, latitudine ed indice di nuvolosità (da satellite).

La disponibilità di una rete pluviometrica fitta e con serie storiche sufficientemente lunghe risulta pertanto necessaria per la caratterizzazione climatica di una zona. Esistono tuttavia elementi per ritenere che sia possibile accrescere l'informazione ottenibile indirettamente sul clima di una regione utilizzando indici vegetazionali telerilevati, quanto meno in combinazione con le grandezze responsabili dell'evapotraspirazione. Nello specifico, si vogliono indagare i legami esistenti tra vegetazione e disponibilità idrica in un'ampia regione dell'Italia Meridionale.

2.1 L'OSSERVAZIONE REMOTA DELLA VEGETAZIONE

Riferimenti importanti riguardo alla rappresentatività della vegetazione come 'indice climatico' sono forniti, ad esempio, da Shuttleworth (1983), che mostra come la vegetazione spontanea presenti caratteri strettamente dipendenti dal clima. L'autore ne propone una classificazione basata su misure di temperatura e precipitazione media.

Gli indici di vegetazione da osservazione satellitare sono derivati da semplici considerazioni sulle modalità di interazione tra le piante e la radiazione solare. La clorofilla, principale responsabile dell'attività fotosintetica delle piante, assorbe soltanto alcune lunghezze d'onda della luce solare, ovvero la luce rossa, detta per questo Radiazione Fotosinteticamente Attiva, mentre risulta fortemente riflettente nell'infrarosso vicino. Ne consegue che la differenza tra la percentuale di radiazione solare riflessa in queste due bande sia fortemente correlata all'attività fotosintetica.

Nel presente lavoro si è fatto riferimento all'indice di vegetazione Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), misurabile da tutte le piattaforme satellitari attrezzate con radiometri in grado di fornire la riflettanza nel visibile (R_{VIS}) e nel vicino infrarosso (R_{NIR}). Esso viene definito dal rapporto:

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{VIS})}{(R_{NIR} + R_{VIS})} \quad (2)$$

L'utilizzo del NDVI consente non solo il riconoscimento delle aree coperte da vegetazione, ma anche il monitoraggio del suo stato di salute e della sua evoluzione. La possibilità di conoscere l'andamento temporale dello sviluppo e della senescenza della vegetazione e il suo legame con condizioni stagionali e climatiche è fonte di importanti connessioni con lo studio di ambienti naturali (DeFries et al., 1995; Nicholson e Farrar, 1994), ed antropizzati, come le aree agricole (Jakubauskas et al., 2002).

Un aspetto importante per gli obiettivi di classificazione climatica indiretta a scala regionale concerne la possibilità di individuare aree distinte dal punto di vista della vegetazione utilizzando un numero ragionevolmente basso di immagini rappresentative. In questo senso risulta interessante la proposta di Azzali e Menenti (1996) che usano una tecnica di rappresentazione sintetica delle serie temporali dell'indice di vegetazione tramite serie di Fourier: ampiezza e fase alle varie frequenze sono utilizzate per definire le caratteristiche di diverse specie vege-

tali e l'importanza di processi climatici a diversa periodicità. Tale tecnica consente inoltre la riduzione degli errori di riconoscimento generati da effetti atmosferici e da un non accurato filtraggio delle aree coperte da nuvole.

Dal punto di vista pratico, considerazioni legate al rapporto tra ripetitività e risoluzione della misura (nonché relative ai costi), conferiscono grande importanza alle informazioni ottenibili dai sensori NOAA-AVHRR, con risoluzione spaziale di 1.1 km di lato. Poiché essi forniscono osservazioni effettuate a lunghezze d'onda rispetto alle quali le nuvole non sono trasparenti, alcuni aspetti connessi alle caratteristiche dell'indice vegetazionale utilizzato risultano importanti rispetto agli obiettivi appena descritti. In particolare, è vantaggioso ai nostri fini che l'indice vegetazionale presenti una significativa inerzia alle più alte frequenze della scala temporale, in modo da poterne determinare un valori rappresentativi anche in periodi dell'anno in cui le osservazioni sono scarse per la frequente presenza di corpi nuvolosi. Inoltre, le specie vegetali presentano per lo più caratteristiche stabili da un anno all'altro (Cuomo et al., 2001), anche nel regime stagionale, cosa che consente di caratterizzarle anche con serie storiche ridotte.

2.2 DATI DISPONIBILI

Il presente studio è stato condotto su un dataset ottenuto dall'elaborazione di un anno di osservazioni giornaliere, effettuate da sensori NOAA-AVHRR, disponibili presso l'Istituto di Metodologie di Analisi Ambientale (IMAA) del CNR. L'elaborazione ha prodotto dodici immagini mensili per l'anno 1998 estratte con la tecnica di composizione dei massimi (MVC; Holben, 1986) dalle immagini giornaliere. La tecnica MVC consiste nell'individuazione del massimo valore dell'indice per ogni pixel dalle immagini di un determinato periodo (ad es. una settimana, 10 giorni, un mese). L'immagine così creata ha i valori di NDVI più credibili, in quanto i fattori che alterano la misura del NDVI, legati alla geometria della ripresa, alla presenza di aerosol, di vapor d'acqua e di nuvole, tendono tutti ad abbassare il valore dell'indice.

L'utilizzo di un solo anno di osservazioni, pur insufficiente a garantire la stabilità dell'informazione utilizzata non pregiudica la sostanza delle considerazioni che verranno tratte dalle elaborazioni. Si è innanzitutto verificato che dal punto di vista delle precipitazioni, nell'anno utilizzato e sulla regione di interesse non si sono verificate importanti deviazio-

ni rispetto alla media. Per quanto riguarda la rappresentatività dei valori medi annui di NDVI e dei cicli fenologici ricostruiti con l'analisi di Fourier, avere un solo anno a disposizione impedisce certamente di fissare dei valori rappresentativi di ogni pixel ma poco toglie alla possibilità di discriminare efficacemente le caratteristiche vegetazionali in diverse aree della regione, che è esattamente l'obiettivo dell'analisi qui svolta.

2.3 ANALISI DEL NDVI MENSILE MEDIANTE SERIE DI FOURIER

L'analisi del NDVI mediante serie di Fourier permette di ridurre i dodici valori mensili a un numero minore di variabili, ampiezze e fasi alle diverse frequenze, che facilitano l'identificazione di caratteri sintetici dell'evoluzione della vegetazione.

Si è fatto ricorso a due armoniche, di periodo pari ad un anno e a sei mesi. L'analisi di Fourier è stata condotta su tutti i pixel che compongono il territorio in studio, avente una superficie complessiva di ca. 40 000 km². Una volta stimati sui dati disponibili i parametri della serie di Fourier con il metodo dei minimi quadrati, il NDVI per il mese t può essere determinato mediante la relazione:

$$NDVI(t) = A_0 + A_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{12} + F_1\right) + A_2 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{6} + 2F_2\right) \quad (3)$$

dove A_0 , A_1 e A_2 rappresentano rispettivamente la media annua e le ampiezze per le armoniche di periodo 12 e 6 mesi. I parametri F_1 e F_2 , espressi in radianti, rappresentano le fasi.

Le mappe dei parametri della serie di Fourier risultano a prima vista fortemente correlate all'orografia della regione indagata (Figura 1). Una valutazione quantitativa della correlazione spaziale delle caratteristiche vegetazionali è stata effettuata tramite l'analisi dei gruppi (cluster analysis). Per l'individuazione del numero ottimale di clusters occorre tenere ben presente l'obiettivo della classificazione: imponendo un numero di classi grande si va incontro alla frammentazione spaziale. Si è dunque optato per tre clusters, quante sono le classi climatiche della regione: umido, subumido e semiarido. La distribuzione spaziale degli elementi di ciascun cluster (mostrata in Figura 2a per la sola area relativa alla Basilicata) riproduce correttamente i caratteri del clima della regione, così come sono riscontrabili in Mancino (2000).

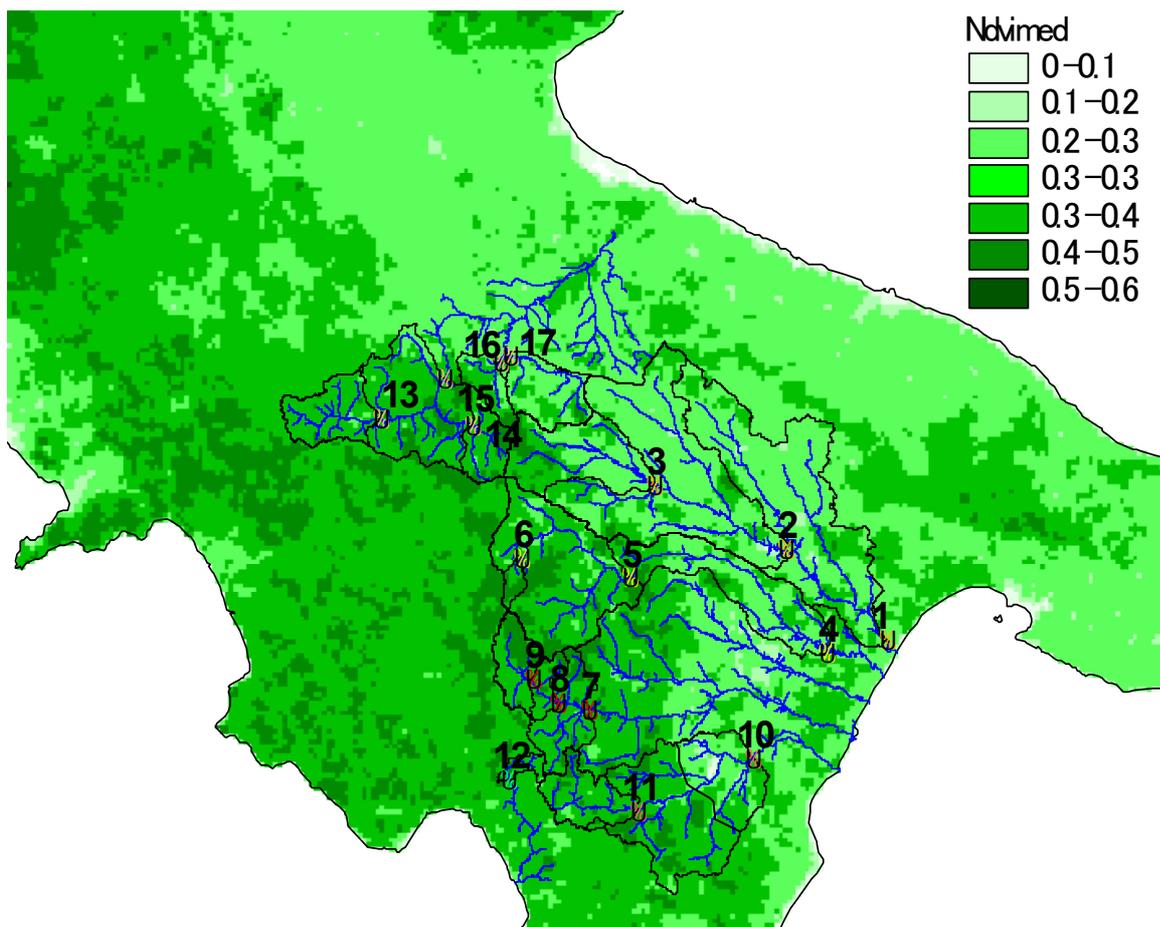


Figura 1. Mappa del NDVI medio per l'anno 1998. Sono indicate le sezioni idrometriche di tab. 1 e i relativi bacini imbriferi.

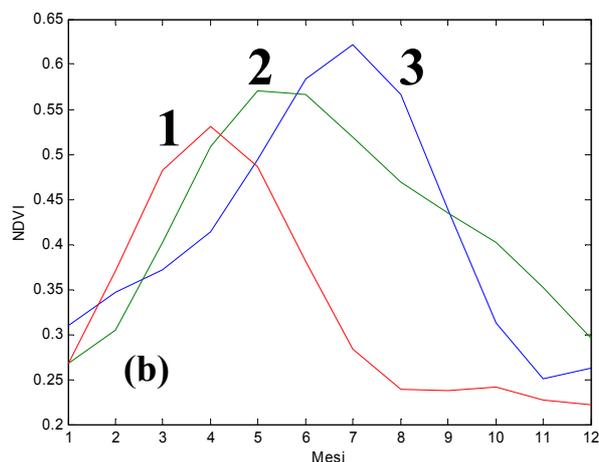
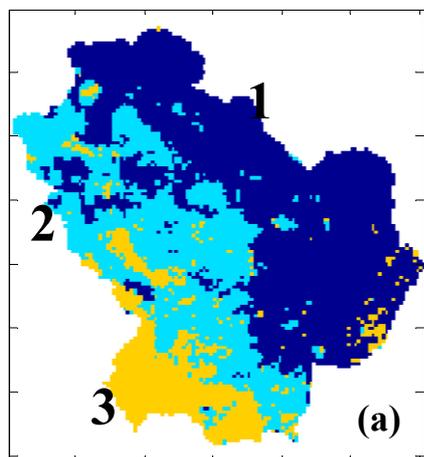


Figura 2. Mappa dei clusters sulla regione (a) e andamento medio del NDVI in ciascun cluster (b).

Avendo a disposizione le coordinate nello spazio 5-D dei centroidi delle classi è possibile rappresentare le curve del NDVI mensile medie per ciascun cluster (Figura 2b). Passando dalle zone aride (1) a quelle umide (3) della regione, si osserva che le curve presentano visibili differenze, soprattutto nella posizione del massimo. L'effetto della differenza di fase è dunque preponderante nell'assegnazione di un pixel al suo cluster ed è uno dei parametri più

importanti per la comprensione del rapporto fra la vegetazione e il clima della regione.

Dalla Figura 2 (b) si può rilevare come i ritmi di accrescimento e senescenza della vegetazione spontanea risultino essere il frutto del compromesso tra disponibilità idrica ed energetica. Si può osservare che nelle aree caratterizzate da clima semiarido (1) e subumido (2) l'attività della vegetazione è condizionata dalla scarsa disponibilità idrica e presenta il

massimo in evidente anticipo rispetto alla forzante energetica; nelle aree a clima umido (3) è la forzante energetica a condizionare lo sviluppo della vegetazione, che presenta il massimo in coincidenza con quello del regime termometrico. La carenza di energia è così sentita che la curva mensile del NDVI per queste aree racchiude un area (proporzionale al NDVI medio annuo) inferiore a quella delle zone subumide.

2.4 CONFRONTO TRA CARATTERI DELLA VEGETAZIONE E INDICI CLIMATICI

Le valutazioni descritte in precedenza sembrano confermare la rappresentatività complessiva del NDVI nei riguardi della distribuzione spaziale di grandezze connesse al bilancio idrico medio annuo. Più nel dettaglio, si mostrano nel seguito i legami riscontrati tra i parametri delle serie di Fourier e grandezze climatiche significative, quali la pioggia media annua e l'indice di di Budyko (BAI, Budyko Aridity Index). Si sono volutamente utilizzate grandezze climatiche medie di lungo periodo per stabilire se, con un solo anno di osservazione del NDVI, si potessero ottenere risultati comunque indicativi.

Nelle figure si sono mostrati con tonalità diverse i pixel appartenenti ai diversi cluster di figura 2, per poter disporre di un più chiaro riferimento alla distribuzione spaziale delle caratteristiche osservate. La notevole dispersione dei punti osservabile nelle Figure 3-5 è in parte spiegabile con il fatto che non si è tenuto conto in nessun modo della natura dei suoli, che risulta sicuramente essere discriminante per l'entità dell'accrescimento delle specie a parità di acqua disponibile.

In Figura 3 sono rappresentate sul piano cartesiano le coppie A_0 -BAI per tutti i punti dell'area in studio (Basilicata). La A_0 sembra assumere valori poco variabili fino a $BAI=2$, per poi decrescere all'aumento del BAI. Il confronto con la precipitazione media, condotto sulla base dei valori direttamente misurati ai pluviometri e ridistribuiti nello spazio, mostra come la variabile presenti andamento crescente nelle aree semiarida (1) e subumida (2), per poi decrescere nella zona umida (3). Tale andamento rappresenta un indizio di scarsità della forzante energetica (radiazione netta) rispetto a quella pluviometrica nelle zone molto umide. L'effetto di saturazione del NDVI all'aumentare della pioggia, ben noto in letteratura (v. Nicholson e Farrar, 1994), si combina, nel passaggio dalla zona subumida a quella umida, con una progressiva riduzione della disponibilità radiativa, che fa sì che il valore medio del NDVI tenda a decrescere.

L'ampiezza della prima armonica (A_1) presenta una notevole dispersione all'interno delle zone climatiche, con conseguente difficoltà nel riscontro di un legame evidente con BAI e P.

La fase della prima armonica (F_1), che rappresenta, a meno di piccole variazioni apportate dalla seconda armonica, il mese in cui il NDVI raggiunge il massimo annuo, è il parametro che, con A_0 , presenta le più interessanti relazioni con il clima. In figura 4 si può osservare che la variabile assume valore pressoché costante nelle zone umide e subumide, mentre decresce all'aumentare del BAI (al diminuire delle piogge) nelle zone aride.

Le variabili della seconda armonica, A_2 e F_2 , sono state introdotte principalmente per migliorare la precisione della ricostruzione della serie del NDVI mensile, con una significativa riduzione dell'errore di ricostruzione. Il loro ruolo è certamente visibile nella ricostruzione delle curve di NDVI mensile in figura 2, che altrimenti avrebbero presentato andamento puramente sinusoidale.

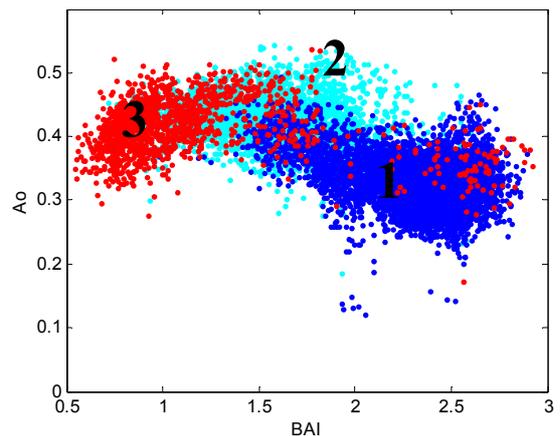


Figura 3. Confronto fra NDVI medio annuo (A_0) e indice di Budyko (BAI).

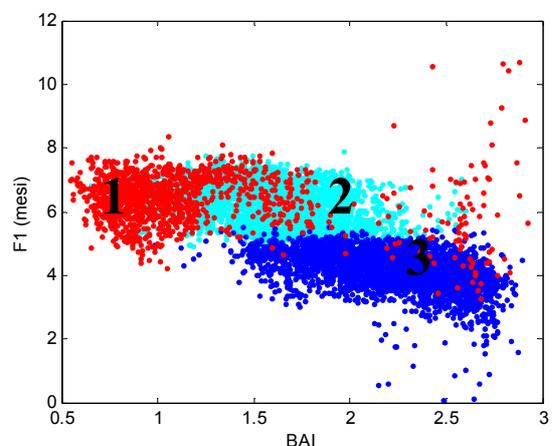


Figura 4. Confronto fra fase della prima armonica (F_1) e indice di Budyko (BAI)

In Figura 5 si nota la spiccata separazione dei valori assunti dal parametro F_2 relativamente alle tre zone climatiche considerate.

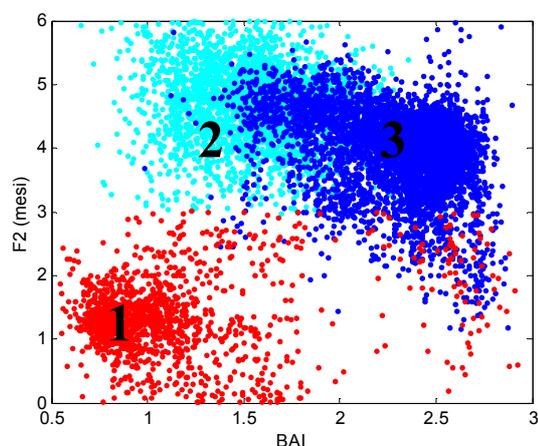


Figura 5. Confronto fra fase della seconda armonica (F_2) e indice di Budyko (BAI).

3 RELAZIONI TRA INDICI CLIMATICI, VEGETAZIONALI E DEFLUSSI ANNUI

Le analisi effettuate ad una scala spaziale indistinta non consentono di trarre indicazioni concretamente utilizzabili se non si scende alla scala di bacino. In ultima analisi, come sottolineato anche in Claps e Mancino (2000) l'interesse ultimo di queste analisi risiede nella valutazione del ruolo che può rivestire la classificazione climatica (e vegetazionale) nella discriminazione dei caratteri di risposta idrologica – a breve e lungo termine – dei bacini idrografici. Di conseguenza, indici e parametri definiti in precedenza sono stati mediati spazialmente su 17 bacini appartenenti al territorio delle regioni Puglia e Basilicata (v. Tabella 1) e caratterizzate da

clima che va da umido a semiarido.

La grandezza idrologica presa a riferimento è anche in questo caso il deflusso annuo (in mm).

Il valore rappresentativo utilizzato per il NDVI è il suo integrale, a rappresentare la produzione primaria (Prince, 1991). Esso è stato confrontato con valori medi annui (e mediati spazialmente) di indice di Budyko (Figura 6a) e precipitazione annua (Figura 6b). Nella rappresentazione dei dati aggregati sui bacini appare ancor più evidente la differenza fra i bacini umidi, quali il Noce a La Calda e Sinni a Pizzutello (cod 11 e 12), e quelli subumidi e semiaridi: il NDVI integrato è pressoché costante per i primi, ma con valori inferiori rispetto a quelli di bacini meno piovosi, e decresce con l'indice di Budyko per i secondi. E' dunque ben osservabile anche alla scala di bacino il risultato del compromesso tra forzante energetica e pluviometrica discusso in precedenza.

Si sono poi esaminati i legami tra NDVI e momenti del deflusso annuo, i quali appaiono di tipo esponenziale. Anche se i risultati che seguono non hanno pretesa di rappresentatività generale, si ritiene utile riportare le relazioni che legano NDVI e, rispettivamente, media e varianza del deflusso annuo.

La media D può essere determinata (v. Fig. 6c) mediante la relazione:

$$D = 0.2625 \cdot \exp(1.4638 \cdot NDVI) \quad (4)$$

con coefficiente di determinazione $R^2=0.8573$. La varianza σ_D è legata al NDVI dalla:

$$\sigma_D = 4.2323 \cdot \exp(1.6936 \cdot NDVI) \quad (5)$$

con $R^2=0.7911$.

Cod.	Bacino	A (km ²)	Z (m)	μ_D (mm)	σ_D^2 (mm)	Tmed (°C)	Pmed (mm)	IntNDVI	BAI
1	Bradano a Tavole Palatine	2743	407	87	3289	14.89	628	3.94	2.46
2	Bradano a S.Giuliano	1631	440	133	11791	14.66	646	4.01	2.38
3	Bradano a p.te Colonna	459	560	136	9094	13.95	695	4.33	2.20
4	Basento a Menzena	1405	664	276	18208	13.34	774	4.58	1.96
5	Basento a Gallipoli	848	893	352	19614	12.06	838	4.84	1.70
6	Basento a Pignola	42.4	1015	574	45886	11.04	1035	5.34	1.31
7	Agri a Tarangelo	507	870	628	33316	12.22	1025	5.17	1.49
8	Agri a Grumento	278	886	775	23841	12.06	1036	5.22	1.42
9	Agri a le Tempe	174	933	809	45108	11.83	1053	5.24	1.38
10	Sinni a Valsinni	1142	752	555	32642	12.33	1064	5.03	1.40
11	Sinni a Pizzutello	233	932	1000	116017	12.07	1457	5.06	1.00
12	Noce a la Calda	44	1121	1207	93956	11.46	1914	5.02	0.70
13	Ofanto a Cairano	272	674	356	15583	12.87	963	4.88	1.52
14	Atella a ponte sotto Atella	158	813	240	8689	12.99	809	4.95	1.85
15	Ofanto a Monteverde scalo	1028	657	253	16171	12.92	874	4.91	1.60
16	Arcidiaconata a ponte r-l	124	530	181	7203	13.72	742	4.58	2.04
17	Venosa a ponte S.Angelo	261	502	127	5390	14.39	673	4.13	2.23

Tabella 1. Caratteristiche fisiche e momenti campionari del deflusso annuo per i bacini in studio.

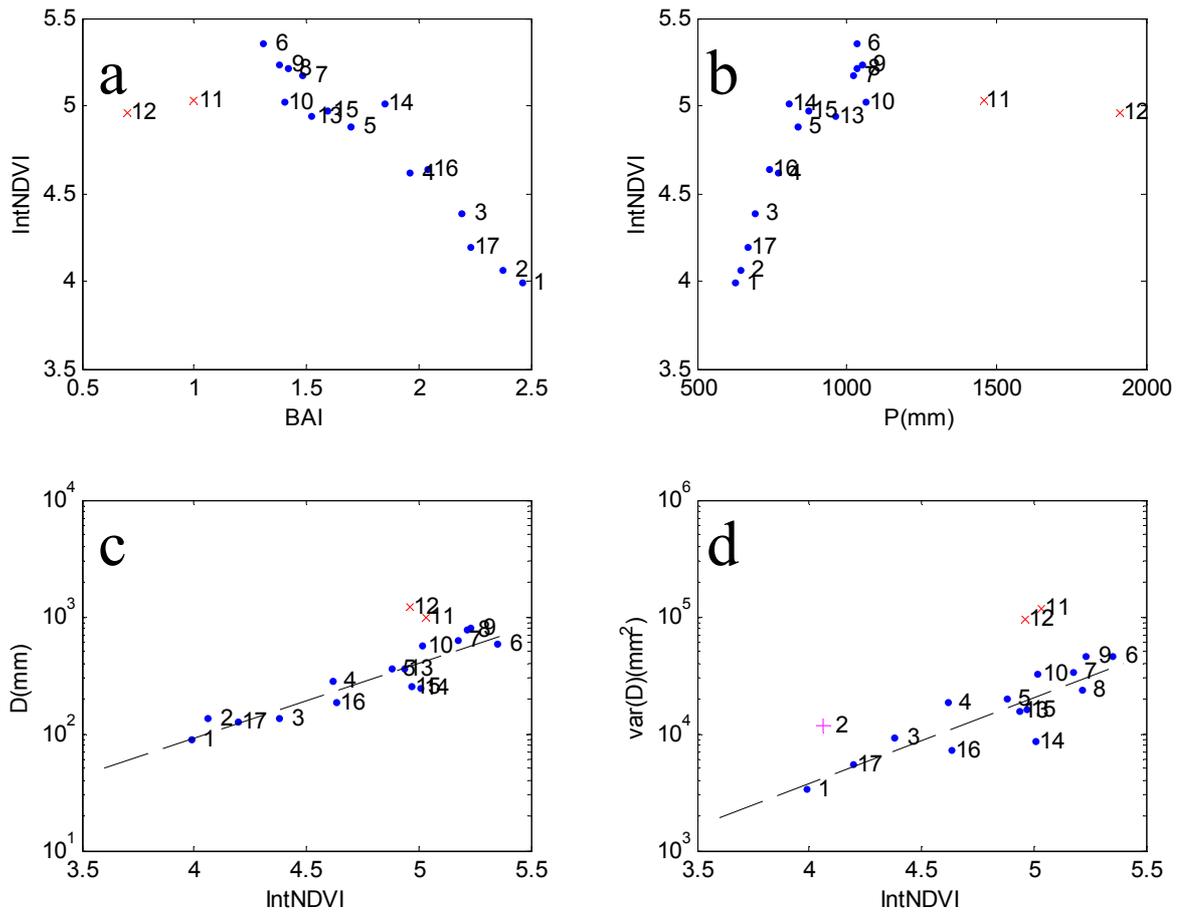


Figura 6. Confronto dell'integrale del NDVI con l'indice di Budyko(a), la pioggia media annua (b), il logaritmo della media (c) e logaritmo della varianza (d) del deflusso annuo.

Dalle relazioni sopra riportate sono esclusi i bacini a clima umido, individuabili (nella regione indagata) dal fatto che presentano precipitazione annua media superiore a 1200 mm ed indice di Budyko non superiore ad 1. Una volta noti i momenti del deflusso annuo, con relazioni del genere sarebbe possibile ricostruirne l'effettiva distribuzione di probabilità, nota la legge probabilistica da adottare.

4 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si sono indagate le possibilità di utilizzo di grandezze telerilevate da satellite a supporto della classificazione climatica di ampie regioni. Lo scopo ultimo è quello di integrare i metodi statistici attualmente in uso nell'ambito delle analisi regionali di grandezze idrologiche.

A questo fine sono state valutate le capacità esplicative di un indice (NDVI) connesso alla fenologia e, vagamente, alla 'biomassa' della vegetazione, dal momento che lo stato trofico della stessa è un fattore che riflette l'entità della disponibilità idrica locale.

I dati elaborati, pur di ridotta numerosità, hanno mostrato significative possibilità di classificazione della vegetazione in relazione al ciclo fenologico, con chiari riflessi sulle caratteristiche climatiche delle zone di afferenza delle diverse tipologie individuate. Senza nessuna pretesa di classificazione botanica, e con il solo obiettivo di evidenziare legami fisicamente spiegabili tra grandezze idrologiche ed indici riconducibili alla vegetazione, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- Il NDVI integrato sembra essere linearmente legato al deficit idrico medio annuo, come rappresentato dal Budyko Aridity Index (BAI)

- Essendo il BAI un buon descrittore delle caratteristiche medie e di variabilità del deflusso annuo (Claps e Mancino, 2000), all'incirca lo stesso è risultato per il NDVI. Importante (e già nota) limitazione ai risultati ottenuti consiste nell'effetto di 'saturazione' che l'indice vegetazionale mostra per elevati valori di precipitazione (e quindi bassi valori del BAI). Questo effetto merita ulteriori approfondimenti, soprattutto in relazione al fatto che sembra essere il principale ostacolo alla definizione di nuovi scenari di mappatura climatica. Si pensa in particolare a ipotesi di validazione di modelli di analisi

G. Laguardia e P. Claps

spaziale di grandezze idrologiche (ad es. precipitazioni medie annue) ed a ipotesi di ricostruzione del-

la disponibilità idrica in ampie regioni scarsamente abitate e prive di adeguate misure pluviometriche.

RINGRAZIAMENTI

Lavoro finanziato con fondi CNR-GNDICI, contributo n.03.00022.GN42, e MIUR, Progetto PRIN 2003 " Caratterizzazione delle siccità e gestione dei serbatoi". Si ringrazia Tiziana Simoniello per la collaborazione nelle elaborazioni ed i suggerimenti forniti.

BIBLIOGRAFIA

Azzali S., Menenti M., Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 5, 973-996, 2000.

Budyko, M.I., The heat balance of the Earth's surface, *Gidrometeoizdat, Leningrad*, 1956.

Claps P., Fiorentino M., Silvagni G., Studio per la Valorizzazione e la Salvaguardia delle Risorse Idriche in Basilicata, [http://www.latibi.unibas.it/prodotti/rapporti/01rapp01/], Regione Basilicata, 300 pp, 1998.

Claps P., Mancino L., Impiego di classificazioni climatiche quantitative nell'analisi regionale del deflusso annuo, *Atti XXVIII Conv. di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Potenza, 169-178, BIOS (Cosenza), 2002.

Cuomo V., Lanfredi M., Lasaponara R., Macchiato M.F., Simoniello T., Detection of interannual variation of vegetation in middle and southern Italy during 1985-1999 with 1 km NOAA AVHRR NDVI data, *Journal of Geophysical Research*, 106(16), 17.863-17.876, 2001.

DeFries R., Hansen M., Townshend J., Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR Pathfinder data, *Remote Sensing of Environment*, 54, 209-222, 1995.

Fiorentino M., Iacobellis V., New insights about the climatic and geologic control on the probability distribution of floods, *Water Resources Research*, 37(3), pp. 721-730, 2001.

Holben, C.J., Characteristic of maximum value composite image from temporal AVHRR data, *International journal of Remote Sensing*, vol. 7, pp. 1417-1434, 1986.

Iacobellis V., Claps P., Fiorentino M., Sulla dipendenza dal clima dei parametri della distribuzione di probabilità delle piene, *Atti XXVI Conv. Idraul. e C. I., Catania, Vol II*, 213-224, 1998.

Jakubauskas M.E., Legates D.R., Kastens J.H., Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data, *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1), 127-139, 2002.

Mancino L., Connessioni tra parametri climatici ed idrologici a scala regionale con applicazione ai bacini idrografici lucani, *Tesi di laurea non pubblicata, Università della Basilicata*, 2000.

Nicholson S.E., Farrar T.J., The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semi-arid Botswana. I. Relationship to rainfall, *Remote Sens. Environ.*, 50, 107-120, 1994.

Pinna M., *Climatologia*, UTET, 1977.

Prince S.D., A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data, *Int. J. Remote Sens.*, 12, 1313-1330, 1991.

Shuttleworth, W.J., Evaporation models in the global water budget. In A. Street-Perrot *et al.* (Eds). *Variations in the global water budget*. D.Riedel Publishing Company, 147-171, 1983.