



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Università degli Studi di Roma “La Sapienza”

Facoltà di Ingegneria

SIA - Scuola di Ingegneria Aerospaziale

DIAEE - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

Dottorato di Ricerca in Energia e Ambiente

XXX Ciclo

Tesi di Dottorato

*Tecniche di classificazione e monitoraggio delle aree agricole
nei paesi dell’Africa Centro-Orientale da immagini satellitari*

Candidato

Roberto Luciani

Relatore

Prof. Giovanni Laneve

A.A. 2017/18

Sommario

Sommario	1
Premessa	4
Struttura della Tesi.....	5
1. Introduzione.....	6
1.1 Lo stato dell'arte.....	6
1.2 Il progetto SBAM.....	9
1.2.1 Gli obiettivi del progetto	9
1.2.2 Area di studio e ricaduta scientifica	10
2. Principi di Telerilevamento	11
2.1 Richiami generali	11
2.2 Il sistema di Telerilevamento	14
2.3 Principi fisici del Telerilevamento	15
2.3.1 Lo spettro elettromagnetico.....	16
2.3.2 Le finestre spettrali.....	17
2.3.3 Radiometria	18
2.3.4 Sorgenti di energia naturali	19
2.3.5 La geometria di osservazione.....	20
2.3.6 Meccanismi principali di emissione.....	21
2.3.7 Meccanismi principali di riflessione	21
2.3.8 Meccanismi principali di trasmissione.....	22
2.4 Caratteristiche spettrali delle superfici naturali	24
2.4.1 Interazione atmosferica	24
2.4.2 Superfici naturali	25
3. Telerilevamento della vegetazione	28
3.1 Proprietà radiative della foglia	28
3.1.1 Interazione con la componente chimica fogliare.....	28
3.1.2 Interazione con la struttura fogliare	31

3.1.3	Modelli delle proprietà ottiche della foglia – PROSPECT e LIBERTY	32
3.1.4	Proprietà radiative delle coperture fogliari	32
3.2	Fisiologia della vegetazione	34
3.2.1	Contenuto di acqua nelle piante	34
3.2.2	Evaporazione e perdita idrica	35
3.2.3	Bilancio energetico.....	35
3.2.4	Flusso di calore	36
3.2.5	Evaporazione.....	36
3.2.6	Equazione di Penman-Monteith	36
3.3	Indici spettrali.....	37
3.3.1	Indici di vegetazione	37
4.	Metodologia	41
4.1	Introduzione	41
4.1.1	Struttura generale	41
4.1.2	Fenologia della vegetazione.....	42
4.1.3	Zone Agro-Ecologiche (AEZ).....	45
4.2	Aree di studio	46
4.3	Dati e materiale	48
4.3.1	Il dato satellitare.....	48
4.3.2	Dati meteorologici e climatici.....	49
4.3.3	Dati del suolo	49
4.3.4	Zonazione agro-ecologica e fenologia	49
4.4	Il processo di classificazione	50
4.4.1	Trattamento del dato satellitare	50
4.4.2	Pan-sharpening.....	52
4.4.3	Calcolo dell'indice NDVI	55
4.4.4	Correzione ed estrazione del profilo fenologico	57
4.4.5	Regole decisionali	60
4.4.6	Algoritmo di classificazione MDT.....	62
5.	Modello di stima della produzione.....	67
5.1	Il modello di previsione dei raccolti.....	67
5.1.1	AquaCrop.....	68
5.1.2	Sviluppo delle colture	70
5.1.3	Traspirazione delle colture.....	71
5.1.4	Produzione di biomassa vegetale	72
5.1.5	Resa delle colture	72
5.1.6	Dati di input.....	73

5.1.7 Equazione di Penman-Monteith	74
5.2 Applicazione del metodo.....	79
6. Risultati	80
6.1 Risultati della procedura di classificazione	80
6.1.1 La classificazione	80
6.1.2 La procedura di validazione	83
6.1.3 Classificazione delle province di Nakuru e Busia – Anno 2015	85
6.1.4 Classificazione delle province di Nakuru e Busia – Anno 2016.....	88
6.1.5 Conclusioni	91
6.2 Risultati della procedura di stima dei raccolti	93
6.2.1 I parametri di simulazione.....	93
6.2.2 Risultati della simulazione	96
6.2.3 Conclusioni	98
Bibliografia	99

Premessa

Il progetto Africover per l'Africa Orientale fu attivo fra gli anni 1995 e 2002, ed ebbe come obiettivo la produzione di un archivio digitale georeferenziato volto alla classificazione delle tipologie di copertura del suolo, nonché alla determinazione della loro destinazione di utilizzo; venne inoltre introdotto un riferimento geodetico omogeneo e stabilita una chiara ed univoca toponimia di strade e bacini idrici presenti nell'area. La FAO e la Cooperazione Italiana supportarono, in risposta a numerose richieste di assistenza a livello sia nazionale che locale, la creazione dell'archivio e la realizzazione delle mappe tematiche di Land Cover poste a fondazione dei criteri decisionali per la gestione e lo sfruttamento delle risorse naturali delle regioni africane.

A partire dal 2002 l'archivio realizzato non è mai più stato aggiornato; da questo punto parte il nostro lavoro, con l'obiettivo di realizzare mappe aggiornate delle aree agricole del Kenya impiegando sensori della classe del Thematic Mapper, sviluppare una metodologia di stima dello stato delle culture per un accurata previsione dei raccolti, sviluppare ed implementare un sistema software che renda agevole la creazione di mappe di uso del suolo da immagini satellitari

Struttura della Tesi

Il **Capitolo 1.** Sarà dedicato all'introduzione del problema oggetto di questo studio ed all'introduzione del progetto SBAM; i **Capitoli 2.-3.** Saranno dedicati all'esposizione dei principi generali della disciplina del Telerilevamento, con particolare interesse per il Telerilevamento della vegetazione, ed alla definizione di grandezze e fenomeni tipici dei modelli di simulazione di crescita della vegetazione. I **Capitoli 4. e 5.** saranno dedicati all'esposizione della metodologia di lavoro, nonché alla presentazione dei dati e del materiale impiegato. Infine nel **Capitolo 6.** Verranno presentati i risultati conseguiti.

1. Introduzione

La conoscenza del territorio svolge un ruolo fondamentale per la corretta gestione territoriale e per la pianificazione di numerose attività umane. L'importanza di monitorare, mappare e quantificare le variazioni della copertura del suolo è ampiamente riconosciuta come un elemento chiave nello studio dei cambiamenti globali.

1.1 Lo stato dell'arte

Negli ultimi 10 anni, i progressi nell'elaborazione delle immagini satellitari a bassa risoluzione spaziale (250-500 m) e le politiche di distribuzione dei dati hanno portato allo sviluppo di prodotti tematici globali utili per applicazioni di carattere ambientale disponibili in tempo reale (30 min) o quasi reale (entro 2 - 3 ore), dall'acquisizione del dato. Naturalmente, qualora l'acquisizione dell'immagine non sia locale, il gap temporale tra il passaggio sull'area di interesse e la disponibilità dell'immagine può tranquillamente essere superiore ad un intero giorno. Questo, in alcune circostanze, può rendere inutile il vantaggio dell'elevata frequenza di osservazione garantita dai sensori a media-bassa risoluzione (MODIS, AVHRR, etc.).

D'altra parte, fattori tecnici (volume dei dati) e politici (elevato costo dei dati) tradizionalmente hanno impedito lo stesso sviluppo per i dati a media-alta risoluzione (~30 m). Il progresso nella capacità di calcolo e il cambiamento nella politica di distribuzione dei dati, avviata dagli Stati Uniti, seguita dalle altre agenzie o istituti di ricerca spaziali (ESA, INPE, etc.) consentono oggi la produzione sistematica di prodotti tematici dai sensori della classe del Thematic Mapper. In particolare, la NASA ha finanziato un progetto della durata di 5 anni chiamato WELD (Web Enabled Landsat Data) che ha come obiettivo la ri-elaborazione di tutte le immagini Landsat acquisite sul territorio degli Stati Uniti in 10 anni e la distribuzione di tali dati in forma di mappa completa in un formato consistente e semplice da utilizzare. L'utilizzo dei dati pre-elaborati nel sistema WELD rende possibile la costruzione di un sistema di monitoraggio completamente automatico utilizzando un approccio simile a quello che sino ad oggi era ristretto alle immagini a bassa risoluzione (quali MODIS).

Se a questa considerazione aggiungiamo la necessità di aggiornare le mappe tematiche di alcune regioni della Terra, in particolare quelle dell'Africa centrale, appare chiaro l'obiettivo di questo progetto. Infatti, se prendiamo come riferimento il Kenya, possiamo renderci conto che le mappe di copertura del

suolo (Land Cover) più recenti si basano su immagini satellitari (Landsat) acquisite in prevalenza nel 1995. La FAO infatti, con il progetto Africover generò nei primi anni del 2000, la mappa di land cover dei paesi del Africa Centro-Orientale che attualmente costituisce la mappa più aggiornata dell'area (Fig. 1.1). E' inutile sottolineare che da allora, i mutamenti socio-economici e politici hanno prodotto grandi cambiamenti con intensificazione delle aree dedicate agro-pastorali e una espansione sistematica delle aree agricole. La produzione di mappe temporali di land cover si rende necessario per analizzare i cambiamenti verificatisi negli ultimi anni e per prevedere nel lungo termine il potenziale trend delle aree agricole e pastorali.

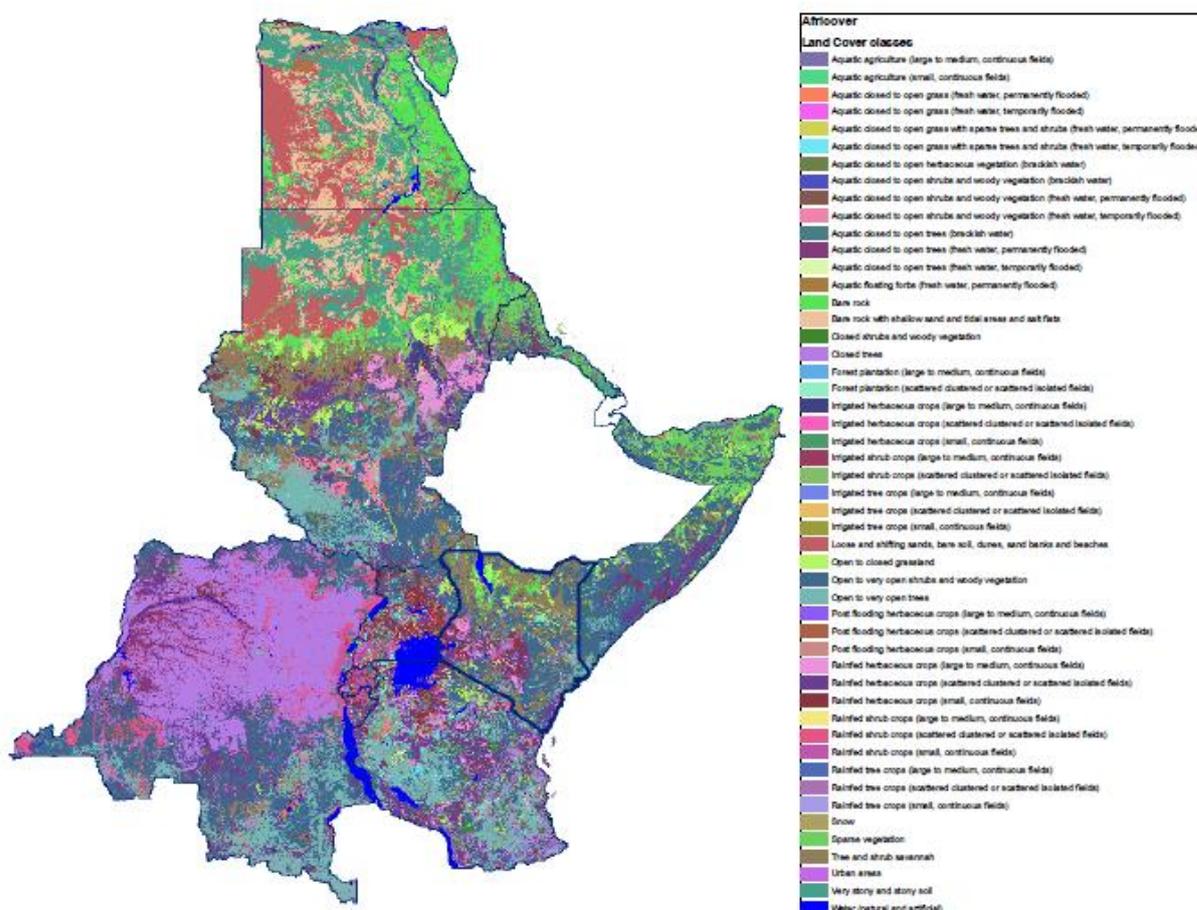


Fig. 1.1 Mappa delle aree agricole realizzata nell'ambito del progetto AFRICOVER.

Tuttavia, va rilevato che la mappa di land cover più recente (2005) disponibile per le aree di interesse è quella presente nel dataset Globcover (Fig. 1.2), prodotta per iniziativa dell'ESA, alla risoluzione spaziale di 300 m, idonea ad analisi di tipo globale e quindi di scarsa utilità per una stima accurata delle aree agricole e della loro produttività.

L'agricoltura ad oggi è la più importante attività economica in Kenya, anche se meno dell'8% del suo territorio è utilizzato per le colture e la pastorizia. Meno del 20% del suolo è idoneo alla agricoltura, di cui solo il 12% è classificato come ad alto potenziale agricolo (precipitazioni adeguate)

e circa l'8% del suolo come a medio potenziale. Il resto del territorio è arido o semiarido. Circa l'80% della forza lavoro è impegnata in agricoltura o nella produzione di prodotti alimentari.

L'espansione delle esportazioni dei prodotti agricoli è stato il fattore più importante nello sviluppo economico, gran parte dell'attività agricola è diretta anche verso il consumo interno. L'agricoltura del Kenya è sufficientemente diversificata per produrre quasi tutti i prodotti alimentari di base. In una certa misura, l'agricoltura del Kenya contribuisce anche al fabbisogno alimentare dei paesi limitrofi.

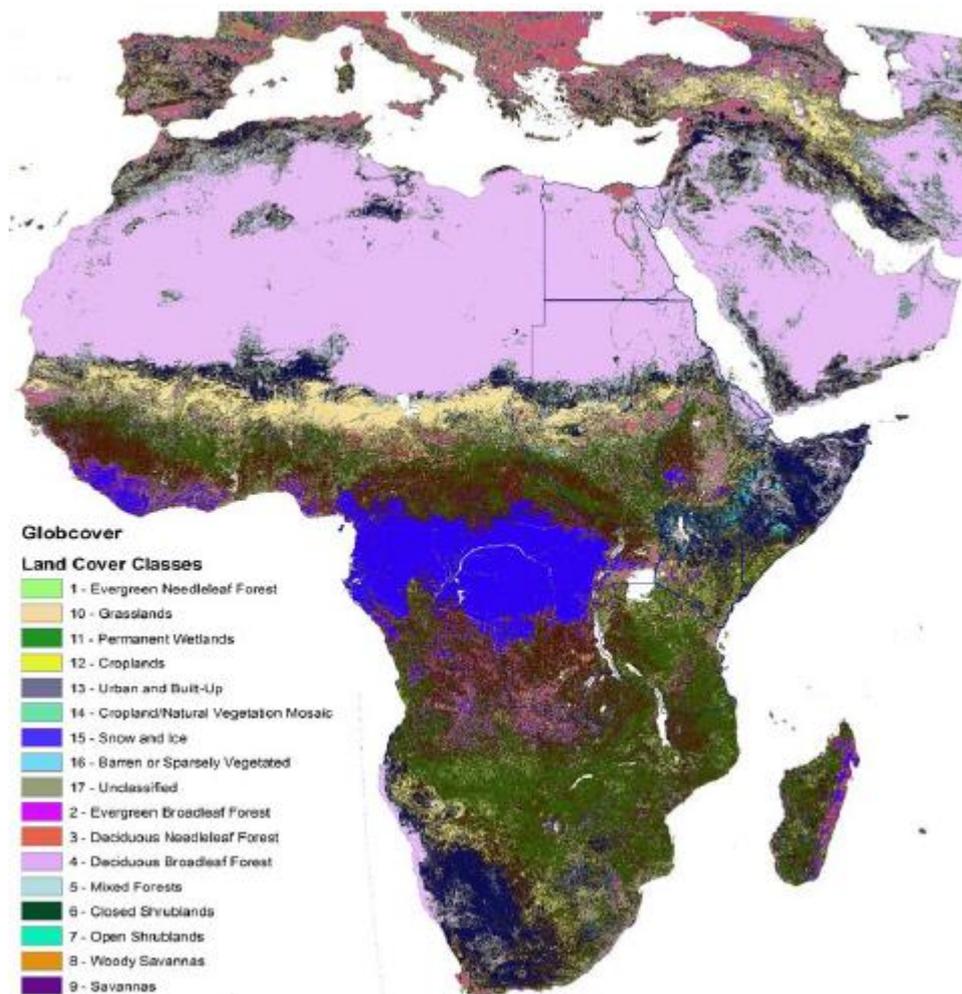


Fig. 1.2 Il prodotto di classificazione Globcover individua 17 classi di copertura del suolo secondo lo schema di classificazione della vegetazione globale del programma internazionale geosfera-biosfera (IGBP). Questo schema comprende 11 classi di vegetazione naturali, 3 classi di terreni sviluppati, uno dei quali è un mosaico con vegetazione naturale, neve o ghiaccio permanente, vegetazione rada e acqua.

Il Kenya è il primo produttore di tè dell'Africa e nel 1999 è stato il quarto nel mondo, dietro India, Cina e Sri Lanka. Il tè nero è la principale fonte di valuta straniera agricola del Kenya. La produzione nel 1999 ha raggiunto le 220.000 tonnellate. Le esportazioni del tè sono state valutate pari a circa \$ 404.100.000 nel 2001, cioè circa il 18% delle esportazioni totali.

La produzione di caffè è la terza fonte di valuta straniera del Kenya, dopo il turismo e il tè. Il Kenya è anche il maggior produttore ed esportatore mondiale di piretro, un fiore dal quale si ottiene una

sostanza utilizzata nei pesticidi. La crescente domanda di pesticidi "organici naturali" ha fatto aumentare la domanda internazionale di piretrine, nonostante l'esistenza di sostituti chimici di sintesi. Altre importanti produzioni agricole sono la canna da zucchero con 5,2 milioni di tonnellate, il mais con 2,11 milioni di tonnellate, il grano con 135.000 tonnellate, il riso con 40.000 tonnellate e il cotone con 5.000 tonnellate (dati del 1999).

Quanto detto fin qui spiega l'importanza di realizzare una mappa aggiornata delle aree agricole del Kenya, sviluppare una metodologia di stima dello stato delle colture per un'accurata previsione dei raccolti, sviluppare/implementare un sistema software che renda agevole la creazione di mappe di uso del suolo da immagini satellitari basate sul sistema GLAM (Global Agricultural Monitoring system) sviluppato negli Stati Uniti. Gli indici di vegetazione (VI) derivati dalle immagini satellitari sono notoriamente correlati con i parametri che definiscono lo stato dei raccolti. Di conseguenza, i dati EO hanno grande importanza per il monitoraggio dello stato delle coltivazioni e della produzione, e per fornire le informazioni necessarie per la sicurezza alimentare e sistemi di allerta precoce.

L'Università del Maryland in collaborazione con la NASA e il Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (USDA) hanno sviluppato il Sistema Globale di monitoraggio agricolo satellitare (GLAM), che è diventato uno strumento primario per gli analisti USDA per prevedere la resa delle colture e la produzione. Il proposito di questo progetto di monitoraggio agricolo basato sul remote sensing (sistema GLAM) sarà quello di aumentare e migliorare la capacità del governo keniano (Uganda, Tanzania, ecc.), di monitorare le condizioni delle colture in previsione di carestie. Il sistema GLAM attuale si basa sull'utilizzo di immagini satellitari MODIS a 250 m di risoluzione. MODIS fornisce una copertura quotidiana della superficie terrestre, ma non l'alta risoluzione spaziale del Landsat (30 m), necessaria per studiare le aree agricole frammentate in piccole proprietà terriere tipiche dei paesi centroafricani.

1.2 Il progetto SBAM

1.2.1 Gli obiettivi del progetto

L'obiettivo del progetto SBAM (*Satellite Based Agricultural Monitoring*), è duplice. Il primo risponde alle esigenze di ottenere delle mappe aggiornate ed accurate delle aree dedicate all'agricoltura nei paesi dell'Africa Centrale partendo dal Kenya, e fornire alle istituzioni di ricerca locali il know how per perseguire l'attività di aggiornamento del land cover con la frequenza ritenuta necessaria. Il secondo, a partire dal secondo anno, riguarda la possibilità di potenziare la stazione di telerilevamento del BSC di Malindi in modo da poter sviluppare applicazioni che in tempo reale generino prodotti di interesse e li distribuiscano agli utenti nel formato più congeniale al loro utilizzo.

La generazione di mappe di land cover aggiornate e validate, con particolare attenzione alle aree agricole costituisce l'obiettivo primario del progetto. L'area sulla quale si focalizzerà l'attività del

progetto comprende i paesi dell'Africa Centrale ed in particolare i paesi che cadono nel cerchio di acquisizione della stazione di telerilevamento del BSC di Malindi.

Il sistema WELD (Web Enabled Landsat Data) opera su un archivio storico di 10 anni (2003-2012) di immagini Landsat (prevalentemente Landsat 7 ETM+ e Landsat 5 TM) di livello 1T (Terrain corrected) e radiometricamente corrette realizzando un monitoraggio di lungo termine di ampie regioni di territorio, nella risoluzione di 30 m, impiegando sia la tecnica del mosaicking che del compositing, affiancando dunque alla creazione del mosaico consistenza temporale; la creazione di un archivio di dati pre-elaborati di tipo WELD (ad oggi disponibile solo per i territori del CONUS e dell'Alaska) apre la possibilità ad un sistema di monitoraggio completamente automatico, utilizzando un approccio simile a quello che sino ad oggi era ristretto alle immagini a bassa risoluzione.

1.2.1 Area di studio e ricaduta scientifica

L'area sulla quale si focalizzerà l'attività del progetto comprende i paesi dell'Africa Centrale ed in particolare i paesi che cadono nel cerchio di acquisizione della stazione di telerilevamento del BSC di Malindi (Fig. 5). Il primo anno del progetto prevede lo sviluppo della catena di elaborazione e della metodologia di classificazione delle immagini MODIS/Landsat per la sola area del Kenya (Fig. 6), successivamente, dopo aver proceduto alla fase di validazione dei risultati e dimostrazione dell'operatività del sistema si potrà considerare l'estensione delle procedure agli altri paesi (Tanzania, Uganda etc.).

Il Kenya è quasi diviso in due dal piano Equatoriale e occupa una superficie complessiva di circa 583,000 km². Gran parte del Paese giace nella parte orientale della fascia Sudano-Saheliana, una regione spesso colpita da siccità e da fenomeni di desertificazione. Il paese è suddiviso in 7 zone agro-climatiche delle quali le prime quattro, che si riferiscono alle aree umide comprendono il 12% del territorio. Le zone 5-7 sono invece classificate come aride e molto aride e comprendono approssimativamente il rimanente 88% del territorio keniano. La popolazione del Kenya è passata dai circa 10 milioni del 1960 agli attuali 32 milioni.

La ricaduta scientifica del presente progetto per le istituzioni del Kenya si può sintetizzare nei seguenti punti:

- i. sviluppo di una metodologia per l'aggiornamento delle mappe di land use per il Kenya;
- ii. implementazione, presso un'istituzione keniana (o presso il BSC di Malindi), di un'infrastruttura HW/SW per l'esecuzione dei sistemi WELD e SIAM.
- iii. formazione di studenti/ricercatori sull'utilizzo delle immagini satellitari;
- iv. coinvolgimento delle autorità locali nell'utilizzo delle immagini satellitari;
- v. accrescimento delle potenzialità della stazione di telerilevamento del BSC.

2. Principi di Telerilevamento

L'osservazione sistematica della Terra iniziò il 1° Aprile 1960 con l'entrata in funzione del primo satellite con sistemi di rilevamento televisivi a scansione Tiros-1 (Television Infrared Observation Satellite). Ad esso seguirono il lancio di satelliti per la navigazione, il primo di questa famiglia fu il Transit-1 (13 Aprile 1960) e per le telecomunicazioni, come il Telstar-1 (10 Luglio 1962). Il lancio del primo satellite della famiglia Landsat confermò le aspettative riversate nel Telerilevamento aerospaziale per lo studio della superficie terrestre e delle sue risorse. Il Landsat-1 fu lanciato il 23 Luglio 1972, 22 giorni dopo il sensore di bordo riprese la sua prima immagine inquadrando la Lombardia. La missione Landsat è proseguita sino ad oggi con il lancio di altri sette satelliti, confermandosi ad oggi come una delle missioni spaziali di maggior successo, sia in merito al numero che alla qualità dei dati raccolti, nonché in merito al contributo fornito all'innovazione della tecnologia di Telerilevamento spaziale.

2.1 Richiami generali

Il Telerilevamento (in inglese Remote Sensing) è la disciplina scientifica che consente di ricavare informazioni, qualitative e quantitative, su oggetti posti a distanza e sull'ambiente circostante, sulla base di misure di energia elettromagnetica, emessa, riflessa o trasmessa, che interagisce con le superfici di interesse. Si tratta della più recente fra le discipline del rilevamento ed ha come scopo la produzione di mappe tematiche del territorio. Essa comprende tre fasi di processo, ovvero la ripresa dei dati, l'elaborazione dei dati e la loro interpretazione. La ripresa dei dati può essere effettuata da satellite, aereo o drone, mentre da terra ci si preoccupa principalmente di effettuare misure per la calibrazione e taratura dei dati ripresi da lontano. La fase di elaborazione prevede l'apporto di correzioni geometriche e radiometriche alle immagini o alle misure telerilevate, nonché l'applicazione di tutte le tecniche di filtraggio, classificazione e trattamento dei dati. L'interpretazione è la fase più delicata per l'ottenimento della mappa tematica, in quanto risulta prevalente l'attività dell'operatore, e dunque la sua esperienza e sensibilità, rispetto alle altre due fasi.

Fra le caratteristiche peculiari della disciplina del Telerilevamento troviamo la multispettralità, ovvero la possibilità di disporre di un numero anche elevato di immagini dello stesso territorio riprese simultaneamente in varie bande dello spettro elettromagnetico, dal campo del visibile sino al campo

delle microonde. Altra caratteristica di interesse è la multitemporalità, che consente di disporre di immagini riprese in tempi diverse, sotto determinate condizioni di periodicità in funzione della piattaforma impiegata, dello stesso territorio, permettendo dunque la valutazione quantitativa e qualitativa delle variazioni intercorse. L'intero pianeta è stato con continuità ripreso da satelliti civili ogni due settimane dal 1972. Nel contempo il dominio della porzione non visibile dello spettro elettromagnetico ha esteso le capacità di analisi ambientale.

Il Telerilevamento è strettamente legato alle altre discipline del rilevamento, quali la Geodesia, la Fotogrammetria, la Topografia, la Cartografia sino alle discipline dell'informatica e della statistica per l'analisi e l'elaborazione numerica dei dati. La disciplina del Telerilevamento si è sviluppata con continuità a partire dagli anni '60 e ad oggi si sono già affiancati e avvicinati tre generazioni di satelliti per l'osservazione della Terra, durante lo sviluppo dei quali sono progressivamente migliorate le risoluzioni geometriche, radiometriche e spettrali. Fondamentale importanza rivestono gli archivi storici dei dati sino ad ora telerilevati, quale unica testimonianza e documentazione dell'aspetto esteriore del nostro pianeta.

Il Telerilevamento estende dunque le nostre capacità di osservazione nello spazio, nel mondo fisico attraverso nuove possibilità di osservazione spettrale, e nel tempo contribuendo alla formazione di una memoria storica della superficie del pianeta. Il Telerilevamento consente di operare dall'alto, a differenti distanze ed in differenti tempi di ripresa, introducendo nuove metodologie e filosofie di indagine e controllo del territorio, rendendo possibile l'osservazione di luoghi e fenomeni non direttamente accessibili ed individuando situazioni in atto difficilmente rilevabili in altro modo. Come già detto lo studio od il monitoraggio di un fenomeno o di una superficie con tecniche di Telerilevamento prevedono tre fasi:

- i. Acquisizione dei dati da piattaforma remota;
- ii. Elaborazione dei dati;
- iii. Interpretazione ed uso dei dati.

Con riferimento agli strumenti impiegati nella disciplina, essi possono essere distinti in due categorie, quelli in grado di fornire misure singole (radiometri, spettrometri, scatterometri), e quelli che forniscono delle immagini, ovvero insieme di misure. Con il termine *sensore* viene indicato un apparato in grado di assolvere le funzioni di raccolta della radiazione, trasduzione, controllo, registrazione, riproduzione e trasmissione; in senso più restrittivo il solo dispositivo collettore di radiazione viene indicato come *rivelatore* . Un'altra distinzione possibile è fra sensori *attivi* e *passivi* : i primi provvedono essi stessi all'illuminazione dei bersagli a terra, captando poi la radiazione di ritorno; i secondi invece si limitano alla registrazione di radiazione emessa o riflessa, essendo dunque la sorgente della radiazione esterna al sensore stesso. In Telerilevamento gioca un ruolo fondamentale, ai fini dell'osservazione, anche il concetto di *multistazione* , ovvero la capacità di osservare uno stesso fenomeno, od una stessa

superficie, contemporaneamente da differenti punti di osservazione (sia geometrici che spaziali e spettrali).

I dati ottenuti mediante tecniche di telerilevamento presentano caratteristiche peculiari quali:

- i. L'estesa capacità di osservazione ed il carattere sinottico delle informazioni presentate;
- ii. Le misure e le osservazioni sono coerenti tra di loro, essendo effettuate dallo stesso strumento ed in forma numerica, facilitando la manipolazione ed il trattamento dei dati;
- iii. La rapidità di accesso all'informazione, in certe condizioni operative si può parlare di trattamento e comunicazione dati in tempo reale;
- iv. L'associazione di dati multipli nel campo dello spettro elettromagnetico e la ripetitività delle misure.

Una caratteristica degna di nota, rispetto ai contenuti dei dati telerilevati, è la varietà delle possibili applicazioni per cui il dato acquisito può essere impiegato. Si tratta inoltre di un settore fortemente multidisciplinare: a partire dalle discipline di base della fisica e della modellistica, sino alle discipline per l'elaborazione numerica dei dati e delle immagini, si schierano infine le più disparate discipline della ricerca, dall'ingegneria alla geologia passando per oceanografie, l'agronomia e tante altre. La disciplina del Telerilevamento è *de facto* una metodologia di analisi ambientale, non autonoma ed esaustiva, ma a complemento delle più classiche e collaudate metodologie di indagine. Bisogna infine ricordare come i dati telerilevati vadano sempre integrati tramite differenti osservazioni e validati attraverso campagne di misura a terra e misurazioni *in situ*, al fine di verificare la validità anche dei presupposti e delle deduzioni associate alle metodologie di indagine sviluppate nell'ambito di questa disciplina.

Fra le maggiori applicazioni si annoverano:

- i. Il monitoraggio ambientale;
- ii. Lo studio dei cambiamenti ambientali e climatici;
- iii. Applicazioni in agricoltura (analisi fenologica, stato delle colture, previsione dei raccolti);
- iv. Analisi geologiche e geomorfologiche;
- v. Monitoraggio delle risorse rinnovabili (suoli, foreste, oceani, idrogeologia);
- vi. Meteorologia;
- vii. Cartografia tematica;
- viii. Gestione delle emergenze.

I diversi sistemi di telerilevamento offrono un'ampia gamma di possibilità operative in funzione del contesto operativo e dei requisiti di missione specifici. Sia in termini di frequenza temporale, che di copertura e risoluzione spaziale piuttosto che di risoluzione spettrale i vari sistemi cercano di soddisfare tutte le esigenze operative nel contesto complessivo del monitoraggio e dell'informazione globale sull'ambiente e il territorio.

2.2 Il sistema di Telerilevamento

Un sistema di Telerilevamento è schematicamente costituito dai seguenti componenti: la sorgente di energia, i percorsi di interazione atmosferica, l'interazione con la superficie terrestre, gli strumenti di osservazione e misura, il processo di elaborazione ed interpretazione dati compreso nel segmento di terra (Fig. 2.1). La radiazione elettromagnetica compie il percorso fra i vari componenti completando il sistema. Entriamo adesso nel dettaglio dei componenti:

- a) La sorgente di radiazione elettromagnetica può essere artificiale, come quella prodotta da radar per illuminare un bersaglio, piuttosto che naturale. In quest'ultimo caso la sorgente di energia può essere il Sole, che illumina la Terra, oppure la Terra stessa, che riflette la radiazione solare e nel contempo emette, nel campo delle radiazioni termiche per esempio. A partire dalle caratteristiche della sorgente si definiscono gli altri componenti del sistema che, sia per il tipo di interazione che per la scelta dei sensori e dei processi di gestione ed analisi dei dati, dipenderanno da essa;
- b) Le radiazioni elettromagnetiche, nel tragitto che separa sorgente e superficie e poi superficie e sensore, attraversano l'atmosfera interagendo con i suoi costituenti in differenti maniere in funzione sia del percorso che della natura stessa della radiazione. Interagendo con molecole gassose, particelle sospese ed aerosol la radiazione viene modificata e distorta nel suo contenuto spettrale (e quindi informativo);
- c) La radiazione che raggiunge la superficie terrestre, e che ne viene riflessa, subisce variazioni nella sua quantità e nelle sue caratteristiche; questo avviene in funzione della geometria, della peculiare costituzione e della condizione superficiale degli oggetti a terra con cui la radiazione si trova ad interagire. La radiazione conserva e tramette, nella misura in cui ne è stata modificata dalla sua forma nominale, l'informazione delle condizioni e della natura dell'oggetto con cui ha interagito. Una volta eliminata la distorsione ed il disturbo provocati sul segnale dal percorso atmosferico è possibile dunque recuperare l'informazione dell'interazione superficiale. Ovviamente tale processo di rimozione si rende necessario ogni qual volta l'oggetto di studio sia proprio un'area a terra; qualora sia l'atmosfera l'oggetto di studio si cerca piuttosto di evitare qualunque interazione a terra attraverso tecniche di osservazione di occultamento, qualora non possibile si cerca quanto meno di operare con un'interazione superficiale che coinvolga coperture a terra note ed il più possibile omogenee ed uniformi;
- d) La registrazione della radiazione è compito dei sensori imbarcati sulla piattaforma di osservazione. Vengono coinvolti in questo processo sensori ottico-elettronici piuttosto che rivelatori quantistici: ad ogni tipo di sensore, secondo le proprie specifiche caratteristiche,

competere uno specifico campo di azione. Ragionando per grandi categorie si può parlare di sensori attivi, come i radar ad apertura sintetica (Synthetic Aperture Radar, SAR) oppure i radar ottici basati su tecnologia laser (LIDAR), oppure di sensori passivi, come i sensori ottici multispettrali ed iperspettrali;

- e) L'ultimo segmento del sistema riguarda il segmento di terra preposto alla gestione, all'analisi ed all'interpretazione dei dati satellitari. I dati satellitari vengono continuamente acquisiti ed inviati a terra, è quindi necessario un sistema che gestisca, pre-elabori, distribuisca ed archivi l'enorme flusso di dati in ingresso. A seguire la fase di sviluppo delle metodologie e dei modelli interpretativi delle informazioni.

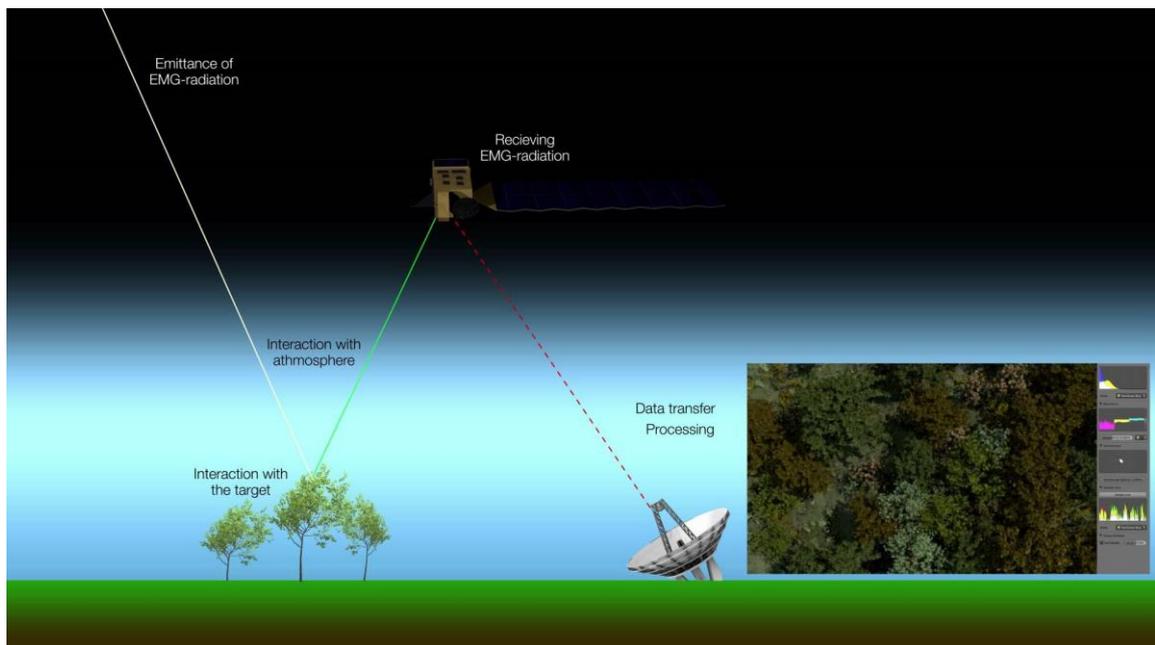


Fig. 2.1 Rappresentazione schematica di un sistema di Telerilevamento satellitare.

2.3 Principi fisici del Telerilevamento

La radiazione elettromagnetica viene impiegata nel Telerilevamento quale veicolo dell'informazione sfruttando tutte le forme di interazione con la superficie terrestre (emissione, diffusione, riflessione, etc.). Sulla base del principio di conservazione dell'energia si può valutare un bilancio del trasporto energetico dalla sorgente al sensore, passando attraverso la superficie in analisi.

2.3.1 Lo spettro elettromagnetico

L'energia elettromagnetica è distribuita secondo un *continuum* monodimensionale detto spettro elettromagnetico, generalmente ordinato secondo lunghezze d'onda crescenti. Pur trattandosi a tutti gli

effetti di una distribuzione continua, ai fini operativi risulta particolarmente utile suddividerlo in sue porzioni, gli *intervalli* o *bande spettrali*, definite a livello internazionale secondo il così detto *schema dello spettro elettromagnetico*. Va tuttavia ricordato che non esistono netti confini di separazione fra le varie bande. Inoltre, l'energia non è uniformemente distribuita lungo lo spettro, ma essa si propaga secondo pacchetti finiti di energia (i fotoni), legati, nella loro intensità, alla lunghezza d'onda: maggiore la lunghezza, minore l'energia ad essa associata (ipotesi di Planck). A quest'ultima considerazione è direttamente attribuibile la minor risoluzione dei sensori operanti nella regione dell'infrarosso termico rispetto a quella dei sensori operanti per esempio nel visibile. Una schematica rappresentazione dello spettro elettromagnetico è presentata in Fig. 2.2.

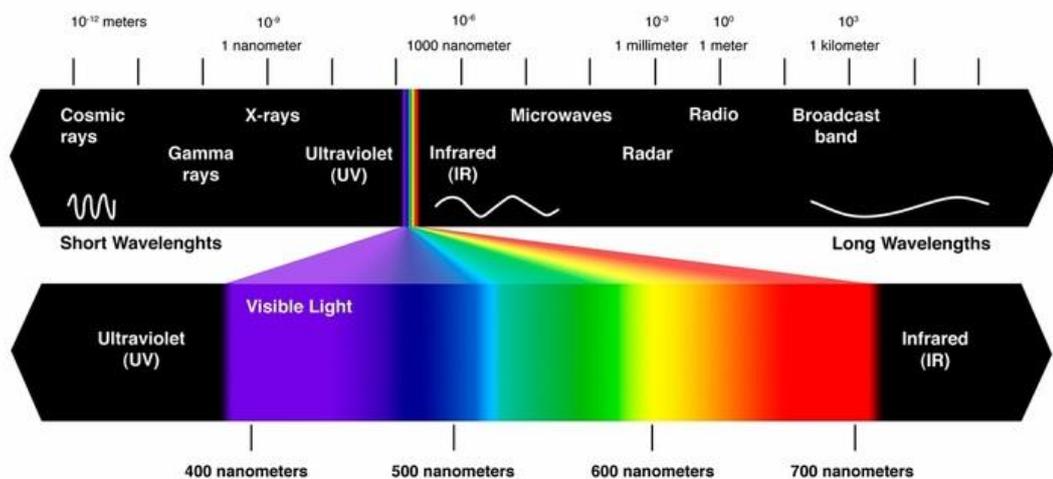


Fig. 2.2 Schema dello spettro elettromagnetico

Ogni banda dello spettro elettromagnetico trova specifiche applicazioni d'elezione nel campo tecnologico-scientifico. Nel campo del Telerilevamento vengono impiegate le bande dell'ultravioletto (UV), del visibile (VIS), dell'infrarosso (IR) e delle microonde (MW). Nello specifico:

- Le bande UV, VIS ed il NIR (porzione vicina della banda IR), si appoggiano sull'energia riflessa della sorgente solare;
- La banda TIR (ovvero la regione termica della banda IR) si basa sull'energia emessa dalla Terra;
- La porzione MW dello spettro, che si appoggia alla radiazione emessa dalla Terra oppure a quella dalla Terra riflessa ed originata da un sensore attivo.

Tutte le bande spettrali giocano un ruolo chiave del telerilevamento, ma ognuna di esse (od una loro specifica combinazione) risulta particolarmente adatta per la descrizione qualitativa e quantitativa di specifiche coperture terrestri.

2.3.2 Le finestre spettrali

L'atmosfera terrestre agisce e reagisce in maniera differenziata rispetto a radiazioni dalla differente lunghezza d'onda. Inoltre, l'azione atmosferica è differenziata per i differenti suoi strati, per la sua composizione chimica, e per l'eventuale presenza (o assenza) di agenti in sospensione. Ciò vuol dire non solo che segnali a lunghezza d'onda verranno alterati in maniera differente se pur sullo stesso percorso atmosferico, ma che su uno stesso segnale, i differenti strati atmosferici agiranno differentemente. Tuttavia è possibile individuare porzioni dello spettro elettromagnetico rispetto alle quali l'azione di disturbo sia moderata, risultando per esse l'atmosfera terrestre relativamente trasparente. Le bande operative impiegate nel Telerilevamento lavorano in quelle porzioni dello spettro per cui l'azione atmosferica risulta essere limitata, ovvero le finestre atmosferiche di osservazione (Fig. 2.3). Questo è il motivo della mancanza di contiguità fra le bande appena presentate. Al di fuori delle lunghezze d'onda in finestra atmosferica, l'atmosfera risulta opaca alle radiazioni; è preferibile non operare su queste lunghezze d'onda, a meno che, ovviamente, il nostro oggetto di studio non sia l'atmosfera stessa. Possiamo individuare due tipi finestra atmosferica.

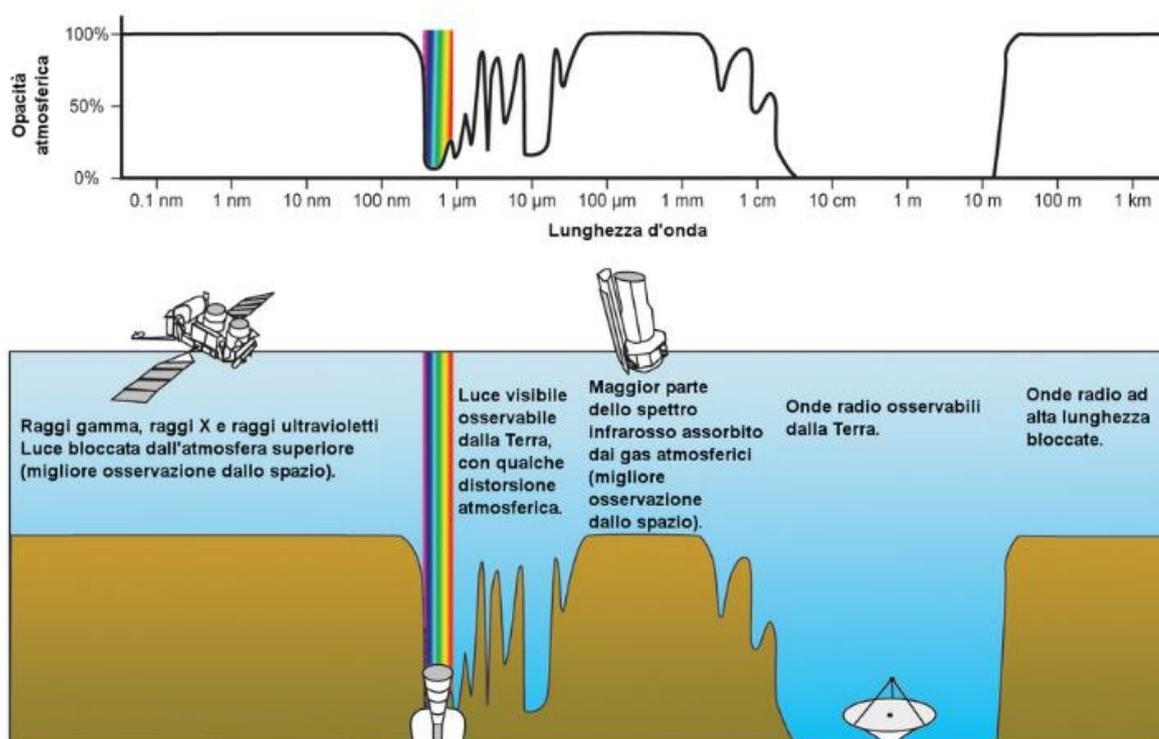


Fig. 2.1 Finestre atmosferiche a disposizione del Telerilevamento satellitare.

La finestra ottica. Tale finestra va dai 100 nm a 20 μm di lunghezza d'onda, e l'energia studiata è di tipo riflesso od emesso. All'interno abbiamo ancora delle regioni opache, per cui è possibile definire delle finestre ancor più specifiche in particolar modo per le bande IR.

La finestra radar. Localizzata nell'intervallo compreso tra 0.2 e 100 cm. In questa finestra l'energia studiata è prodotta artificialmente. Gli strumenti impiegati sono in grado di operare in qualunque condizione meteorologica ed in qualunque condizione di illuminazione. I sensori operanti in questa finestra possono essere sia attivi che passivi e sono unicamente caratterizzati dall'aver un'antenna come collettore di energia. In questa finestra, oltre ai fenomeni di assorbimento, riflessione e trasmissione, compaiono tutta una serie di parametri che condizionano l'interpretazione delle misure, come la polarizzazione di antenna, lo stato superficiale, la geometria o la giacitura della superficie, la sua rugosità nonché la tessitura, la costante dielettrica e la resistività elettrica.

2.3.3 Radiometria

Le misure della radiazione elettromagnetica effettuate dai sensori dipendono da quattro fattori:

- i. Il tempo necessario (Δt) per catturare la quantità finita di energia. Maggiore il tempo di integrazione, maggiore l'energia raccolta;
- ii. L'area della superficie (ΔA) inquadrata dal sensore;
- iii. L'angolo solido ($\Delta \omega$) entro il quale il sensore raccoglie la radiazione;
- iv. L'intervallo spettrale ($\Delta \lambda$) di funzionamento del sensore.

Di seguito definiremo brevemente le grandezze fisiche necessarie alla misura della radiazione elettromagnetica:

- a) *Energia radiante (Q).* L'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche. Tale energia è trasportata sotto forma di pacchetti energetici finiti (quanti o fotoni); l'energia elementare associata ad ogni fotone è in ragione inversa della lunghezza d'onda della radiazione su cui

Figura 2. Finestre atmosferiche a disposizione dei sensori di Telerilevamento satellitare.

viaggia, per tanto radiazioni ad onde corte risultano più energetiche di quelle ad onde lunghe;

- b) *Flusso radiante (Φ).* Esprime la variazione di energia nel tempo:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [W] \quad (1)$$

ovvero la quantità di energia radiante Q trasferita fra due superfici nell'unità di tempo, e si misura in Watt;

- c) *Intensità radiante (I).* Il flusso radiante uscente da una sorgente per unità di angolo solido in una direzione:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad [W \text{ sr}^{-1}] \quad (2)$$

d) *Densità di flusso radiante (M)*. Ovvero il rapporto tra l'intensità radiante uscente e l'area della superficie interessata:

$$M = \frac{d\Phi}{dt} \quad [W m^{-2}] \quad (3)$$

e) *Irradianza (E)*. Ovvero il rapporto tra intensità radiante incidente e l'area della superficie interessata;

f) *Radianza (L)*. Il valore del flusso radiante per unità di superficie e di angolo solido in una certa direzione e misurata su un piano ortogonale a tale direzione:

$$L = \frac{d\left(\frac{d\Phi}{dA \cos \theta}\right)}{d\omega} \quad [W m^{-2} sr^{-1}] \quad (4)$$

Dove θ è l'angolo tra la direzione di osservazione e la normale alla superficie interessata. La radianza è legata alla geometria di osservazione ed alle caratteristiche dello strumento di osservazione, per tanto è la grandezza principale del Telerilevamento.

Sono quattro le leggi che interessano l'aspetto quantitativo delle tecniche di telerilevamento:

- i. Legge di Planck. Descrive l'andamento della potenza emessa dalle superfici in funzione della lunghezza d'onda e della loro temperatura;
- ii. Legge di Stefan-Boltzman. Fornisce la quantità totale di potenza emessa dalle superfici calcolata su tutto lo spettro elettromagnetico in funzione della temperatura;
- iii. Legge di Wien. Indica il valore della lunghezza d'onda dove si localizza la massima emissione elettromagnetica per una data temperatura;
- iv. Legge di Kirchoff. Stabilisce la relazione fra i coefficienti di assorbimento e di emissione.

2.3.4 Sorgenti di energia naturali

Le principali sorgenti naturali di energia elettromagnetica per il Telerilevamento sono il Sole e la Terra. Il Sole emette energia soprattutto nell'intervallo spettrale che va dal visibile all'infrarosso medio, svolgendo quindi il ruolo di sorgente illuminante per tutte le riprese di energia riflessa. La differenza di emittanza del sole tra il visibile e l'infrarosso termico è pari a circa 4 ordini di grandezza. La Terra invece emette radiazioni soprattutto nell'infrarosso termico e, seppur in forma molto ridotta rispetto a questa prima, anche nel campo delle microonde.

La temperatura radiometrica del Sole non può essere stimata in maniera univoca, dipendendo essa dalla lunghezza d'onda a cui viene misurata e dalla eterogeneità che ne caratterizza la composizione. Solitamente il Sole viene assimilato ad un corpo nero che emette ad una temperatura superficiale compresa tra i 5800 ed i 6000 K. Applicando la legge di Wien è possibile localizzare il picco di emissione ad una lunghezza d'onda pari a $\lambda=0.491$, ovvero poco prima dell'inizio dell'intervallo del verde nello spettro del visibile. Naturalmente la radiazione terrestre deve percorrere sia un percorso extra-

atmosfera che uno atmosferico, prima di raggiungere la superficie terrestre; dunque la qualità e la quantità della radiazione nominale subiscono delle variazioni già prima di interagire con la superficie di interesse. Ciò comporta una differenza di circa il 30% fra i valori di irradianza solare al di fuori dell'atmosfera terrestre e quelli a livello della superficie terrestre, riducendo i $2200 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ disponibili fuori dall'atmosfera a $1500 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ utili alla superficie terrestre. Inoltre la radiazione extra-atmosferica è caratterizzata da uno spettro sostanzialmente continuo, ricordando effettivamente lo spettro di un corpo nero. Lo spettro al livello della superficie terrestre, a seguito dell'attraversamento atmosferico, risulta partizionato in ragione dell'intervento delle finestre di assorbimento alle varie lunghezze d'onda; ovviamente la qualità e la quantità dell'interazione dipendono dal percorso atmosferico (quindi dalla geometria di osservazione), e dalla specifica composizione dell'atmosfera locale.

La Terra emette ad una temperatura superficiale di 280 K, e contemporaneamente, nella porzione della superficie esposta al Sole, interagisce, attraverso fenomeni di riflessione, assorbimento e trasmissione, con la radiazione solare. La diversa temperatura determina il differente comportamento delle due sorgenti naturali. La Terra emette energia visibile quasi nulla, al pari l'emissione del Sole nell'infrarosso termico è trascurabile. A titolo di esempio si può inoltre considerare la banda dell'infrarosso termico compresa fra 3-5 μm : in questo intervallo l'energia solare riflessa dalle superfici terrestri è direttamente confrontabile con l'energia emessa dalle stesse superfici. Considerazioni di questo tipo, relative all'interazione ed alla sovrapposizione degli spettri delle due sorgenti naturali, sono alla base della scelta delle lunghezze d'onda di osservazione di fenomeni e superfici.

2.3.5 Geometria della radiazione

La radianza è di fatto la grandezza principe del Telerilevamento essendo essa la diretta misura dell'interazione tra radiazione elettromagnetica e la materia. Tale interazione risponde al principio di conservazione dell'energia secondo la legge di Kirchoff per cui $\rho + \alpha + \tau = 1$ (dove ρ , α , τ sono rispettivamente i coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione). Tuttavia nel fenomeno di interazione gioca un ruolo fondamentale il fattore geometrico.

La geometria dell'interazione descrive le posizioni relative assunte da sorgente e sensore rispetto alla superficie illuminata ed osservata. Le superfici coinvolte nei fenomeni di interazione presentano comportamenti variabili, ovvero presentano caratteristiche diverse per le diverse direzioni di osservazione. Le superfici naturali in particolare presentano un comportamento anisotropo, ovvero dirigono la radianza in maniera non uniforme in relazione alla struttura e geometria che le caratterizza. Talvolta il loro comportamento si avvicina a tal punto alle condizioni ideali che il loro comportamento può, con buona approssimazione, essere assimilato a quello di una superficie isotropa.

Si definisce superficie Lambertiana una superficie per cui la radianza osservata risulta costante ed indipendente dalla specifica composizione della geometria di osservazione tra sorgente e sensore. Le

superfici naturali presentano generalmente un comportamento più complesso. Tale comportamento può, per la maggior parte delle superfici, essere considerato valido sino ad angoli di osservazione pari circa a $\theta=40^\circ$ (in alcuni casi tale valore può essere ragionevolmente esteso sino a 60°). In generale si possono manifestare tre condizioni principali di irraggiamento:

- i. *Flusso radiante direzionale.* Ovvero flusso radiante a raggi paralleli, il che vuol dire proveniente da distanza infinita o comunque molto elevata rispetto alla dimensione della superficie interessate (come nel caso del sistema Sole-Terra). Un parametro critico in questa condizione è l'angolo tra superficie illuminata e fascio radiante.
- ii. *Flusso radiante conico.* Ovvero proveniente da una sorgente puntiforme. In questo caso l'irradianza è legata al valore dell'intensità radiante secondo la legge del coseno e la legge dell'inverso del quadrato della distanza.
- iii. *Flusso radiante nello spazio emisferico.*

2.3.6 Meccanismi principali di emissione

L'emissione di energia elettromagnetica interessa qualunque superficie naturale che si trovi ad una temperatura superiore allo zero assoluto. L'energia emessa dipende fondamentalmente da due fattori: la temperatura del corpo e la sua emissività (ovvero il deficit emissivo rispetto quell'emettitore perfetto qual è il corpo nero). In generale le superfici naturali non sono mai dei radiatori perfetti quantunque alcune fra loro possono significativamente avvicinarsi a questa condizione. La radianza misurabile a seguito del fenomeno di emissione dipende anche dallo strumento impiegato e dalla lunghezza (o dalle lunghezze) d'onda cui la misura viene effettuata, inoltre la componente emessa può essere influenzata da componenti di energia radiante provenienti dall'ambiente circostante. Anche in questo caso, di cruciale importanza risulta essere la geometria di osservazione, in ragione della quale si introducono i concetti di temperatura radiometrica e di emissività direzionali.

2.3.7 Meccanismi principali di riflessione

Fatta eccezione per l'aria e l'acqua, la maggior parte delle superfici naturali risulta opaca (o caratterizzata da trascurabili valori di trasmissività) per ampie regioni dello spettro elettromagnetico. Nell'ambito del bilancio radiativo la quota parte di energia riflessa assurge automaticamente a ruolo d'elezione nell'ambito delle attività di Telerilevamento. Ancora una volta le caratteristiche dello strumento di misura e la geometria di osservazione ricoprono un ruolo fondamentale. Introduciamo allora i concetti di:

- a) *Riflessione speculare e riflessione diffusa.* Il comportamento di riflessione speculare è caratteristico delle superfici lisce, mentre superficie rugose determinano una riflessione diffusa

(ovvero una riflessione multidirezionale dove, almeno nel caso reale, l'energia radiativa non è uniformemente ridistribuita lungo tutte le direzioni di riflessione). La radianza uscente sarà rispettivamente ragolata dal modello anisotropo ed isotropo. Se h è l'altezza della discontinuità superficiale allora per $h > \lambda$ la superficie è rugosa e la riflessione sarà diffusa (superficie lambertiana); altrimenti la superficie è da considerarsi liscia e la riflessione speculare (superficie specchio), in questo caso la riflessione segue la legge di Snell e l'angolo di incidenza sarà pari a quello di riflessione. A partire dai possibili casi estremi, ovvero assenza di riflessione, riflessione completamente diffusa e riflessione completamente speculare (sun glittering con conseguente saturazione del sensore), la maggior parte delle superfici naturali presenta un comportamento misto.

- b) *Funzione di distribuzione della Riflettività Bidirezionale.* Come già detto il fenomeno di riflessione è governato dalla stato della superficie interessata e dalla configurazione geometrica di sorgente ed osservatore. La funzione di distribuzione è dunque una funzione descrittiva della radianza osservata rispetto all'irradianza incidente, considerando tutte le possibili configurazioni di assetto geometrico secondo gli angoli incidenti alla superficie (θ, φ) e gli angoli uscenti da essa (θ', φ'), secondo la relazione:

$$F(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = \frac{dL(\theta, \varphi, \theta', \varphi')}{dE(\theta, \varphi, \theta', \varphi')} \quad [sr^{-1}] \quad (5)$$

il cui valore può variare tra zero (superfici perfettamente assorbenti), ad uno (superfici capaci di una riflessione perfettamente speculare).

- c) *Fattore di riflettività bidirezionale.* Si introduce questo fattore per superare la dipendenza della misura dalle caratteristiche strumentali, come l'angolo solido variabile. Essa si rappresenta come il rapporto tra la radianza della superficie oggetto di studio e la radianza, nella stessa direzione, della radianza di una superficie lambertiana di riferimento, quindi:

$$R = \frac{L(\theta, \varphi, \theta', \varphi')}{L_s(\theta, \varphi, \theta', \varphi')} R_s(\theta, \varphi, \theta', \varphi') \quad (6)$$

2.3.8 Meccanismi principali di trasmissione

Il meccanismo di trasmissione caratterizza tutte quelle superfici che manifestano un elevato valore di trasmissività, come l'acqua e l'atmosfera. Nel cammino atmosferico la radiazione subisce significative modificazioni, ed il fenomeno di trasmissione atmosferica è particolarmente legato al fenomeno di diffusione (o scattering), che comporta una redistribuzione della radiazione nello spazio senza che si verifichi assorbimento. Durante l'assorbimento l'energia della radiazione si trasforma in calore che innesca o modifica la condizione di emissione. La diffusione si innesca ogniqualevolta un'onda elettromagnetica di opportuna grandezza interagisca con una particella in sospensione, ovvero quando una parte dell'energia associata all'onda viene ridistribuita in altre direzioni. La riflessione a questo punto può essere letta come un caso particolare di diffusione in cui la redistribuzione avviene lungo una

direzione preferenziale. Inoltre bisogna distinguere tra casi di diffusione singola, in cui viene coinvolta una singola particella, ed il caso di diffusione multipla, ovvero una serie di interazioni reciproche fra varie particelle. In funzione delle dimensioni delle particelle coinvolte distinguiamo differenti tipi di diffusione (Fig. 2.4):

- a) *Diffusione di Mie*. Meccanismo di diffusione in relazione alla singola particella di forma sferica e dimensione finita, perfettamente non assorbente. Una delle condizioni necessarie perché tale meccanismo si inneschi è che le particelle siano indipendenti nello spazio fra di loro, ovvero che fra loro intercorra una distanza pari almeno a tre volte la dimensione caratteristica della particella; in tal modo le particelle agiscono sulla radiazione come unità singole ed indipendenti. Secondo il modello la diffusione presenta generalmente una sola direzione preferenziale, in avanti rispetto alla direzione della radiazione (forward scattering); in alcuni casi specifici (come nel caso delle gocce d'acqua in sospensione) si possono presentare delle direzioni secondarie come per esempio in direzione opposta a quella della radiazione (backward scattering);
- b) *Diffusione multipla di Rayleigh*. In questo caso la dimensione delle particelle coinvolte deve essere significativamente inferiore alla lunghezza d'onda della radiazione con cui andranno ad interagire, condizione che si verifica per esempio nel caso di componenti gassose. La diffusione di Rayleigh dipende dunque sia dalla densità atmosferica che dalla lunghezza d'onda della radiazione, nello specifico poi le onde più lunghe, a parità di dimensioni delle particelle, verranno diffuse in maniera meno efficiente. In questo caso la diffusione si ripartisce nelle quattro direzioni, preferendo equamente le due direzioni giacenti sulla traiettoria della radiazione;
- c) *Diffusione non selettiva*. Si verifica nel caso in cui le dimensioni delle particelle siano notevolmente superiori in confronto alla lunghezza d'onda della radiazione. In questo caso tutte le radiazioni sono diffuse praticamente alla stessa maniera.

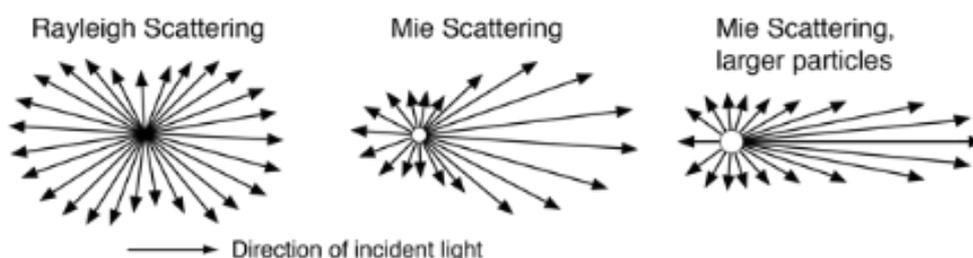


Fig. 2.4 Principali meccanismi di diffusione atmosferica

2.4 Caratteristiche spettrali delle superfici naturali

A questo punto si rende necessario contestualizzare i vari meccanismi di interazione rispetto alle bande spettrali ed in ragione delle superfici naturali osservabili. Tale analisi verrà svolta nei successivi paragrafi.

2.4.1 Interazione atmosferica

La sorgente più importante di energia è il Sole. Prima che l'energia del Sole raggiunga la superficie terrestre, possono aversi tre tipi di interazione con l'atmosfera: l'assorbimento, la trasmissione e lo scattering. L'energia trasmessa viene quindi riflessa o assorbita dal materiale della superficie.

L'energia elettromagnetica, viaggiando attraverso l'atmosfera, viene parzialmente assorbita da varie molecole: le molecole presenti nell'atmosfera che assorbono la radiazione solare in modo più efficiente sono l'ozono, il vapore acqueo e il biossido di carbonio.

La diffusione atmosferica ha luogo quando le particelle o le molecole gassose presenti nell'atmosfera fanno sì che le onde EM vengano indirizzate su un percorso diverso dall'originale. La quantità di diffusione dipende da numerosi fattori, come la lunghezza d'onda della radiazione, la quantità di particelle e di gas, e la distanza che la radiazione percorre attraverso l'atmosfera. La causa primaria della diffusione è la differenza di indice di rifrazione tra il diffusore e il suo intorno. Per le lunghezze d'onda del visibile, il 100% (nel caso di copertura delle nuvole) e il 5% (in caso di atmosfera libera) dell'energia ricevuta dal sensore è stato diffuso dall'atmosfera. Le principali particelle che contribuiscono alla diffusione atmosferica sono:

- i. Molecole di gas (0,01 μm);
- ii. Aerosoli (0,1 – 1 μm);
- iii. Particelle d'acqua nelle nubi (1 – 10 μm);
- iv. Cristalli di ghiaccio sospeso (1 – 100 μm);
- v. Grandine (fino a 10 cm).

È fondamentale il rapporto tra la dimensione delle particelle che causano la diffusione e la lunghezza d'onda della radiazione in transito. Dopo aver definito il parametro $\alpha = 2\pi r/\lambda$ è possibile suddividere i fenomeni di diffusione in:

- i. $\alpha < 0,001$ diffusione trascurabile;
- ii. $0,001 < \alpha < 0,1$ diffusione di Rayleigh;
- iii. $0,1 < \alpha < 50$ diffusione di Mie;
- iv. $\alpha > 50$ si usa l'ottica geometrica.

Il tipo di diffusione dipende dalla tipologia dei diffusori (in funzione della radiazione), dal numero di eventi di diffusione (se la radiazione viene diffusa una volta o molte volte), dalla composizione dei diffusori: la diffusione in un solido trasparente per mezzo di oscillazioni (fononi) si chiama "diffusione di Brillouin", mentre la diffusione in cui la lunghezza d'onda non cambia si chiama "diffusione di Rayleigh".

Nelle applicazioni del telerilevamento che riguardano il terreno e l'acqua ciò che ci interessa particolarmente è la radiazione riflessa perché essa ci fornisce utili informazioni riguardo le

caratteristiche della superficie che stiamo esaminando. La riflessione avviene quando la radiazione rimbalza sul bersaglio e viene reirradiata; di conseguenza è un fenomeno molto importante, in quanto è qui che avviene fisicamente la raccolta di informazioni sull'oggetto stesso. L'assorbimento invece avviene quando la radiazione viene assorbita dal bersaglio.

L'energia della radiazione incidente su di una determinata superficie può dunque essere assorbita, riflessa o trasmessa:

$$R_i = R_a + R_r + R_t$$

Dato un intervallo dello spettro, si definiscono assorbanza, riflettanza e trasmittanza spettrale i valori di queste energie per unità di lunghezza d'onda su quell'intervallo, riferiti all'energia dell'onda incidente. In altre parole, la riflessione (quello che vediamo) è la differenza tra quanto incide e quanto viene assorbito o trasmesso.

2.4.2 Superfici naturali

Consideriamo una superficie composta da un certo materiale; l'energia che raggiunge tale superficie è detta irradianza. L'energia riflessa dalla superficie è detta radianza; che si misura in $W\ m^{-2}\ sr^{-1}$. Per ogni materiale può essere stabilita una curva di riflettanza, che mostra la frazione della radiazione incidente riflessa come funzione della lunghezza d'onda. La curva di riflettanza descrive l'andamento della riflettanza per una data superficie nell'intervallo spettrale $0,4 - 2,5\ \mu m$. Ovviamente la curva di riflettanza di una superficie varia molto in funzione delle condizioni ambientali (periodo dell'anno, condizione fisica e chimica della superficie) e di ripresa (geometria sorgente- superficie- sensore). È possibile disegnare delle curve di riflettanza media che, pur avendo valore indicativo in quanto soggette alle variazioni appena descritte, possono dare delle informazioni importanti sul comportamento delle superfici in esame. Le curve di riflettanza sono realizzate per la parte ottica dello spettro elettromagnetico fino a $2,5\ \mu m$. Attualmente vengono fatti molti sforzi per immagazzinare raccolte di curve di riflettanza tipiche in librerie spettrali.

Le caratteristiche di riflettanza della vegetazione dipendono da proprietà delle foglie come l'orientazione e la struttura della copertura delle foglie stesse. La porzione della radiazione riflessa in parti differenti dello spettro dipende dalla pigmentazione della foglia, dal suo spessore, dalla composizione (struttura della cella) e dalla quantità di acqua nel tessuto della foglia stessa. La Fig.2.5 mostra una curva di riflettanza ideale per della vegetazione sana. Nella porzione visibile dello spettro, la riflessione dalla luce blu e rossa è bassa in quanto queste porzioni vengono assorbite dalla pianta stessa (dalla clorofilla, soprattutto) per fotosintesi e la vegetazione riflette di più la luce verde. La riflettanza nel vicino infrarosso è più alta ma la quantità dipende dallo sviluppo della foglia e dalla struttura della cella delle foglie. Nell'infrarosso medio, la riflettanza è determinata soprattutto dall'acqua libera nel tessuto delle foglie; più acqua libera significa un più basso valore di riflettanza. Quando le foglie seccano, per

esempio durante il periodo del raccolto, la pianta può cambiare colore (per esempio, può diventare gialla). A questo livello non c'è fotosintesi, il che comporta una riflettanza più alta nella porzione del rosso dello spettro. Inoltre, le foglie secche producono una più alta riflettanza nel medio infrarosso; di conseguenza si può dire che il telerilevamento ottico fornisce informazioni sul tipo di pianta e anche sulle condizioni di salute della pianta stessa.

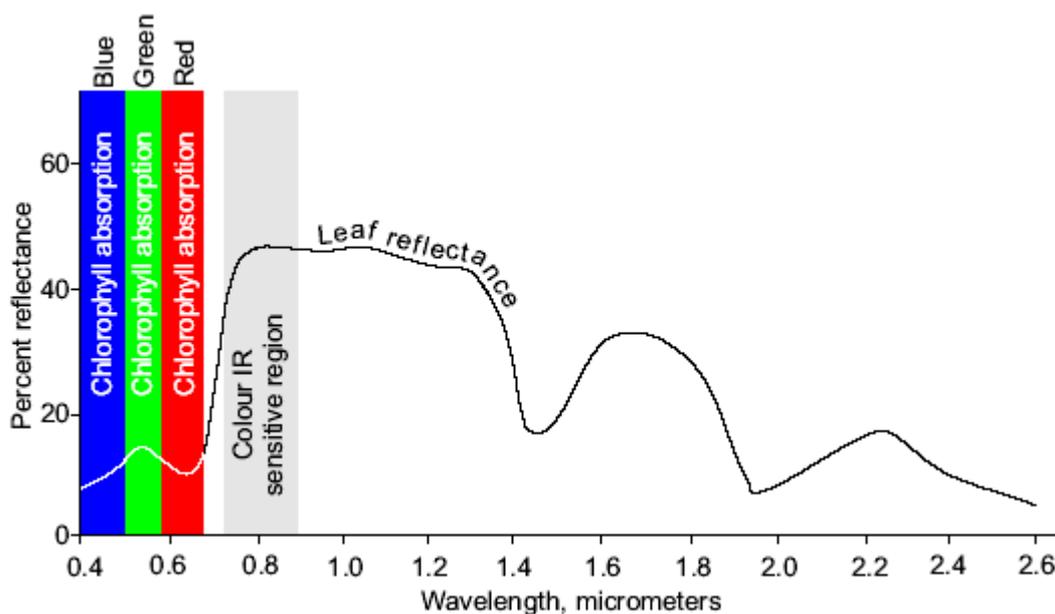


Fig. 2.3 Spettro di riflettanza caratteristico della vegetazione verde

La riflettanza del suolo spoglio dipende da così tanti fattori che è molto difficile dare una curva tipica della riflettanza del suolo. Comunque, i fattori principali che influenzano la riflettanza del suolo sono il colore del suolo, il contenuto di umidità, la presenza di carbonati, e il contenuto di ossido di ferro. La Fig. 2.6 mostra le curve di riflettanza ottenute per i cinque tipi di suolo più diffusi negli Stati Uniti. Si può osservare la forma tipica di alcune di queste curve, che mostrano una forma convessa tra i 500 e i 1300 nm con dei minimi a 1450 e 1950 nm. Questi minimi sono chiamati bande di assorbimento dell'acqua e sono causate dalla presenza di umidità del suolo. La curva (e), che si riferisce ad un suolo in cui domina la presenza di ferro, ha un andamento diverso, e questo può essere spiegato con il fatto che l'assorbimento del ferro domina a lunghezze d'onda maggiori.

Se paragonata a quelle di vegetazione e suolo, si nota subito che l'acqua ha una riflettanza più bassa. La vegetazione può riflettere fino al 50%, il suolo fino al 30-40% mentre l'acqua riflette al massimo il 10% della radiazione incidente. L'acqua riflette l'energia EM nel visibile fino al vicino infrarosso. Oltre 1200 nm tutta l'energia viene assorbita. La Fig. 2.6 mostra l'andamento di alcune curve di riflettanza per diversi tipi di acqua. La riflettanza più alta è data dall'acqua fangosa, e da acqua contenente piante che hanno un picco della riflessione della clorofilla alla lunghezza d'onda del verde.

Tuttavia, tale riflettanza apparente nasce dalla riflessione dei corpi contenuti nell'acqua piuttosto che dall'acqua stessa.

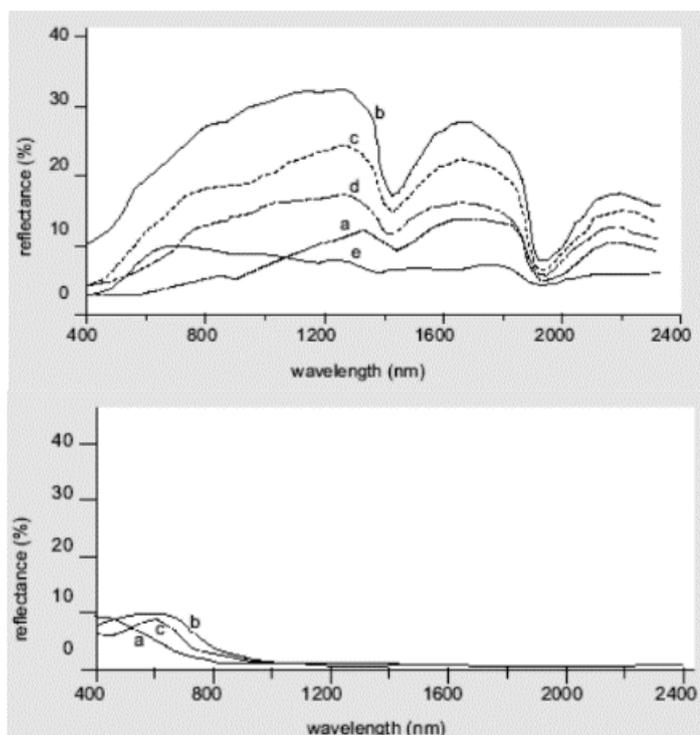


Fig. 2.4 Spettri di riflettanza caratteristici per il suolo e l'acqua; (sopra) Spettri di riflettanza di campioni di 5 suoli minerali; (a) composto in prevalenza da parti organiche (b) minimamente modificato, (c) modificato dal ferro, (d) intaccato da componenti organici, e (e) composto prevalentemente da ferro; (sotto) Effetti tipici della clorofilla e dei sedimenti sulla riflettanza dell'acqua; (a) acque oceaniche, (b) acqua torbida, (c) acqua con clorofilla.

3. Telerilevamento della vegetazione

Storicamente la disciplina del Telerilevamento si è sviluppata principalmente basandosi su studi della riflessione passiva nel campo del visibile e del vicino e medio infrarosso, sebbene lo sviluppo delle applicazioni nell'infrarosso termico e nel campo delle microonde si stia sviluppando rapidamente. Per gli scopi perseguiti in questo capitolo ci interesseremo della regione dello spettro elettromagnetico che va dalla regione dell'ultravioletto sino al medio infrarosso (250-3000 nm).

3.1 Proprietà radiative della foglia

3.1.1 Interazione con la componente chimica fogliare

L'interazione della radiazione elettromagnetica con la singola foglia, ed i conseguenti valori di riflettività, assorbimento e trasmittività, è il risultato, oltre che della lunghezza d'onda della radiazione, di una serie di caratteristiche fogliari fra i quali i principali sono la composizione chimica, l'età della foglia, la sua struttura, il suo spessore ed il suo contenuto in acqua e clorofilla. Le foglie di alcune qualità vegetali possono inoltre presentare disomogeneità nella distribuzione della clorofilla (e quindi delle attività fotosintetica), copertura cerosa, piuttosto capacità di ritenzione idrica più o meno sviluppata in funzione dei più o meno sofisticati meccanismi di scambio gassoso. Inoltre la crescita e lo sviluppo, nonché specifiche condizioni di stress, possono significativamente modificare la firma spettrale. Per finire bisogna considerare le interazioni secondarie e terziarie al livello di copertura vegetale, ovvero le interazioni reciproche a diversi livelli delle unità fogliari che si organizzano in una chioma caratteristica per ogni specie vegetale.

Le caratteristiche più comuni dell'interazione radiometrica con la struttura di una foglia è mostrata in Fig. 3.1. Tutte le foglie assorbono una larga parte della radiazione incidente nel campo del visibile (radiazione al di sotto dei 700 nm con una inversione nel verde), mentre assorbono relativamente nel campo dell'infrarosso, con l'eccezione delle bande di assorbimento dell'acqua. Ovviamente la trasmissione e la riflessione della radiazione incidente sono basse nel visibile ed alte nell'infrarosso. Bisogna poi registrare la tendenza, soprattutto per foglie sottili, a far corrispondere regioni ad alta riflettanza con regioni ad alta trasmittività. Naturalmente quello appena presentato è il modello più

generale possibile, notevoli possono essere le variazioni per specifiche specie vegetali od in ragione dell'azione di agenti stressanti.

La composizione chimica della foglia gioca un ruolo fondamentale nel determinare le sue capacità di interazione con la radiazione, specialmente nella regione del visibile. In particolar modo ricordiamo i pigmenti fotosintetici (specialmente la clorofilla), il contenuto di carotenoidi (ovvero pigmenti gialli) ed i flavonoli (fra cui l'antocianina) che contribuiscono alla colorazione autunnale. Le curve di assorbimento per tali componenti chimici sono mostrati in Fig. 3.2. I pigmenti dominanti della clorofilla determinano la capacità di assorbimento della radiazione rossa e blu, mentre i carotenoidi estendono l'assorbimento al blu. Altri componenti strutturali, come la lignina e diverse proteine, contribuiscono al risultato finale specialmente nella regione dell'infrarosso. Sempre in Fig. 2.2, oltre alle curve di assorbimento dei singoli componenti chimici, sono mostrate le curve di assorbimento risultato dell'azione combinata dei differenti componenti. Chiaramente l'eventuale insorgere della senescenza fogliare rende sempre meno prominente l'azione della clorofilla (in ragione della sua diminuzione), a favore dell'azione dei carotenoidi e delle proteine.

In contrasto con quel che accade nella regione del visibile, nella regione dell'infrarosso l'acqua è il componente chimico che principalmente si esprime nell'interazione con la radiazione, data anche la scarsa capacità di assorbimento dei pigmenti in questa regione dello spettro. L'acqua assorbe principalmente a lunghezze d'onda superiori a 1100 nm, con bande di assorbimento caratteristiche localizzate a 1450 nm, 1950 nm e 2500 nm. La bassa capacità di assorbimento della foglia nella regione del vicino infrarosso non dipende né dall'azione dell'acqua né da quella della clorofilla e dipende principalmente dalla struttura fogliare. Come ci si può aspettare l'incremento del contenuto di acqua, che determina contestualmente l'incremento dello spessore fogliare, aumenta la capacità di assorbimento nelle bande dell'acqua con una riduzione dunque della capacità di riflessione nel medio infrarosso.

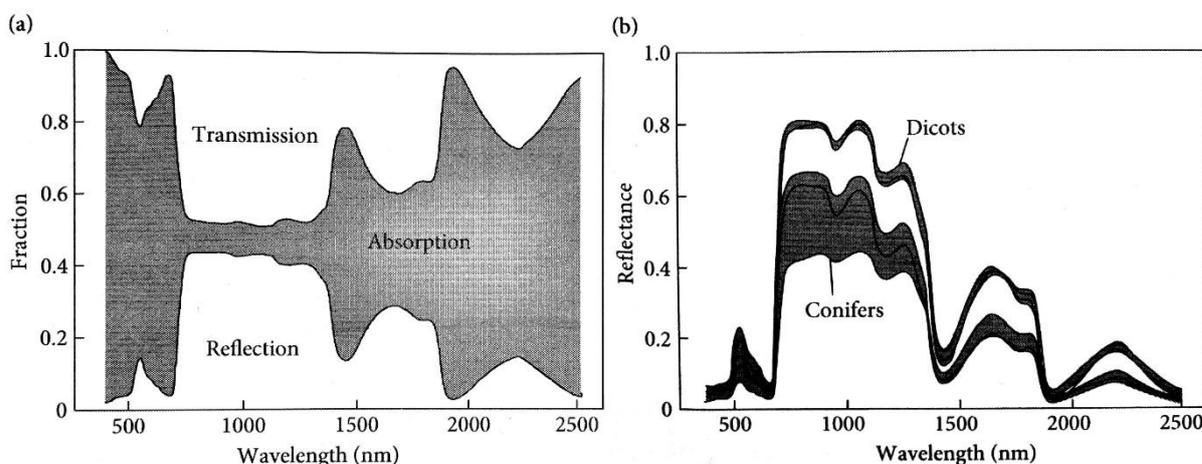


Fig. 3.1 (a) Tipico pattern di assorbimento, trasmissione e riflessione fogliare, illustrato per una foglia di vite (*Vitis Vinifera*); (b) tipico spettro di riflettanze per strati otticamente spessi sia della specie dicotiledone (lattuga, patate etc.), che per la specie conifera (*Pinus contorta*, *Pseudotsuga menziesii*, *Picea sitchensis*) (dati prelevati dall'esperimento LOPEX93 (Hosgood et al., 2005)).

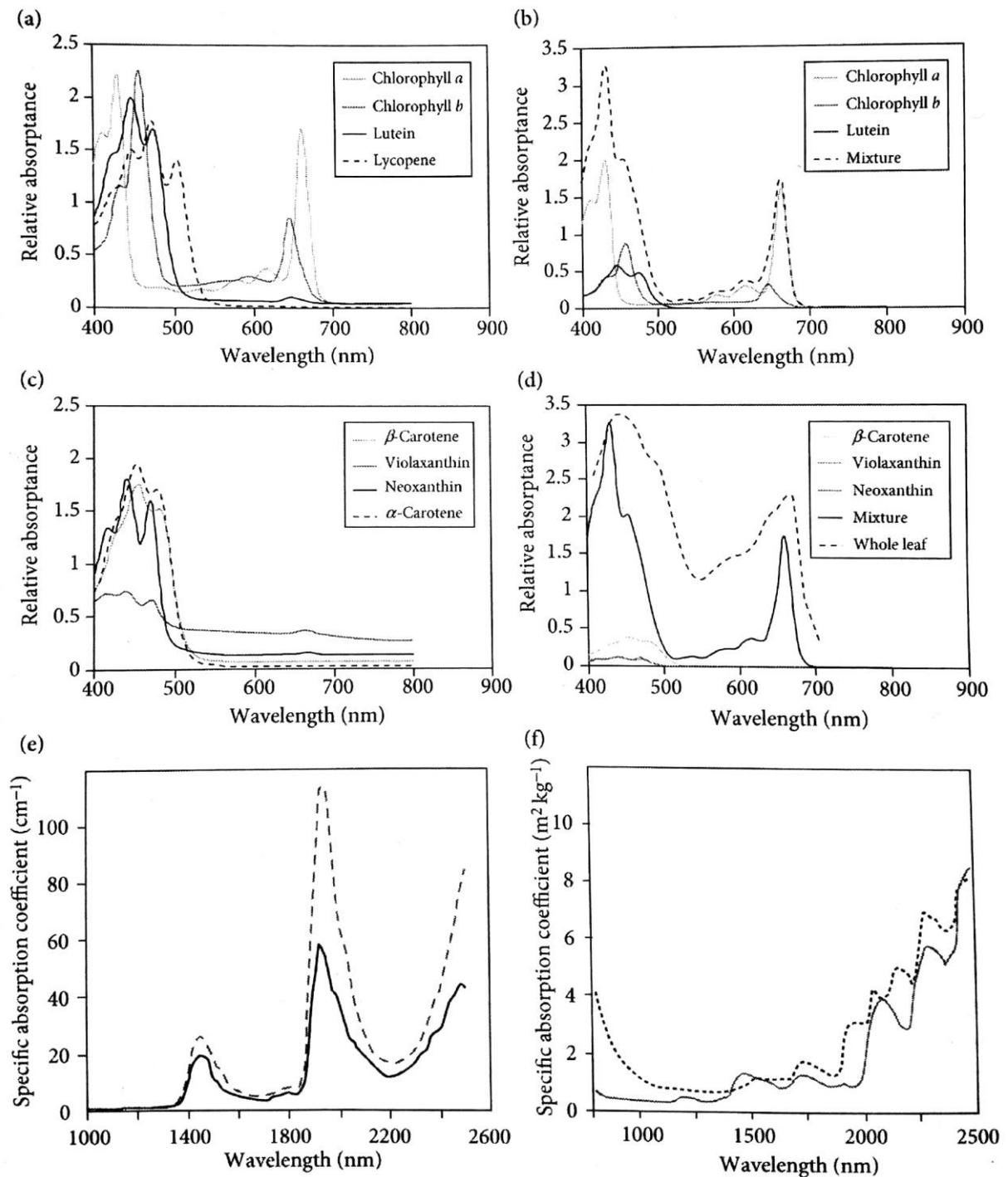


Fig. 3.2 Variazioni spettrali nei coefficienti di assorbimento per una serie di pigmenti e componenti chiave delle strutture fogliari. (a, c) assorbimento da parte dei più importanti pigmenti (clorofilla-a, clorofilla-b, luteina, carotene, xantofille, licopene) misurati in campioni di acetone e scalati affinché le aree totali al di sotto delle curve risultino uguali (Buschmann); (b, d) assorbimento relativo caratteristico dei differenti pigmenti, scalato secondo le proporzioni delle reali concentrazioni nella foglia, accoppiato con l'assorbimento totale prodotto da tutti i pigmenti presenti e l'assorbimento mostrato dalla foglia da cui i pigmenti sono stati estratti (Buschmann); coefficienti di assorbimento specifico dell'acqua contenuta nella foglia (Jaquemond et al. 1990), dell'acqua pura (Curcio and Petty 1951); (f) coefficienti di assorbimento specifico delle proteine fogliari (.....), e delle cellulosa accoppiata con la lignina (____) (Jaquemond et al., 1996).

3.1.2 Interazione con la struttura fogliare

La foglia è molto più che un sottile strato omogeneo assorbente, e la riflessione non si manifesta esclusivamente sulla superficie della fogliare. La foglia è una struttura stratificata non omogenea. Una porzione minima della radiazione viene riflessa dalla superficie cuticolare della foglia, la restante porzione viene trasmessa ed assorbita dalla clorofilla e da altri pigmenti, oppure diffusa al livello dell'interfaccia tra aria ed acqua sulla superficie delle cellule. Quest'ultimo fenomeno prende il nome di diffusione di volume (volume scattering) e dipende dai differenti indici di rifrazione che le diverse componenti fogliari manifestano (Gausman et al., 1974).

Ad ogni modo in prima analisi, si può considerare una superficie fogliare di riferimento che si comporti come un diffusore perfetto (superficie lambertiana). La brusca variazione degli indici di rifrazione determina dei confini ottici in corrispondenza dei quali la radiazione non solo viene riflessa, ma ne viene modificata anche la direzione per fenomeno di rifrazione. Questi confini ottici sono localizzati in corrispondenza della superficie fogliare, alla separazione fra le cellule e negli spazi intercellulari. Una sostanziale parte del fenomeno di riflessione, specialmente della regione dell'infrarosso, è comunque determinata al livello della superficie cuticolare della foglia.

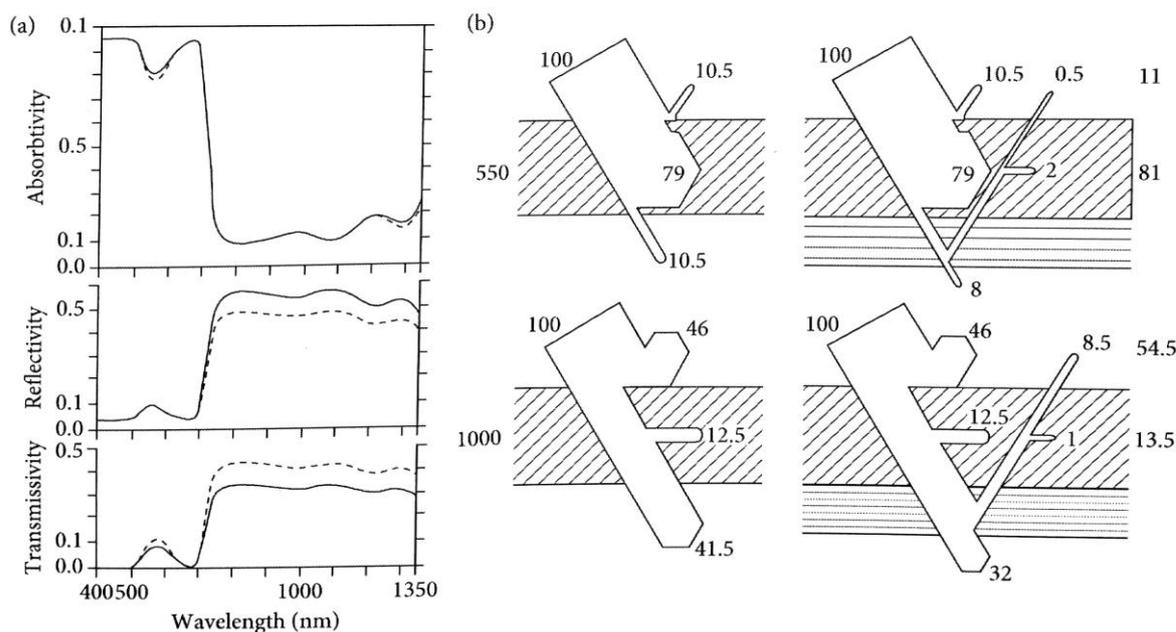


Fig. 3.3 (a) Proprietà spettrali della foglia di *Tussilago farfara*, in presenza di tricomi sul lato inferiore (—), ed una volta rimossi (-----); (b) illustrazione dell'interazione dei flussi radiativi a 550 nm (sopra), ed a 1000 nm (sotto), in presenza ed assenza di tricomi sul lato inferiore (Eller, 1977), questo mostra il maggiore effetto nel NIR rispetto al RED, relativo alla presenza di tricomi.

3.1.3 Modelli delle proprietà ottiche della foglia – PROSPECT e LIBERTY

Come già detto, la maggior parte della riflessione fogliare interviene laddove sono localizzate le discontinuità dell'indice rifrattivo, quindi in dipendenza della struttura fogliare. Il trasferimento radiativo all'interno della foglia è estremamente complesso e vi sono coinvolti numerosi siti di assorbimento e diffusione fra i vari strati della struttura fogliare. Questa componente strutturale complica notevolmente la capacità di osservare direttamente le proprietà chimiche della foglia. D'altro canto il tracciamento esatto di tutti i percorsi radiativi all'interno della foglia richiederebbe l'impiego di uno straordinario numero di parametri.

Si è tuttavia dimostrato possibile impiegare modelli fisici che approssimino che consentono una descrizione approssimate della foglia secondo le sue proprietà garantendo la separabilità dei contributi chimici e strutturali allo spettro radiativo (Jacquemoud e Baret, 1990). Uno dei modelli maggiormente impiegati prevede di approssimare la struttura fogliare come una serie di strati assorbenti omogenei separati da strati di aria al livello dei quali si verificano i fenomeni di riflessione e diffrazione (Allen et al., 1969). Il numero di strati N non rappresenta la diretta misura del numero di strati della foglia, deve essere visto piuttosto come una variabile, resa continua nel modello PROSPECT (Jacquemoud e Baret, 1990). In questo modello la descrizione della foglia dipende solo da tre parametri: il parametro strutturale N , la concentrazione del pigmento C_{chl} , ed il contenuto di acqua C_w . Questi parametri, insieme ad altri come i coefficienti di assorbimento dei vari pigmenti, permettono di simulare gli spettri di riflessione di differenti tipi di foglie. Il metodo è stato poi esteso per stimare altri componenti biochimici (carotenoidi, antocianina, proteina e lignina), seppur con minore accuratezza (Ferret et al., 2008). Il modello è stato ampiamente modificato per adattarsi alla simulazione della struttura fogliare tipica delle conifere, dando vita al modello LIBERTY (Dawson e Curran, 1998).

L'inversione dei modelli PROSPECT e LIBERTY consente di stimare le proprietà biochimiche delle foglie. Per applicazioni al livello di copertura fogliare (canopy cover) è necessario integrare il trasferimento radiativo al livello di tale copertura. Per raggiungere questo obiettivo si può combinare un modello biochimico come PROSPECT con un modello di trasferimento radiativo della copertura fogliare come SALI (modello PROSAIL).

3.1.4 Proprietà radiative delle coperture fogliari

La riflessione della radiazione da parte di un sistema vegetale dipende dalla proprietà in tal senso dei suoi elementi costituenti (compreso il suolo e l'acqua), ma anche dall'architettura e dall'organizzazione spaziale della sua copertura fogliare, così come dalla distribuzione angolare della radiazione incidente e dalla posizione del sensore.

Il parametro più importante che determina le caratteristiche di assorbimento e trasmissione della pianta è il leaf-area-index (LAI), definito come l'unità d'area fogliare per unità d'area del terreno. Per molte applicazioni, specialmente in studi riguardanti la fotosintesi ed il bilancio energetico della copertura fogliare, si è principalmente interessati alla quota parte di energia assorbita dalla copertura fogliare. Questa informazione può essere ricavata sia dalla conoscenza della radiazione riflessa che da quella trasmessa. L'approccio tradizionale, usato negli studi di fisiologia della vegetazione o negli studi agronomici, prevede di ricavare questa informazione attraverso la misura della radiazione trasmessa al terreno attraverso la copertura fogliare tramite l'impiego di appositi strumenti di terra. Successivamente la misura viene invertita, sulla base di un appropriato modello di trasmissione, per ricavare variabili come il LAI ed il LAD (leaf-angle distribution). In Telerilevamento invece la stessa informazione viene ricavata attraverso ciò che viene riflesso dalla copertura fogliare piuttosto che di quanto viene trasmesso attraverso essa, basando questo secondo approccio sugli stessi principi fisici del primo.

Le traiettorie di penetrazione, diffusione e trasmissione della copertura fogliare costituiscono nel complesso un fenomeno che presenta numerose somiglianze con la diffusione di volume osservata per la singola foglia, solo ad una dimensione di scala maggiore. Dato che parte della radiazione viene assorbita ad ogni evento di scattering, l'energia radiativa complessiva diminuisce all'aumentare del numero di eventi di diffusione. Questi fenomeni sono statisticamente in numero maggiore rispetto a quelli che occorrono nell'analisi della singola foglia: si deduce pertanto che l'energia riflessa a livello di copertura fogliare è sostanzialmente inferiore a quella riflessa dalla singola foglia. Alla diminuzione del valore del LAI la radiazione riflessa tende ad avvicinarsi sempre di più a quella del suolo sottostante. La radiazione si arricchisce nella regione dell'infrarosso sia per il numero di riflessioni che per la profondità della copertura vegetale. Inoltre l'albedo della copertura vegetale è funzione dell'angolo solare (quindi dall'ora di osservazione), che dalla presenza di formazioni nuvolose.

Il trattamento analitico della copertura fogliare è basato su diversi parametri che ne approssimano la struttura e ne determinano il comportamento interattivo:

- a) *Copertura omogenea.* La più semplice approssimazione è che il canopy cover abbia caratteristiche omogenee, ovvero che le componenti di assorbimento siano omogeneamente distribuite lungo la copertura. La radiazione viene attenuata seguendo la legge di Beer per mezzo di un coefficiente di estinzione (o attenuazione);
- b) *Foglie orizzontali.* Le foglie, opache ed orizzontali, sono organizzate secondo uno schema stocastico senza sovrapposizioni;
- c) *Distribuzione degli angoli fogliari.* Nella realtà le foglie presentano diverse inclinazione, da quella perfettamente orizzontale (planofila) a perfettamente verticale (erectofila). L'attenuazione nel caso di foglie verticali è chiaramente inferiore, si può tenere conto della distribuzione angolare tenendo conto della variazione del fattore di forma fogliare;

- d) *Distribuzione angolare sferica*. Per tenere conto di tutti i possibili orientamenti dell'angolo della foglia si può arrangiare la posizione occupata dalla foglia nello spazio in maniera che possa coprire la superficie di una sfera.

3.2 Fisiologia della vegetazione

3.2.1 Contenuto di acqua nelle piante

Un altro meccanismo di scambio di massa tra vegetazione ed atmosfera è la perdita di acqua tramite evaporazione. Il contenuto d'acqua della pianta dipende, in ogni momento, dal bilancio tra la quantità di acqua prelevata dal terreno e la quantità d'acqua persa dalle foglie e da altri tessuti vegetali al di sopra del terreno. Circa il 90% del peso della pianta verde è rappresentato dall'acqua che riveste il ruolo di solvente per molte delle reazioni biochimiche che ordinariamente caratterizzano la fisiologia vegetale.

Bisogna considerare che la misura diretta del contenuto d'acqua non è particolarmente funzionale agli studi di fisiologia vegetale. Questo perché l'acqua viene impiegata a livello cellulare, ciò vuol dire che la forma e la fisiologia della foglia devono essere prese in considerazione; le sottili foglie delle varietà di cereali, per esempio, contengono un quantitativo di acqua significativamente inferiore rispetto a quello di molte piante caratterizzate da foglie larghe, ma questo non vuol dire che sia in atto una situazione di stress idrico. Per quanto visto non sarebbe possibile effettuare confronti diretti del contenuto idrico se la misura fosse effettuata semplicemente per unità di massa e volume. Si introduce allora il contenuto idrico relativo (relative water content, RWC, Jones, 1992) come:

$$\text{RWC} = (\text{massa fresca} - \text{massa secca}) / (\text{massa turgida} - \text{massa secca})$$

Nel dettaglio la massa turgida corrisponde alla massa che si ottiene sospendendo in acqua i tessuti fogliari per 24h, a bassa temperatura, in assenza di luce per inibire le perdite per respirazione; la massa fresca si ottiene pesando una foglia fresca; infine la massa secca si ottiene asciugando una foglia alla temperatura di 80° C sino a quando non si osservano ulteriori cambiamenti di massa. Impiegando il RWC ha il vantaggio di normalizzare il contenuto di acqua rispetto allo spessore fogliare e rispetto alla differente elasticità dei tessuti.

Spesso in letteratura viene impiegato, come parametro di stima, il potenziale idrico della foglia (leaf water potential), misurato in unità di pressione (MPa). Tale parametro esprime il gradiente pressorio e quindi la direzione del movimento complessivo dell'acqua nella pianta, dal suolo attraverso le radici sino alle foglie ed all'atmosfera. Esso esprime la condizione assoluta di stress idrico della pianta. Un valore dell' RWC pari ad 1.0 corrisponde ad un potenziale idrico di 0 MPa, ovvero il valore atteso per vegetazione non soggetta a stress idrico; allo svilupparsi del deficit idrico il valore dell'RWC

decrese sino a raggiungere un valore minimo corrispondente alla misura di -1.5 MPa del potenziale idrico (Jones, 1992).

3.2.2 Evaporazione e perdita idrica

La stima del rateo di evaporazione è un fattore determinante per determinare il contenuto d'acqua della pianta. Dal punto di vista del Telerilevamento è più semplice studiare lo scambio evaporativo che non lo scambio di CO₂. L'evaporazione dell'acqua richiede un apporto energetico in grado di soddisfare il calore latente di evaporazione (2.454 MJ kg⁻¹ a 20 °C), che è di tre ordini di grandezza superiore della quantità di calore necessaria ad incrementare la temperatura della stessa quantità di acqua di 1 K tenendo conto del suo calore specifico (c_p = 1.01 kJ kg⁻¹ K⁻¹). Lo scambio energetico evaporativo produce variazioni nella temperatura superficiale rilevabili attraverso Telerilevamento, poiché questi flussi evaporativi sono comparabili nell'ordine di grandezza con i flussi radiativi e convettivi.

La perdita d'acqua tramite evaporazione, dagli spazi intercellulari sino agli stomata, è definita traspirazione. Invece la perdita d'acqua a livello dell'intera copertura fogliare (che comprende la traspirazione e qualunque fenomeno evaporativo a livello superficiale, coinvolgendo anche il suolo) viene definita evapotraspirazione.

3.2.3 Bilancio energetico

Il bilancio energetico è centrale rispetto a qualunque processo di interazione radiativo. Nel caso specifico del bilancio energetico della copertura fogliare intervengono principalmente due termini, l'insolazione che apporta calore alla copertura, e l'evaporazione che tende a rimuovere il calore. La somma di tutti i flussi energetici alla superficie è descritta dalla seguente relazione:

$$R_n - C - \lambda E - M - S = 0$$

Dove R_n è la somma dei flussi totali assorbiti dalla superficie della copertura fogliare; C è la perdita di calore attraverso i fenomeni di conduzione e convezione; λE è la perdita di calore attraverso evaporazione come flusso latente di calore; M è un termine metabolico indicante il calore immagazzinato sotto forma di energia chimica attraverso reazioni biochimiche come la fotosintesi; S è il flusso di calore che innalza la temperatura. Tutti i flussi sono espressi in termini di densità di flusso per unità d'area a terra (W m⁻²). Il termine metabolico (in genere due ordini di grandezza inferiore agli altri) generalmente viene ignorato.

3.2.4 Flusso di calore

Ricorrendo alla legge di Fourier per la conduzione del calore, possiamo esprimere il flusso di calore coinvolto in funzione della differenza tra temperatura superficiale della copertura fogliare (T_s), e la temperatura atmosferica (T_a), secondo la relazione:

$$C = K/l(T_s - T_a) = g_H \rho c_p (T_s - T_a)$$

Dove K è la conduttività termica ($W m^{-1} K^{-1}$) e K/l la conduttanza associata ($W m^{-2} K^{-1}$), g_H e ρ sono rispettivamente conduttanza e densità.

3.2.5 Evaporazione

Il rateo dell'evaporazione dalla copertura fogliare della vegetazione è determinato da:

- i. *Fattori ambientali.* Ovvero la temperatura dell'aria, la disponibilità di energia, la differenza della pressione vapore fra la copertura e l'atmosfera, e la resistenza sui bordi degli strati atmosferici;
- ii. *Fattori della vegetazione.* Ovvero l'area fogliare, la struttura della volta fogliare ed in particolare dai fori stomatali.

L'evaporazione impatta decisamente sul bilancio energetico e sul controllo della temperatura. Possiamo in prima analisi scrivere:

$$E = g_w (x_s - x_a) = (x_s - x_a)/r_w$$

dove g_w è la conduttanza totale (ed r_w la resistenza) espressa in moli ($mol m^{-2} s^{-1}$) del vapore acqueo, che include entrambi i percorsi attraverso gli stomata e gli strati atmosferici, x_s ovvero l'umidità presente negli spazi intercellulari ed infine x_a che è la pressione del vapore d'acqua nell'aria. Tale equazione può essere espressa esprimendo la resistenza totale alla perdita d'acqua nei termini di un termine diffusivo (r_s), che rappresenti la perdita d'acqua al livello stomatale, ed in un termine convettivo (r_a), che rappresenti al trasferimento attraverso gli strati fogliari:

$$E = (x_s - x_a)/(r_s + r_a) = (x_s - x_{epidermide})/r_s = (x_{epidermide} - x_a)/r_a$$

dove $x_{epidermide}$ indica l'umidità (espressa in frazioni di mole) alla superficie epidermica delle foglie.

3.2.6 Equazione di Penman-Monteith

La soluzione dell'equazione del bilancio energetico per ottenere una stima di E richiede non solo informazioni relative alle condizioni ambientali, come la radiazione, la temperatura dell'aria,

umidità e resistenze atmosferiche, ma richiede anche la temperatura superficiale della copertura fogliare. Sfortunatamente la temperatura superficiale concorre a determinare i termini λE e C di scambio energetico, ed è a sua volta determinata da questi fattori. Il problema può essere risolto stimando sia la temperatura fogliare che il rateo evaporativo impiegando un' approssimazione lineare proposta da Penman nel 1948. Questo approccio consiste nel sostituire il termine $(x_s - x_a)$, ovvero la differenza di umidità tra aria e foglia che guida l'evaporazione, con la differenza di temperatura tra aria e foglia ed il deficit di umidità dell'aria:

$$(x_s - x_a) = (x_{\text{sat}(T_s)} - x_a) - s(T_a - T_s) = D_x + s(T_a - T_s)$$

dove l'umidità è espressa nei termini di frazioni di mole, mentre il termine s corrisponde alla pendenza della curva che mette in relazione la saturazione del vapore d'acqua con la temperatura. A partire da questa sostituzione si può ricavare l'equazione di Penman-Monteith ottenendo:

$$E = g_w(D_x + sC/c_p g_H), \quad \text{ovvero} \quad \lambda E = \frac{c_p g_H D_x + s R_n}{(c_p g_H / \lambda g_w) + s} = \frac{c_p g_H D_x + s R_n}{\gamma + s}$$

dove con γ si indica la costante psicometrica, ovvero il fattore che corregge le differenze tra le conduttanze del vapore d'acqua e del calore. Si elimina la necessità di conoscere la temperatura superficiale ma si introduce il termine g_w che rappresenta la conduttanza del vapore d'acqua.

3.3 Indici spettrali

Differenti materiali sono caratterizzati da differenti spettri di riflessione, che mostrano tipiche capacità di assorbimento (o riflessione), localizzate a ben specifiche lunghezze d'onda. La complessità di questi spettri testimonia la necessità di introdurre approcci semplificati per poter opportunamente discriminare i diversi materiali e, eventualmente, estrarre proprietà biofisiche ad essi associati. Gli indici spettrali sono nuove variabili generate dalla combinazione matematica di almeno due bande spettrali, opportunamente scelte perché siano in grado di evidenziare le proprietà biofisiche di interesse. L'introduzione di tali indici ha inoltre il vantaggio di normalizzare i dati impiegati rispetto a variazioni non direttamente correlate alle componenti di interesse; inoltre tali indici consentono di migliorare la sensibilità della misura introducendo rapporti e differenze attraverso due misure (impiegando per esempio una seconda banda di controllo selezionata in funzione del comportamento radiativo caratteristico del materiale in analisi). La determinazione di indici spettrali è una pratica ampiamente diffusa nei più disparati ambiti del Telerilevamento. Nello specifico, nello studio delle coperture vegetali, si introducono indici di vegetazione (vegetation indices, VI).

3.3.1 Indici di vegetazione

Gli indici di vegetazione sono generalmente misure adimensionali derivate da dati radiometrici al fine di evidenziare la presenza di vegetazione in un'immagine. La maggior parte di questi indici si

basa sul rapido incremento di riflettanza che si verifica a circa 700 nm. Questo rapido incremento è di fatto tipico delle vegetazione verde, tutte le altre coperture mostrando una graduale variazione in corrispondenza della regione dello spettro intorno alla stessa lunghezza d'onda (Fig. 3.4). Rappresentando i valori di riflettanza nella regione dell'infrarosso rispetto a quelli nella regione del rosso, per tutti i pixel di un'area campione, si può ottenere una distribuzione simile a quella di Fig. 3.5, dove i punti di densa vegetazione sono rappresentati in alto a sinistra, per via degli elevati valori di

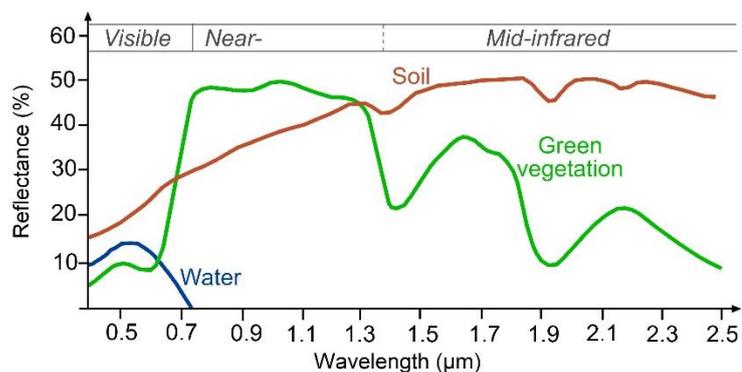


Fig. 2.4 Comparazione degli spettri di riflettanza del suolo, dell'acqua e della vegetazione verde nella loro più tipica accezione. In corrispondenza dei 700 nm è chiaramente visibile il salto di riflettanza nello spettro della vegetazione su è basato il calcolo degli indici spettrali.

riflettanza nel NIR ed i corrispondenti valori nel rosso. I punti di suolo scoperto, in relazione alla loro condizione specifica, sono distribuiti lungo la diagonale in basso a destra; tale linea risulta come un'approssimazione lineare fra i valori di riflettanza nel NIR e nel rosso, viene definita linea dei suoli e mostra i suoli asciutti con valori di riflettanza elevati in entrambe le bande, mentre i suoli bagnati sono caratterizzati da bassi valori di riflettanza in entrambe le bande.

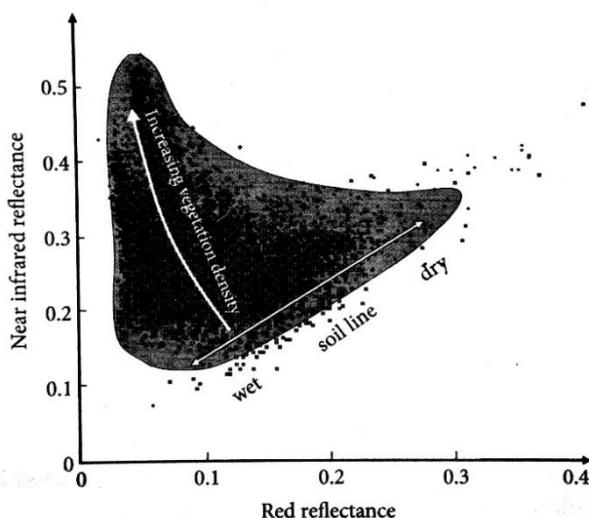


Fig. 3.5 Diagramma scatter che mostra la tipica relazione fra NIR e RED in un'area di landcover a composizione mista (area grigia); i punti rappresentano singoli pixel: i punti raggruppati in alto a sinistra rappresentano la densa vegetazione mentre quelli allineati lungo la diagonale in basso a destra rappresentano il suolo (soil line). La linea del suolo indica la variazione attesa fra suolo asciutto e suolo bagnato.

Esistono differenti tecniche attraverso cui è possibile tenere conto della differente risposta della vegetazione e del suolo nelle bande del rosso e del vicino infrarosso al fine di produrre indici della vegetazione:

- i. Il primo metodo, veramente il più semplice, consiste nel computare la differenza fra le due bande del NIR e del rosso, il brusco salto fra il picco di assorbimento del rosso ed il picco riflettente del NIR determina elevati valori della differenza per le aree vegetate in confronto ai valori usualmente più bassi che presentano altre coperture. L'impiego di valori di riflettanza, piuttosto che valori di riflettanza o numeri digitali, riduce la dipendenza dalle condizioni di illuminazione. Definiamo quindi il difference vegetation index ($DVI = \rho_{NIR} - \rho_R$);
- ii. In alternativa alla differenza si può impiegare il rapporto fra le suddette bande, ovvero il ratio vegetation index ($RVI = \rho_{NIR} / \rho_R$). L'impiego del rapporto permette di compensare gli effetti di illuminazione anche lavorando con le sole radianze. In Fig. 3.6(a) è possibile osservare come le linee ad RVI costante siano correlate a quelle di LAI costante seppur non parallele;
- iii. Un metodo ancor più efficace consiste nel normalizzare la differenza delle bande del NIR e del rosso. Introduciamo allora il normalized difference vegetation index (NDVI) come:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$$

Il termine al denominatore rappresenta due volte la riflettanza media nel campo delle lunghezze d'onda impiegate. Dividere per questo fattore vuol dire ridurre gli effetti di una illuminazione non uniforme (anche funzione dell'aspetto della topografia) e consente di migliorare la comparabilità dell'indice di vegetazione attraverso l'immagine. In Fig 3.6 le linee di RVI ed NDVI sono perfettamente sovrapposte, tuttavia l'NDVI, assumendo solo valori compresi tra -1 ed 1, risulta opportunamente scalato.

Gli indici di vegetazione generalmente non tendono all'unità per alti valori del LAI (oppure verso lo zero per i terreni scoperti), per questo motivo è pratica comune scalare i valori di questi indici secondo la generica relazione:

$$VI^* = (VI - VI_{min}) / (VI_{max} + VI_{min})$$

dove i valori di massimo e minimo si riferiscono, rispettivamente, ai valori di densa vegetazione ed al terreno scoperto. In Fig. 2.6 viene riproposta la stessa distribuzione di pixel mostrata in precedenza (Fig. 3.5). Nel diagramma (a) le linee tratteggiate rappresentano posizioni lungo le quali l'indice NDVI si mantiene costante (e parimenti si mantiene costante l'indice RVI), mentre le linee continue

rappresentano posizioni lungo le quali a mantenersi costante è il valore del LAI, calcolato da una punto di osservazione al Nadir attraverso il modello di trasferimento radiativo SAIL (Baret and Guyot, 1991).

Il diagramma (b) è simile al precedente, questa volta a mantenersi costanti lungo le linee tratteggiate sono i valori del SAVI (Soil Adjusted VI) ovvero un indice di vegetazione corretto per l'effetto del suolo secondo la formula:

$$SAVI = (1+L)(NIR-Red)/(NIR+Red +L)$$

dove il parametro L (spesso assunto pari a 0.5) varia in funzione del LAI. Dalla diagramma presentato in Fig. 3.6, si evince come le linee RVI varino in funzione delle linee LAI (seppure non parallele); le linee di RVI sono le stesse dell'indice NDVI, ma quest'ultimo ha il vantaggio di scalare i propri valori tra 0 ed 1, ed in generale dimostra avere un comportamento più stabile

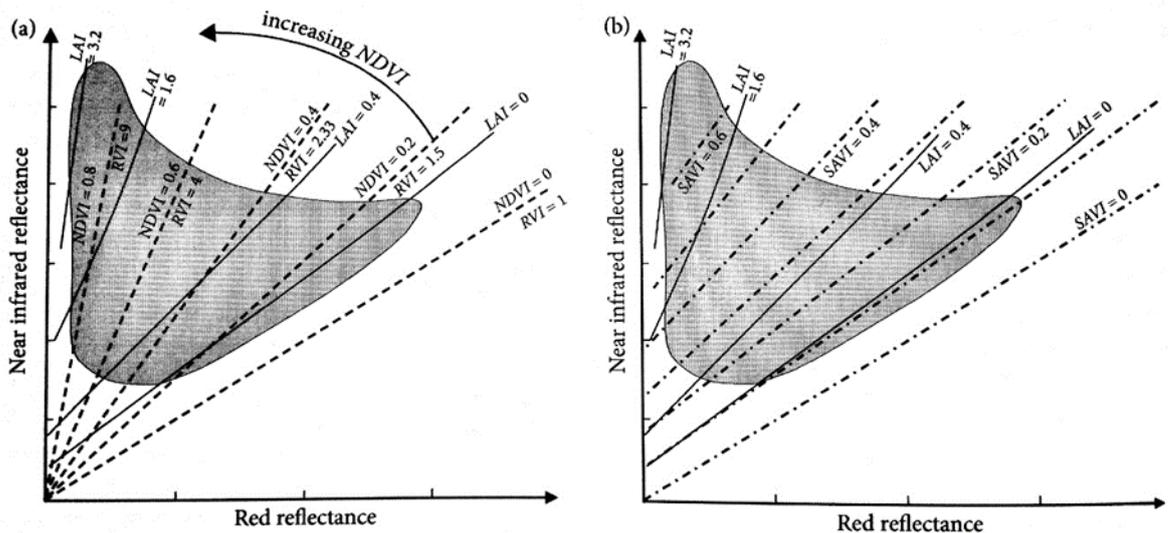


Fig. 3.6 Distribuzione di pixels nello spazio NIR/Red; le linee tratteggiate mostrano posizioni dove entrambi gli indici RVI ed NDVI mantengono valori costanti, le linee continue posizioni costanti di LAI; (b) nello stesso spazio le linee tratteggiate rappresentano adesso posizioni s SAVI costante (Baret and Guyo, 1991).

4. Metodologia

Investigheremo circa l'impiego di dati fenologici della vegetazione nel supportare il processo di classificazione di precisione delle aree di interesse. Particolare riguardo verrà posto nella discriminazione delle differenti colture rintracciabili nelle aree di studio. Una volta individuate le aree agricole sarà possibile procedere ad una valutazione dello stato di salute delle colture e quindi ad una previsione del raccolto nell'ambito di un sistema di monitoraggio.

4.1 Introduzione

4.1.1 Struttura generale

Il mantenimento della funzionalità di un ecosistema gioca un ruolo chiave nella gestione dei terreni agricoli e forestali, specialmente nei paesi in via di sviluppo. La conoscenza del territorio risulta dunque cruciale nella pianificazione delle attività di intervento. I sistemi e gli strumenti del Telerilevamento, automatici ed economici, sono dunque particolarmente indicati per il monitoraggio della crescita e dello stato di salute delle coltivazioni, fornendo ai coltivatori informazioni tempestive circa gli interventi da intraprendere per garantire la salvaguardia delle coltivazioni e la sicurezza alimentare.

Impiegare immagini satellitari di media risoluzione (le uniche in grado di rifornire un sistema di monitoraggio con un numero sufficiente di dati), nel mappare la vegetazione al livello di singola specie e nel discriminare i diversi tipi di coltivazioni, è un compito impegnativo, specialmente in un ambiente eterogeneo caratterizzato da un'elevata variabilità dei tipi di suolo e delle qualità delle colture. Partendo da questo punto è stato sviluppato un sistema di classificazione sito-specifico basato sulla fenologia della vegetazione e supportato dall'introduzione di informazioni ancillari legate alla caratterizzazione agro-ecologica delle aree di interesse. Il processo di classificazione è suddiviso in due filoni di lavoro:

- i. Da una parte abbiamo il trattamento del dato satellitare. Le immagini, una volta acquisite, vengono sottoposte ad una procedura di pre-processamento (che comprende l'applicazione di una tecnica di pansharpening ed il calcolo dell'indice NDVI);

vengono successivamente organizzate in una struttura multi-temporale in funzione delle fasi di lavoro successive. Su ogni area di interesse vengono estratti i profili fenologici che caratterizzano la vegetazione, contestualmente vengono corretti dalla possibile contaminazione dovuta alla presenza di formazioni nuvolose sulla scena. Il dato satellitare così gestito è pronto ad entrare nel processo di classificazione;

- ii. Il processo di classificazione è basato sull'impiego di un albero decisionale: ciò vuol dire, come vedremo, che devono essere introdotte delle regole decisionali affinché tale classificazione possa avere luogo. Informazioni ancillari sono importate nel processo di classificazione attraverso la suddivisione dell'area di interesse in zone agro-ecologiche (Agro-Ecological Zone, AEZ) e l'impiego di profili fenologici di riferimento che descrivano le specie vegetali (ed in particolar modo quelle agricole) all'interno delle AEZ in cui l'area di studio è stata suddivisa. Per far questo è necessario far riferimento a tutta una serie di informazioni concernenti la topografia e la geologia del territorio, il clima, e le principali categorie di uso del suolo nonché la tipologia di vegetazione caratteristica. Definite le regole decisionali, queste possono essere introdotte nel processo di classificazione.

Il processo di classificazione, applicato per ogni pixel, segue un approccio multi-temporale, supportato in questo dall'impiego di informazioni ausiliare estranee al dato telerilevato. Tale processo è strutturato in maniera tale da escludere in prima istanza tutte le coperture non vegetali (cercando ad ogni modo di caratterizzarle nella loro natura per quanto possibile, non essendo queste oggetto di principale interesse di questo studio). Successivamente vengono eliminate tutte le coperture vegetali che non presentino una fenologia compatibile con quella di un'area agricola; solo a questo punto si procede alla discriminazione delle varie coltivazioni all'interno della categoria agricola.

Portata a termine la classificazione, viene diffuso un prodotto di informazione geografica in grado di indicare la posizione, la tipologia e l'estensione delle aree agricole presenti sul territorio. Queste informazioni, integrate al dato relativo all'evapotraspirazione ed allo stress idrico del territorio, vengono inserite nel modello AquaCrop (FAO), per ottenere la stima del raccolto.

4.1.2 Fenologia della vegetazione

La fenologia è la scienza che si occupa della classificazione e registrazione degli eventi rilevanti nello sviluppo degli organismi, in particolare di quelli *pecilotermi*, cioè incapaci di regolare la propria temperatura in modo indipendente da quella ambientale, come ad esempio le piante e gli insetti. La fenologia vegetale in particolare si occupa della definizione delle fasi di sviluppo (o fasi fenologiche) delle piante in particolari scale fenologiche e della registrazione delle date in cui esse si verificano nei diversi ambienti. Se le piante oggetto di osservazione sono coltivate siamo nel campo della *fenologia agraria* o *agrofenologia*.

la fase fenologica è uno stadio specifico del ciclo vitale di un organismo vivente identificato da uno status morfologico, fisiologico, funzionale e comportamentale indotto dalla mutazione stagionale delle condizioni ambientali, in particolare quelle climatiche. Il concetto di fase fenologica è l'oggetto di studio centrale della fenologia nell'ambito di tutti i settori delle scienze naturali fondamentali e applicate che mettono in relazione il ciclo ontogenetico degli organismi con il ciclo stagionale. In particolare, il concetto trova ampio riscontro nell'ambito dell'ecologia, della botanica, dell'etologia e dell'agronomia e, in ambito tecnologico, nel settore dell'agricoltura, della selvicoltura, del giardinaggio, della fitoiatria.

A prescindere dalle interazioni che intercorrono fra ogni specie vivente e le mutazioni ambientali stagionali, il concetto di fase fenologica si applica in particolare agli organismi pecilotermi, in quanto la variazione della temperatura è il fattore climatico di maggiore rilevanza nell'interdipendenza fra ciclo ontogenetico e ciclo stagionale nelle regioni temperate e subartiche. In molti organismi esiste anche una risposta alla variazione stagionale del fotoperiodo, tuttavia lo studio del fotoperiodismo degli organismi è generalmente svincolato dal concetto di fase fenologica. L'agricoltura, sotto l'aspetto sociologico e tecnologico, e l'agronomia, sotto l'aspetto scientifico, sono gli ambiti applicativi dove il concetto di fase fenologica trova maggior riscontro.

Da un punto di vista tecnico e scientifico, l'identificazione di una fase fenologica è di particolare importanza in quanto ad essa si associano particolari esigenze fisiologiche (es. nutrizione idrica e minerale, induzione antogena). La fisiologia del vegetale ha una complessa base ormonale e nutrizionale sulla quale incidono fattori endogeni, di natura genetica, ed esogeni di natura ambientale. Fra questi hanno un ruolo primario i fattori climatici, in particolare la temperatura e, in misura minore e in casi specifici, il fotoperiodo, i fattori pedologici, i fattori biologici di tipo relazionale (ad esempio l'induzione di processi fisiologici indotta da parassiti specifici). Il fattore antropico, rappresentato dalla tecnica colturale, interviene più o meno direttamente sui fattori endogeni e, in misura più evidente, sull'interdipendenza tra fisiologia vegetale e ambiente esterno, regolando la risposta fisiologica e funzionale della pianta agli stimoli ambientali (*Fenner, 1998*).

Ogni specie vegetale è caratterizzato da una propria fenologia che può evidenziarne le specificità, tuttavia possono essere individuate delle fasi fenologiche generiche per gruppi omogenei secondo vari criteri.

Per comprendere appieno la struttura di un profilo fenologico portiamo l'esempio delle fasi fenologiche caratteristiche dei cereali autunno-vernini (frumento, orzo, avena, segale, triticale); sono piante erbacee annuali il cui ciclo fenologico si inquadra nell'ambito di un'annata agraria che intercorre, nelle basse e medie latitudini, dall'autunno all'inizio dell'estate. A latitudini più alte il ciclo inizia più precocemente, a inizio autunno, e si conclude in piena estate, con un prolungamento della stasi vegetativa invernale, ma dove le condizioni ambientali diventano proibitive a causa degli inverni rigidi, il ciclo diventa primaverile estivo, con semina a fine inverno e raccolta in piena estate. Queste sono le fasi fenologiche:

- Germinazione - Consiste nell'attivazione dei processi fisiologici che portano all'accrescimento della plantula e alla fuoriuscita della radichetta embrionale e dell'ipocotile. Questa fase è influenzata prevalentemente dallo stato di umidità del terreno, dal quale dipende l'umettamento della cariosside e l'imbibizione. Le esigenze termiche sono modeste in quanto questi cereali germinano anche a basse temperature, purché superiori a 0 °C.
- Emergenza - È la fase successiva alla germinazione e consiste nella fuoriuscita del coleoptile dal terreno.
- Accestimento - È la fase fondamentale dello stadio foglioso dei cereali autunno-vernini e si verifica nel periodo invernale durante l'apparente stasi vegetativa della coltura. Un accestimento di modesta entità può comportare una bassa resa in caso di semina rada, un eccessivo accestimento comporta invece una scalarità di maturazione. L'accestimento è influenzato dalla disponibilità di azoto, da cui dipende, in sostanza, il numero di spighe fertili per unità di superficie. Un buon stato nutrizionale in questa fase influisce inoltre sul numero di spighe per spiga. Durante lo stadio foglioso, le piante hanno modeste esigenze termiche e sono in grado di sopportare anche apprezzabili abbassamenti della temperatura. Le alte temperature sono incompatibili con l'accestimento.
- Levata - È la fase che prelude allo stadio riproduttivo e si verifica all'inizio della primavera, con il sopraggiungere di temperature più miti. Spigatura - Coincide con lo stadio riproduttivo e si verifica in piena primavera. A questo punto le esigenze termiche hanno un ruolo determinante e le piante sono sensibili agli abbassamenti termici, che possono influenzare negativamente l'impollinazione
- Riempimento della cariosside - Si svolge nella tarda primavera e consiste nell'accrescimento lineare delle cariossidi seguito dall'accrescimento ponderale per accumulo delle sostanze nutritive. Gravi effetti negativi hanno gli abbassamenti termici, che deprimono la fotosintesi, la siccità e la stretta. Nel corso di questa fase si svolge la lignificazione dei culmi e il progressivo disseccamento delle foglie a partire da quelle basali.
- Maturazione - Si svolge dalla fine della primavera fino al momento della raccolta, all'inizio dell'estate o, secondo la latitudine, in piena estate. In questa fase si ha il progressivo disseccamento dell'intera pianta e la perdita d'acqua dalla granella, con il caratteristico viraggio di colore dal verde al giallo.

L'epoca di raccolta dipende dal tipo di utilizzo del cereale:

- Affienamento - l'epoca ottimale si colloca in corrispondenza della spigatura, fase in cui si raggiunge il miglior rapporto tra qualità e quantità di biomassa. Una raccolta più

precoce penalizza la quantità a causa della scarsa resa in biomassa, una raccolta più tardiva penalizza la qualità del fieno a causa dell'eccessiva lignificazione dei culmi e della traslocazione delle sostanze nutritive verso le spighe.

- Insilamento - l'epoca ottimale si colloca in corrispondenza della maturazione cerosa, fase in cui si raggiunge la maggiore resa in unità foraggiere.
- Granella - l'epoca ottimale si colloca in corrispondenza della maturazione di morte. Una raccolta più precoce, in corrispondenza della maturazione fisiologica, incide negativamente sulla conservabilità della granella a causa dell'umidità elevata.

Naturalmente non tutte le coltivazioni presentano un ciclo fenologico suddivisibile nello stesso numero e nella stessa tipologia di fasi. Tuttavia, come vedremo in seguito, non è comunque possibile estrarre o ricostruire, dal solo dato satellitare, un profilo fenologico ad un tale livello di dettaglio; sarà invece possibile descrivere i profili di crescita, maturazione e senescenza e, soprattutto, sarà possibile localizzarli temporalmente all'interno della stagione in analisi.

4.1.3 Zone Agro-Ecologiche (AEZ)

Il concetto di zonazione agro-ecologica fu definito ed utilizzato per la prima volta dalla FAO nel 1978 (*FAO 1978-81 Report*), che lo raccomandava come strumento per la pianificazione territoriale, per la predizioni dei raccolti su larga scala, la valutazione dell'impatto ambientale delle attività agricole, e la valutazione del potenziale produttivo delle varie colture. Normalmente, le zonazioni agro-ecologiche sono costruite sulla base di criteri pedo-climatici tuttavia, la produzione agricola è influenzata da molteplici fattori, relativi sia all'ambiente che alle pratiche agronomiche. Di conseguenza, anche l'inclusione di informazioni sul land cover, ed in particolare sulle colture più diffuse sul territorio, può apportare un miglioramento al significato della zonazione, mentre, rovesciando il problema, la zonazione è un valido supporto nell'identificazione delle possibili specie agricole presenti in un territorio attraverso mezzi di telerilevamento.

Il sistema prevede la rappresentazione del territorio in distinti strati di informazione spaziale ed una conseguente integrazione a mezzo di sistemi informativi geografici. Tali intersezioni si aggiungono alle informazioni topografiche, amministrative, fisiografiche, geologiche, pedografiche, climatiche e di suolo; tali rappresentazioni possono essere condotte a differenti scale geografiche (Fig. 4.1) a seconda della tipologia di impiego: per applicazioni in ambito agricolo vengono richieste scale di rappresentazione locale. I modelli elaborati possono allora essere impiegati per il calcolo dei periodi di crescita delle colture e per la stima dell'attitudine delle diverse colture ad aree di interesse di scala regionale o nazionale (*Antoine, 1994, Fischer et al., 2001*).

I paesi dell'Africa centro-orientale sono caratterizzati da un elevato grado di variabilità nella zonazione agro-ecologica, in funzione soprattutto della complessità topografica. Variazioni nella quota sono profondamente collegate con variazioni della temperatura e delle precipitazioni e, in un certo

grado, alla tipologia ed alla qualità dei suoli. Nell’ottica di ottimizzare la pianificazione delle risorse naturali, lo scopo della zonazione è di raggruppare aree che esprimano il medesimo potenziale agricolo e condividano le stesse limitazioni alla pianificazione ed allo sviluppo delle attività (FAO Report, 1978, Fisher et al. 2002).

Nello specifico vengono presi in considerazione i seguenti fattori:

- i. Natura e combinazione dei suoli;
- ii. Rilievi e caratteristiche climatiche;
- iii. Topografia;
- iv. Fenologia della vegetazione;
- v. Requisiti climatici delle coltivazione e pratiche agricole.

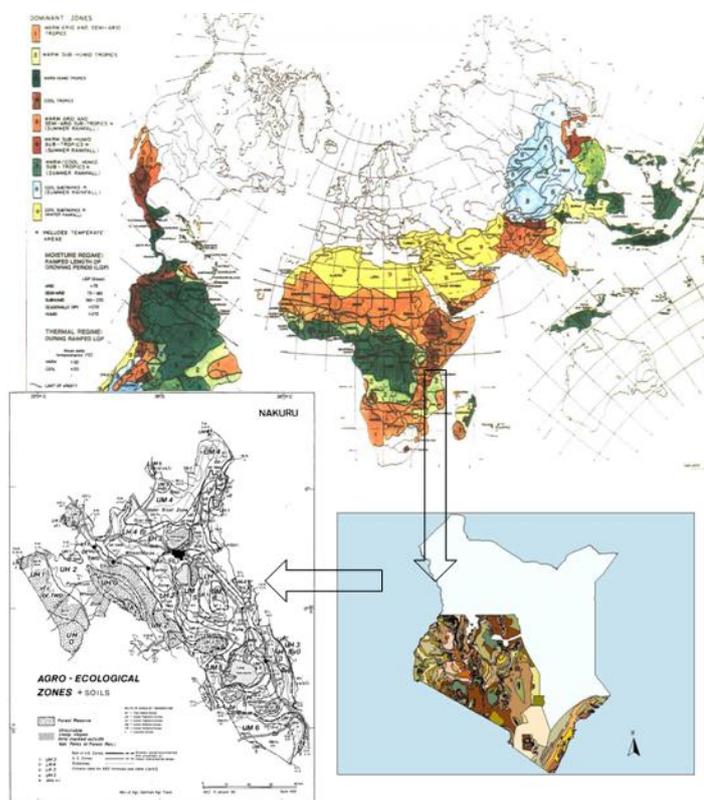


Fig. 4.1 Esempio di zonazione agro-ecologica, da scala globale, a scala locale (FAO/ISRIC)

4.2 Aree di studio

Il progetto SBAM è attivo su tutto il territorio del Kenya. Tuttavia le aree ad esclusivo interesse agricolo sono localizzate interamente nella regione della Great Rift Valley e nella zona costiera a Sud del Golfo di Mombasa. A scopo meramente divulgativo concentreremo la nostra attenzione esclusivamente nella Rift Valley, e più precisamente per tutte quelle province per cui dati di validazione a terra sono disponibili per operare una valutazione dei risultati di classificazione.

La Great Rift Valley è una grande fossa tettonica, ovvero una formazione geografica e geologica che si estende per circa 8000 km dal Nord della Siria al centro del Mozambico. Di questa formazione solo il ramo orientale si sviluppa in Kenya e Tanzania; ad esso è associata la montagna più alta d'Africa, il Kilimangiaro ed altri rilievi principali come il monte Kenya. I laghi del ramo orientale sono meno profondi rispetto a quelli del ramo occidentale e caratterizzati da un'alta concentrazione di sali minerali dovuta alle piogge, che trasportano i sali minerali dai vicini vulcani, ed alla forte evaporazione dell'acqua. Il lago Magadi, ad esempio, ha la sua superficie completamente coperta di soda cristallizzata, e i laghi Elmenteita, Baringo, Bogoria e Nakuru sono fortemente alcalini, mentre il Lago Naivasha ha una grande varietà biologica grazie alle sorgenti di acqua dolce che lo alimentano. Le aree che verranno analizzate sono di seguito brevemente descritte nelle loro caratteristiche salienti:

Provincia di Nakuru

La capitale e più grande cittadina è Nakuru che, insieme a Naivasha, rappresenta uno dei maggiori centri abitati nella regione con una popolazione di 1,603,325 abitanti (censimento 2009). Nei confini della provincia sono localizzati i laghi Nakuru e Naivasha, alcuni dei numerosi laghi ricchi di Soda della Rift Valley. L'area a disposizione per le coltivazioni alimentari è di circa 243,711.06 Ha mentre le coltivazioni a carattere economico (the, caffè, fiori, piretro, etc.) rappresentano 71,416.35 Ha coprendo in totale poco più di 3000 km². L'incremento delle aree agricole è dovuto a diversi fattori, fra cui la natura vulcanica del suolo, la presenza di precipitazioni affidabili, disponibilità di forza lavoro e mercati. Tuttavia una significativa parte della provincia è interessata da condizioni di aridità o semi-aridità che, combinate con i fenomeni di desertificazione od erosione del suolo, le rende inadatte alle coltivazioni. La temperatura media annuale è compresa tra i 10° C ed i 15° C mentre le precipitazioni annue sono comprese tra i 1200-1400 mm.

Provincia di Busia

Si tratta del distretto più occidentale del Kenya. La tipologia del suolo, caratterizzato da minimi livelli di fertilità, caratterizza la quasi totalità del distretto come a basso potenziale agricolo. La regione è tuttavia sfruttata per la coltivazione di specie cerealicole, canna da zucchero e cotone; la grande parte delle attività agricole sono volte all'agro-pastorizia di sussistenza, la regione caratterizzata inoltre da una elevata frammentazione delle aree coltivate. La temperatura media annuale è compresa tra i 21.0°C ed i 22.7°C, con elevati valori di umidità dovuti alla presenza del Lago Vittoria. Il potenziale di evapotraspirazione è di circa 800-2000 mm annuali.

Tali province sono state selezionate per rappresentare le due condizioni estremali di potenziale agricolo all'interno della Great Rift Valley del Kenya (escludendo ovvero le regioni desertiche del Centro-Nord).

4.3 Dati e materiale

4.3.1 Il dato satellitare

I sensori OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal InfraRed Sensor), imbarcati sul satellite Landsat 8, concorrono all'acquisizione di immagini digitali multi spettrali della superficie terrestre, incluse le aree costiere, le isole, e le calotte polari. Il sensore OLI opera nel campo del visibile, del vicino infrarosso e nella porzione dell'infrarosso ad onde corte. Le immagini multi spettrali prodotte sono caratterizzate da una risoluzione spaziale di 30m, mentre la risoluzione spaziale del canale pancromatico è di 15m. Lo swath dello strumento è di 185 km, fornendo ampie visioni panoramiche della superficie terrestre. L'intero pianeta viene osservato in 16 giorni (per via dell'orbita semi-polare del satellite), catturando 700 immagini del pianeta ogni giorno (con un notevole miglioramento rispetto alle 250 immagini acquisite dal satellite Landsat 7). Il sensore impiega uno scanner push broom (con oltre 7000 rilevatori per singola banda allineati lungo il piano focale), migliorando sensibilmente rispetto al suo predecessore (il sensore ETM+ impiegava uno scanner whisk broom) nella sensibilità dello strumento alla misura e riducendo il numero di parti e componenti in movimento durante il processo di acquisizione dell'immagine.

Il sensore OLI acquisisce in tutte le bande spettrali già appartenute al sensore ETM+ (Enhance Thematic Mapper plus) imbarcato sul satellite Landsat 7 (questo per garantire continuità nel flusso di dati e la costituzione di archivi storici delle misure scientifiche); l'ampiezza delle bande spettrali del nuovo sensore è stata raffinata per evitare il più possibile fenomeni di assorbimento atmosferico (riducendo così le condizioni di acquisizione del dato al di fuori delle finestre atmosferiche). La banda pancromatica del sensore è stata ristretta (escludendo il canale del NIR rispetto al suo predecessore) in maniera da mostrare un più evidente contrasto all'interno dell'immagine tra aree vegetate ed aree non vegetate. Infine abbiamo due nuove bande spettrali a nostra disposizione: una banda nel blu per l'osservazione delle acque in prossimità delle zone costiere, ed una banda nell'infrarosso che ricade intorno ad una lunghezza d'onda in cui si manifesta un forte assorbimento del vapore d'acqua, migliorando la capacità di rilevamento delle formazioni nuvolose alte (cirri e cirrostrati). Si può notare inoltre che la banda 5 (raffinata rispetto alla versione precedente) e la nuova banda 9 coincidono con due bande del sensore MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) imbarcato su entrambi i satelliti Terra ed Aqua, garantendo anche con questi continuità nel flusso dati (Knight et al., 2014).

In questo studio sono state impiegate dalle 22 alle 23 immagini OLI per anno su ogni singola area di studio. Le immagini sono state fornite dall'archivio dell'USGS in formato L1T, ovvero corrette sia geometricamente che per l'effetto del terreno, e successivamente convertite da valori digitali (Digital Number, DN) in valori riflettanza TOA (Top Of Atmosphere). Il periodo di copertura

interessa gli anni 2015-2016 e nello specifico parte da Gennaio 2015 (Day of Year – DOY 28) sino a Dicembre 2016 (DOY 364). Nessuna discriminazione è stata imposta su alcuna immagine in funzione della contaminazione dovuta alla presenza di copertura nuvolosa sulla scena.

4.3.2 Dati meteorologici e climatici

ERA-Interim è un sistema di analisi globale, aggiornato in tempo reale, dei dati climatici a partire dal 1979. Il sistema è caratterizzato da un'analisi 4Dvar in una finestra temporale di 12 ore, con una risoluzione spaziale di circa 80 km distribuita su 60 livelli di quota (dalla superficie sino a 0,1 hPa). I dati climatici forniti sono disponibili presso lo ECMWF Public Datasets web interface (Berrisford et al., 2009, Balsamo et al., 2015). Per la reazione del modello atmosferico sono stati impiegati gli archivi messi disposizione per gli anni 2015-2016, dalla quota di 1000 mbar sino alla quota di 100 mbar, delle seguenti grandezze:

- i. Geopotenziale terrestre;
- ii. Umidità relativa;
- iii. Temperatura;
- iv. Componente orizzontale delle velocità

4.3.3 Dati del suolo

I dati relativi alla descrizione del top-soil (ovvero la composizione del suolo sino ad una profondità di 20 cm) sono stati importati attraverso i database KENSOTER (liberamente scaricabile al seguente link <http://www.isric.org/projects/soil-and-terrain-soter-database-programme>) e SOTWIS. Il programma SOTER (SOil and TERRain) fu attivato nel 1986 per interesse della FAO, dell'UNEP (United Nations Environmental Programme) e dell'ISRIC (International Soil Reference and Information Center). Lo scopo del programma era quello di fornire un database SOTER a livello globale in scala 1:1 milione che avrebbe dovuto sostituire il database SMW (Soil Map of the World) precedentemente sviluppato da una collaborazione FAO-UNESCO. Il database SOTER a copertura globale non fu mai portato a termine, ma archivi SOTER furono comunque rilasciati per singole regioni, paesi o continenti: l'archivio KENSOTER è la declinazione del database SOTER per il Kenya. L'eventuale mancanza di dati in tale database è stata colmata attraverso l'integrazione con il database WISE (il quale originariamente armonizzava i profili dei suoli con informazioni geografiche estratte dal database SMW), dando vita al database SOTWIS (FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009).

4.3.4 Zonazione agro-ecologica e fenologia

I dati relativi alla zonazione agro-ecologica sono stati forniti dall' Farm Management Handbook of Kenya (FMHK), Vol. II, Part A-B-C (Jaetzold et al., 1983), e dagli archivi ISRIC (Batjes,

2002). La zonazione impiegata rispecchia la metodologia ed i criteri di suddivisione già adottati dalla FAO (FAO 1978-81, FAO/IIASA/UNFPA, 1982). I calendari fenologici sono stati estratti dall'FMHK ed integrati con i crop calendar distribuiti dalla FAO.

Il DEMs (Digital Elevation Model) 90m SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) distribuito dall'USGS è stato impiegato come modello di elevazione digitale del terreno (Farr et al., 2007).

4.4 Il processo di classificazione

4.4.1 Trattamento del dato satellitare

La fase di pre-processamento del dato satellitare è intesa a preparare il dato per il suo effettivo utilizzo nell'ambito delle diverse discipline di studio ed analisi. Il sistema di pre-processamento del è stato completamente automatizzato impiegando uno script IDL. In Fig. 4.2 è proposto lo schema di lavoro del trattamento del dato satellitare. Il processamento si articola nei seguenti punti:

- i. Pre-processamento. Ogni immagine acquisita viene immediatamente convertita, dai valori in numeri digitali con cui è registrata, a valori di riflettenza TOA secondo la relazione:

$$R_{toa} = DN * Gain + Bias$$

- ii. Dove i valori di Gain e Bias vengono estratti dal metafile che accompagna l'immagine. Statistiche preliminari sono volte a stabilire la percentuale di pixel inutilizzabile e la percentuale di pixel affetti da copertura nuvolosa; nessuna immagine viene ad ogni modo esclusa dalle fasi di elaborazione successiva e tali percentuali rimangono un dato meramente descrittivo;
- iii. Pan-sharpening e calcolo dell'indice NDVI. Per adeguare il prodotto agli standard di risoluzione spaziale richiesti per condurre attività di monitoraggio delle aree agricole, si procede all'applicazione di una tecnica di pan-sharpening (v. § 4.4.2) dedicata alle bande 4-5, ovvero i canali corrispondenti al rosso (RED) ed al vicino infrarosso (NIR). A seguito di questa operazione viene computato l'indice NDVI (v. § 4.4.3);
- iv. Creazione degli archivi multi-temporali. Il risultato conseguito sino ad ora consiste in una serie di immagini ad una risoluzione spaziale di 15m, rappresentative dell'indice NDVI sulla scena osservata; il passo successivo è quello di organizzare tali immagini in un archivio multi temporale, ovvero, attraverso l'impiego della tecnica del layer stacking esclusivo, ottenere una nuova pseudo-immagine in cui ogni banda corrisponde ad una immagine Landsat 8;
- v. Estrazione delle informazioni fenologiche. L'archivio multi-temporale appena creato fornisce una proiezione storica dell'indice NDVI sulla scena in esame. Prima di procedere all'estrazione dei profili fenologici è necessario tuttavia valutare l'eventuale

presenza di copertura nuvolosa per ogni singolo pixel, e correggere adeguatamente la contaminazione affinché non ne risulti significativamente alterata la caratteristica fenologica (v. § 4.4.4); Il dato così approntato è reso disponibile al processo di classificazione;

- vi. Regole decisionali. Sia in fase preliminare di analisi, che contestualmente alle operazioni sin qui svolte, è necessario creare un modello interdisciplinare dell'area di studio, che renda possibile definire le regole decisionale che guideranno il processo di classificazione vero e proprio, attraverso un algoritmo ad albero decisionale multi variato (multi variate decision tree, MDT), nella discriminazione e separazione per classi dei profili fenologici fin qui ricavati (v. § 4.4.5). Le informazioni necessarie a costituire tali regole ricadono in due categorie principali: le informazioni relative alla definizione delle aree agro-ecologiche in cui si andrà ad operare, e le informazioni relative alla definizione dei calendari agricoli di riferimento specifici per ogni AEZ.
- vii. Classificazione. Il processo viene condotto impiegando un albero decisionale multi variato (v. § 4.4.6). Le regole sono impostate per gestire un approccio fenologico multi-temporale, e vanno ad operare una discriminazione per classi di copertura successive, riconoscendo prima di tutto l'eventuale presenza di un andamento di tipo fenologico all'interno del pixel in esame, per poi successivamente operare una più accurata discriminazione sino ad arrivare ad assegnare una classe semantica.

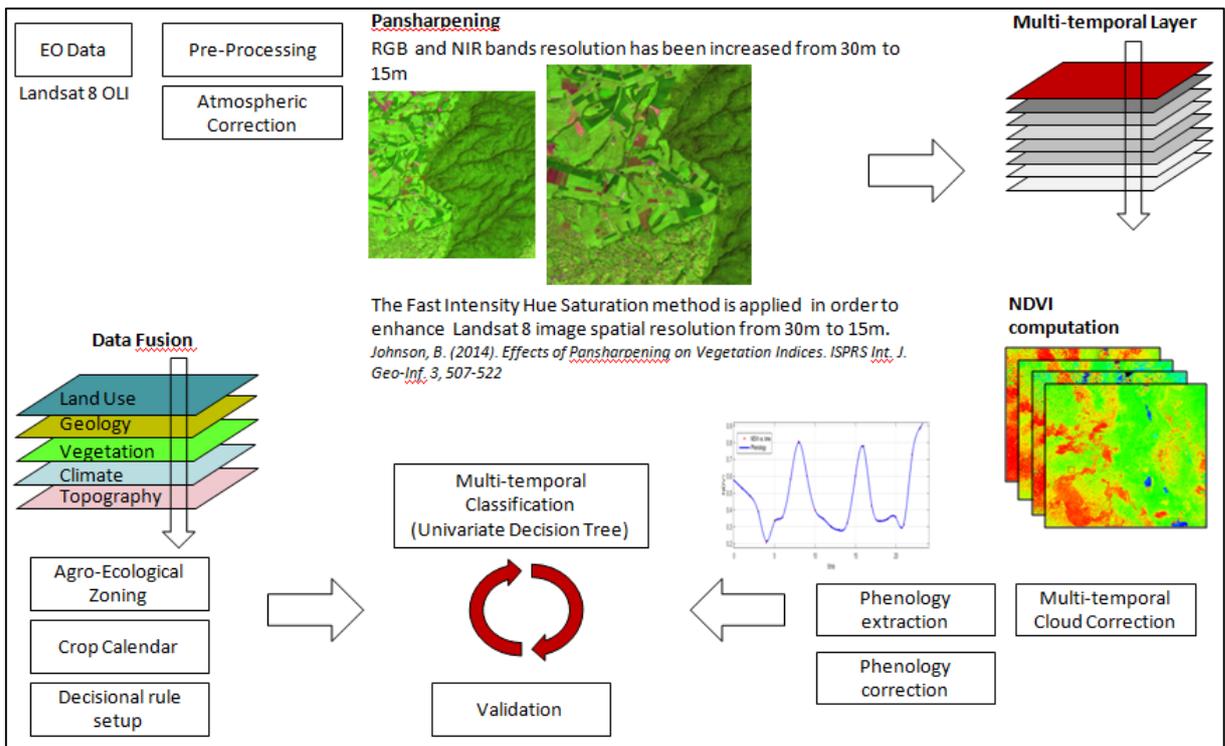


Fig. 4.2 Trattamento del dato satellitare, a partire dal pre-processamento sino alla procedura di classificazione; in basso a sinistra è visibile la separata elaborazione dei dati ancillari in supporto del processo di classificazione

4.4.2 Pan-sharpening

Le immagini così trattate si presentano ad una risoluzione di 30m, decisamente insufficiente per studi sulla vegetazione agricola, specialmente nelle regioni dell'Africa centro-orientale fortemente caratterizzate, da una miriade di appezzamenti di terreno e fattorie di piccole e medie dimensioni. Il tessuto delle aree agricole risulta essere frammentato ed irregolare, e a questo è necessario aggiungere l'elevata variabilità delle coltivazioni e dei suoli.

Per questo motivo si rende necessaria l'applicazione di una tecnica per il miglioramento della risoluzione spaziale, ovvero sottoponiamo l'immagine ad una procedura di pansharpening.

La fusione delle immagini, detta anche pan-sharpening, è una tecnica che permette di integrare il dettaglio geometrico dell'alta risoluzione delle immagini pancromatiche con le informazioni spettrali derivanti dalle immagini multi spettrali delle bande ad inferiore risoluzione (*Wald, 2002*). In questo modo è possibile creare un'immagine ad alta risoluzione partendo da tre o più bande multispettrali a bassa risoluzione. Questa tecnica trova a declinarsi in un elevato numero di algoritmi, tra cui, i più comuni, possono essere considerati come varianti della procedura che opera per sostituzione dei componenti; nella sua forma più generale tale tecnica si articola sui seguenti punti (Fig. 4.3):

- i. Up-sampling: le bande a bassa risoluzione vengono portate alla risoluzione della banda pancromatica impiegando tecniche di ricampionamento;
- ii. Allineamento: tutte le immagini vengono allineate per ridurre errori di registrazione (operando con immagini provenienti dallo stesso sensore tale passo non è necessario);
- iii. Forward transform: le bande portate alla risoluzione maggiore sono trasformate in un nuovo spazio dei colori dove l'intensità è ortogonale al colore;
- iv. Intensity matching: nello spazio trasformato l'intensità dei colori delle immagini ricampionate viene portata a coincidere con quella dei colori pancromatici;
- v. Component substitution: l'immagine pancromatica viene direttamente sostituita;
- vi. Reverse transform: la trasformazione inversa viene operata coinvolgendo le nuove componenti di intensità, si torna nello spazio dei colori originale.

Alcune delle più impiegate tecniche che operano per sostituzione dei componenti sono la HSI (Hue-Saturation-Intensity) e la YCbCr. Tuttavia questa procedura può produrre delle distorsioni spettrali per via delle caratteristiche della banda pancromatica. La banda pancromatica del sensore ETM+ (Landsat 7) differisce sensibilmente da quella del sensore OLI (Landsat 8), quest'ultima non contenendo la banda NIR. Tenendo conto che in linea teorica la tecnica di pansharpening può essere applicata solo per le bande multi spettrali effettivamente presenti nell'immagine pancromatica, questa mancanza rappresenta una grave limitazione, specialmente per gli ambiti operativi relativi allo studio ed al monitoraggio della vegetazione.

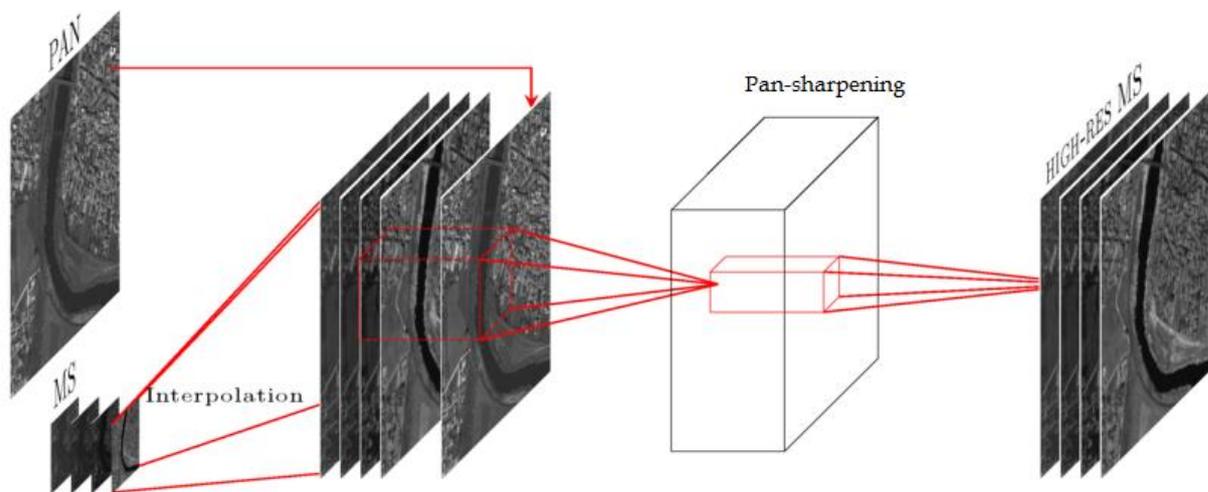


Fig. 4.3 Schema esemplificativo delle trasformazioni che si susseguono in un tipico processo di Pan-sharpening

Al fine di incrementare la risoluzione spaziale delle bande di lavoro da 30m a 15m, si è applicata la tecnica FIHS (Fast Intensity-Hue-Saturation) così come proposta da Johnson nel 2014, tecnica specificamente realizzata per le immagini Landsat 8 con l'esplicito proposito di coinvolgere nella procedura di pan-sharpening anche la banda NIR (Johnson, 2014, Johnson et al., 2014).

L'algoritmo FIHS è ben noto per la sua velocità di esecuzione, la semplicità di implementazione e l'elevato grado di miglioramento spaziale. Tale algoritmo può essere rappresentato nella forma:

$$MS_{high} = MS_{low} + \delta$$

Dove MS_{high} sono le bande multispettrali a seguito dell'applicazione dell'algoritmo, mentre MS_{low} sono le bande multi spettrali originali, infine $\delta = (PAN - I)$, e I è l'immagine di intensità e PAN l'immagine pancromatica. L'immagine di intensità I è intesa come la simulazione di un'immagine pancromatica alla risoluzione spaziale originale delle bande multi spettrali. I dettagli spaziali dall'immagine pancromatica sono ottenuti sottraendo l'immagine di bassa risoluzione I all'immagine di alta risoluzione PAN. A questo punto tali dettagli spaziali vengono direttamente applicati alle immagini multispettrali ricampionate alla risoluzione pancromatica.

L'immagine di intensità viene calcolata impiegando le bande multi spettrali di bassa risoluzione, operazione questa che può comportare delle distorsioni spettrali dovute alla differenza fra gli intervalli spettrali coperti dalle bande di bassa risoluzione rispetto all'intervallo spettrale coperto dall'immagine PAN. Se il disallineamento delle coperture spettrali incrementa la differenza fra PAN ed I , allora troppe informazioni e senza alcuna necessità vengono trasmesse dalla PAN alle bande multi spettrali; viceversa troppi pochi dettagli vengono impiegati nella procedura di interpolazione. Un approccio molto comune nel ridurre le eventuali distorsioni spettrali consiste nel pesare le bande

multispettrali impiegate nel calcolo dell'immagine di intensità. Sebbene nelle applicazioni più tradizionali, laddove le bande ricampionate sono comprese nell'intervallo spettrale associato all'immagine pancromatica, detti pesi assumano egual valore, studi passati dimostrano che la calibrazione di tali pesi, attraverso prove empiriche [23] o tecniche di regressione multi variabile [29], può ridurre sensibilmente anche la minima (e comunque sempre presente) forma di distorsione del dato senza sostanziale perdita di informazione spaziale.

Bisogna inoltre notare che la tecnica FIHS è una tecnica additiva e non moltiplicativa, la qual cosa assume particolare importanza nell'ottica del successivo impiego delle bande che sono state sottoposte al trattamento. Analizziamo per esempio il caso del calcolo dell'indice NDVI impiegando bande su cui sia stata applicata prima una tecnica moltiplicativa e poi una tecnica additiva. Nel primo caso possiamo scrivere:

$$NDVI_{high} = \frac{NIR_{low} * \left(\frac{PAN}{I}\right) - RED_{low} * \left(\frac{PAN}{I}\right)}{NIR_{low} * \left(\frac{PAN}{I}\right) + RED_{low} * \left(\frac{PAN}{I}\right)} = \frac{NIR_{low} - RED_{low}}{NIR_{low} + RED_{low}} = NDVI_{low}$$

Come si può vedere il termine (PAN/I) da cui dipende in questo caso l'incremento della risoluzione viene mutuamente eliso, il calcolo pertanto determina l'annullamento della procedura di pan-sharpening previamente applicata, tornando a calcolare un'immagine NDVI di bassa risoluzione. Nel caso di tecniche additive, quale la FIHS, il calcolo può essere svolto nella seguente forma:

$$NDVI_{high} = \frac{(NIR_{low} + \delta) - (RED_{low} + \delta)}{(NIR_{low} * \delta) + (RED_{low} * \delta)} = \frac{NIR_{low} - RED_{low}}{NIR_{low} + RED_{low} + 2\delta}$$

In questo caso il termine da cui il miglioramento spaziale dipende si conserva. Bisogna tuttavia notare che in questo caso il grado di miglioramento spaziale dipende dalla differenza tra canali NIR e RED; laddove $NIR_{low} = RED_{low}$ non preserviamo alcun miglioramento spaziale, il quale pertanto risulterà più elevato sulle aree vegetate, laddove questa differenza in particolare modo si esprime.

Applicando questa tecnica al caso delle immagini Landsat 8 è necessario impiegare le bande 2,3,4 (coperte dall'immagine PAN) al fine di calcolare l'immagine di intensità I. Una opportuna scelta dei pesi nel calcolo di I (Johnson, 2014) ha consentito di estendere l'applicazione dell'algorithmo anche alla banda 5 (NIR). Abbiamo dunque:

$$I = (Band\ 2_{low} * 0.08) + (Band\ 3_{low} * 0.54) + (Band\ 4_{low} * 0.38)$$

$$Band\ 4_{high} = Band\ 4_{low} + (PAN - I)$$

$$Band\ 5_{high} = Band\ 5_{low} + (PAN - I)$$

dove la Band 4 = RED e Band 5 = NIR. In generale bisogna sempre considerare che computazioni successive, come il calcolo dei VI, risultano sempre in una perdita, seppur menoma e contenuta, del miglioramento spaziale che le tecniche di pan-sharpening introducono. Per questo motivo il calcolo degli indici di vegetazione è sempre consigliabile svolgerlo in seguito all'applicazione del pan-sharpening, specialmente se si è indirizzati verso applicazioni di monitoraggio delle aree agricole od altre simili, piccole, porzioni aree vegetate (*Johnson et al., 2014*).

4.4.3 Calcolo dell'indice NDVI

Gli indici di vegetazione derivati da immagini satellitari sono ben correlati con i parametri che definiscono lo stato della vegetazione e delle colture. Per quasi quattro decenni l'indice NDVI è stato uno dei più robusti ed ampiamente utilizzati strumento di monitoraggio; impiegato attraverso una ampia varietà di sensori satellitari, oggi costituisce un significativo archivio storico della condizione della vegetazione a livello globale.

Dati NDVI ad elevata frequenza temporale sono stati impiegati per lo studio e la registrazione della fenologia della vegetazione su un'ampia varietà di ecosistemi impiegando i sensori AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, NOAA), (*Justice and Hiernaux, 1983; Justice and Townshead, 1985; Justice and Holbern, 1986; Vrieling and de Beurs, 2011*) e MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer, NASA), (*Fisher, 2007; Hmimina, 2011*). La risoluzione spaziale offerta da questi sensori è tuttavia inadeguata per studi volti alla discriminazione delle varietà vegetali agricole; i dati MODIS sono disponibili ad una risoluzione di 250-500 m ed 1 km in funzione dello specifico prodotto (*Justice et al., 1998*); i dati AVHRR invece sono disponibili nella risoluzione locale di 1.1 km e ad una risoluzione spaziale di 4.4 km globalmente (*Kidwell, 1998*). Dati satellitari a maggiore risoluzione spaziale, come i dati Landsat forniti dal sensore TM (Thematic Mapper) ad una risoluzione di 30 m, sono stati comunque impiegati in studi inerenti la vegetazione agricola (*Rudolf and Batista, 1991; Thenkabail et al., 1994*); tuttavia essendo inferiore la frequenza di rivisitazione della scena (16 giorni), si potrebbe manifestare una difficoltà nell'ottenere dati nei momenti critici dello sviluppo fenologico della vegetazione. Recenti studi hanno fuso i prodotti ad alta risoluzione spaziale derivati dai sensori Landsat, con i prodotti ad elevata frequenza di rivisitazione derivati dai sensori MODIS ed AVHRR (*Becker-Reshef et al., 2010; Mkhabela et al., 2011*).

In questo studio tenteremo di ricostruire il profilo fenologico della vegetazione impiegando i soli dati forniti dal sensore OLI Landsat 8, rinunciando pertanto all'elevata frequenza di rivisitazione dei sensori AVHRR e MODIS, in favore della migliore risoluzione spaziale. Successivamente alla fase di pre-processamento del dato avviene il computo dell'indice NDVI, secondo la ben nota relazione:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$

Si può vedere dalla sua definizione matematica, che l'NDVI di un'area contenente una fitta vegetazione tenderà a dare valori positivi (0,3-0,8) mentre nel caso di nuvole e di neve sarà caratterizzato da valori negativi. Altri obiettivi visibili dallo spazio sulla terra sono: acque ferme (ad

esempio, oceani, mari, laghi e fiumi) che hanno una riflettanza piuttosto bassa in entrambe le bande spettrali (perlomeno lontano dalle coste) e quindi portano a valori positivi o addirittura leggermente negativi di NDVI; terreni che in genere mostrano una riflettanza spettrale nel vicino infrarosso un po' più grande rispetto al rosso, e quindi tendono a generare valori positivi anche piuttosto piccoli NDVI (ovvero 0,1-0,2).

Oltre alla semplicità dell'algoritmo e la sua capacità di distinguere sostanzialmente aree vegetate da altri tipi di superficie, l'NDVI ha anche il vantaggio di comprimere la dimensione dei dati che devono essere compressi di un fattore 2 (o più), dal momento che sostituisce due bande spettrali in una singola (eventualmente codificando su 8 bit invece dei 10 o più bit dei dati originali). Dal punto di vista dell'impiego (sia qualitativo che quantitativo) del dato bisogna tenere presente che questo indice risulta essere sensibile ad una serie di fattori quali:

- i. Effetti atmosferici: la reale composizione dell'atmosfera (in particolare per quanto riguarda il vapore acqueo e l'aerosol);
- ii. Nuvole: nuvole profonde (otticamente spesse) possono essere molto evidenti nelle immagini satellitari e producono caratteristici valori di NDVI che facilitano il loro discernimento. Tuttavia, nubi sottili (ad esempio gli onnipresenti cirri) oppure nuvole piccole dimensioni (con un diametro minore della superficie effettivamente campionata dal sensore) possono contaminare significativamente le misurazioni. Allo stesso modo, le ombre delle nubi in zone che non appaiono chiare possono influire i valori NDVI e portare a errate interpretazioni;
- iii. Effetti del suolo: terreni tendono a scurirsi quando sono bagnati, e quindi la loro riflettanza diviene una funzione diretta del contenuto d'acqua, l'NDVI di una zona può apparire cambiato a seguito di variazioni di umidità del suolo (precipitazioni o evaporazioni) e non a causa dei cambiamenti della vegetazione;
- iv. Effetti anisotropi: tutte le superfici (naturali o artificiali) riflettono la luce in modo diverso in direzioni diverse, e questa forma di anisotropia è di solito spettralmente dipendente, anche se la tendenza generale può essere simile in queste due bande spettrali. Come risultato, il valore di NDVI può dipendere dalla anisotropia particolare del bersaglio e dalla geometria angolare dell'illuminazione e dell'osservazione al momento delle misurazioni, e quindi dalla posizione del bersaglio di interesse all'interno della fascia dello strumento o il tempo di passaggio del satellite sul sito;
- v. Effetti spettrali: dal momento che ogni sensore ha le proprie caratteristiche e prestazioni, in particolare per quanto riguarda la posizione, la larghezza e la forma delle bande spettrali, una formula unica come NDVI produce risultati diversi quando applicato alle misure acquisite da strumenti diversi.

4.4.4 Correzione ed estrazione del profilo fenologico

La serie di immagini NDVI raccolta su un determinato periodo temporale di interesse, viene organizzata in un layer multi-temporale: ogni banda della pseudo-immagine che si viene a creare è quindi collegata ad una immagine NDVI in una specifica data. In questo modo siamo in grado di produrre una proiezione storica dell'indice NDVI per ogni pixel, che corrisponde esattamente al profilo fenologico nel periodo di riferimento (Fig. 4.4). Ogni pixel diviene un sito specifico di analisi, e la fenologia ad esso associata consente di discriminare le differenti specie vegetali, se presenti, e l'andamento stagionale della biomassa (*Suepa et al., 2016*).

Sia la fase di estrazione dei profili fenologici che il successivo processo di classificazione sono condotti a livello di singolo pixel. Nessun processo di segmentazione viene applicato all'immagine, i poligoni che si determineranno al termine del processo di classificazione saranno frutto della collezione e del raggruppamento di profili fenologici simili. Prima che le informazioni estratte dalla fenologia possano essere valutate dalle regole decisionali nell'ambito del processo di classificazione, è necessario che esse vengano vagliate ed eventualmente corrette da possibili alterazioni dovute alla presenza di copertura nuvolosa. L'algoritmo di correzione è stato implementato in linguaggio IDL, ed opera il recupero delle informazioni perdute nei pixel contaminati prendendo in considerazione i valori dell'indice NDVI non contaminati prossimi al pixel in esame.

La presenza della copertura nuvolosa per immagini Landsat 8 può essere determinata impiegando la banda BQA (Band Quality Assessment), (*Kong et al., 2013*). Ogni pixel in questa banda esprime attraverso un numero intero una combinazione di condizioni inerenti la superficie, l'atmosfera ed il sensore, che potrebbero compromettere l'utilità dell'informazione radiometrica contenuta nel pixel dato. Lo scopo è quello di testimoniare circa l'integrità della scena osservata, indicando quali pixel potrebbero essere affetti da alterazioni dovute alla strumentazione, alla contaminazione atmosferica (presenza di nuvole per esempio) oppure di particolari condizioni della superficie (come la presenza di neve o ghiaccio). In uno studio inerente o basato sulla fenologia in particolare, la presenza di coperture nuvolose può alterare le caratteristiche della crescita stagionale della vegetazione. In presenza di copertura nuvolosa il valore dell'indice NDVI precipita, raggiungendo valori prossimi allo zero; la riduzione dell'indice della vegetazione potrebbe essere scambiato come un indicatore del cambiamento ambientale.

La banda BQA consente di individuare per ogni data dell'archivio multi-temporale la posizione dei pixel contaminati. Per ogni pixel individuato si provvede a richiamare i valori NDVI dello stesso pixel nelle date immediatamente precedenti e successive. Qualora il pixel risultasse contaminato anche in una od in entrambe le dette date, si procederebbe con un ulteriore passo temporale. Se il primo salto corrispondeva a richiamare l'indice NDVI a distanza di 16 giorni, con il secondo salto temporale ci allontaniamo dalla data oggetto di studio di 32 giorni; insistere ulteriormente nel caso persista la contaminazione non può essere giustificato nell'ambito di uno studio sulle dinamiche della vegetazione: nel caso la perdita dell'informazione interessi un intervallo

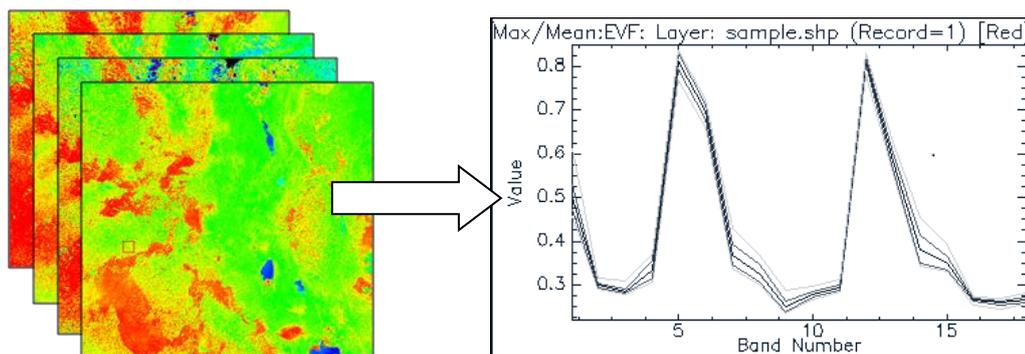


Fig. 4.4 Estrazione del profilo fenologico da una layer multi-temporale di indici NDVI

temporale così esteso il pixel assume lo stesso valore, pari all'ultimo valore noto dell'NDVI. Nel caso sia possibile recuperare valori dell'indice NDVI nell'arco temporale di un mese è possibile procedere alla correzione.

L'algoritmo di correzione agisce sostituendo il pixel contaminato con una media pesata dei valori NDVI recuperati. In questa procedura i pesi vengono selezionati tenendo conto di due fattori:

- i. La prossimità. Viene assegnato un peso maggiore ai valori NDVI temporalmente più vicini al pixel contaminato;
- ii. Precedenti correzioni. Nel tornare indietro alla ricerca di pixel non contaminati, talvolta è possibile imbattersi in pixel già corretti: nel confronto diretto viene assegnato un peso maggiore ai pixel non corretti.

Una volta recuperati i dati contaminati si procede alla ricostruzione della funzione impiegando l'interpolazione spline. Si tratta di un metodo di interpolazione basato sull'impiego di funzioni spline. A differenza dell'interpolazione polinomiale, che utilizza un unico polinomio per approssimare la funzione su tutto l'intervallo di definizione, l'interpolazione spline è ottenuta suddividendo l'intervallo in più sotto-intervalli ($I_k=[x_k, x_{k+1}]$ con $k=1, \dots, N-1$) e scegliendo per ciascuno di essi un polinomio di grado d (di solito piccolo). Polinomi consecutivi vengono saldati imponendo il rispetto della condizione di continuità sulle prime $d-1$ derivate. Nel caso particolare si impieghi un polinomio di grado 1 su ogni sotto-intervallo si ritorna al caso dell'interpolazione lineare.

La funzione interpolante ottenuta con la interpolazione spline è più *liscia* di quelle ottenute con altri metodi (ad esempio con l'interpolazione polinomiale), nel senso che è la funzione interpolante con *curvatura media minima*. Inoltre, l'interpolante spline risulta più facile da valutare dei polinomi di grado elevato richiesti dalla interpolazione polinomiale e non soffre del fenomeno di Runge. Tuttavia, se i dati da interpolare hanno conformazioni particolari (ad esempio formano dei gradini), la spline interpolante può essere soggetta al fenomeno di Gibbs, ampie oscillazioni in vicinanza di un gradino.

Per ovviare a questo problema vengono utilizzate le *smoothing spline* o le *tension spline*. L'utilizzo dell'interpolazione spline genera una funzione che passa esattamente attraverso i punti

sperimentali, ma che ha curvatura minima e per questo viene spesso chiamata "curva smooth" o "smoothing". Però, sempre nello stesso ambito, sono molto utilizzate anche le *smoothing spline*, spline a cui non viene imposto di interpolare i dati ma di minimizzare una combinazione lineare tra curvatura e distanza dai dati. In Fig. 4.5 è possibile osservare un profilo fenologico bi-stagionale, ricostruito su di un sito campione nella provincia di Nakuru per l'anno 2015.

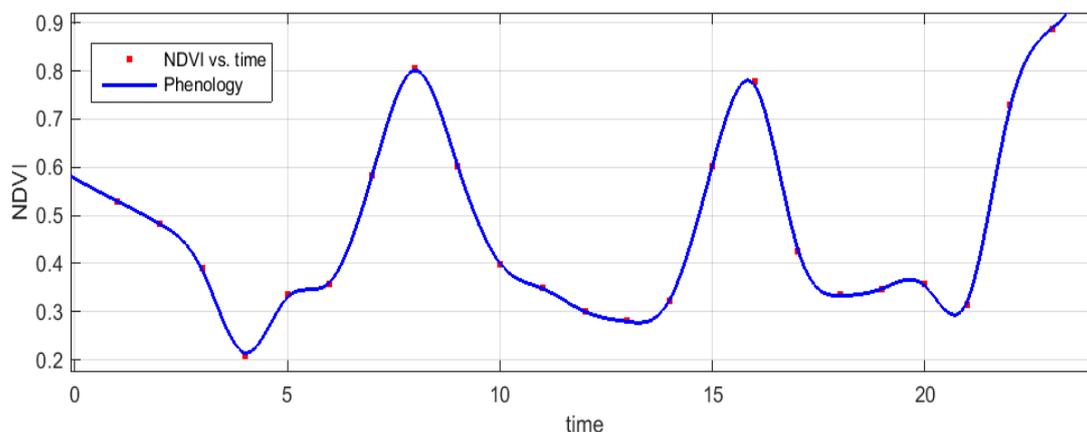


Fig. 4.5 Ricostruzione del profilo fenologico su un sito campione attraverso la tecnica *smoothing spline*

Un profilo fenologico mostra la crescita e lo sviluppo della vegetazione nel corso dell'anno. Riconoscere una specie vegetale vuol dire riconoscere gli attributi peculiari che caratterizzano il suo sviluppo. Rispetto agli stadi caratteristici della fenologia vegetale precedentemente presentati (v. § 4.1.2) le fasi salienti che possono essere estratte dal dato satellitare sono (Zhang *et al.*, 2002) e visibili in Fig. 4.6 su di un profilo fenologico ricostruito:

- i. Start of Season (SOS). Questo è il periodo immediatamente successivo alla semina in cui la vegetazione è caratterizzata da una più o meno rapida fase di crescita;
- ii. Maturation Peak (MP1). Rappresenta il picco della biomassa vegetale espressa durante lo sviluppo;
- iii. Maturation Plateau (MP2). Ovvero il periodo per il quale viene conservata la condizione di maturazione;
- iv. End of Season (EOS). Ovvero l'inizio della fase di senescenza della vegetazione;
- v. Length of Season (LOS). L'estensione temporale dell'intero ciclo (coincide con la differenza tra EOS e SOS).

La derivata prima viene impiegata alla ricerca dei suoi zeri, corrispondenti ai punti di minimo e massimo locale della funzione fenologica ricostruita (Fig. 4.6).

Vengono quindi cercati dei trend di crescita e decrescita nell'intorno di questi zeri tenendo conto che due minimi locali devono contenere almeno un massimo locale (ovvero il picco di

maturazione); i valori di minimo locale invece devono coincidere con valori dell'indice NDVI inferiori a 0.4, valore al di sotto del quale possiamo considerare il pixel come terreno scoperto (come accade immediatamente prima della semina e subito dopo il raccolto). Le date in cui cadono i valori di SOS, MP1 ed EOS, nonché l'ampiezza TD, i trend di crescita e particolari forme della funzione fenologica (come per esempio dei plateau intermedi) costituiscono l'insieme delle caratteristiche che verranno prese in considerazione dalle regole decisionali nell'operare il confronto con i profili fenologici di riferimento.

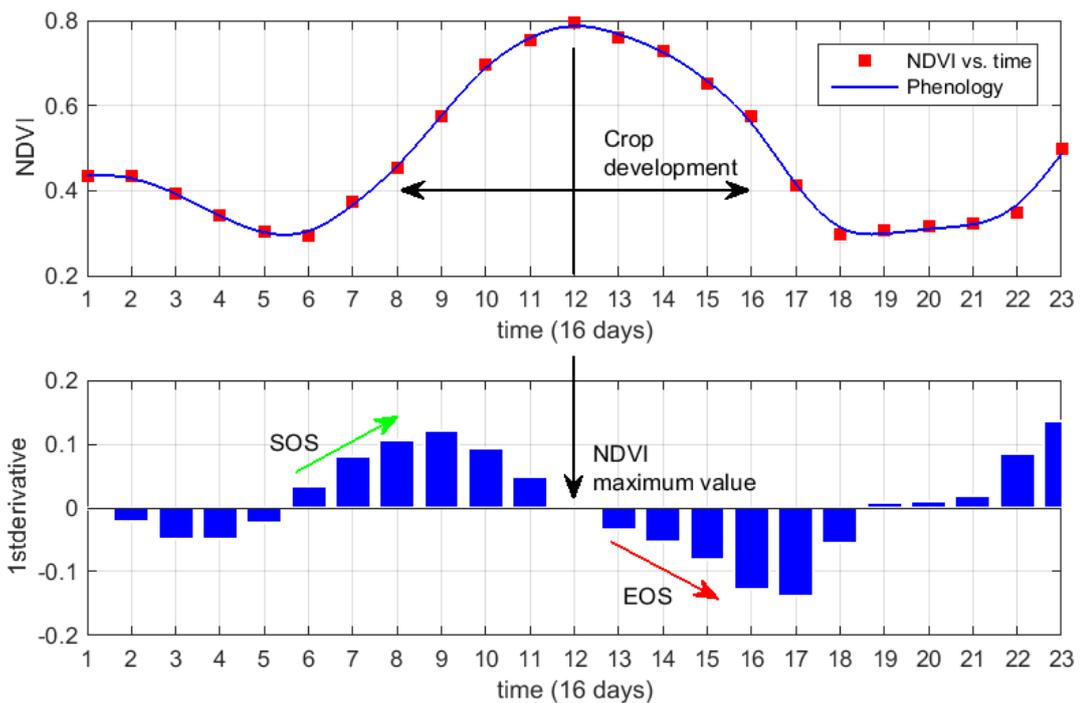


Fig. 4.6 Estrazione dei parametri caratteristici di un profilo fenologico per mezzo dell'analisi della sua derivata prima.

4.4.5 Regole decisionali

L'algoritmo di classificazione basato su albero decisionale necessita di regole in grado di guidare il processo di classificazione, in quello che di fatto risulta essere un approccio supervisionato basato sulla conoscenza del problema. Ogni albero decisionale può essere linearizzato in una serie di regole decisionali, a loro volta generate da una serie di regole associazionali che esprimano relazioni temporali o causali (Quinlan, 1987).

Il primo obiettivo è quello di produrre una macro-classificazione delle coperture a terra presenti nella scena in esame; successivamente fornire una classificazione delle aree agricole operando la discriminazione, il più possibile dettagliata, fra le diverse colture. Le regole decisionali dovranno essere in grado di realizzare tali obiettivi. A fondamento di tali regole si è posta una solida conoscenza

delle aree oggetto di studio e dei tipi di vegetazione in esse presenti. La suddivisione dell'area di studio nelle zone agro-ecologiche è cruciale nel perseguire tale obiettivo.

Le aree agro-ecologiche, come già visto, esprimono, attraverso la compressione di informazioni climatiche, geologiche ed ambientali, il potenziale agricolo di una regione: attraverso le AEZ tali informazioni entrano nel processo di classificazione (Domac et al., 2006). Tenendo conto di fattori quali la composizione del suolo, le fasce termiche, l'umidità ed il livello delle precipitazioni, viene determinata la tipologia di coltivazioni più adatte per la regione, ovvero coltivazioni in grado di resistere a determinati fattori di stress garantendo livelli di produttività minima, piuttosto che aree particolarmente favorevoli alle specifiche colture che garantiranno elevati livelli di produttività; allo stesso modo le AEZ indicano le coltivazioni sconsigliate per una regione, poiché non garantiranno stabilità nella produzione inter-annuale, oppure non garantiranno livelli di produttività minima ed infine potranno essere soggette a criticità di ordine fito-patologico.

Introdurre Le AEZ vuol dire in primo luogo ridurre il numero di possibili coperture agricole nell'area in esame tenendo conto del potenziale agricolo associato alle singole coltivazioni per l'area di interesse. Tuttavia operare esclusione sulla sola base delle informazioni fornite dalle AEZ può risultare affrettato. Di fatto è necessario tenere conto anche della tradizione agricola e della cultura contadina che caratterizza le regioni in esame. Un esempio per tutti è la provincia di Kisumu: classificata come totalmente inadatta alla coltivazione della canna da zucchero dalla suddivisione agro-ecologica prodotta dalla FAO, risulta essere per tradizione la prima provincia del Kenya per la coltivazione e la raffinazione di questa specie agricola. Nel correggere le informazioni fornite dai modelli AEZ la conoscenza del territorio gioca un ruolo chiave e la consulenza di tecnici del KALRO (Kenyan Agriculture and Livestock Research Organization) nonché le interviste a coltivatori locali durante le campagne di terra, hanno consentito di sviluppare tale conoscenza. Le informazioni raccolte sul campo hanno dunque integrato, e laddove necessario corretto, la rappresentazione del territorio interamente basata sul modello teorico delle aree agro-ecologiche.

Una volta definito il potenziale agricolo, e per conseguenza il bacino delle possibili colture, per un territorio è necessario introdurre un modello di sviluppo temporale per le coltivazioni. Calendari fenologici prodotti dalla FAO sono stati impiegati in questo studio. Così come per le AEZ, anche tale calendari sono stati integrati e corretti sfruttando dati fenologici storici ed informazioni direttamente raccolte sul campo.

Se l'introduzione delle AEZ riduce il numero di specie vegetali agricole nell'area di interesse, i calendari fenologici consentono la loro discriminazione. Differenti specie agricole sono caratterizzate da differenti e specifici periodi di crescita e sviluppo all'interno di una particolare AEZ, nell'ambito del ciclo annuale (Pax-lenney et al., 1996). Da questa analisi siamo in grado di assegnare il numero di classi che il processo di classificazione dovrà individuare e le regole, basate sulla fenologia, che lo consentiranno. Seppur in linea di principio ad ogni AEZ sarà assegnato uno specifico set di regole,

tutte le AEZ condivideranno una radice comune, differenziandosi, quando necessario, solo nella discriminazione delle specie vegetali di interesse agricolo.

Alla radice comune dei vari DT è affidata la produzione della prima macro-classificazione. Attraverso un approccio multi-temporale basato sulla fenologia e la valutazione dei valori spettrali attraverso l'indice NDVI, sarà immediatamente possibile riconoscere ed isolare bacini idrici, terreni scoperti ed aree artificiali, nonché aree vegetate caratterizzate da valori dell'indice NDVI troppo bassi per giustificare la presenza di un'area agricola: tali aree verranno classificate come pascoli e praterie. Ciò che avanza a tale classificazione sono aree vegetate caratterizzate, in un qualunque momento dell'anno da elevati valori NDVI; il passo successivo provvede a riconoscere in queste aree la presenza di un qualunque ciclo fenologico, escludendo in questo modo le aree forestali ed isolando le aree agricole.

Conclusa la Macro-classificazione il set di regole, se necessario, si specializza con l'obiettivo di discriminare le differenti coltivazioni. Si deve tener conto ad ogni modo che, per determinate AEZ, la coesistenza di coltivazioni caratterizzate da fenologie sovrapponibili, può impedire di spingere la classificazione allo stesso livello di dettaglio che si può ottenere per altre AEZ.

4.4.6 Algoritmo di classificazione MDT

Un albero decisionale (*decision tree*, DT) prende in input un database descritto da un vettore di variabili ed emette in uscita una "decisione" del tipo yes/no. Ciascun nodo interno all'albero corrisponde ad un test sul valore di una delle proprietà e gli archi che partono da ciascun nodo sono etichettati con i possibili valori del relativo test. Ciascuna foglia specifica il valore booleano di output se si perviene a tale foglia.

Nel *data mining* un albero di decisione viene utilizzato per classificare le istanze di grandi quantità di dati (per questo viene anche chiamato albero di classificazione). In questo ambito un albero di decisione descrive una struttura ad albero dove i nodi foglia rappresentano le classificazioni e le ramificazioni l'insieme delle proprietà che portano a quelle classificazioni. Di conseguenza ogni nodo interno risulta essere una macro-classe costituita dall'unione delle classi associate ai suoi nodi figli. Nell'ambito del *data mining* gli algoritmi DT sono impiegati sia in problemi di classificazione che di regressione. La tecnica su cui si basano è flessibile e permette di adattarli a numerose situazioni (Brodely et al., 1995); inoltre il loro output è molto chiaro, dato che è rappresentato visivamente da una struttura ad albero, nel quale ogni nodo è caratterizzato da una regola (un predicato che determina la suddivisione del nodo in sotto-nodi, oppure nelle classi). Inoltre gli alberi decisionali offrono una serie di vantaggi rispetto ai più tradizionali algoritmi di classificazione: possono facilmente gestire dati in ingresso, che siano variabili numeriche piuttosto che categoriche, dati telerilevati piuttosto che ancillari (Lawrence and Wright, 2001; Brown de Colstoum et al., 2003), qualunque sia la loro distribuzione; non sono parametrici e possono gestire relazioni non lineari fra classi e caratteristiche (Friedl et al., 1997; Fayad et al., 1992; Li et al., 2015; Villa et al., 2015).

Il principale vantaggio degli alberi decisionali è la produzione di regole di classificazione e la loro facilità di interpretazione. Un altro vantaggio è la possibilità di utilizzare tale tecnica sia per la classificazione, sia per la regressione. Questa tipologia di algoritmi presenta due principali svantaggi: in primo luogo gli alberi decisionali spesso presentano una scarsa performance predittiva; inoltre di frequente presentano una elevata instabilità, che porta alla generazione di alberi anche molto diversi al variare anche minimo dei dati di input (in questo caso le tecniche di ensemble possono ovviare a questo problema, ma sempre a scapito della facilità di interpretazione del modello).

Gli alberi decisionali sono tecniche non parametriche che analizzano le dipendenze di una variabile target Y da un insieme di variabili esplicative X , adottando un processo di partizione di tipo gerarchico. Ogni gruppo di unità viene cioè ricorsivamente diviso in sottogruppi per selezionare, tra le variabili esplicative, quelle che maggiormente spiegano la variabilità della variabile target. Le unità statistiche vengono quindi suddivise, secondo una regola divisiva (o regola decisionale), in gruppi sempre più omogenei al loro interno (varianza minima internamente al gruppo) e disomogenei al loro esterno (varianza massima fra i gruppi) rispetto alla variabile target. Gli elementi che costituiscono un albero decisionale, visibili schematicamente in Fig. 4.7) sono (Brodley et al., 1992; Kamiński et al., 2017):

- i. i nodi, rappresentano i gruppi ai diversi livelli di segmentazione (i nodi genitori sono quelli la cui partizione determina la nascita di due o più sottogruppi detti figli);
- ii. i rami o archi, indicano le condizioni che hanno determinato le suddivisioni;
- iii. le foglie, si riferiscono ai nodi finali, per i quali non è ritenuta utile un'ulteriore segmentazione;

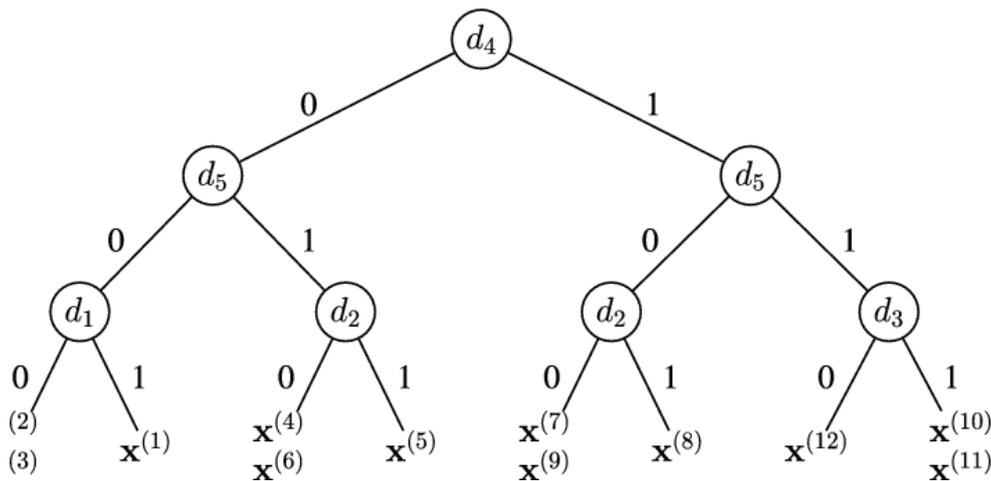


Fig. 4.7 Struttura generale di albero decisionale.

Un esempio operativo dell'applicazione di algoritmi DT al problema della classificazione è il Cropland Data Layer NASS-USDA (National Agricultural Statistics Service – United States

Department of Agriculture), prodotto di informazione geografica per la mappatura delle aree agricole negli Stati Uniti continentali (Boryan et al., 2011); Peña-Barragán et al. (2011) hanno combinato con successo le metodologie OBIA (Object Based Image Analysis) e DT per l'identificazione di 13 specie agricole coltivate nella contea di Yolo (California, USA) riportando un'accuratezza del 79%; Brown de Colstoun et al. (2003) hanno un approccio multitemporale basato su immagini ETM+ Landsat 7 ed algoritmo DT per mappare 11 categorie di Land Cover con un'accuratezza dell'89%; Vieira et al. (2012) hanno ancora combinato metodologie OBIA ed algoritmi DT per mappare le aree dedicate alla coltivazione della canna da zucchero in Brasile.

Per produrre la classificazione verrà impiegato un albero decisionale multivariato, ovvero in cui, almeno una parte delle regole decisionali ai nodi tengano in considerazione più caratteristiche del target. Tuttavia vi sono almeno due importanti vantaggi derivanti dall'impiego dei DT che non si vorrebbe correre il rischio di perdere applicando delle regole multivariate. In primo luogo, i test decisionali in un DT vengono effettuati sequenzialmente seguendo i rami dell'albero e solo i parametri che sono necessari al raggiungimento di una decisione dovrebbero essere valutati. In secondo luogo bisogna considerare che gli algoritmi DT hanno solitamente il vantaggio di offrire una chiara panoramica di uno schema decisionale: un algoritmo DT di dimensioni contenute con test elementari ad ogni nodo è immediatamente comprensibile ed interpretabile. Impiegando uno schema multivariato si deve tenere in considerazione che test elementari ai nodi determinano alberi di grandi dimensioni, al contrario regole decisionali articolate (e non immediatamente comprensibili) snelliscono la dimensione dell'albero (ed è proprio questo il caso multivariato).

La struttura dell'albero decisionale nell'ambito del data mining è determinata dal numero di classi individuabili all'interno del database e dal set di regole decisionale che permette di segmentare il database nelle classi precedentemente individuate. Solitamente vengono inseriti anche uno (o più) criteri di arresto, che dipendono dalla tipologia di problema in analisi e dalla natura dei dati in gioco, nonché dalla necessità o meno di suddividere l'intero database nelle classi predisposte. Nel processo di classificazione proposto in questo studio tutti i pixel vengono inseriti in classi copertura del suolo durante la fase di pre-classificazione, fase comune a tutti gli alberi decisionali messi in campo. Durante la successiva fase di discriminazione delle aree agricole a livello di specie vegetale invece, non richiede che tutti i pixel vengano necessariamente collocati nelle classi disponibili; dunque si accetta che un numero di pixel possa rimanere genericamente classificato come area agricola, garantendo la specificità e la precisione con cui gli altri pixel vengono classificati.

Analizziamo nel dettaglio un esempio di albero decisionale facendo riferimento ad un set di regole decisionali organizzato secondo quanto descritto in § 4.4.4; l'albero qui riportato ha guidato la classificazione della AEZ LH (1-5) della provincia di Nakuru per l'anno 2015 (Fig. 4.8).

- I. Sezione: questa sezione è condivisa da tutti gli alberi decisionali e provvede alla classificazione di tutte le aree caratterizzate da bassi valori dell'indice NDVI (< 0.6):

- a. Nodo 1: eliminazione del Background;
 - b. Nodo 2: riconoscimento ed eliminazione dei bacini idrici;
 - c. Nodo 3: vengono identificate ed isolate le aree vegetate con valori NDVI sufficientemente elevati da poter essere identificate come aree agricole. Le aree escluse al livello di questa regola decisionale vengono sottoposte ad ulteriore classificazione:
 - i. Nodo 4.1: classificazione delle rimanenti aree vegetate (steppa, prateria, etc.);
 - ii. Nodo 4.2: classificazione dei suoli nudi e degli edifici;
- II. Sezione: questa sezione è condivisa da tutti gli alberi decisionali e si occupa di identificare le generiche aree agricole e di classificare le rimanenti aree vegetate:
- a. Nodo 5: le aree isolate al nodo 3 vengono ora sottoposte a nuova analisi per riconoscere la presenza di una generica fenologia agricola. Tutte le aree escluse da questa regola decisionale verranno ulteriormente analizzate al nodo successivo, le aree sopravvissute passeranno alla sezione III per operare la discriminazione al livello di specie agricola;
 - b. Nodo 6.1 & 6.2: qui vengono analizzate le aree escluse dal nodo-5; nello specifico a questo livello vengono isolate le aree forestali (nella fattispecie foreste tropicali) ed aree vegetali caratterizzate da elevati valori di NDVI (almeno in una data durante l'anno) ma per le quali alcun tipo di sviluppo fenologico agricolo è ravvisabile.
- III. Sezione: questa sezione è specifica per ogni AEZ ed opera la discriminazione a livello di specie delle generiche aree agricole precedentemente identificate:
- a. Nodo 7-11: La discriminazione delle specie avviene individuando nella fenologia dei massimi locali nell'intervallo fra due minimi (corrispondenti alla preparazione del terreno alla semina ed alla fase di senescenza, raccolta e pulitura del terreno agricolo), e collocando tali punti di interesse nell'intorno di date suggerite dal calendario fenologico delle specie ad elevato potenziale per la specifica AEZ in esame.

La mappa LULC così creata è esportata in un prodotto di informazione geografica interattivo (Fig. 4.9) . In funzione delle dimensioni, le singole aree agricole sono esportate singolarmente o raggruppate in ordine alla specie agricola che le caratterizza. Per ogni area agricola è fornita la posizione in coordinate geografiche, l'estensione della superficie coltivata e la specie agricola.

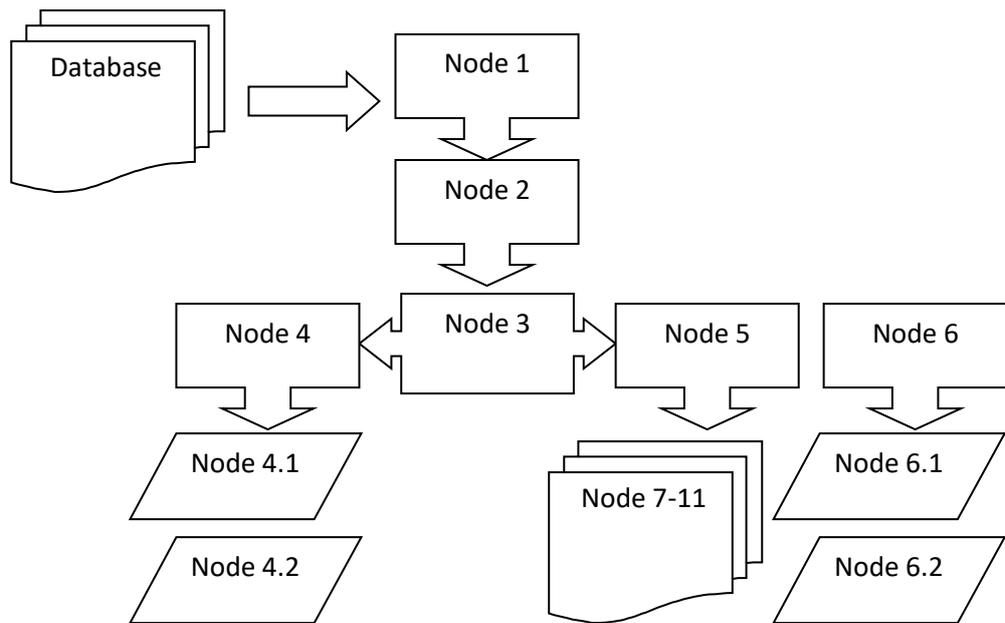


Fig. 4.8 Architettura generale dell'albero decisionale multi-variato impiegato per la classificazione delle province di Busia e Nakuru.

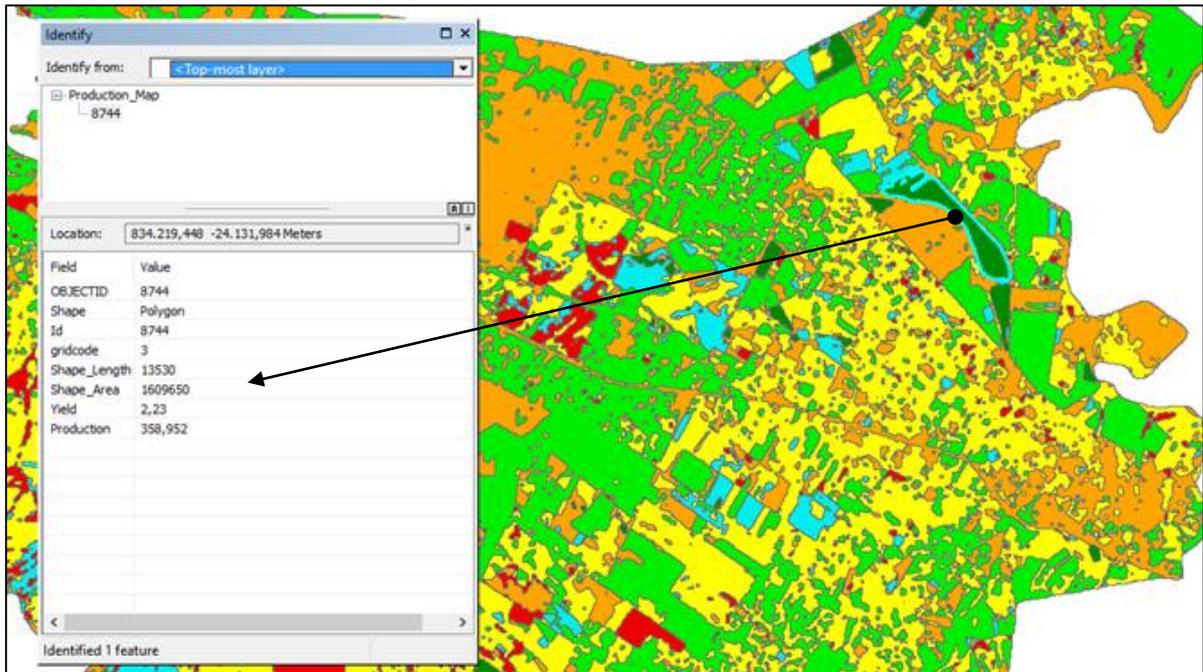


Fig. 4.9 Dettaglio del prodotto GIS prodotto dalla classificazione della provincia di Nakuru (2015). Selezionando una specifica area agricola è possibile visualizzare la sua descrizione.

5. Modello di stima della produzione

Investigheremo l'impiego del modello di simulazione AquaCrop per saggiarne le capacità nell'ambito del problema della stima della produzione agricola. Il modello è inoltre in grado di simulare l'effetto di specifici fattori di stress sul livello di produzione atteso; di particolare interesse risulteranno i fattori di stress termico nonché la disponibilità di risorse idriche a supporto della coltivazione. Il modello verrà calibrato per condizioni operative tipiche di un ambiente arido o semi-arido, e successivamente validato per aree selezionate.

5.1 Il modello di previsione dei raccolti

Un sistema di monitoraggio agricolo deve essere in grado di identificare le aree agricole e misurarne le proprietà e le condizioni, per poter simulare la crescita delle colture e stimare la produzione ad esse associata, identificando le eventuali criticità consentendo dunque la pianificazione delle attività di intervento di supporto e preservazione della coltivazione e del suo valore economico.

Il fattore determinante è il tempo necessario a collezionare tali informazioni. Affinché siano utili è necessario che siano disponibili a seguito della prima fase fenologica di crescita e prima del raccolto, ovvero in un periodo di circa due mesi. Attualmente i sistemi di raccolta dei dati sono basati su controlli via terra e sorveglianza aerea. Questi sistemi forniscono dati in maniera puntuale ed accurata ma presentano diversi svantaggi: la difficoltà nel comparare statistiche e dati collezionati da vari enti su territori estesi, che risulta poi nell'applicazione di differenti metodologie e strumenti; la disponibilità di stime della produzione solo a ridosso del periodo di raccolta; infine l'elevato tempo richiesto ed i notevoli investimenti economici necessari per porre in essere tali strategie di monitoraggio.

Da questo punto di vista le applicazioni di telerilevamento satellitare per il monitoraggio delle coltivazioni assumono un ruolo di rilievo, automatizzando il processo di osservazione ed abbattendone sensibilmente i costi. Come già detto le applicazioni di telerilevamento per una accurata identificazione delle aree agricole richiede un approccio multi temporale, considerando che per ogni tipo di coltivazione avremo delle finestre di osservazione chiave per la discriminazione della specie

agricola. L'introduzione del dato satellitare uniforma la misurazione e permette di controllare l'efficacia delle tecniche di coltivazione adottate sul campo.

Nell'affrontare il problema della stima dei raccolti si ravvisano le stesse criticità sopra citate: le procedure tradizionali prevedono la raccolta di informazioni relative alla condizione del suolo, ai fattori climatici ed ambientali ed alle tecniche di coltivazione, attraverso campagne di misura terrestri, che, ancora una volta, richiedono notevoli investimenti economici e tempo per la loro realizzazione. Inoltre, l'elevata variabilità delle condizioni agro-climatiche, delle tecniche di coltivazione e della tipologia di suolo, possono rendere tali procedure inefficaci ed inesatte al fine della stima del livello di produzione.

Modelli di simulazione opportunamente calibrati possono intervenire nell'analisi dell'adattabilità delle specie coltivate alle condizioni climatiche, nonché l'efficacia delle tecniche di coltivazione nel gestire criticità e fattori di stress che si dovessero manifestare nei differenti stadi di sviluppo della coltivazione (Twomlow et al., 2008); attraverso la simulazione si offre la possibilità di scegliere attraverso differenti possibili ed adattabili strategie di pianificazione e gestione delle aree agricole (Evet and Tolk, 2009).

Bisogna tuttavia considerare che non esiste una calibrazione universale per un modello di simulazione (Sinclair and Seligman, 1996); l'obiettivo consiste nel calibrare un modello alla variabilità climatica locale cercando di impiegare il minor numero possibile di parametri a tale scopo, focalizzando l'attenzione sui più importanti fattori di stress che caratterizzano l'area in cui si sta operando (Bhattacharya and Sastry, 1999). Da questo punto di vista il modello AquaCrop simula la biomassa ottenibile, e l'associato raccolto, in risposta alla disponibilità di acqua per supportare la coltivazione con l'obiettivo specifico di limitare il numero di parametri espliciti necessari (Steduto et al., 2009).

5.1.1 AquaCrop

Il modello AquaCrop è il modello di crescita e previsione dei raccolti sviluppato dalla FAO per lo studio di applicazioni di sicurezza alimentare e per studiare gli effetti dell'ambiente e delle tecniche di coltivazione sulle produzioni agricole.

Questo modello simula la risposta della produttività per le specie vegetali alla variazione della disponibilità idrica, pertanto è particolarmente indicato per l'applicazione nei territori aridi, semi aridi o soggetti a forti periodi di siccità (Hsiao et al., 2009).

In un modello di previsione dei raccolti vengono descritte le interazioni tra la pianta, il suolo, attraverso cui vengono estratti l'acqua ed i nutrienti, e l'atmosfera, che determina l'evapotraspirazione, la richiesta di anidride carbonica, e l'energia necessaria alla crescita. Molti di questi modelli richiedono un elevato numero di parametri e variabili in ingresso, di non facile reperibilità per tutti i tipi di coltivazioni e per tutte le possibili aree di applicazione, specialmente nei paesi in via di

sviluppo. Inoltre tali parametri sono solitamente più familiari agli scienziati che non agli utenti finali, in questo caso gli agricoltori.

Rispetto ad altri modelli di previsione dei raccolti, AquaCrop è parametrizzato attraverso un ridotto numero di parametri, cercando di bilanciare semplicità, accuratezza e robustezza. Il principio fondante alla base del modello è costituito dalla relazione tra evapotraspirazione di riferimento e raccolto (Doorenbos & Kassam, 1979): l'evapotraspirazione viene separata in traspirazione della copertura fogliare e del suolo, ed il modello implementa un semplice schema di crescita e senescenza per la vegetazione. Il contenuto di acqua alle radici è preso in considerazione tenendo conto dei flussi di acqua in ingresso ed uscita dal terreno.

Il leaf area index è sostituito dal canopy ground cover. L'espansione della copertura fogliare, la conduttanza agli stomi, la senescenza fogliare e l'indice di produzione (harvest index, HI), sono tutti parametri chiave nella risposta allo stress idrico. Viene anche considerato un fattore di stress termico sia per alte che per basse temperature (stress sulla impollinazione e sul livello di biomassa). L'evapotraspirazione è simulata a parte tenendo conto della traspirazione della vegetazione, dell'evaporazione attraverso il suolo, mentre la traspirazione giornaliera viene impiegata per il calcolo del guadagno di biomassa attraverso la BWP (Biomass Water Productivity) normalizzata (dove la normalizzazione tiene conto della richiesta di evaporazione atmosferica e del contenuto di anidride carbonica, rendendo di fatto il modello adattabile a diverse regioni e stagioni). Il sistema inoltre permette di tenere conto dei livelli di fertilità dei suoli e delle tecniche di gestione delle risorse idriche. La stima della produzione attesa viene fornita in uno specifico ambiente definito nei suoi caratteri salienti come:

- i. Condizioni meteorologiche. Ovvero il livello delle piogge, la temperatura dell'aria e l'evapotraspirazione;
- ii. Tipo di suolo. Inteso nei termini della sua natura, della profondità, e del sistema di circolo delle acque sotterranee;
- iii. Attività di gestione della coltivazione. Ovvero lo svolgimento di attività programmatiche e/o straordinarie a supporto della coltivazione (fertilizzazione, irrigazione, irrigazione di supporto, etc.).

Considerando le caratteristiche della specie agricola in esame e variando i parametri succintamente sopra indicati è possibile non solo una stima della produzione ma la comprensione delle dinamiche di crescita della specie in esame alla variazione delle condizioni ambientali. AquaCrop può essere impiegato come uno strumento per pianificare ed assistere le attività agricole sia nel caso di coltivazioni irrigate artificialmente che nel caso di coltivazioni basate sull'andamento delle piogge (il caso appunto del Kenya). In particolare alcuni campi di applicazione riguardano:

- i. La comprensione della risposta delle coltivazioni alle variabili ambientali;

- ii. Lo sviluppo di sistemi ottimali di gestione delle attività agricole e la valutazione dell'introduzione di una nuova specie agricola in un determinato sito di coltivazione;
- iii. Lo sviluppo di strategie di irrigazione volte a minimizzare la dispersione idrica;
- iv. La comparazione del massimo livello di produzione ottenibile rispetto a quello attuale, enucleando i fattori di stress che costituiscono dei limiti di produttività.

La stima della produttività viene effettuata attraverso una simulazione in quattro tempi:

- i. Sviluppo della copertura fogliare e l'approfondimento delle radici;
- ii. Traspirazione della coltura, che è proporzionale alla copertura fogliare simulata;
- iii. Produzione di biomassa vegetale, che si ottiene collegando la produzione di biomassa alla quantità simulata di acqua che ha traspirato attraverso la coltivazione;
- iv. Resa delle colture, ottenuto dalla biomassa simulata e corretta attraverso l'indice HI.

5.1.2 Sviluppo delle colture

Il modello AquaCrop simula lo sviluppo della pianta attraverso lo sviluppo della copertura fogliare (al di sopra della superficie del terreno), e del sistema di radici (al di sotto della superficie del terreno). Le due espansioni vengono studiate separatamente e collegate tra di loro attraverso il mezzo dello stress idrico.

Lo sviluppo fogliare è espresso attraverso il parametro CC (canopy cover), che sostituisce il LAI (leaf area index). Questa sostituzione introduce significative semplificazioni nella simulazione, riassumendo in un unico parametro di crescita fattori quali la crescita, l'orientamento e la distribuzione fogliare. Il CC indica la frazione di suolo coperta dal manto fogliare, assume valori da 0 (assunto generalmente alla semina) ad 1 (valore raggiunto generalmente nel momento di massima maturazione) (Fig. 5.1). Un vantaggio del suo impiego è legato alla facilità di stima sul campo per dei confronti con il valore simulato. AquaCrop impiega pochi parametri per descrivere il CC: un'equazione mette in relazione la densità della coltivazione alla germinazione, un coefficiente di crescita ed uno di declino (senescenza) della pianta, il CC massimo raggiunto, il tempo di inizio di crescita e senescenza.

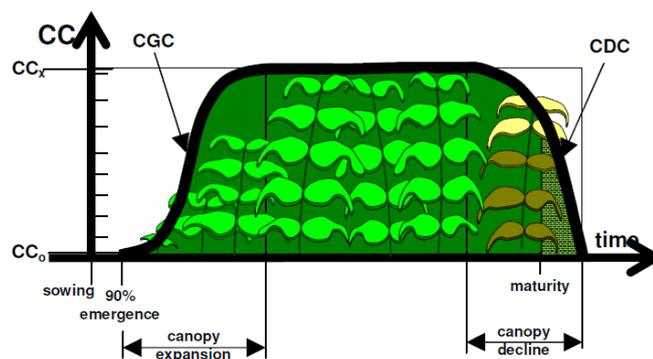


Fig. 5.1 Rappresentazione dello sviluppo del CC durante un ciclo di sviluppo stagionale.

La zona interessata dallo sviluppo del sistema radicale può essere rappresentata attraverso uno schema idrico che tenga conto dei flussi di acqua in ingresso (piogge, irrigazione, risalita capillare), e dei flussi di acqua in uscita (scorrimento orizzontale, evapotraspirazione e percolazione in profondità) (Fig. 5.2). Il bilancio idrico del terreno viene preso in considerazione attraverso il parametro FC (field capacity), che indica la capacità massima di ritenzione idrica del terreno: un irrigazione che ecceda la capacità idrica produce una dispersione idrica. Nel contempo, in assenza di ogni tipo di irrigazione, il terreno continua a perdere acqua attraverso l'evapotraspirazione, risultando nel raggiungimento del livello di PWP (permanent wilting point), oltrepassato il quale la pianta muore.

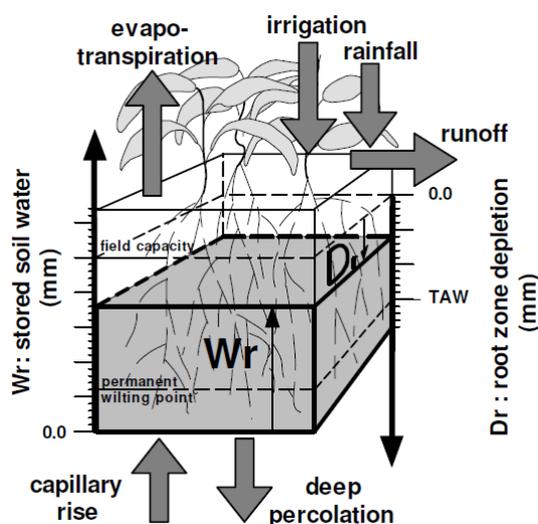


Fig. 5.2 Rappresentazione del modello idrico del terreno in corrispondenza della zona di sviluppo radicale della pianta.

Il modello di simulazione parametrizza questa situazione attraverso diverse soglie di SWC (soil water content). Nello specifico, allo scendere del livello idrico al di sotto di queste soglie, si innescano specifici meccanismi di stress che affliggono i valori del CC. In sostanza lo sviluppo del CC è corretto attraverso fattori di stress innescati dal bilancio idrico del terreno, che al contempo e direttamente determina lo sviluppo del sistema radicale.

5.1.3 Traspirazione delle colture

La Traspirazione della pianta consiste nella vaporizzazione dell'acqua contenuta negli spazi intercellulari e dalla rimozione del vapor d'acqua attraverso gli stomi, ed è direttamente proporzionale allo sviluppo del CC.

La traspirazione viene calcolata moltiplicando l'evapotraspirazione di riferimento (ETo) per un coefficiente di traspirazione della coltivazione (K_{cTr}). L'evapotraspirazione di riferimento è l'evapotraspirazione di una superficie di erba ben irrigata, esprime il potenziale di evaporazione dell'atmosfera e può essere derivato dalle condizioni meteorologiche. Il coefficiente di traspirazione

invece è proporzionale al CC e per conseguenza varia attraverso il ciclo vitale della pianta. Questo parametro introduce tutti gli effetti che distinguono la coltivazione dall'erba di riferimento.

Lo stress idrico non affligge solo lo sviluppo del CC, ma anche la traspirazione (basti pensare che l'insorgere della senescenza produce la chiusura degli stomi e quindi blocca la traspirazione). Per tenere conto di questo viene introdotto il coefficiente di stress idrico (K_s), che diviene minore di 1 quando il contenuto di acqua nel suolo scende al di sotto della soglia per cui si verifica la chiusura degli stomi. Maggiore il livello di stress, minore il valore del coefficiente di stress. Al raggiungimento del PWP, il valore di K_s sarà pari a zero e la traspirazione cesserà del tutto.

5.1.4 Produzione di biomassa vegetale

Lo sviluppo della biomassa vegetale è ottenuto dalla quantità simulata di acqua traspirata. Nel momento in cui gli stomi sono aperti per rimuovere acqua, allo stesso tempo le piante assorbono anidride carbonica. In presenza di luce, acqua ed anidride carbonica vengono convertite in carboidrati, elemento costituente la biomassa vegetale. Esiste dunque un legame diretto fra traspirazione e produzione di biomassa vegetale. In condizioni di buona irrigazione gli stomi sono aperti e lo scambio di gas sarà regolare, cos' come la crescita della pianta. In condizioni di stress idrico gli stomi tenderanno a chiudersi, diminuendo la capacità di scambio gassoso per traspirazione, per conseguenza arrestando l'attività fotosintetica e la produzione di biomassa.

La relazione tra traspirazione (Tr) e produzione di biomassa (B) è espressa attraverso la produttività idrica (water productivity, WP). Questo parametro non è altro che la pendenza della funzione lineare che esprime la relazione fra B e la traspirazione totale, ed esprime la quantità la quantità di materia secca prodotta al si sopra del suolo (g oppure kg) per unità di terreno (m^2 oppure ha) per unità di vapore traspirato (mm). Data una specie vegetale, la relazione fra acqua consumata e biomassa prodotta è altamente lineare data una specifica condizione climatica. AquaCrop non impiega la WP per la simulazione ma una sua versione corretta per l'effetto delle condizioni climatiche, ovvero la produttività idrica normalizzata (WP^*). La normalizzazione rispetto alle condizioni climatiche è ottenuta dividendo Tr per ET_o .

A seguito della normalizzazione le diverse colture mostrano comportamenti raggruppabili per calssi di WP^* : distinzioni possono essere fatte tra colture C4 (come il sorgo) con WP^* di circa 30 to 35 g/m^2 (0.30 to 0.35 ton per ha) e colture C3 crops (come girasole e grano) con un WP^* di 15 to 20 g/m^2 (0.15 to 0.20 ton per ha).

5.1.5 Resa delle colture

L'ultimo passaggio corrisponde al calcolo della resa attesa. Il valore di biomassa vegetale prodotto viene moltiplicato per l'indice HI, che è la frazione di B che costituisce il raccolto, ottenendo

la resa Y . Il parametro HI è ovviamente specifico per ogni coltura. Tuttavia AquaCrop ne modifica il valore in funzione dello stress idrico accumulato durante lo sviluppo della coltivazione.

Lo schema di Fig. 5.3 riassume ed organizza le fasi di calcolo sin qui presentate. I fattori di stress derivati dall'analisi dello sviluppo del CC e del profilo idrico del suolo (analisi che in più punti si influenzano vicendevolmente), intervengono nel calcolo della traspirazione a partire dall'evapotraspirazione di riferimento calcolata attraverso l'equazione di Penman-Monteith (vd. § 4.5.6); da questo punto è possibile la stima della biomassa prodotta (attraverso il termine WP^*) e del raccolto (attraverso la stima dell' HI).

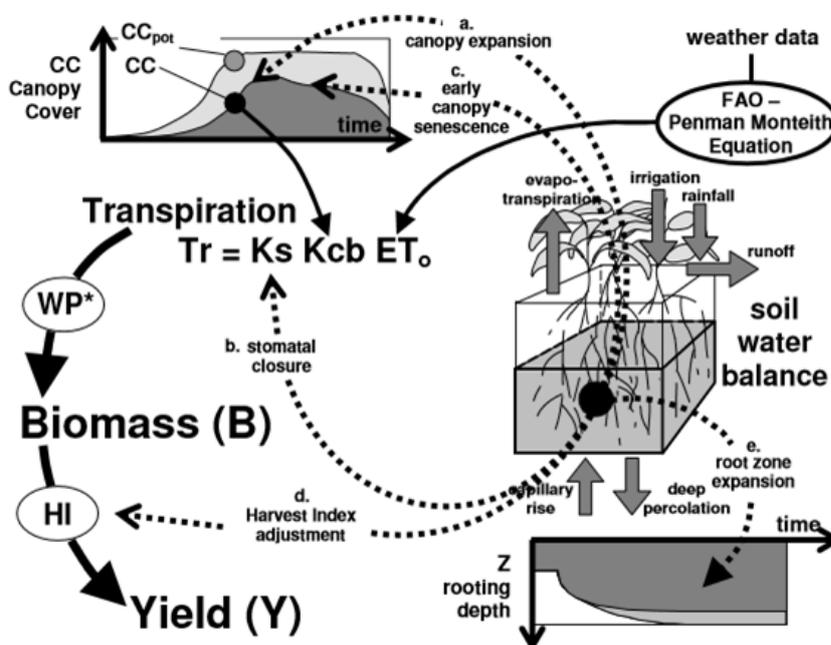


Fig. 5.3 Schema generale di calcolo del modello di simulazione AquaCrop

5.1.6 Dati di input

AquaCrop impiega un numero limitato di parametri espliciti e variabili intuitive, allo stesso tempo ampiamente conosciute e facilmente reperibili o misurabili. I dati di input possono essere suddivisi in quattro categorie: dati climatici, caratteristiche del suolo, tipologia di coltura e pratiche di gestione. A sua volta le caratteristiche del suolo richiede dati di input per il profilo del suolo e le sue caratteristiche idriche. Nel dettaglio:

- a) *Dati climatici.* Aquacrop richiede i valori di E_{to} per il periodo di simulazione. Questo parametro, una volta note le informazioni meteorologiche, viene calcolato attraverso l'equazione di Penman-Monteith. In aggiunta sono richieste la temperatura massima e minima

ed il livello delle piogge. Tutti questi dati sono necessari su un intervallo di tempo variabile da un giorno, a 10 giorni sin ad un mese, in funzione dello step di simulazione. In particolare modo l'impiego di approssimazioni per i livelli delle piogge, in concorso con la loro caratteristica eterogenea distribuzione, può ridurre significativamente l'accuratezza della simulazione. Inoltre deve essere fornito almeno il valore medio annuale di concentrazione dell'anidride carbonica, che interessa sia il parametro Tr che il parametro WP*.

- b) *Caratteristiche della coltura.* Queste caratteristiche sono descritte da un set di parametri che descrivano la fase di crescita e produzione. Sono dunque richiesti (i) lo sviluppo del CC in condizioni non limitanti; (ii) la produzione di biomassa (ovvero WP*); (iii) il parametro di formazione del raccolto Hlo (ovvero il parametro HI di riferimento in assenza di fattori limitanti); (iv) i parametri di risposta allo stress idrico, di fertilità e di temperatura.
- c) *Caratteristiche del profilo del suolo.* Il profilo del suolo può essere costituito da più di cinque orizzonti, ognuno di diversa profondità e con differenti caratteristiche fisiche. Le caratteristiche idrauliche considerate sono: (i) il contenuto di acqua nel suolo a saturazione (FC); (ii) il contenuto minimo di acqua ritenuto (PWP); (iii) e la conduttività idraulica a saturazione. Da quest'ultimo parametro è possibile ricavare il coefficiente di infiltrazione e drenaggio dell'acqua nel suolo (τ).
- d) *Caratteristiche idriche del suolo.* La profondità e la salinità delle acque contenute nel suolo. Se la profondità non è significativa, acqua e sale potrebbero risalire in superficie per capillarità.
- e) *Pratiche di irrigazione.* Ovvero la presenza o meno di piogge affidabili oppure di sistemi di irrigazione artificiali. In quest'ultimo caso ha rilevanza anche la qualità dell'acqua oltre che la distribuzione temporale.
- f) *Tecniche di gestione.* Ovvero l'azione di tecniche di fertilizzazione oppure volte a ridurre la dispersione idrica o l'evaporazione attraverso il terreno.

Fra le limitazioni più significative: bisogna tener conto che solo il profilo idrico verticale viene preso in considerazione e che le condizioni di suolo e gestione vengono considerate uniformi su tutta l'area della simulazione; infine tale modello può essere impiegato solo per cicli annuali di crescita.

5.1.7 Equazione di Penman-Monteith

L'evapotraspirazione (ET) è una grandezza fisica usata in agrometeorologia e consiste nella quantità d'acqua (per unità di tempo) che dal terreno passa nell'aria allo stato di vapore per effetto congiunto della traspirazione attraverso le piante, e dell'evaporazione dal terreno. L'unità di misura è il mm (millimetro) inteso come altezza della massa d'acqua evaporata e traspirata (oppure il m³/ha).

Il concetto ingloba due processi nettamente distinti, in quanto a rigore l'evaporazione esulerebbe dalla coltura, tuttavia non è possibile scorporarli e trattarli distintamente, tanto più che ad interessare è il consumo e effettivo e totale sia per evaporazione che per traspirazione.

La stima dell'evapotraspirazione si basa sull'applicazione di formule matematiche che permettono il calcolo dell'evapotraspirazione in funzione di una o più variabili climatiche di facile rilevamento.

Il metodo Blaney-Criddle è stato largamente usato in passato nell'ovest degli Stati Uniti. È uno dei più conosciuti ma è anche troppo approssimativo, con un margine d'errore del 25% per le stime estive. Per ottenere una sufficiente affidabilità deve essere applicato ad un periodo di almeno un mese, perciò è poco adatto a monitorare l'andamento dell'evapotraspirazione per redigere il bilancio idrico di una coltivazione in atto.

Un primo metodo sviluppato dalla FAO prevede l'adattamento a svariati contesti della formula di Makink, originariamente sviluppata per essere applicata nei soli Paesi bassi e scarsamente affidabile in altri contesti. Il metodo mette in relazione l'evapotraspirazione potenziale standard con due fattori climatici: nella fattispecie un fattore di proporzionalità (funzione della temperatura dell'aria e dell'altitudine), e la radiazione globale totale. Entrambi i metodi dipendono da indici rilevabili da tabelle e diagrammi specifici, ovvero attraverso un calcolo grafico da modello. Il metodo della radiazione solare dipende da due variabili climatiche e pertanto è più preciso del metodo Blaney-Criddle, risulta applicabile su intervalli di tempo inferiori al mese ma presenta ancora un margine di errore del 20%.

Il metodo Penman-Monteith risulta di più complessa applicazione ma significativamente più preciso dei precedenti in quanto prende in considerazione molteplici variabili climatiche. Il modello di Penman (1948) considera le variabili relative all'apporto energetico e al trasporto turbolento dell'aria. La modifica introdotta da Monteith (1965) tiene conto anche del complesso meccanismo che regola il passaggio del vapore acqueo dal mesofillo, attraverso gli stomi all'atmosfera, applicando un modello semplificato riassunto da due variabili, rispettivamente la resistenza degli stomi e la resistenza aerodinamica.

La FAO ha ulteriormente rimodulato il metodo definendo le caratteristiche morfologiche e fisiologiche della coltura di riferimento in modo da ottenere per le variabili di resistenza un modello ripetibile in differenti contesti.

Da questo punto di vista la formula di Penman-Monteith è una rappresentazione più realistica del processo evapotraspirativo di una coltura. L'equazione di Penman-Monteith simula in sostanza il comportamento di qualsiasi tipo di coltura in qualunque condizione di rifornimento idrico, purché siano noti i valori dei parametri di resistenza. Il margine di errore associato è del 10%. La notevole mole di studi che ha testimoniato la validità dell'equazione Penman-Monteith nelle più diverse condizioni ambientali ha spinto il gruppo di esperti della FAO, riunitosi a Roma nel 1990 (Smith,

1992), a raccomandarla quale metodo principale per la stima dell'ET₀ e per la determinazione dei coefficienti colturali.

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p(e_s - e_a)/r_a}{\Delta + (1 + r_c/r_a)}$$

λET è il flusso evapotraspirativo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

Δ è la pendenza che esprime la tensione di vapore saturo in funzione della temperatura [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]

R_n la radiazione netta [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

G il flusso di calore nel suolo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

ρ_a densità media dell'aria [Kg m^{-3}]

C_p calore specifico dell'aria a pressione costante [$\text{KJ Kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$]

e_s la tensione di vapore saturo [KPa]

e_a la tensione di vapore dell'aria [KPa]

r_a resistenza aerodinamica al flusso di vapore [s m^{-1}]

r_c resistenza del manto vegetale al flusso di vapore [s m^{-1}]

λ il calore latente di evapotraspirazione [MJ Kg^{-1}]

γ la costante psicrometrica [$\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]

Gli esperti della FAO, al fine di poter utilizzare l'equazione di Penman-Monteith quale standard nella stima dell'evapotraspirazione, hanno stabilito le caratteristiche geometriche, morfologiche e fisiologiche della coltura di riferimento, definendo di conseguenza i valori da utilizzare per r_c e r_a . Esplicitando tutte le costanti per il calcolo della evapotraspirazione di riferimento alla scala giornaliera l'equazione assume, in ultima analisi, la seguente forma:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)}$$

dove, oltre ai simboli già noti, T rappresenta la temperatura media dell'aria e u l'intensità media della velocità del vento. In sostanza la determinazione dell'ET₀ tramite l'equazione di Penman-Monteith richiede la misura o la stima delle seguenti grandezze meteorologiche: la radiazione netta, la temperatura dell'aria, l'intensità del vento e l'umidità relativa dell'aria.

Il flusso di calore del suolo, essendo praticamente nullo alla scala giornaliera, viene invece trascurato. L'equazione (2) è chiaramente un'approssimazione della formulazione originaria di Monteith: in particolare i termini di resistenza (r_c e r_a) sono esplicitati tenendo conto delle caratteristiche standard della ipotetica coltura di riferimento (in particolare l'altezza del prato, pari a 0.12 m) e della quota standard (2 m) di misura delle grandezze meteorologiche.

Il database ERA-Interim ha fornito gli archivi di geopotenziale, temperatura, umidità relativa e componente orizzontale del vento (u) necessari per calcolare i valori di tali grandezze alla quota di 2 m rispetto all'elevazione locale.

I dati climatici (risoluzione spaziale 12 km, 19 livelli di pressione fra i 1000 ed i 350 mbar) ed il modello di elevazione digitale del terreno (SRTM, Space Shuttle Topographic Mission, risoluzione spaziale max 90 m), sono stati ricampionati alla risoluzione di 250 m.

Successivamente si è proceduto ad interpolare i valori climatici lungo la colonna atmosferica di riferimento per estrarre i valori di tali grandezze alla quota di riferimento per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento.

Nelle Fig. 5.4-5.5-5.6-5.7 sono riportati tutti gli andamenti delle grandezze (medie settimanali riferite alla prima settimana del mese di Gennaio 2015) necessarie al calcolo dell'Et0 per tutto il territorio keniano. L'analisi è stata reiterata al fine di produrre medie settimanali a copertura dell'intero anno 2015, creando l'ambiente di simulazione per il modello AquaCrop su qualunque area agricola del Kenya precedentemente classificata.

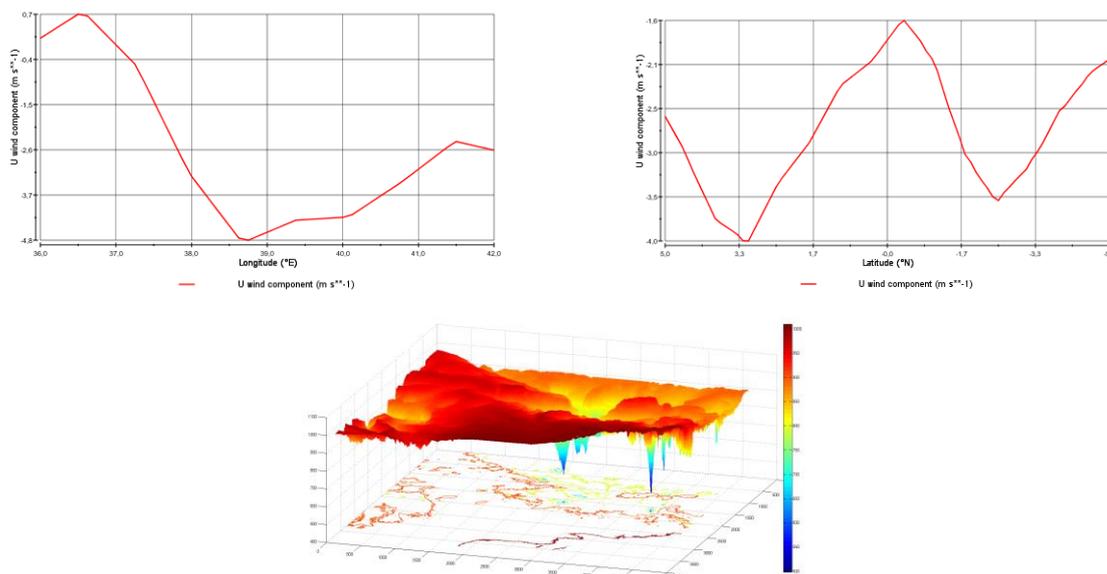


Fig. 5.4 (sopra) andamento della componente u del vento a 2m dal suolo, secondo longitudine e latitudine; (sotto) andamento medio della pressione a 2 m dal suolo. I valori sono intesi come medie settimanali relative alla prima settimana del mese di Gennaio 2015.

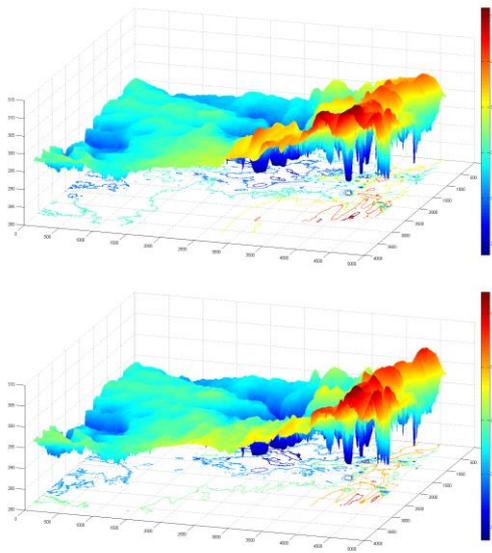


Fig. 5.5 Temperatura max e min (K), 2m sulla quota locale, risoluzione spaziale 250 m. I valori sono intesi come medie settimanali relative alla prima settimana del mese di Gennaio 2015.

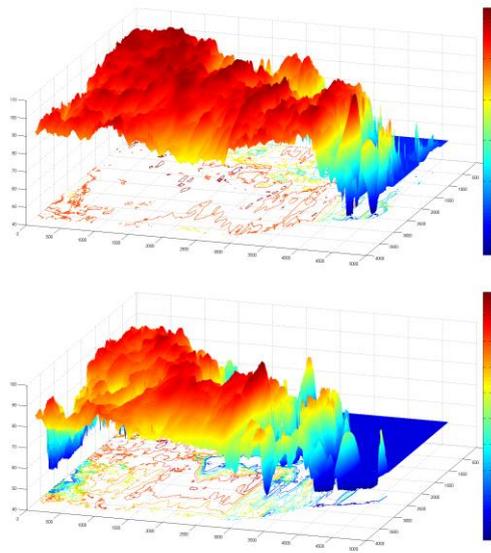


Fig. 5.6 Umidità relativa max e min, 2m sulla quota locale, risoluzione spaziale 250 m. I valori sono intesi come medie settimanali relative alla prima settimana del mese di Gennaio 2015.

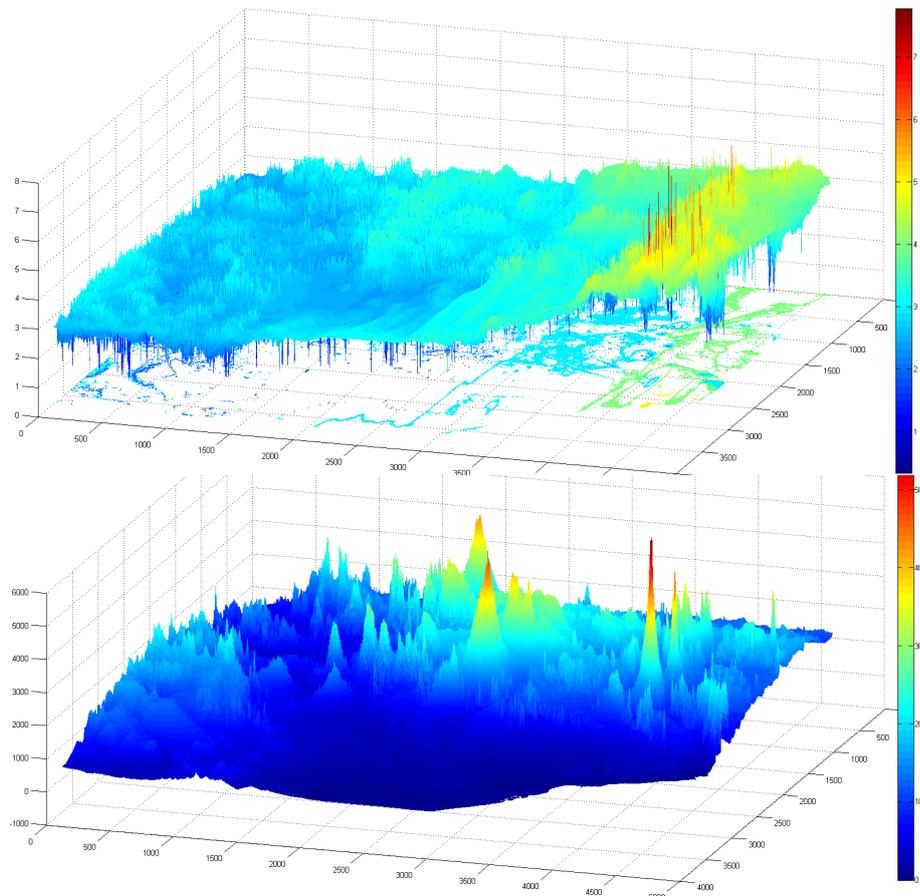


Fig. 5.7 (sopra) Evapotraspirazione (mm/day), 2m sulla quota locale, risoluzione spaziale 250 m. I valori sono intesi come medie settimanali relative alla prima settimana del mese di Gennaio 2015; (sotto) modello di elevazione digitale del terreno SRTM

5.2 Applicazione del metodo

Il processo di analisi è diviso in due sezioni: in primo luogo si procede, tramite classificazione, alla identificazione delle aree agricole nell'area di interesse; successivamente si procede all'applicazione del modello di previsione dei raccolti.

L'intero processo di classificazione è stato semi-automatizzato in ambiente IDL. L'unico intervento richiesto all'operatore è la definizione (o la verifica) dell'impianto di regole decisionali della sezione III (specifica per ogni AEZ in cui può essere suddivisa l'area di interesse). A scopo dimostrativo la procedura di classificazione è stata condotta sulle province per le quali sono disponibili prove di terra, collezionate durante le campagne condotte nel 2015 e nel 2016, al fine di validare i risultati ottenuti.

Una volta portata a termine, la classificazione viene resa disponibile sotto forma di prodotto di informazione geografica (GIS). La mappa interattiva prodotta consente di selezionare singoli campi venendo informati della posizione geografica dell'appezzamento di terreno, della sua estensione e, se disponibile, della specie agricola ivi coltivata.

La seconda fase di analisi prevede l'applicazione del modello di previsione dei raccolti. In questo caso sono state selezionate aree di controllo a terra fra le colture classificate caratterizzate da un ciclo annuale di sviluppo. Gli archivi ECMWF hanno fornito i dati climatici necessari alla modellazione dell'area di interesse, mentre la mappatura KENSOTER-SOTWIS ha fornito i dati relativi alla natura dei suoli. La procedura di calcolo dell'evapotraspirazione, così come la scrittura dei dati di input per il modulo AquaCrop, nonché l'avvio della simulazione, è stata automatizzata in ambiente MATLAB.

6. Risultati

Analizzeremo i risultati ottenuti dall'applicazione su specifiche aree di controllo delle metodologie illustrate nel precedente capitolo volte all'identificazione delle aree agricole ed alla previsione dei raccolti ad esse associati. Infine valuteremo tali risultati giudicando la fattibilità e l'affidabilità di un sistema di monitoraggio agricolo basato su dato satellitare.

6.1 Risultati della procedura di classificazione

6.1.1 La classificazione

Il primo obiettivo raggiunto consiste nella classificazione delle aree di studio con particolare riferimento all'identificazione delle coperture agricole a terra. Allo scopo di saggiare e validare le capacità del metodo sviluppato, sono state selezionate province a particolare vocazione agricola per la quale fossero disponibili prove di terra, ovvero le province di Busia e Nakuru (Fig. 6.1).

La classificazione è stata condotta a livello provinciale ed ogni provincia è stata scomposta nelle aree agro-ecologiche che la caratterizzano. Le sezioni I & II della procedura di classificazioni suddividono l'area di studio in macrocategorie di copertura a terra. Un nodo terminale della sezione II si occupa di riconoscere la presenza di profili fenologici fra tutti i pixel che mostrino un elevato valore dell'indice NDVI in un qualunque momento dell'anno. La procedura di classificazione si arresta a questo punto per tutte le aree che non superino questo test, ovvero la cui copertura risulti non rispondente ai criteri stabiliti nell'ambito fenologico per il riconoscimento delle aree agricole. Tutte le aree sopravvissute alla selezione della sezione II accedono infine alla sezione III. A questo livello avviene la discriminazione delle aree agricole a livello di specie vegetale. L'albero decisionale a questo punto si diversifica per ogni AEZ. Le AEZ operano una zonazione sulla base di una sintesi di caratteristiche geografiche e climatiche, descrivendo, tra le altre cose, il potenziale agricolo delle aree in analisi. In Fig. 6.2 è mostrato l'esempio della zonazione effettuata sull'area di Nakuru in riferimento alle aree agro-ecologiche di categoria LH (1-5).

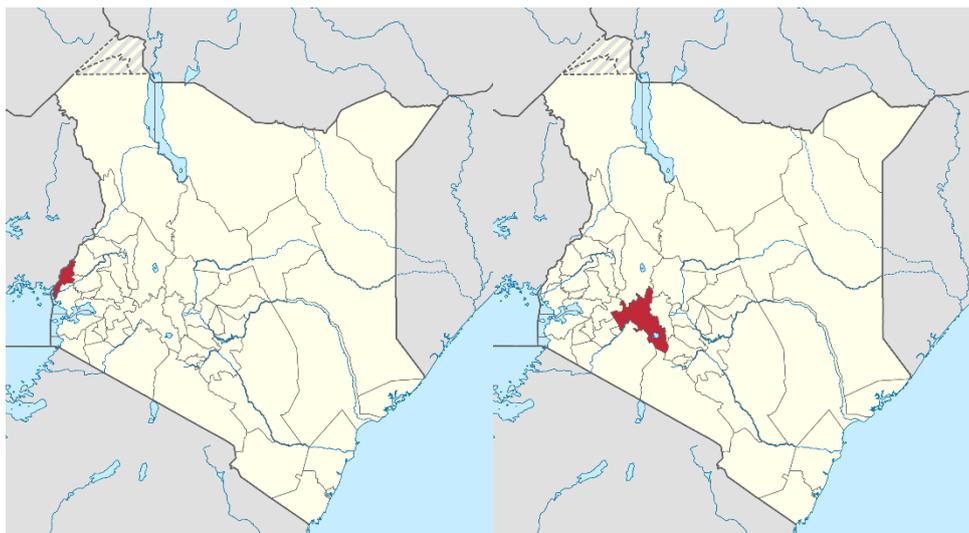


Fig.6.1 Posizione delle province di Busia (a sinistra) e della provincia di Nakuru (a destra.)

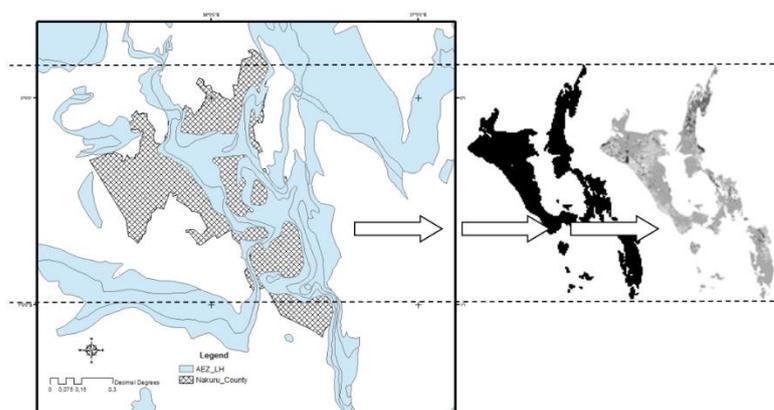


Fig. 6.2 Esempio di zonazione: estrazione delle AEZ LH 1-5 dalla provincia di Nakuru

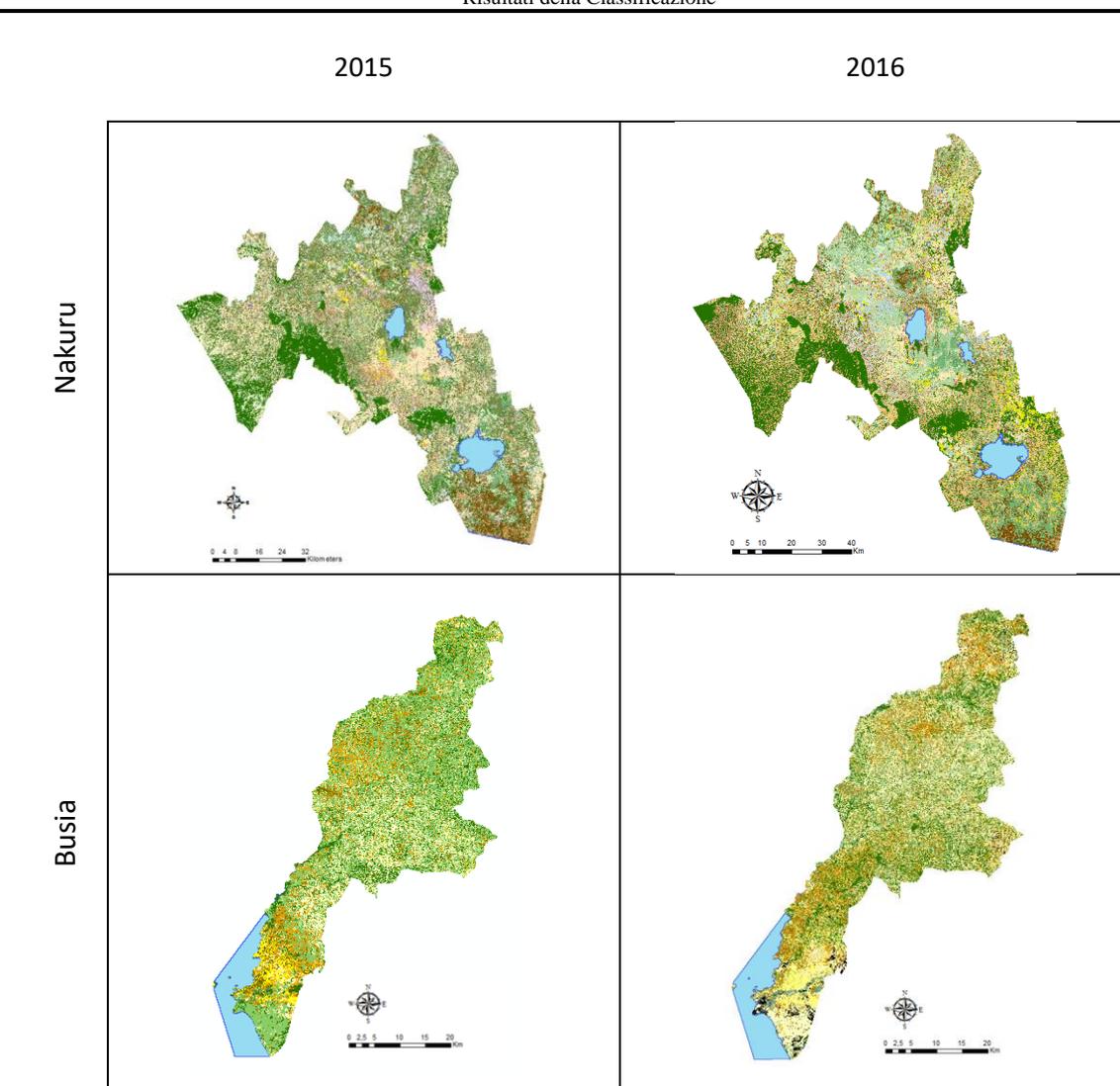
Le aree agricole localizzate all'interno dell'AEZ estratta sono classificate da un set di regole decisionali che è diretta espressione delle caratteristiche ambientali rappresentate. Ridurre la classificazione al livello delle aree agro-ecologiche vuol nel contempo dire ridurre il numero di classi agricole a disposizione della classificazione. La classificazione finale dell'intera area si ottiene come somma di una macro-classificazione che ha interessato l'intera area di studio (in questo caso la provincia), e di una serie di sotto-classificazioni che hanno avuto luogo nelle singole AEZ in cui l'area agricola totale è stata scomposta.

In Tab. I, sono mostrati i risultati della procedura di classificazione per le province di Nakuru, Busia, fra gli anni 2015 e 2016. Le province scelte coprono lo spettro che va da una decisa vocazione agricola di particolare rilevanza economica, a province dal minore potenziale agricolo caratterizzate per lo più da agricoltura di sussistenza. Nei paragrafi successivi tali prodotti verranno esaminati nel

dettaglio. Per ognuno di essi verranno forniti i valori di path e row per il sensore OLI Landsat 8, nonché il periodo di acquisizione ed il numero di immagini impiegate per portare a termine la classificazione.

Verranno inoltre fornite le matrici di confusione relative alla validazione della classificazione. Nel dettaglio una prima matrice di confusione mostrerà i livelli di accuratezza raggiunti nella classificazione globale. Una seconda matrice di confusione entrerà nel dettaglio dell'accuratezza raggiunta nella discriminazione delle sole classi agricole.

TABELLA I
Risultati della Classificazione



6.1.2 La procedura di validazione

La procedura di validazione del metodo di classificazione è stata condotta sfruttando i dati collezionati durante due campagne di terra (Fig. 6.3), che hanno avuto luogo rispettivamente nei periodi di Agosto-Settembre 2015, e Settembre-Ottobre 2016.

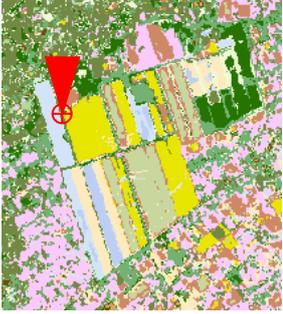
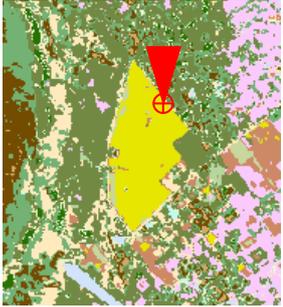
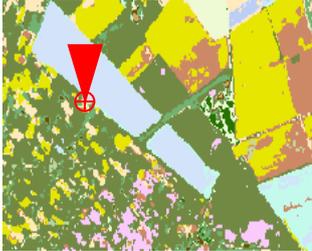
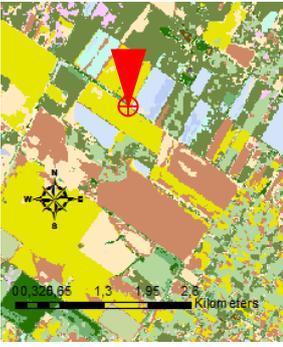


Fig.6.3 Percorsi delle campagne di terra condotte Agosto-Settembre 2015 (dettaglio in basso a destra), e Settembre-Ottobre 2016 (dettaglio in alto a sinistra).

La collaborazione con esperti del KALRO ed agricoltori locali ha permesso di migliorare, per le aree oggetto di studio, i calendari fenologici e la definizione delle potenzialità agricole espresse dalle AEZ. Sono state compiute misurazioni GPS per identificare aree campione di dimensioni adeguate ad essere impiegate in funzione di siti di validazione. Essendo la procedura di classificazione basata sulla previa conoscenza dell'area in esame, ed essendo le informazioni necessarie importate da modello teorico, nessuna area campione è stata impiegata per l'addestramento dell'algoritmo di classificazione.

In Tab. II, sono portate ad esempio le aree campione messe a disposizione della procedura di validazione della mappa di classificazione della provincia di Nakuru per l'anno 2015: nella prima colonna sono mostrate le aree di d' interesse attraverso Google Earth; nella colonna abbiamo le stesse aree così come appaiono nella mappa di classificazione prodotta; nella terza colonna abbiamo

TABELLA II
 Aree di controllo a terra per la provincia di Nakuru (esempi)

Ripresa Google Earth	Area classificata (2015)	Fotografie
		
		
		
		
		

6.1.3 Classificazione delle province di Nakuru e Busia (anno 2015)

In Tab.III è mostrata la matrice di confusione relativa alla validazione combinata condotta sui siti campione provenienti dalle province di Busia e Nakuru per l'anno 2015. Tale validazione è condotta per tutte le classi rilevate sui territori in analisi. Il valore elevato di overall accuracy, pari al 98.82 %, può essere giustificato tenendo in considerazione l'elevata accuratezza (100 %) con cui determinate classi di copertura a terra (foreste tropicali, terreni scoperti, bacini idrici, edifici, etc) vengono classificate impiegando un approccio multitemporale (in questo caso ulteriormente supportato dall'approccio fenologico al problema). In Tab.IV la matrice di confusione relativa alla validazione combinata condotta sui siti campione provenienti dalle province di Busia e Kisumu per l'anno 2015 e limitata alla sola validazione delle classi agricole. Il valore di accuratezza globale rimane comunque elevato (91.35 %), nonostante la discriminazione fra la classe grano e la classe sorgo non possa ritenersi un successo. In Tab. V-VI sono presentate le mappe di classificazione per le due province; dalla legenda si evince che almeno tre aree agricole nella provincia di Nakuru sono state riconosciute come tali ma non è stato possibile attribuire una fenologia.

TABELLA III
CONFUSION MATRIX I

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	l	m	n	o	PA
a	2449	70	0	13	0	10	0	0	0	0	0	0	0	96.34%
b	112	977	0	1	0	0	0	0	0	0	0	146	44	76.32%
c	0	7	9704	26	0	0	0	0	0	0	91	57	0	98.16%
d	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00%
e	0	0	0	0	84359	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00%
f	119	23	0	0	0	1123	0	0	0	5	0	0	0	88.42%
g	0	20	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	31.03%
h	0	0	0	0	0	0	0	611	0	0	0	0	0	100.00%
i	0	0	0	0	0	0	0	0	298	0	0	0	0	100.00%
l	28	19	0	0	0	9	0	0	0	768	0	0	0	93.20%
m	0	17	0	0	0	0	34	0	0	0	2347	185	9	90.54%
n	0	110	0	0	0	0	0	0	0	0	40	2996	17	94.72%
o	0	10	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	578	92.48%
UA	90.43	77.92	100	58.33	100	98.33	11.25	100	100	99.35	94.71	88.53	89.19	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	

Overall Accuracy: 98.82 %

Legend: a=sugarcane; b=maize; c=forest; d=buildings; e=water; f= bush land & cotton; g=sorghum; h=bare soil type1; i=bare soil type2; l= maize & intercropping; m=bi-seasonal wheat & maize; n=bi-seasonal wheat & barley; o=wheat. PA= Product Accuracy; UA=User Accuracy.

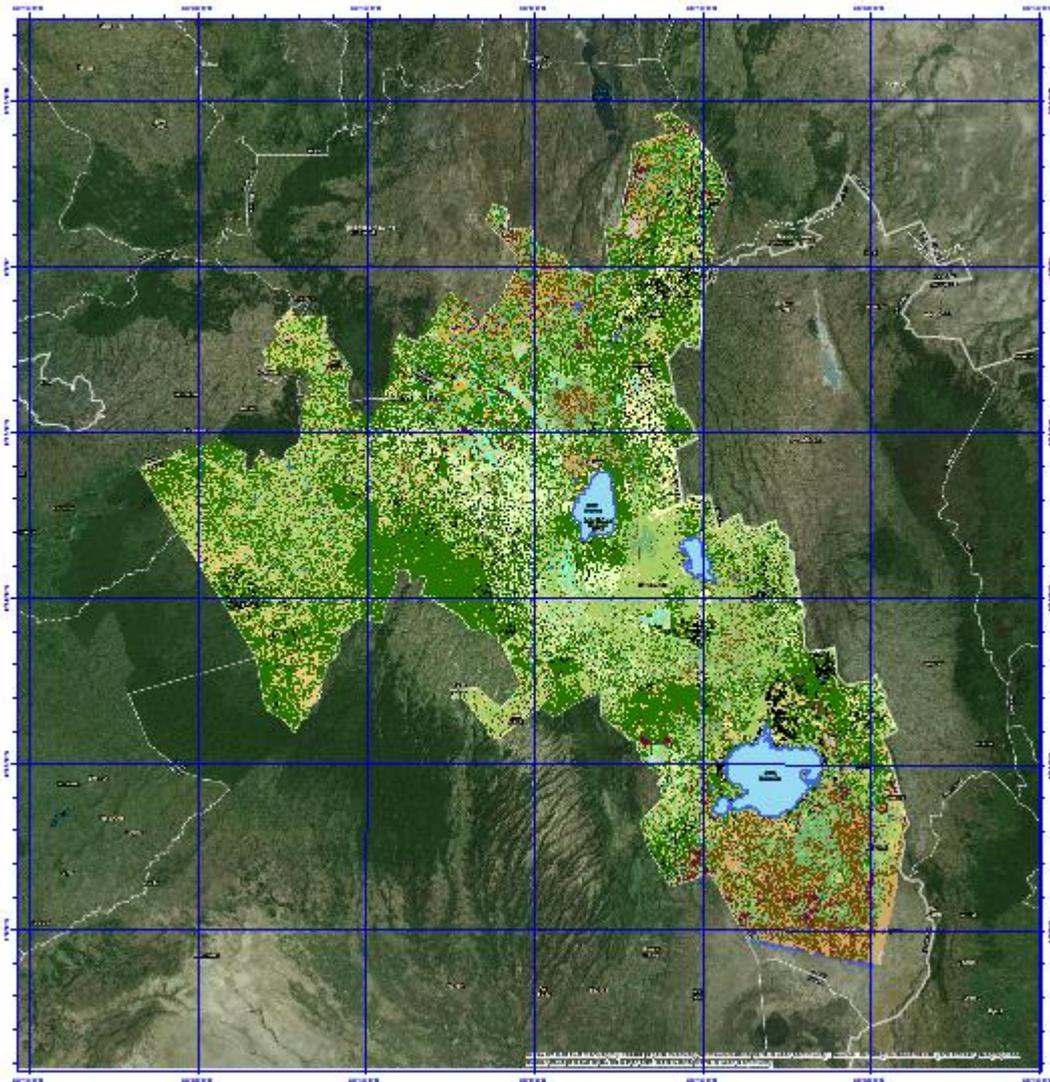
TABELLA IV
CONFUSION MATRIX II

	Sugarcane	Maize	Bush land & Cotton	Sorghum	Maize & Intercropping	Wheat & Maize	Wheat & Barley	Wheat	PA
Sugarcane	2449	70	10	0	0	0	0	0	96.83%
Maize	112	977	0	0	0	0	146	44	76.38%
Bush land & Cotton	119	23	1123	0	5	0	0	0	88.42%
Sorghum	0	20	0	9	0	0	0	0	31.03%
Maize & Intercropping	28	19	9	0	768	0	0	0	93.20%
Wheat & Maize	0	17	0	34	0	2347	185	9	90.54%
Wheat & barley	0	110	0	0	0	40	2996	17	94.72%
Wheat	0	10	0	37	0	0	0	578	92.48%
UA	90.43%	78.41%	98.33%	11.25%	99.35%	98.32%	90.05%	89.19%	

Overall accuracy: 91.35 %

PA= Product Accuracy; UA=User Accuracy.

TABELLA V
 Classificazione della provincia di Nakuru – anno 2015



Legenda:

 Forest	 Wheat - Barley	 Unidentified Crop 1
 Water	 Wheat and Maize	 Unidentified Crop 2
 Wheat	 Bush Land	 Unidentified Crop 3
 Maize	 Bare Soil 1	 Buildings
 Sorghum	 Bare Soil 2	

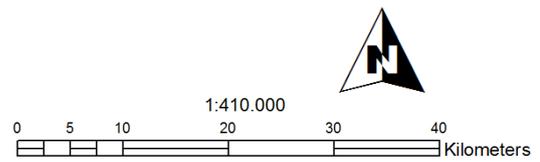
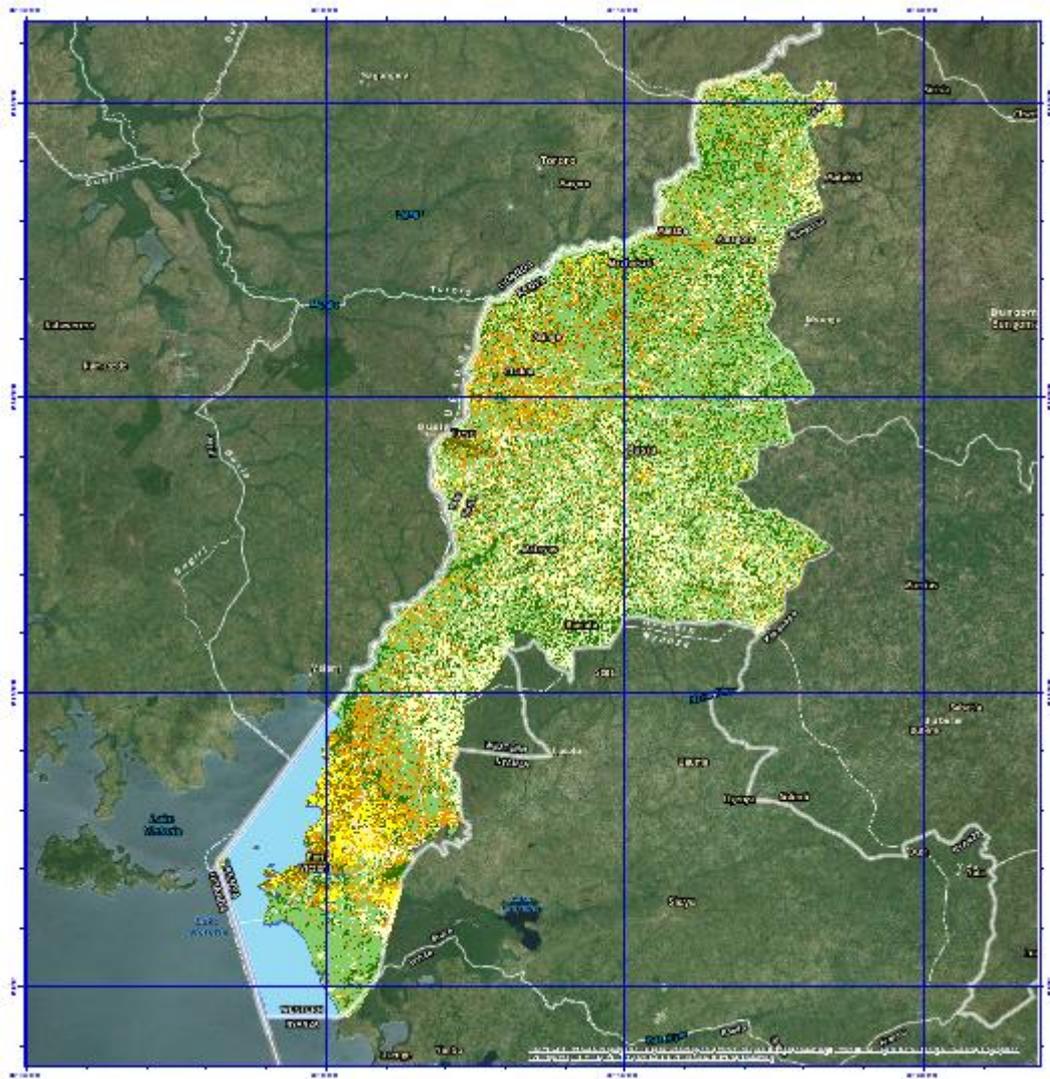
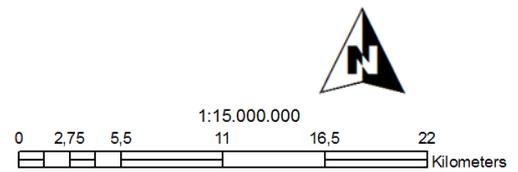


TABELLA VI
 Classificazione della provincia di Busia – anno 2015



Legenda:

- | | |
|---|--|
|  Forest |  Bush Land & Cotton |
|  Water |  Sugarcane |
|  Maize |  Bush Land |
|  Maize & Intercropping |  Generic Crops |



6.1.4 Classificazione della provincia di Nakuru e Busia (anno 2016)

In Tab.VII è mostrata la matrice di confusione relativa alla validazione combinata condotta sui siti campione provenienti dalle province di Busia e Nakuru per l'anno 2016. Tale validazione è condotta per tutte le classi rilevate sui territori in analisi. Il valore elevato di overall accuracy, pari al 97.89 %. In Tab.VIII la matrice di confusione relativa alla validazione combinata e limitata alla sola validazione delle classi agricole. Il valore di accuratezza globale rimane comunque elevato (83.18 %). In Tab. IX-X sono presentate le mappe di classificazione per le due province. Anche in questo caso nella provincia di Busia è presente una classe a connotazione agricola per la quale non è stato possibile isolare le singole aree costituenti, a causa delle menome dimensioni. Il calo dell'accuratezza globale può essere in parte imputato alla procedura di validazione: seppure i siti campione sono rimasti invariati, non è stato possibile rivisitali tutti nella campagna condotta nel 2016; per taluni siti è stata assunta la conservazione della specie agricola o la sua rotazione sulla base delle informazioni raccolte l'anno precedente (che non è stato possibile verificare) oppure da modello teorico.

TABELLA VII
CONFUSION MATRIX I

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	l	m	n	o	PA
a	2311	70	0	13	0	148	0	0	0	0	0	0	0	90.91%
b	91	909	0	1	0	0	0	0	0	89	128	26	36	71.01%
c	0	7	9704	26	0	0	0	0	0	0	91	57	0	98.16%
d	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00%
e	0	0	0	0	84359	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00%
f	79	221	0	0	0	932	0	0	0	5	0	22	0	74.02%
g	0	20	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	79	8.33%
h	0	0	0	0	0	0	0	611	0	0	0	0	0	100.00%
i	0	0	0	0	0	0	0	0	298	0	0	0	0	100.00%
l	0	39	0	0	0	9	0	0	0	440	8	0	0	88.77%
m	0	17	0	0	0	0	7	0	0	328	2189	185	167	75.66%
n	0	116	0	0	0	7	0	0	0	0	52	2935	53	92.79%
o	0	4	0	0	0	0	64	0	0	0	0	0	505	88.13%
UA	93.14 %	64.78 %	100 %	58.33 %	100 %	85.03 %	11.25 %	100 %	100 %	51.10 %	88.69 %	91.00 %	60.11 %	

Overall Accuracy: 97.89 %

Legend: a=sugarcane; b=maize; c=forest; d=buildings; e=water; f= bush land & cotton; g=sorghum; h=bare soil type1; i=bare soil type2; l=maize & intercropping; m=bi-seasonal wheat & maize; n=bi-seasonal wheat & barley; o=wheat. PA= Product Accuracy; UA=User Accuracy.

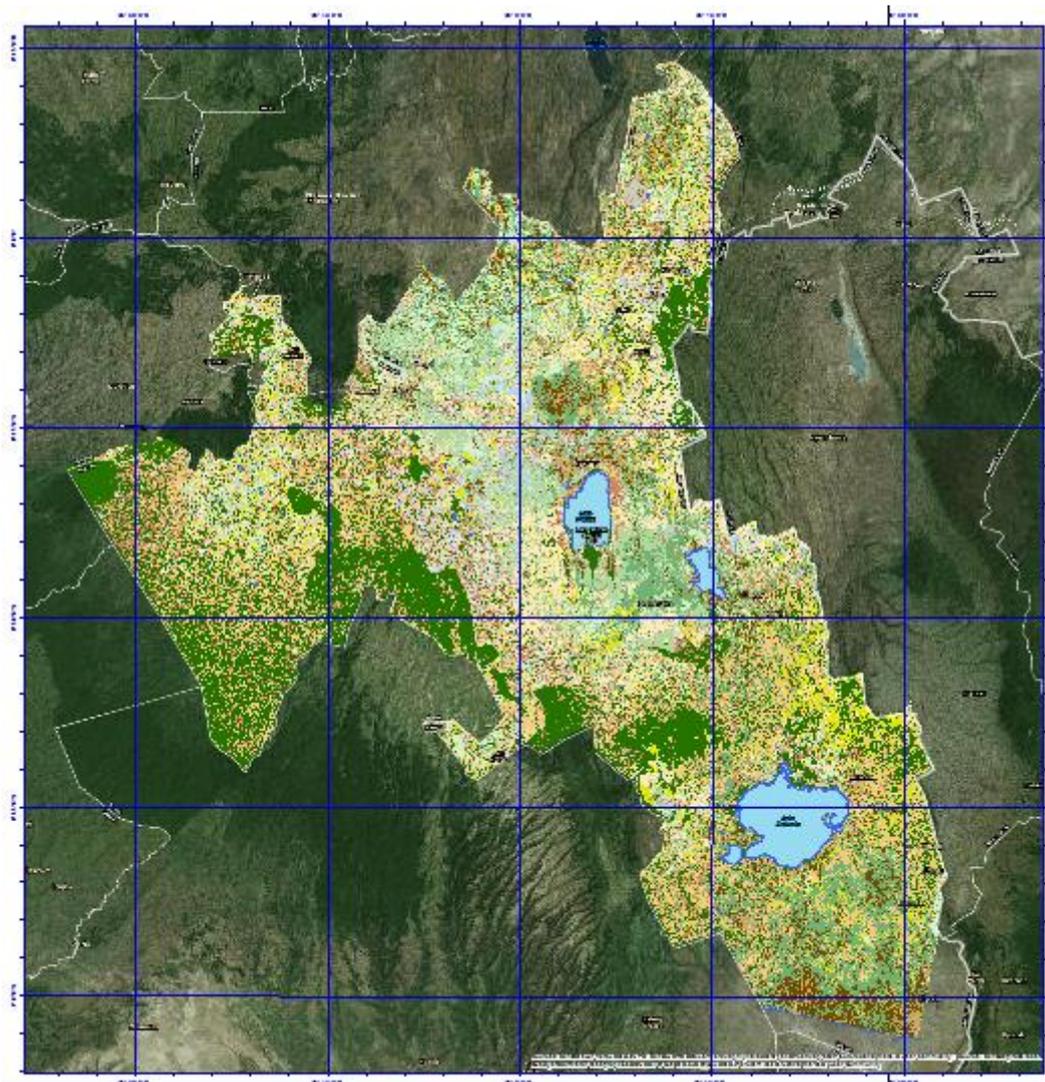
TABELLA VIII
CONFUSION MATRIX II

	Sugarcane	Maize	Bush land & Cotton	Sorghum	Maize & Intercropping	Wheat & Maize	Wheat & Barley	Wheat	PA
Sugarcane	2311	70	148	0	0	0	0	0	91.37%
Maize	91	909	0	0	89	128	26	36	71.07%
Bush land & Cotton	79	221	932	0	0	3	22	0	74.11%
Sorghum	0	20	0	9	0	0	0	79	8.30%
Maize & Intercropping	0	39	9	0	440	8	0	0	88.70%
Wheat & Maize	0	17	0	7	328	2189	185	167	75.66%
Wheat & barley	0	116	7	0	0	52	2935	53	92.79%
Wheat	0	4	0	64	0	0	0	505	88.13%
UA	93.14%	65.11%	85.03%	11.25%	51.34%	98.32%	92.64%	60.11%	

Overall accuracy: 83.18 %

PA= Product Accuracy; UA=User Accuracy.

Tabella IX
 Classificazione della provincia di Nakuru – anno 2016



Legenda:

- | | | |
|--|--|---|
|  Forest |  Sorghum |  Baresoil Type 1 |
|  Water |  Wheat & Barley |  Baresoil Type 2 |
|  Wheat |  Wheat & Maize |  Buildings |
|  Maize |  Bush Land | |

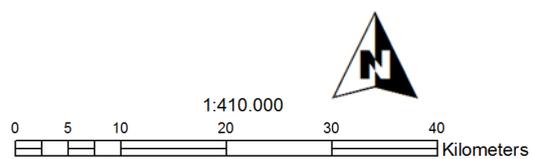
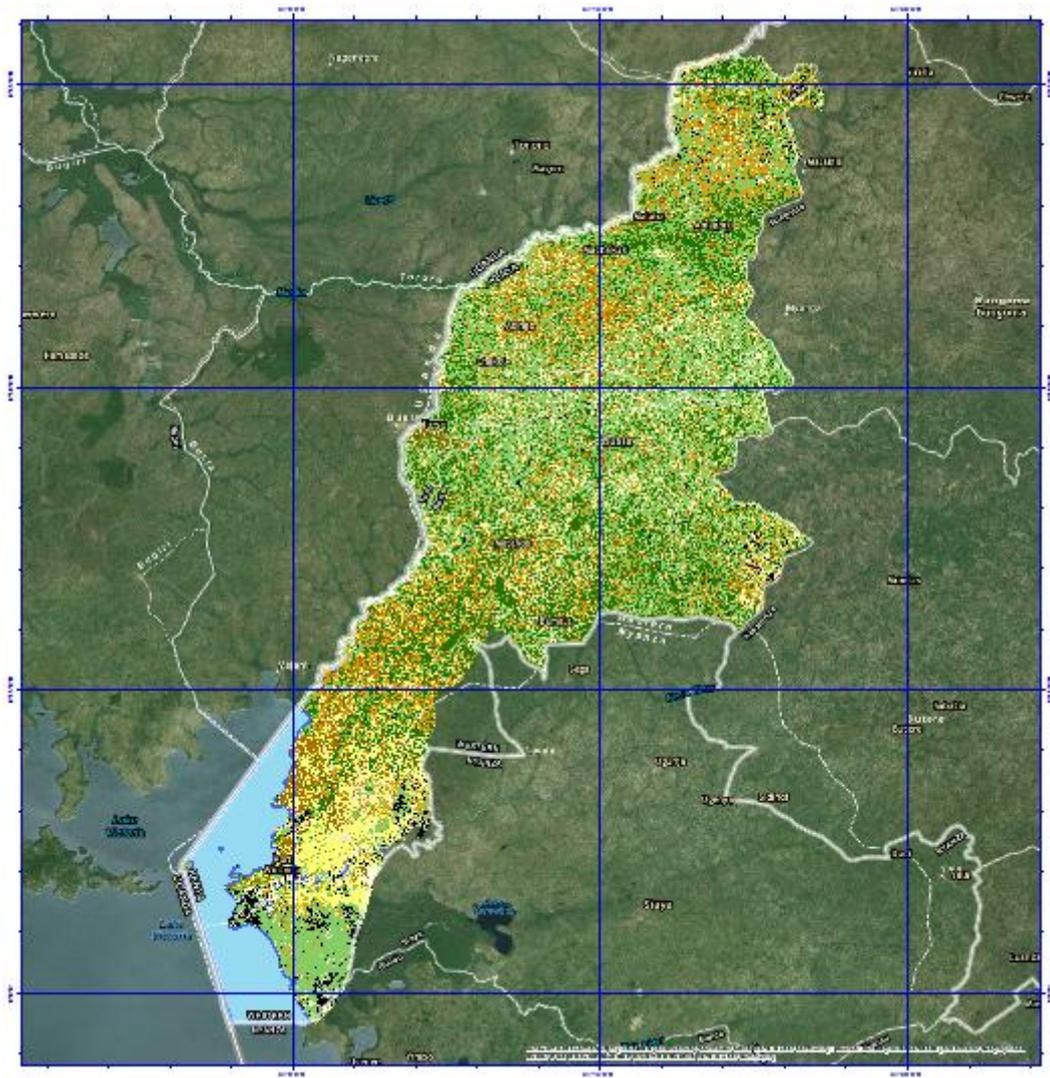
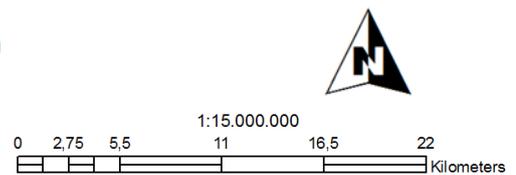


TABELLA X
 Classificazione della provincia di Busia – anno 2016



Legenda:

- | | |
|---|--|
|  Forest |  Bush Land & Cotton |
|  Water |  Sugarcane |
|  Maize |  Bush Land |
|  Maize & Intercropping |  Generic Crops |



6.1.5 Conclusioni

I risultati del processo di validazione sono promettenti. L'approccio multi-temporale fenologico è risultato efficace, seppur non esaustivo e suscettibile di automazione.

Tale approccio è estremamente efficace nell'identificare aree agricole rispetto ad altre coperture a terra. Rimane efficace anche nel discriminare differenti specie agricole tuttavia sotto determinate limitazioni: ancora una volta la dimensione delle aree coltivate può risultare decisiva; inoltre, come nel caso appena visto della discriminazione fra le specie grano e sorgo, profili fenologici sovrapponibili possono risultare in una ulteriore criticità. Infine bisogna tenere in considerazione che è sempre necessaria una buona conoscenza dell'area in analisi è decisamente propedeutica alla riuscita della classificazione: la conoscenza delle specie coltivate, e della loro fenologia gioca un ruolo cruciale da questo punto di vista, poiché l'assenza di una fenologia costituisce un impedimento all'identificazione delle specie agricole (le tre specie riconosciute come agricole e comunque non classificate nel caso Nakuru 2015 ne sono un chiaro esempio).L'agricoltura di sussistenza (nella quale si può far ricadere la classe *generic crop* del caso Bsuia 2015-2016) risulta in un ulteriore criticità, sia per le dimensioni espresse sia, per l'irregolarità della fenologia, difficilmente confrontabile con fenologie studiate per la produzione u larga scala.

L'intero processo di elaborazione della classificazione è stato reso semi-automatico in linguaggio IDL; di fatto la procedura di costruzione e calibrazione delle regole decisionali valide per la discriminazione delle aree agricole (e per conseguenza l'ultima sezione degli alberi decisionali per le varie AEZ) richiede ancora un intervento manuale.

L'approccio al problema della classificazione appena presentato viene ora confrontato con i prodotti volti alla classificazione delle aree agricole sin ora disponibili per il Kenya. In Fig.6.4-6.5, sono confrontati i prodotti dei progetti FAO Africover (2000), ESA Globcover (2005) e SBAM (2017); l'area campione è costituita dall'insieme delle AEZ LH presenti nell'area di Nakuru.

Il progetto Africover offre una mappa alla risoluzione spaziale di 30 m basata su dati Landsat e su un'estesa collezione di dati raccolti a terra. Come è possibile osservare nel dettaglio proposto in Fig. 6.4, la mappa offre una classificazione per aree tematiche, affiancata da un complesso sistema di codici per fornirne un'interpretazione. La suddivisione in categorie d'uso del terreno è espressa in valori percentuali per ogni area tematica, con un elevato livello di dettaglio per le area agricole seppure non ne viene localizzata l'esatta posizione. Il progetto Globcover è caratterizzato da una risoluzione spaziale di 300 m ed è basato su dati Meris. Il prodotto di classificazione non è specificatamente dedicato alla mappatura delle aree agricole, e dedica un numero ridotto di classi a tale fine (5 classi invece delle 54 offerte da Africover). Il livello di dettaglio, funzione ovviamente

della risoluzione spaziale, non è in grado di catturare la distribuzione, la geometria e la posizione delle aree agricole.

Il progetto SBAM presenta una risoluzione spaziale di 15 m ed è basato su dati Landsat. La mappa di uso dei suoli è dedicata alla identificazione delle specie agricole. La classificazione prodotta è in grado di identificare cosa viene coltivato e dove; le singole aree agricole vengono localizzate esattamente ed evidenti sono pure i loro confini (a tal proposito, in Fig. 6.5, si può osservare il differente dettaglio offerto dal confronto condotto su un'area campione). Tuttavia il grado di risoluzione spaziale può essere ancora insufficiente nell'identificazione delle piccole e micro aree agricole, dedicate soprattutto ad attività agricole di sussistenza, che caratterizzano soprattutto le aree a scarsa vocazione o potenzialità agricola.

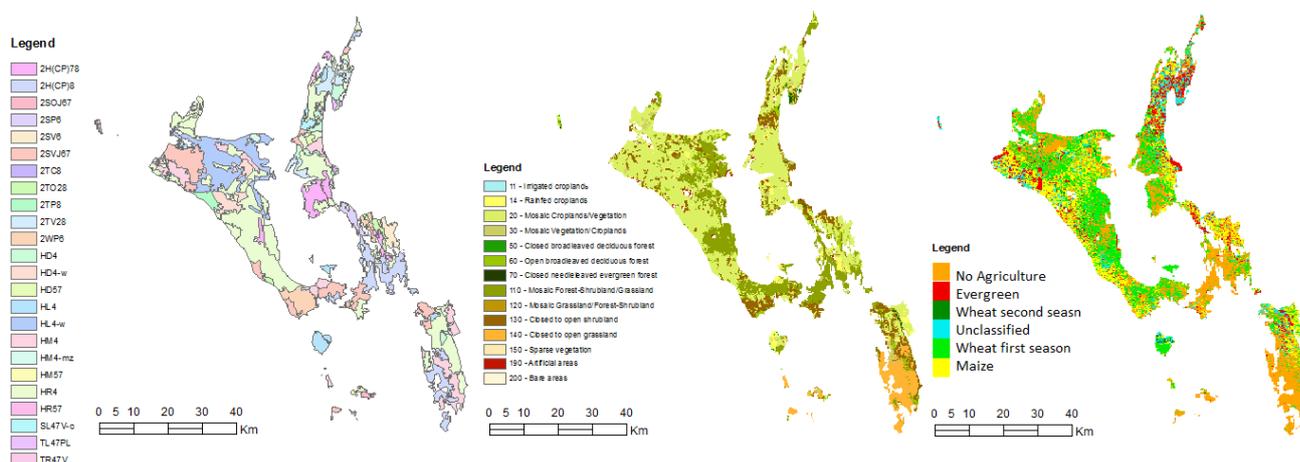


Fig. 6.4. Confronto delle mappe di classificazione, Nakuru Caounty AEZ LH. Da sinistra a destra: FAO Africover Project, 2000; ESA Globcover project, 2005; our project, 2015.

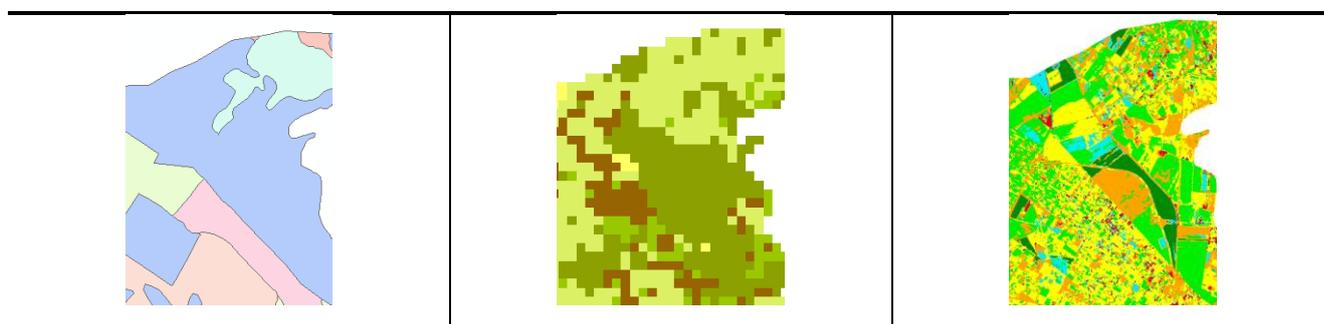


Fig. 6.5. dettagli dalle coordinate Lon = 36,011403, Lat = -0,207513. Da sinistra a destra: FAO Africover Project, 2000; ESA Globcover project, 2005; SBAM, 2015.

6.2 Risultati della procedura di stima dei raccolti

6.2.1 I parametri di simulazione

Le attività agricole condotte nelle regioni centrali della Great Rift Valley, registrano un sensibile calo dei livelli di produzione. Questo fenomeno è legato alla ridotta disponibilità di acqua nel suolo, causata dalla quasi totale assenza di supporto all'irrigazione e dall'inaffidabilità del pattern delle piogge, e dall'inefficienza delle tecniche di raccolta. La riduzione dei rischi di produzione è strettamente legata ad un migliore impiego delle risorse idriche e ad una maggiore comprensione degli effetti conseguenti l'interazione dei fattori climatici con la tipologia di suolo agricolo e le tecniche di gestione delle coltivazioni. Modelli di simulazione possono essere impiegati per accelerare la comprensione delle strategie di utilizzo e preservazione dei suoli e delle risorse idriche, in funzione delle specifiche condizioni climatiche, della tipologia e specie delle coltivazioni, rispetto a quanto non siano in grado di fare le più tradizionali strategie di analisi sul campo, basate principalmente sulla multi-locazione e sulla differenziazione della variante della specie agricola e della stagionalità delle coltivazioni campione.

Il modello AquaCrop simula la biomassa prodotta nell'area coltivata, e da questa stima il livello di raccolto atteso, in funzione dell'impatto sulla coltivazione di differenti fattori di stress guidati dalla disponibilità e dalla gestione delle risorse idriche. Ogni simulazione deve essere calibrata, in funzione della tipologia di coltivazione, sulla base dei dati climatici e della tipologia di suolo. In Tab. I-II, sono presentati rispettivamente, i valori medi nel periodo di simulazione dei dati climatici impiegati (valori di riferimento a 2 m sopra la superficie del suolo), ed i valori medi del profilo del suolo nei siti oggetto di studio.

Tabella I
Valori climatici di riferimento su media giornaliera

Month	Rain (mm)	Et0 (mm)	Tmin °C	Tmax °C	CO2 ppm
March	3	3.03	14.3	16.7	400.55
April	1.2	3.313	14.6	16.1	400.55
May	1.7	2.93	14.6	16.4	400.55
June	0.8	2.89	13.2	15.2	400.55
July	0.8	2.75	13.1	14.9	400.55
August	1.5	2.93	12.4	20.0	400.55
September	5.2	3.02	13.4	14.6	400.55

Tabella II
Profilo suolo

Spessore m	Sat Vol %	FC Vol %	WP Vol %	Ksat mm/day	CRa	Crb	
0.14	42.1	32.7	21.9	50.4	-0.569716	-1.397481	Horizon 1
0.14	45.1	39.4	27.5	11.0	-0.568140	-2.298866	Horizon 2
0.30	45.2	40.5	28.7	6.2	-0.567948	-2.638402	Horizon 3
0.22	45.5	35.8	18.3	64.3	-0.492813	-0.142651	Horizon 4
0.20	39.3	21.3	13.4	129.5	-0.312495	-0.318535	Horizon 5

Sat, Saturazione; FC, Field Capacity; WP, Wilting Point;

In Tab. III-IV, sono presentati i parametri con cui sono state calibrate, all'interno del modello AquaCrop, le specie agricole, nella fattispecie grano e mais, rilevate e validate dalla procedura di classificazione nell'area di studio:

Tabella I
Parametri di calibrazione del modello AquaCrop – Specie agricola: Mais

Parameters	Values
fruit/grain producing crop	2
Crop is sown	1
Determination of crop cycle : by calendar days	1
Soil water depletion factors (p) are adjusted by ETo	1
Base temperature (°C) below which crop development does not progress	8.0
Upper temperature (°C) above which crop development no longer increases with an increase in temperature	30.0
Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Upper threshold	0.25
Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Lower threshold	0.60
Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion (0.0 = straight line)	2.9
Soil water depletion fraction for stomatal control (p - sto) - Upper threshold	0.65
Shape factor for water stress coefficient for stomatal control (0.0 = straight line)	3.0
Soil water depletion factor for canopy senescence (p - sen) - Upper threshold	0.65
Shape factor for water stress coefficient for canopy senescence (0.0 = straight line)	2.7
Sum(ETo) during stress period to be exceeded before senescence is triggered	0
Soil water depletion factor for pollination (p - pol) - Upper threshold	0.80
Vol% for Anaerobiotic point (* (SAT - [vol%]) at which deficient aeration occurs *)	5
Considered soil fertility/salinity stress for calibration of stress response (%)	50
Response of canopy expansion is not considered	25.00
Response of maximum canopy cover is not considered	25.00
Response of crop Water Productivity is not considered	25.00
Response of decline of canopy cover is not considered	25.00
Response of stomatal closure is not considered	25.00
Minimum air temperature below which pollination starts to fail (cold stress) (°C)	10
Maximum air temperature above which pollination starts to fail (heat stress) (°C)	40
Minimum growing degrees required for full biomass production (°C - day)	12.0
Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop starts to be affected by soil salinity (dS/m)	2
Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop can no longer grow (dS/m)	10
Shape factor for soil salinity stress coefficient (0 : linear response)	0
Crop coefficient when canopy is complete but prior to senescence (KcTr,x)	1.05
Decline of crop coefficient (%/day) as a result of ageing, nitrogen deficiency, etc.	0.300
Minimum effective rooting depth (m)	0.30
Maximum effective rooting depth (m)	0.80
Shape factor describing root zone expansion	13
Maximum root water extraction (m ³ water/m ³ soil.day) in top quarter of root zone	0.028
Maximum root water extraction (m ³ water/m ³ soil.day) in bottom quarter of root zone	0.009
Effect of canopy cover in reducing soil evaporation in late season stage	50
Soil surface covered by an individual seedling at 90 % emergence (cm ²)	6.50
Canopy size of individual plant (re-growth) at 1st day (cm ²)	6.50
Number of plants per hectare	40000
Canopy growth coefficient (CGC): Increase in canopy cover (fraction soil cover per day)	0.16284
Maximum canopy cover (CCx) in fraction soil cover	0.99
Canopy decline coefficient (CDC): Decrease in canopy cover (in fraction per day)	0.9923
Calendar Days: from sowing to emergence	7
Calendar Days: from sowing to maximum rooting depth	55
Calendar Days: from sowing to start senescence	96
Calendar Days: from sowing to maturity (length of crop cycle)	147
Calendar Days: from sowing to flowering	62
Length of the flowering stage (days)	16
Crop determinancy linked with flowering	1
Excess of potential fruits (%)	50
Building up of Harvest Index starting at flowering (days)	76
Water Productivity normalized for ETo and CO ₂ (WP*) (gram/m ²)	33.7
Water Productivity normalized for ETo and CO ₂ during yield formation (as % WP*)	100
Crop performance under elevated atmospheric CO ₂ concentration (%)	50
Reference Harvest Index (HI ₀) (%)	48
Possible increase (%) of HI due to water stress before flowering	4
Coefficient describing positive impact on HI of restricted vegetative growth during yield formation	7.0
Coefficient describing negative impact on HI of stomatal closure during yield formation	3.0
Allowable maximum increase (%) of specified HI	10

Tabella II
Parametri di calibrazione del modello AquaCrop – Specie agricola: Grano

Parameters	Values
fruit/grain producing crop	2
Crop is sown	1
Determination of crop cycle : by growing degree-days	0
Soil water depletion factors (p) are adjusted by ETo	1
Base temperature (°C) below which crop development does not progress	0.0
Upper temperature (°C) above which crop development no longer increases with an increase in temperature	26.0
Total length of crop cycle in growing degree-days	2942
Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Upper threshold	0.5
Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Lower threshold	0.8
Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion (0.0 = straight line)	5.0
Soil water depletion fraction for stomatal control (p - sto) - Upper threshold	0.65
Shape factor for water stress coefficient for stomatal control (0.0 = straight line)	2.5
Soil water depletion factor for canopy senescence (p - sen) - Upper threshold	0.55
Shape factor for water stress coefficient for canopy senescence (0.0 = straight line)	2.5
Sum(ETo) during stress period to be exceeded before senescence is triggered	0
Soil water depletion factor for pollination (p - pol) - Upper threshold	0.85
Vol% for Anaerobic point (* (SAT - [vol%]) at which deficient aeration occurs)	5
Considered soil fertility/salinity stress for calibration of stress response (%)	50
Response of canopy expansion is not considered	25.00
Response of maximum canopy cover is not considered	25.00
Response of crop Water Productivity is not considered	25.00
Response of decline of canopy cover is not considered	25.00
Response of stomatal closure is not considered	25.00
Minimum air temperature below which pollination starts to fail (cold stress) (°C)	5
Maximum air temperature above which pollination starts to fail (heat stress) (°C)	35
Minimum growing degrees required for full biomass production (°C - day)	14.0
Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop starts to be affected by soil salinity (dS/m)	6
Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop can no longer grow (dS/m)	20
Shape factor for soil salinity stress coefficient (0 : linear response)	0
Crop coefficient when canopy is complete but prior to senescence (KcTr,x)	1.10
Decline of crop coefficient (%/day) as a result of ageing, nitrogen deficiency, etc.	0.150
Minimum effective rooting depth (m)	0.30
Maximum effective rooting depth (m)	0.88
Shape factor describing root zone expansion	15
Maximum root water extraction (m ³ water/m ³ soil.day) in top quarter of root zone	0.039
Maximum root water extraction (m ³ water/m ³ soil.day) in bottom quarter of root zone	0.022
Effect of canopy cover in reducing soil evaporation in late season stage	50
Soil surface covered by an individual seedling at 90 % emergence (cm ²)	1.50
Canopy size of individual plant (re-growth) at 1st day (cm ²)	1.50
Number of plants per hectare	3000000
Canopy growth coefficient (CGC): Increase in canopy cover (fraction soil cover per day)	0.09716
Maximum canopy cover (CCx) in fraction soil cover	0.99
Canopy decline coefficient (CDC): Decrease in canopy cover (in fraction per day)	0.03768
Length of the flowering stage (days)	11
Crop determinancy linked with flowering	1
Excess of potential fruits (%)	100
Building up of Harvest Index starting at flowering (days)	55
Water Productivity normalized for ETo and CO ₂ (WP*) (gram/m ²)	15.0
Water Productivity normalized for ETo and CO ₂ during yield formation (as % WP*)	100
Crop performance under elevated atmospheric CO ₂ concentration (%)	50
Reference Harvest Index (HI ₀) (%)	47
Possible increase (%) of HI due to water stress before flowering	12
Coefficient describing positive impact on HI of restricted vegetative growth during yield formation	10.0
Coefficient describing negative impact on HI of stomatal closure during yield formation	7.0
Allowable maximum increase (%) of specified HI	7
GDDays: from sowing to emergence	217
GDDays: from sowing to maximum rooting depth	557
GDDays: from sowing to start senescence	2087
GDDays: from sowing to maturity (length of crop cycle)	2942
GDDays: from sowing to flowering	1350
Length of the flowering stage (growing degree days)	146
CGC for GDDays: Increase in canopy cover (in fraction soil cover per growing-degree day)	0.006354
CDC for GDDays: Decrease in canopy cover (in fraction per growing-degree day)	0.002512
GDDays: building-up of Harvest Index during yield formation	764

6.2.2 Risultati della simulazione

In Tab. V, sono raccolte le coordinate geografiche di siti campione su cui sono state condotte le simulazioni, e la specie agricole ivi presenti. In Fig. 6.6 sono mostrate le serie storiche FAO dei livelli di produzione (valori medi per il Kenya) delle due specie agricole analizzate; evidenziati in giallo, i valori relativi all'anno 2015 relativi alle simulazioni condotte, appaiono del tutto coerenti con i valori di riferimento medi presentati. In Tab.VI sono invece disponibili i rapporti completi relativi alle simulazioni condotte; è possibile vedere come non siano stati presi in considerazione fattori di stress come la salinizzazione del suolo o particolari deficit della fertilità del terreno. Tuttavia fattori di stress termico, come pure elevati livelli di sofferenza al livello foliare e degli stomi, sono determinanti nel determinare una drastica riduzione dell'HI, da valori di riferimento prossimi al 48%, sino a valori del 18-23%.

Tabella V
Siti campione

Sample	Type	Lon	Lat
Sample field n. 1	Maize	35.92187 E	0.30612 N
Sample field n. 2	Maize	35.94662 E	0.34212 N
Sample field n. 3	Maize	35.92412 E	0.35112 N
Sample field n. 4	Maize	35.92412 E	0.35337 N
Sample field n. 5	Wheat	35.92187 E	0.30612 N
Sample field n. 6	Wheat	35.94212 E	0.34662 N
Sample field n. 7	Wheat	35.94662 E	0.34662 N

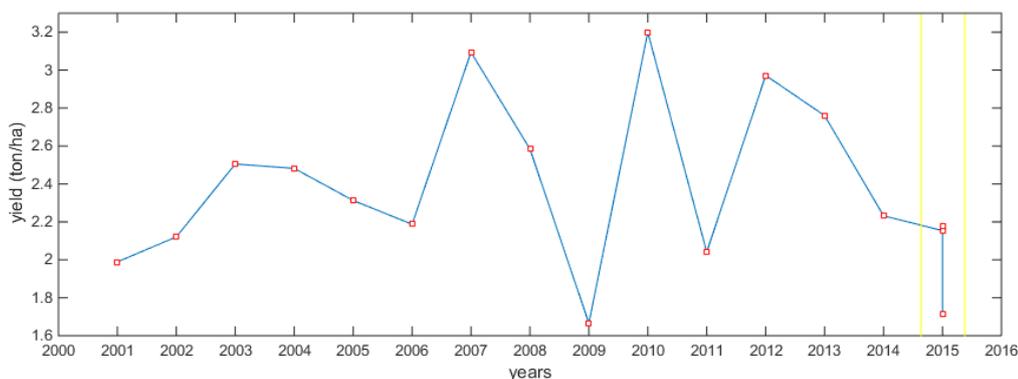
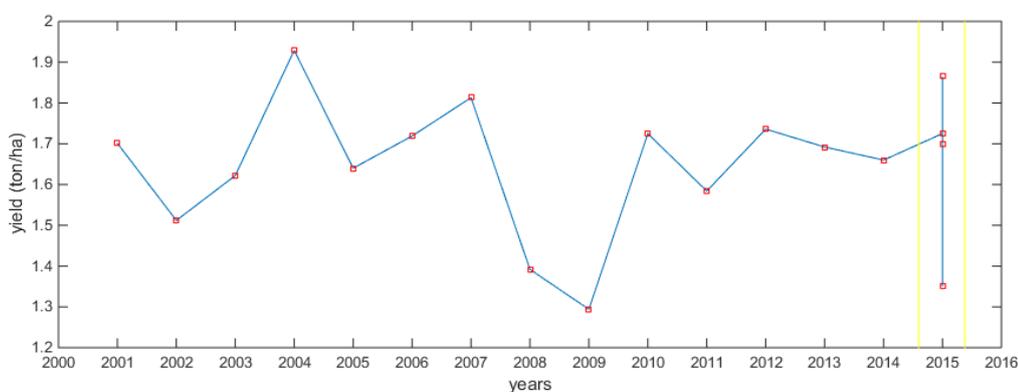


Fig. 6.6 Andamenti della produzione del Mais (in alto) e del grano (in basso) negli anni 2001-2015 (dati FAOSTATS)

Tabella VI
Sintesi simulazioni AquaCrop

		s.f. 1	s.f. 2	s.f. 3	s.f. 4	s.f. 5	s.f. 6	s.f. 7
Day1		22	22	7	15	1	1	15
Month1		3	3	4	3	3	3	3
Year1		2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015
Rain	mm	190	190	176	201	334	339	374
ETo	mm	441	435	434	446	603	601	586
GD	°C.day	1001	1001	1027	967	2950	2953	2947
CO2	ppm	400.55	400.55	400.55	400.55	400.55	400.55	400.55
Irri	mm	0	0	0	0	0	0	0
Infilt	mm	190	190	176	201	333	338	368
Runoff	mm	0	0	0	0	1	1	6
Drain	mm	0	0	0	0	0	0	0
Upflow	mm	0	0	0	0	0	0	0
E	mm	166	164	164	174	255	256	253
E/Ex	%	70	71	69	71	81	82	83
Tr	mm	125	126	109	126	155	155	143
TrW	mm	125	126	109	126	155	155	143
Tr/Trx	%	80	81	77	82	73	73	70
SaltIn	ton/ha	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SaltOut	ton/ha	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SaltUp	ton/ha	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SaltProf	ton/ha	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cycle	days	93	94	93	92	112	112	113
SaltStr	%	0	0	0	0	0	0	0
FertStr	%	0	0	0	0	0	0	0
WeedStr	%	0	0	0	0	0	0	0
TempStr	%	21	21	24	22	0	0	0
ExpStr	%	33	32	26	33	32	32	30
StoStr	%	20	20	21	18	34	34	39
BioMass	ton/ha	9.863	10.113	7.678	9.374	7.877	7.940	7.539
Brelative	%	52	54	45	50	31	32	30
HI	%	17.5	18.4	17.6	18.1	27.3	27.5	22.8
Yield	ton/ha	1.725	1.865	1.350	1.698	2.154	2.179	1.716
WPet	kg/m3	0.72	0.78	0.63	0.67	0.68	0.69	0.60
DayN		15	15	31	8	11	12	27
MonthN		8	8	8	8	9	9	9
YearN		2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015

Day1, Start day of simulation run; **Month1**, Start month of simulation run; **Year1**, Start year of simulation run; **Rain**, Rainfall; **ETo**, Reference evapotranspiration; **GD**, Growing degrees; **CO2**, Atmospheric CO2 concentration; **Irri**, Water applied by irrigation; **Infilt**, Infiltrated water in soil profile; **Runoff**, Water lost by surface runoff; **Drain**, Water drained out of the soil profile; **Upflow**, Water moved upward by capillary rise; **E**, Soil evaporation; **E/Ex**, Relative soil evaporation (100 E/Ex); **Tr**, Total transpiration of crop; **TrW**, Crop transpiration by weed infestation; **Tr/Trx**, Relative total transpiration (100 Tr/Trx); **SaltIn**, Salt infiltrated in the soil profile; **SaltOut**, Salt drained out of the soil profile; **SaltUp**, Salt moved upward by capillary rise from groundwater table; **SaltProf**, Salt stored in the soil profile; **Cycle**, Length of crop cycle; **SaltStr**, Soil salinity stress; **FertStr**, Soil fertility stress; **WeedStr**, Relative cover of weeds at canopy closure; **TempStr**, Temperature stress; **ExpStr**, Leaf expansion stress; **StoStr**, Stomatal stress; **Biomass**, Cumulative biomass produced; **Brelative**, Relative biomass; **HI**, Harvest Index adjusted for inadequate photosynthesis and water stress; **Yield**, Yield (HI x Biomass); **WPet**, ET Water Productivity for yield part (kg yield produced per m3 water evapotranspired); **DayN**, End day of simulation run; **MonthN**, End month of simulation run; **YearN**, End year of simulation run.

6.2.3 Conclusioni

In questo studio il modello AquaCrop è stato impiegato per stimare i livelli di copertura fogliare, biomassa e raccolto di due specie agricole, in risposta al deficit di irrigazione in condizioni di clima sub-umido e semi-arido, tipico delle highlands keniane. Dati osservati sulle aree di test sono stati forniti dagli archivi della FAO e dall'USDA FAS (United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service). La distanza fra stima ed osservazione dei raccolti di mais e grano nei siti in analisi (Fig. 6.7), è soddisfacente, con valori di R pari a 0.71 e 0.66 e MAE pari a 216 kg/ha e

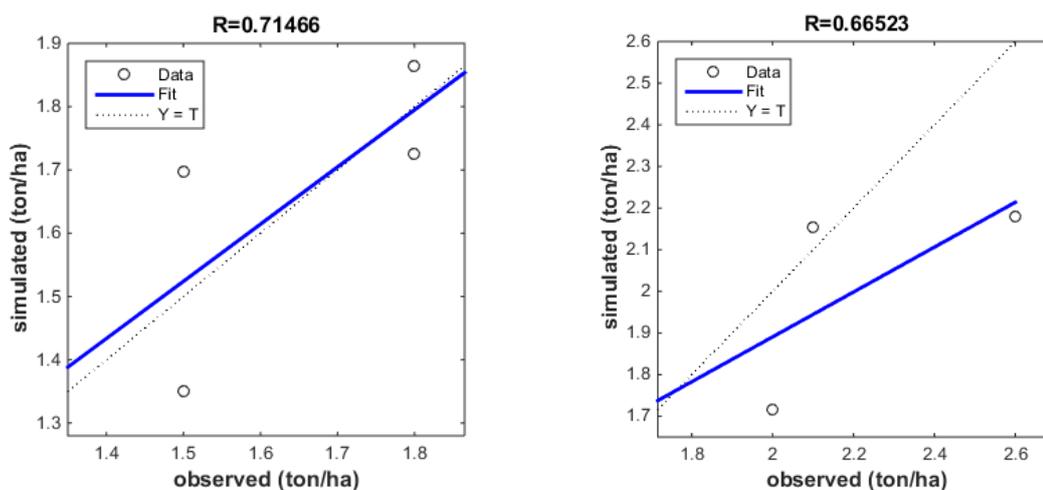


Fig. 6.7 Confronto fra dati simulati ed osservati per le specie mais (a sinistra) e grano (a destra).

650 kg/ha, rispettivamente per le due specie. Si può concludere che il modello AquaCrop può essere un valido strumento nella pianificazione e gestione delle attività agricole, in particolar modo considerando il fatto che il modello di simulazione richiede un numero limitato di parametri, in gran parte intuitivi ed espliciti, facilmente collezionabili (anche secondo procedure suscettibili di automazione) che, in molti casi, sono già disponibili. Non di meno le prestazioni del modello necessitano una più vasta ed approfondita validazione e valutazione, in funzione delle diverse possibili calibrazioni, e di una più ampia disponibilità di siti campione e specie agricole.

Bibliografía

- Allen W.A., Gausman H.W., Richardson A.J., Thomas J.R., 1969. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. *Journal of the Optical Society of America*, 59, 1376-1379.
- Antoine, J. 1994. Linking geographical information systems (GIS) and FAO's agroecological zone (AEZ) models for land resource appraisal. Pp 35-52. In: *Proceedings of the regional workshop on Agro-Ecological Zones methodology and Applications*. Bangkok, Thailand 17-23 November 1991. *World Soil resources Report 75*. Rome
- Balsamo G., Albergel C., Beljaars A., Boussetta S., Brun E., Cloke H., Dee D., Dutra E., Muñoz-Sabater J., Pappenberger F., de Rosnay P., Stockdale T. and Vitart F., 2015. ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 389–407, 2015
- Batjes, N.H., 2002. ISRIC-WISE global data set of derived soil properties on a 0.5 by 0.5 degree grid (Version 2.0). Report 2002/03 (available online via: <http://www.isric.org>). International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen.
- Becker-Reshef, I.; Justice, C.O.; Sullivan, M.; Vermote, E.F.; Tucker, C.; Anyamba, A.; Small, J.; Pak, E.; Masuoka, E.; Schmaltz, J.; et al. Monitoring global croplands with coarse resolution Earth observation: The Global Agriculture Monitoring (GLAM) project. *Remote Sens* 2010, 2, 1589–1609.
- Berrisford, Paul & Dee, D & Fielding, K & Fuentes, M & Kallberg, Per & Kobayashi, Shinya & Uppala, S. M.. (2009). The ERA-interim archive.
- Bhattacharya, B.K. and Sastry, P.S. 1999. Comparative evaluation of three-crop growth models for the simulation of soil water balance in oilseed Brassica. *Agr. Water Manage.* 42: 29-46.
- Boryan C., Yang Z., Mueller R. and Craig M., 2011. Monitoring US agriculture: the US Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, Cropland Data Layer Program. *Geocarto International* Vol. 26 , Iss. 5,2011
- Brodley C.E., Utgoff P. E., 1992. Multivariate Decision Trees. COINS Technical Report 92-82
- Brodley C.E., Utgoff P. E., 1995. Multivariate Decision Trees. *Machine Learning*, 19. 45-77.
- Brown de Colstoun E., M. Story, C. Thompson, K. Commisso, T. Smith, and J. Irons. 2003. National park vegetation mapping using multitemporal Landsat 7 data and a decision tree classifier. *Remote Sensing of Environment* 85:316-327.
- Buschmann C., Nagel E., 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote sensing*, 14, 711-722.
- Curcio J.A., Petty C.C., 1951. Extinctions coefficients for pure liquid water. *Journal of Optical Society of America*, 41, 302-304.

- Dawson T.P., Curran P.J., 1998. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2133-2139.
- Domaç A. & Süzen M.L., 2006, 'Integration of environmental variables with satellite images in regional scale vegetation classification', *Int. J. Remote Sens.*, vol. 27, pp. 1329-1350.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*, FAO, Rome, Italy. 193 pp.
- Eller B.M., 1977. Leaf pubescence: the significance of lower surface hairs for the spectral properties of the upper surface. *Journal of Experimental Botany*, 28, 1054-1059.
- Evett, S.R. and Tolk, J.A. 2009. Introduction: Can Water Use Efficiency be Modeled. *Agron. J.* 101: 423-425.
- FAO. 1978. Report on Agro-Ecological Zones Project. Vol 1. Methodology and Results for Africa. *World Soil Resources Report 48*. FAO: Rome.
- FAO, 1982. Potential population supporting capacities of lands in the developing world. Technical Report of project INT/75/P13, 'Land resources for populations of the future', undertaken by FAO/IIASA for UNFPA.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.1). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fayyad, U.M., Irani, K.B., 1992. "On the handling of continuous-valued attributes in decision tree generation," *Mach. Learn.* 8:87-02.
- Farr, T.G., E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, P. Rosen, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, 2007, *The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics*, volume 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Feret J.B., Francois C., Asner G.P., Gitelson A.A., Martin R.E., Bidet L.P.R., Ustin S.L., le Maire G., Jacquemond S., 2008. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3030-3043.
- Fischer G., Shah M., van Velthuisen H., Nachtergaele F., 2001, *AGRO-ECOLOGICAL ZONES ASSESSMENTS. LAND USE, LAND COVER AND SOIL SCIENCES – Vol. III - Agro-Ecological Zones Assessments*
- Fischer, G., H. van Velthuisen, M. Shah, F. Nachtergaele. 2002. *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. IIASA: Austria & FAO: Rome.
- Fisher, J.I. & Mustard, J.F 2007, 'Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data', *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, pp. 261–273
- M.A. Friedl, C.E. Brodley, 1997, "Decision tree classification of land cover from remotely sensed data," *Remote Sens, Environ*, 61:399-409.
- Gausman H.W., Allen W.A., Escobar D.C., 1974. Refractive index of plant cell walls. *Applied Optics*, 13, 109-111.
- Hmimina G., Dufrêne, E., Pontailier, J.Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., de Grandcourt, A., Burban, B., Flechard, C., Granier, A., Gross, P., Heinesch, B., Longdoz, B., Moureaux, C., Ourcival, J.M., Rambal, S., Saint André, L., Soudani, K 2013, 'Evaluation of the potential of MODIS satellite

- data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements', *Remote Sensing of Environment*, vol. 132, pp. 145–158
- Hosgood B., Jacquemond S., Andreoli G., Verdebout J., Pedrini A., Schmuck G., 2005. Leaf optical properties EXperimnet 93 (LOPEX93), Ispra, Italy.
- Kamiński, B.; Jakubczyk, M.; Szufel, P. (2017). "A framework for sensitivity analysis of decision trees". *Central European Journal of Operations Research*. doi:10.1007/s10100-017-0479-6
- Kidwell, K. B., (Ed.), NOAA Polar Orbiter Data User's Guide, U.S. Dep. of Commer., NESDIS, NOAA, Natl. Clim. Data Cent., Satell. Data Serv. Div., Washington, D.C., 1998.
- Knight, Edward J., and Geir Kvaran. "Landsat-8 operational land imager design, characterization and performance." *Remote Sensing* 6, no. 11 (2014): 10286-10305.
- Kong, Xiangsheng, Yonggang Qian, and Anding Zhang. "Cloud and shadow detection and removal for Landsat-8 data." In Eighth International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, pp. 89210N-89210N. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- Jacquemond S., Baret F., 1990. PROSPECT:A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75-91.
- Jacuemond S., Ustin S.L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B., 1996. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment*, 56, 194-202.
- Jaetzold, R. and Schimdt, H., 1983, "Farm Management Handbook of Kenya," Vol. II/B. Natura Condition and Farm Management Information. Ministry of Agriculture, Kenya in Cooperation with German Agriculture Team (GAT) of the German Agency for Technical Cooperation (GTZ), Nairobi, Kenya.
- Johnson, B. 2014, 'Effects of Pansharpening on Vegetation Indices', *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* Vol. 3, pp. 507-522
- Johnson, B.A., Scheyvens, H., Shivakoti, B.R., 2014. "An ensemble pansharpening approach for finer-scale mapping of sugarcane with Landsat 8 imagery," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 218-225.
- Jones H.G., 1992. *Plants and microclimate* (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge. Pp. 428, ISBN 0521425247.
- Justice, C.O., Hiernaux, P. 1983, 'Monitoring the grassland of the Sahel using NOAA AVHRR data: Niger 1983', *Int. Journal of Remote Sensing*, vol.7, pp. 1475-1498.
- Justice, C.O., Holben, B.N., Gwyne, M.D. (1986). Monitoring East African vegetation using AVHRR data'. *Int. Journal of Remote Sensing*, vol. 7, pp. 1453-1474.
- Justice, C.O., Townshead, J.R.G., Holben, B.N., Tucker, C. J 1985, 'Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data', *Int. Journal of Remote Sensing*, vol. 6, pp. 1271-1318.
- Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101: 448-459.

- Lawrence R. L., Wright A., 2001. Rule-based Classification Systems Using Classification and Regression Tree (CART) Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(10):1137-1142.
- Li Q., Wang C., Zhang B., Lu L., 2015, "Object-based crop classification with Landsat-MODIS enhanced time-series data," *Remote Sensing*, vol. 7, pp. 16091 – 16107.
- M.S. Mkhabela, P. Bullock, S. Raj, S. Wang, Y. Yang Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data
Agric. For. Meteorol., 151 (3) (2011), pp. 385-393
- Michael Fenner, The phenology of growth and reproduction in plants, In *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, Volume 1, Issue 1, 1998, Pages 78-91, ISSN 1433-8319, <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00053>.
- M. Pax-lenney, C.E. Woodcock, J.B. Collins, H. Hamdi, 1996. "The status of agricultural lands in Egypt: the use of multitemporal NDVI features derived from Landsat TM," *Remote Sens. Environ.*, 56, 8-20.
- Quinlan, J. R. (1987). "Simplifying decision trees". *International Journal of Man-Machine Studies*. 27 (3): 221. doi:10.1016/S0020-7373(87)80053-6
- Rudolf, B.F.T., G.T.Batista., Wheat Yield Estimation of The Farm Level Using TM Landsat and Agrometeorological Data. *Int. J. Remote Sensing*. Vol. 12, 2477-2484., 1991.
- Sinclair, T.R. and Seligman, N.G. 1996. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agron. J.* 88: 698-703.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model for predicting yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101: 426–437
- T. Suepa, J. Qi, S. Lawawirojwong, J.P. Messina, 2016. "Understanding spatio-temporal variation of vegetation phenology and rainfall seasonality in the monsoon Southeast Asia," *Environmental Research*, 147, 621-629.
- Thenkabail, P. S., Ward, A. D., Lyon, J. G., and Maerry, C. J. (1994). Thematic Mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60, 437–442
- Twomlow, S., Mugabe, F.T., Mwale, M., Delve, R., Nanja, D., Carberry, P. and Howden, M. 2008. Building adaptive capacity to cope with increasing vulnerability due to climatic change in Africa – A new approach. *Phys. Chem. Earth Part B* 33: 780-787.
- Vieira M. A., Formaggio A.R., Rennò C.D., Atzberger C., Aguiar D.A., Mello M.P., 2012. Object Based Image Analysis and Data Mining applied to remotely sensed Landsat time series to map sugarcane over large areas. *Remote Sensing of Environment*. 2012, 123, 553-562.
- Villa P., Stroppiana D., Fontanelli G., Ramin A., Brivio P. A., 2015, "In-season mapping of crop type with optical and X-band SAR data: a classification tree approach using synoptic seasonal features," *Remote Sensing*, vol. 7 (10), pp. 12859-12886.
- Vrieling, A., de Beurs, K.M., Brown, M.E. 2011, 'Variability of African farming systems from phenological analysis of NDVI time series', *Climatic Change* DOI10.1007/s10584-011-0049-1.

- Wald L., 2002. Data fusion, definitions and architectures – Fusion of images of different spatial resolution. Les Presses de L'Ecole des Mines, Paris. pp. 200, ISBN 291176238X.
- X. Zhang, M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hodges, F. Gao, B.C. Reed, A. Huete, 2002. "Monitoring vegetation phenology using MODIS," Remote Sensing of Environment, 84, 471-475.

