

# Trent'anni di osservazione della Terra alla Scuola di Ingegneria di Firenze

*Luciano Alparone*

Le attività di Osservazione della Terra (OT) alla Scuola di Ingegneria di Firenze sono iniziate nel 1994, quando la prima stazione per la ricezione dei dati MeteoSat di I Generazione è stata installata presso il Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni (DET). In realtà, mentre il DET è stato storicamente testimone di un'intensa attività di telerilevamento con sistemi attivi coerenti a microonde, del tipo radar a sintesi di apertura (SAR), l'osservazione con sistemi ottici era inesistente prima del 1994.

La stazione permetteva la connessione diretta con un satellite della costellazione per accedere ai dati che erano stati pre-elaborati nella stazione di Darmstadt, in Germania, sede del Consorzio EumetSat, che a partire dal 1977 sovrintende alle attività europee in ambito meteorologico. Di fatto, il satellite serviva soltanto da specchio, perché i dati grezzi venivano prima inviati a terra per le prime correzioni e la sovrapposizione delle scritte e dei confini dei vari stati, e poi rimandati sul satellite che li inviava alle stazioni. Oltre ai dati strettamente necessari per le previsioni meteorologiche, cioè una banda pancromatica allargata alle lunghezze d'onda del vicino infrarosso (da 0.5 a 0.9 micron) per il tracking delle formazioni nuvolose, una banda nell'assorbimento del vapor d'acqua (da 6 a 7 micron), per determinare la quantità di acqua delle nubi, e una banda nell'infrarosso termico (da 10.5 a 12.5 micron), per misurare la temperatura superficiale delle nubi, il sistema acquisiva, assieme a una serie di dati puntuali per lo studio dell'atmosfera, una serie di bande spettrali nel visibile e vicino infrarosso con cui era possibile effettuare correzioni geometriche e proiezioni cartografiche, tipicamente secondo Mercatore, e ottenere mappe di classificazioni tematiche, di indici di vegetazione, di temperatura, ed altri prodotti, tutti alla scala chilometrica delle osservazioni da satellite geostazionario, ma con elevata ripetitività temporale, dell'ordine di 15'.

A seguito dell'istituzione di un corso di Sistemi di Telerilevamento, presso la Laurea Specialistica in Telecomunicazioni, sono iniziate attività a tutto tondo con dati ottici e termici prodotti anche da sistemi eliosincroni con orbita quasi-polare, e quindi risoluzioni a terra decametriche e tempi di rivisitazione, sempre alla stessa ora locale, dell'ordine di settimane. La generazione culminata con il satellite LandSat 7 della NASA, lanciato

Luciano Alparone, University of Florence, Italy, [luciano.alparone@unifi.it](mailto:luciano.alparone@unifi.it), 0000-0002-8984-938X

Referee List (DOI 10.36253/fup\_referee\_list)

FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup\_best\_practice)

Luciano Alparone, *Trent'anni di osservazione della Terra alla Scuola di Ingegneria di Firenze*, © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0975-5.06, in Stefano Selleri, Alberto Tesi, Enrico Vicario (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 2. Ingegneria dell'Informazione*, pp. 25-30, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0975-5, DOI 10.36253/979-12-215-0975-5

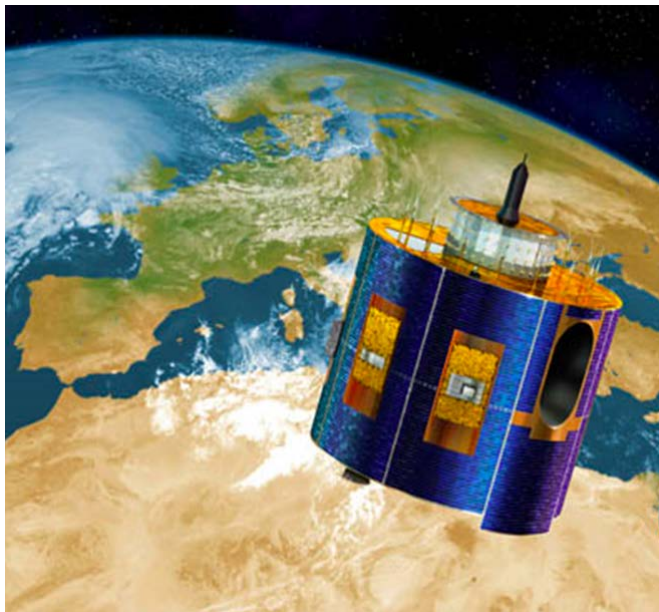


Figura 6 – Una visione ‘artistica’ di un satellite della costellazione MeteoSat che guarda l’Europa dall’orbita geosincrona.

nel 1999 ed equipaggiato col sensore ETM+ (Enhanced Thematic Mapper+), rappresenta un punto di riferimento.

Dopo il pensionamento nel 2004, del collega Pier Franco Pellegrini, promotore delle attività sopra riportate, ho avuto l’opportunità di ereditarne il corso. In precedenza, intorno al 1997, avevo iniziato con l’IFAC-CNR, all’epoca IROE, una fortunata collaborazione su temi di elaborazione di immagini applicata a dati telerilevati multibanda. Grazie alla presenza della banda pancromatica, i dati prodotti dalla generazione dei satelliti SPOT, acronimo francese di «sistema per l’osservazione della terra» erano il candidato ideale per sperimentare le nuovissime tecniche di fusione ‘pan-sharpening’, neologismo coniato nel 2003, ma di fatto praticato fin dal 1987. Era da poco iniziata la generazione dei sensori multispettrali (MS) ad altissima risoluzione (risoluzione uguale a un metro o superiore), iniziata con IKONOS-2 (di IKONOS-1 fallì il lancio), che offriva quattro bande multispettrali a 4 m e una banda pancromatica (Pan) a 1 m. A seguito, nel 2001, arrivò QuickBird-2 (stesso infausto esito per il primo lancio), con risoluzione a terra di 2.8 m per MS e 0.7 per Pan. Nonostante siano stati entrambi dismessi nel 2015, questi satelliti hanno costituito una pietra miliare per l’OT su piccolissima scala.

Negli ultimi vent’anni, l’OT da sensori ottici, anche iperspettrali, con oltre 200 bande nell’intervallo coperto dalla radiazione solare (da 0.4 a 2.5 micron), ha avuto notevole impulso presso il DET, in seguito ridenominato DINFO, con una cospicua produzione scientifica, supportata da una adeguata attività progettuale. A coronamento del primo ventennio di attività in OT, iniziata nel 1994, nel 2015 è stato pubblicato un volume monografico di oltre 350 pagine sulla fusione di immagini telerilevate da satellite, con autori congiunti, due di IFAC-CNR e uno del DIIMT, Università di Siena: L. Alparone, B. Aiazzi, S. Baronti, A. Garzelli, *Remote Sensing Image Fusion* edito dall’americana CRC Press. Il libro condensa l’attività pregressa nel campo della fusione e dell’elaborazione di immagini telerilevate in generale.

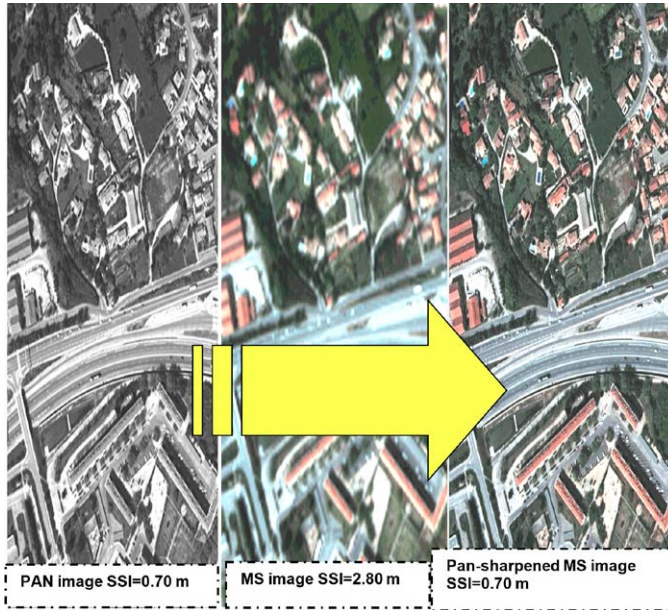


Figura 7 – Esempio di Pansharpining di dati QuickBird rappresentati in vero colore (RGB): il dato MS ha 2.8 m di risoluzione a terra (SSI); il prodotto Pan-sharpened ha la stessa risoluzione a terra del dato Pan, 0.7 m.

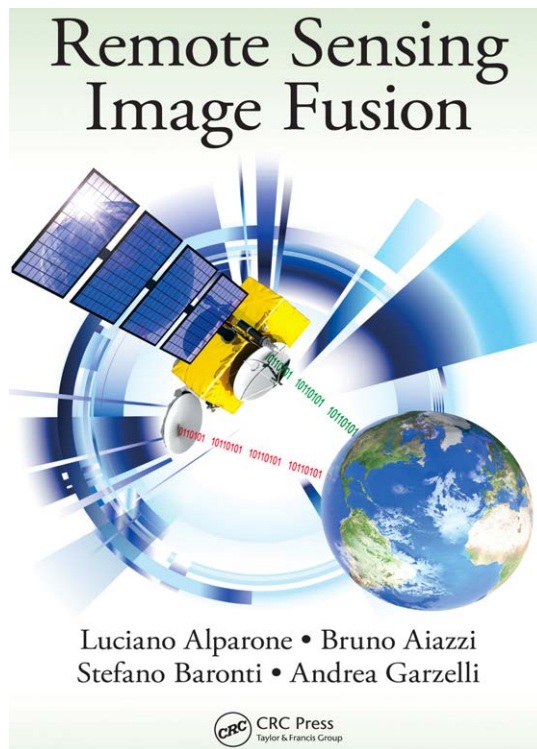


Figura 8 – Copertina del volume monografico Remote Sensing Image Fusion.

Un ulteriore impulso è arrivato con il lancio della generazione di satelliti a risoluzione estrema (EHR), meno di 0.5 m per il Pan, e la disponibilità di otto bande nel visibile e vicino infrarosso (VNIR) allocate su due strumenti distinti. Dopo WorldView-1, che prevedeva solo un Pan a 0.5 m, nel 2009 è stato lanciato WorldView-2 (2 m MS, 0.5 m Pan), seguito nel 2013 da WorldView-3 (1.6 m MS, 0.4 m Pan). Quest'ultimo dispone di otto bande nell'infrarosso a onda corta (SWIR), con risoluzione tre volte minore di quella del VNIR. La missione più recente, WorldView-4, aveva solo quattro bande MS a 1.2 m e Pan a 30 cm. Sfortunatamente, dal 2019 non è più operativo a causa di un guasto a uno dei giroscopi.

Queste tipologie di dati a risoluzione estremamente spinta hanno aperto nuovi orizzonti e prospettive applicative, ma anche creato dei problemi, fino ad ora trascurati, di consistenza, qualità e integrità dei dati su cui opera la fusione. Le correzioni geometriche e il processo di geo-codifica, che rende l'immagine rilevata lungo l'orbita satellitare sovrapponibile a una carta geografica, richiedono dei modelli digitali di elevazione (DEM) di adeguata risoluzione spaziale. I DEM standard, prodotti tipicamente a 10 m, non sono pienamente adeguati a dati di risoluzione intorno al metro. Ne consegue che l'errore massimo di localizzazione spaziale garantito dal distributore è di 3 m, ma quel che è peggio i dati MS e Pan possono essere disallineati tra di loro, perché gli strumenti che li acquisiscono operano da punti diversi dell'orbita e quindi con diverse parallassi. Il disallineamento tra i dati prodotti da due strumenti è nel caso peggiore pari a 6 metri, che è pari al doppio dell'errore di geo-localizzazione delle singole tipologie di dati. Al momento, è in corso uno studio congiunto con il DIIMT di Siena sull'armonizzazione dei dati MS e Pan, che ne standardizza l'usabilità, rimuovendo automaticamente artefatti di 'aliasing', dovuti a insufficiente campionamento spaziale, motivato da vincoli di sistema, e disallineamenti locali, dovuti a mancata compensazione delle parallassi, a causa della ridotta risoluzione spaziale dei DEM disponibili.

Negli ultimi anni si è assistito a un'esplosione del numero di metodi di fusione, non più basati sui concetti classici dei due decenni precedenti, ma che prendono spunto da specifiche teorie matematiche, ad esempio, ragionamento bayesiano, super-risoluzione e decomposizioni sparse, ma soprattutto su metodologie dell'intelligenza artificiale (IA) basate su apprendimento. Le reti neurali convoluzionali (CNN) sono il boom degli ultimi anni. La loro capacità di apprendere a diverse scale e quindi su aree più o meno estese, le rende ideali per un approccio multi-risoluzione alla fusione. A dispetto della loro apparente versatilità, i metodi di fusione basati su architetture CNN non sono riproducibili e quindi i loro risultati sono imprevedibili. Inoltre, per il processo di apprendimento che opera su base blocchi di pixel, le immagini fuse presentano sempre artefatti vistosi, che influiscono poco sulla qualità globale, ma molto fastidiosi. L'attività portata avanti nel DINFO, in questo senso, è stata maggiormente rivolta ad analizzare i limiti e i difetti di questi metodi, piuttosto che a promuoverne l'uso e lo studio indiscriminato.

In anni recenti, grazie allo sforzo congiunto delle agenzie spaziali, europee e non europee, lo spirito pionieristico delle prime osservazioni della Terra ha trovato nuovo impulso nelle tecnologie della banda larga, che permettono a chiunque di connettersi con i server delle agenzie per accedere a dati pubblici di alta qualità, copertura globale della Terra e di buona ripetitività. Nell'ambito del progetto Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), sono accessibili dati ottici a 10, 20 e 60 m in una varietà di bande volte alla soluzione di problemi specifici, analisi della vegetazione, delle zone innevate, dei ghiacciai, addirittura dell'inquinamento atmosferico da aerosol. Grazie alla costellazione Sentinel-2 formata da due satelliti gemelli, i tempi di rivisitazione si sono ridotti a 5 giorni. In parallelo la missione LandSat della NASA è proseguita con i satelliti 8 e 9, l'ultimo operativo dal 2021. Entrambi montano il sensore OLI (Opera-

tional Land Imager) e il TIRS (Thermal Infra-Red Spectrometer), oltre a una banda pancromatica. Oltre alla fusione MS/Pan, diventa interessante valutare le potenzialità della fusione tra dati ottici e termici. I primi sono distribuiti nei formati riflettanza di superficie o radianza spettrale esootmosferica. Invece i dati termici sono di norma distribuiti come temperatura superficiale del terreno, anche se invertendo la curva di Planck, che definisce la radiazione termica della materia, è possibile convertirli in radianza spettrale superficiale. Quest'ultima diventa confrontabile con la riflettanza di superficie dei dati ottici. Tuttavia, non si può fare a meno di considerare che i dati ottici e termici sono tra loro eterogenei, non tanto come formati, che possono essere armonizzati, quanto come principi fisici su cui si fondano. Di conseguenza, la fusione non è più tra dati omogenei, come MS e Pan, ovvero una fusione unimodale, ma multimodale, come è tipico in ambito bio-medicale, in quanto le immagini da fondere sono prodotte da metodiche totalmente differenti. Questo comporta una serie di problemi non banali, anche solo per la valutazione della qualità dei dati fusi, dato che i consueti protocolli e indici statistici valgono solo per fusione unimodale. Negli anni, la valutazione di qualità del dato fuso è stata il motivo dominante dell'attività del DINFO, anche perché non si può stabilire se un metodo sia meglio di un altro, se non disponendo di misure di qualità affidabili. Si ricorda a proposito il riconoscimento dell'IEEE nel 2005 per il Best Paper Award del 2004. L'articolo riguarda una misura di qualità per immagini multibanda basata sulla teoria dei numeri ipercomplessi.

Dopo il lancio del primo satellite della generazione MeteoSat III, meno di due anni fa, l'attività si è rivolta, almeno in prospettiva, ad un problema annoso e di fatto insolubile con le tecnologie pregresse: la rivelazione precoce di incendi boschivi. Favorita dalla nuova disposizione delle bande e dalle nuove caratteristiche di risoluzione spaziale e soprattutto radiometrica delle bande nell'infrarosso termico, a cui è stata aggiunta una banda nel medio infrarosso, con lunghezza d'onda tra 3.5 e 5.5 micron, diventa abbordabile il problema di rivelare incendi la cui estensione sia addirittura lo 0.01% dell'area del pixel, che tipicamente è dell'ordine di uno o più chilometri quadrati, almeno nel Sud-Ovest dell'Europa. A fronte di una ripetitività delle acquisizioni di 10', o anche meno in modalità di crisi, in questo senso, diventa critica la sensibilità dei sensori che producono le varie bande e la possibilità di combinare informazioni complementari sul fronte dell'incendio e la zona fumante a temperatura via via decrescente. Purtroppo, mentre la rivelazione degli incendi ad un limitato grado di sviluppo, intorno al centinaio di metri quadri, è fattibile, le problematiche connesse alla gestione degli interventi umani per affrontare l'incendio risultano ancora di difficile attuazione. La presenza di MeteoSat III G non ha impedito lo scempio che gli incendi hanno fatto nei nostri territori anche quest'anno.

Al momento presente, le attività sono a una svolta. Da un lato lo studio e lo sviluppo di metodi di analisi/elaborazione/fusione sempre più sofisticati ed efficienti. Dall'altro, il consolidamento delle attività pregresse di una comunità scientifica, che svincolata da logiche di mercato, tende a perseguire finalità speculative, spesso avulse da contesti pratici e applicativi. In questo contesto, sarebbe interessante stabilire limiti e potenzialità della fusione basata su apprendimento. Nonostante lo sviluppo sorprendente della letteratura specialistica e la diffusione pervasiva dell'IA nella vita di ogni giorno, non se ne trova riscontro in un prodotto di vasto uso, come Google Earth, dove le immagini satellitari visualizzate sono tutte prodotti 'pan-sharpened' ottenuti con metodi estremamente consolidati e tradizionali; forse non al top delle prestazioni, ma veloci e prevedibili nei risultati, in quanto riproducibili e non parametrici.

Questa serie di considerazioni vuole mettere in luce come la ricerca scientifica volta a migliorare la qualità dell'esistenza umana, nel caso presente le metodologie per il

monitoraggio dell'ambiente in cui viviamo, deve sempre raffrontarsi con lo sviluppo tecnologico, che in un certo senso ne motiva l'esistenza. Se il telerilevamento ambientale ha avuto tanto sviluppo negli ultimi decenni è perché qualcuno ha pensato bene di dispiegare tecnologie avanzate e costose, sviluppate in prevalenza in ambito militare, per la soluzione di problemi legati all'inquinamento ambientale, alla gestione delle risorse agro-alimentari, allo studio dei cambiamenti climatici, al monitoraggio di eventi critici di natura geofisica e/o meteorologica. In trent'anni di lavoro, didattico presso la Scuola di Ingegneria, di ricerca presso il DET e poi il DINFO, assieme ai collaboratori che si sono avvicinati nel tempo, ho sempre cercato di perseguire l'intento di fornire, con onestà intellettuale e abnegazione, quello che è il principale e, secondo me, anche l'unico, prodotto della ricerca: qualcosa che non si improvvisa né tantomeno si compra, la conoscenza, in un mondo dove sembra che il detto 'sapere è potere' funzioni alla rovescia.