

I GEORGOFILI

Quaderni
2005-X



L'AGRIMENSURA AI TEMPI DEL GPS: DAL RILIEVO TOPOGRAFICO ALLA GUIDA AUTOMATICA

Firenze, 21 ottobre 2005

SOCIETÀ EDITRICE FIORENTINA

Copyright © 2006
Accademia dei Georgofili
Firenze
<http://www.georgofili.it>

Proprietà letteraria riservata

Supplemento a «I Georgofili. Atti dell'Accademia dei Georgofili»
Anno 2005 - Serie VIII - Vol. 2 (181° dall'inizio)

Responsabile redazionale: dott. Paolo Nanni

Servizi redazionali, grafica e impaginazione
SOCIETÀ EDITRICE FIORENTINA
Via G. Benivieni 1 - Firenze
Tel. 055 5532924
Fax: 055 5532085
info@sefeditrice.it
www.sefeditrice.it

INDICE

FABRIZIO MAZZETTO

*La gestione delle aziende agricole ai tempi del GPS:
dai quaderni di campagna informatici all'agricoltura di precisione* 7

MASSIMO LAZZARI

*Il controllo delle macchine agricole mediante GPS:
dalla agricoltura di precisione alla guida automatica* 69

La gestione delle aziende agricole ai tempi del GPS: dai quaderni di campagna informatici all'agricoltura di precisione

I. IL PROBLEMA DELLA QUALITÀ GESTIONALE IN AGRICOLTURA

Anche per l'agricoltura del nuovo millennio l'innovazione tecnologica è destinata a evolvere verso forme di sistemi di produzione incardinati sul concetto di *qualità*. Si tratta di sistemi in cui le nuove tecnologie saranno sempre più destinate a consentire:

- la messa in essere di *sistemi colturali a basso impatto ambientale e a costo ridotto*, attraverso l'impiego di strumenti per il controllo automatico della distribuzione di tutti i fattori di produzione a logorio totale, con particolare riguardo ai potenziali inquinanti (fertilizzanti e agrofarmaci);
- l'attuazione di *forme di "management" avanzato* nell'ottica di un miglioramento della qualità dei controlli da svolgere da parte della direzione dell'azienda agricola, con conseguenti incremento della produttività del lavoro e riduzione dei costi di produzione;
- la creazione di condizioni manageriali che in prospettiva favoriscano, anche all'interno delle aziende agricole, l'attuazione di *forme automatiche di documentazione* in grado di rispondere a obiettivi: sia di *certificazione di qualità* (tipo ISO 9000 e 14000, ecc.); sia di *trasparenza dei propri protocolli di produzione* nonché di *tracciabilità* delle produzioni realizzate, onde soddisfare le esigenze di conoscenza del mercato e dei consumatori finali.

Con ciò, cercando di realizzare un'agricoltura sostenibile in termini sia ecologico-ambientali sia socio-economici. *Gestire la qualità significa, innanzitutto, gestire l'informazione all'interno dei cicli operativi che costituiscono qualsivoglia sistema produttivo*. E la *gestione dell'informazione* è cosa tutt'altro che semplice, poiché richiede l'utilizzo di tecnologie appropriate (hardware e

* IIA – Istituto di Ingegneria Agraria, Università degli Studi di Milano

software) da parte di personale adeguatamente preparato. Gestire la qualità significa, pertanto, investire in nuove tecnologie (soprattutto informatiche) e risorse umane.

Le varie forme applicative del Management Informatizzato e della cosiddetta Agricoltura di Precisione e possono concretamente contribuire al conseguimento di detti obiettivi. Ciò, tuttavia, a patto di affrontare con il dovuto rigore metodologico e con la necessaria gradualità le varie fasi del trasferimento tecnologico al mondo operativo. Tuttavia, è ferma opinione di chi scrive che, nonostante le diverse applicazioni già realizzate nel nostro Paese, intorno a tali argomenti continui a permanere una certa confusione, soprattutto sul piano metodologico. Si spazia, infatti, dalle notevoli aspettative che derivano dalla possibilità di gestire in modo differenziato e automatico le dosi nei trattamenti fertilizzanti e fitosanitari, alla disillusione maturata intorno a talune applicazioni (come la mappatura delle produzioni), alla erronea convinzione che basti acquisire una qualunque tecnologia che impieghi sistemi di posizionamento satellitari per potersi iscrivere nel ruolo di “agricoltore di precisione”.

L'obiettivo di questa memoria vuole essere quello di fornire un primo contributo – tutt'altro che esaustivo e risolutivo – nel delineare un quadro metodologico e applicativo che possa fare da riferimento ai molteplici aspetti che il mix di tecnologie meccaniche, elettroniche e informatiche offre da diversi anni, proponendosi come soluzione di primo piano tra le innovazioni radicali di settore per l'agricoltura. E ciò sottolineando il fatto che uno dei maggiori scogli da superare – *anche alla luce di esigenze emergenti come la tracciabilità delle produzioni, la gestione di qualità dei sistemi sia produttivi sia ambientali* – riguarda, appunto, il trasferimento e l'applicazione delle tecnologie informatiche in agricoltura.

2. L'AGRICOLTURA DI PRECISIONE (AP)

2.1 *Terminologia e definizioni*

È ormai dalla metà degli anni '90 che anche in Italia, sebbene tra svariate difficoltà tecniche ed economiche, si assiste a una lenta e progressiva diffusione di tecnologie informatiche in agricoltura (con particolare interesse nei settori cerealicolo e viticolo) che tentano, a vari livelli, di mettere in pratica i succitati obiettivi di qualità gestionale. Nella loro formulazione originale, si tratta per lo più di tecnologie strettamente mirate a una gestione puntuale

dell'attività di campo secondo approcci di precisione cosiddetti *sito-specifici* (Mangold, 1995; Stafford et al., 1997). Si tratta di metodiche, in gran parte di derivazione anglosassone e statunitense, che propongono processi, tecnologie e tipologie di lavoro che rientrano nell'ambito della cosiddetta *Agricoltura di Precisione* (AP). Con questa definizione ci si riferisce alla traduzione italiana di diversi termini inglesi quali: i) *precision farming systems*; ii) *prescription farming*; iii) *target farming*; iv) *site specific farm management*.

L'ultima definizione è quella che maggiormente centra l'idea di "precisione" insita nella traduzione italiana. Essa, infatti, pone più l'accento sulle capacità di gestire in modo automatico porzioni di terreno su scala "sub-apprezzamento" (secondo logiche *sito-specifiche*, per l'appunto) attraverso una opportuna integrazione tra tecnologie informatiche e pratiche agronomiche. In sintesi, l'approccio sito-specifico comporta *l'utilizzo di tecnologie, tecniche e metodiche di lavoro in pieno campo che consentano la coerente e non ambigua possibilità di trattare in modo differenziato singole aree omogenee di terreno delle quali si conoscano le effettive caratteristiche produttive*. Pertanto, l'adozione di tecniche AP consente una più o meno spinta *automazione delle attività di controllo operativo* in campo, venendo il trattorista in parte disattivato nelle sue funzioni di regolazione delle macchine.

Tuttavia, focalizzare l'attenzione solamente sugli aspetti dell'automazione del controllo operativo offre un'immagine troppo restrittiva dell'intero contesto. Ciò comporta il rischio di indirizzare le modalità di trasferimento tecnologico dell'AP verso approcci a utilità limitata, troppo distanti da quell'insieme di molteplici benefici integrati che le stesse tecnologie AP dovrebbero garantire sul fronte della qualità gestionale. Infatti, vi sono dei settori produttivi – come, ad esempio, quello viticolo – in cui l'importanza dell'automazione di taluni processi di campo è vista con priorità secondaria rispetto alla necessità di disporre in tempi rapidi di adeguate informazioni relative agli stadi fenologici e/o agli stati fitosanitari delle coltivazioni per pianificare interventi correttivi sulla conduzione dei vigneti. In altre parole: la capacità di reperire e utilizzare informazioni a fini gestionali diventa un obiettivo primario per i responsabili della conduzione aziendale.

Con l'intento di integrare i concetti di "management" aziendale e automazione dei processi, l'Agricoltura di Precisione è definibile come *una strategia gestionale che utilizza tecnologie informatiche per raccogliere dati da fonti multiple in vista di un loro successivo utilizzo nell'ambito di decisioni riguardanti le attività produttive di campo* (RNC, 1999).

Tale concetto è di fondamentale importanza poiché *associa* la qualità gestionale alla capacità di *prendere decisioni* in base a informazioni mirate, pre-

viamente raccolte attraverso un'attività di monitoraggio globale dei processi produttivi. E ciò riguarda:

- sia *l'ambiente decisionale operativo*: controllo, regolazione e intervento diretto sui processi durante la loro esecuzione, di norma anche con funzioni integralmente automatizzate (es.: distribuzione di fattori secondo logiche sito-specifiche, guida assistita o automatica, ecc.);
- sia *l'ambiente decisionale direttivo*: pianificazione e controllo dei processi, con definizione delle loro modalità spazio-temporali di gestione, inclusa la scelta delle risorse umane e tecnologiche, nonché dei fattori della produzione, da impiegare (organizzazione del lavoro e modalità di svolgimento delle operazioni).

2.2 I ruoli aziendali dell'Informazione

In un'ottica di gestione della qualità aziendale, l'informazione può essere considerata un *bene* con ruolo, al tempo stesso, sia di *fattore produttivo*, sia di *prodotto* dell'attività imprenditoriale.

Essa infatti, benché fisicamente immateriale, ha una natura assimilabile a tutti gli altri fattori materiali comunemente impiegati nello svolgimento delle attività produttive (concimi, antiparassitari, manodopera, macchine, ecc.) in quanto:

1. comporta dei costi di approvvigionamento ed esercizio;
2. necessita di sistemi di immagazzinamento (archiviazione);
3. richiede appropriate forme di gestione e utilizzo, variabili a seconda delle finalità per cui l'informazione stessa è impiegata.

Oltre a ciò, l'informazione è anche un bene che può configurarsi:

- sia come *fattore reimpiegato* all'interno del processo produttivo, quando impiegata in attività di regolazione e controllo dei processi stessi (*utilizzo intra-aziendale*; fig. 1A);
- sia come *vero e proprio prodotto* destinato a una fruizione esterna all'azienda, quando impiegata per documentare lo svolgimento dei processi produttivi in modo conforme a specifici disciplinari di produzione (*utilizzo extra-aziendale*; fig. 1B).

Questo secondo punto, in realtà, si manifesta solamente a fronte di forme avanzate di conduzione, quali sono – ad esempio – quelle richieste dall'adozione di sistemi espliciti di controllo della qualità previste dalle norme ISO

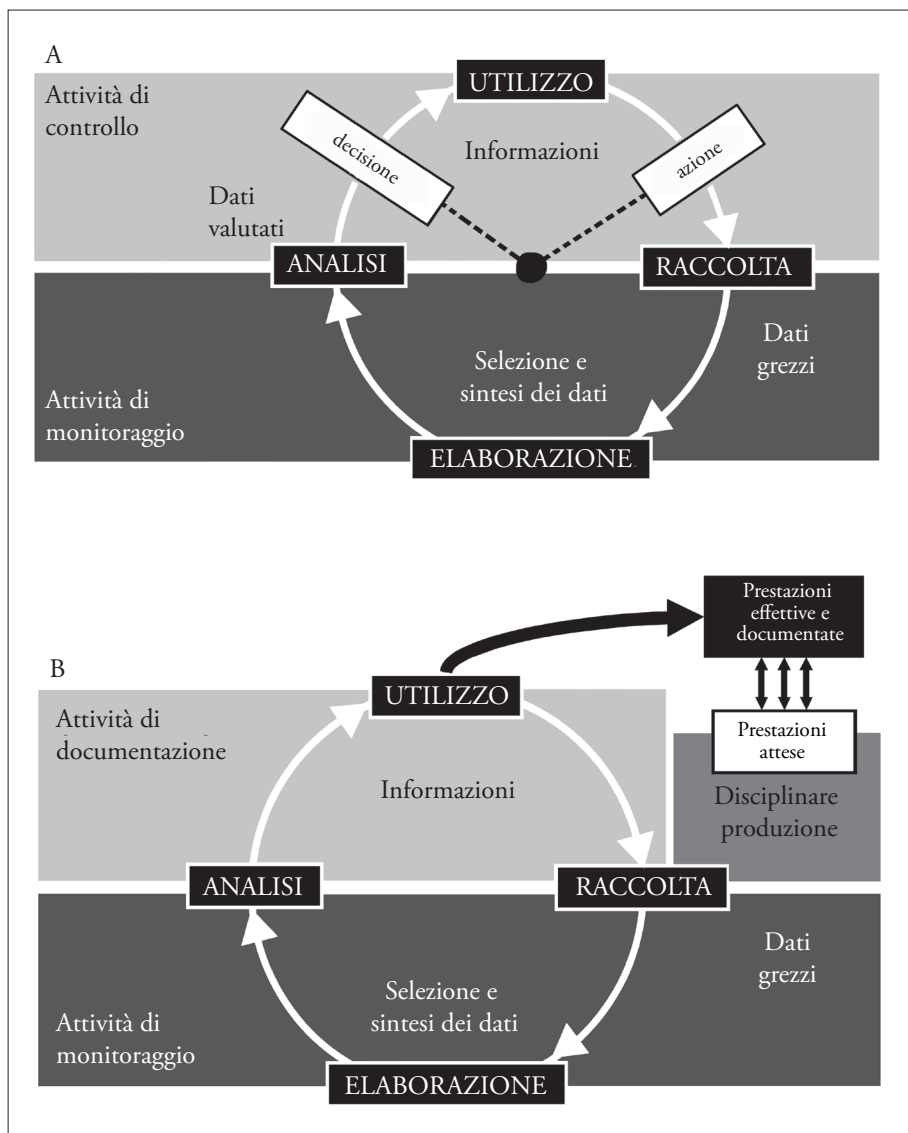


Fig. 1 *Ruolo delle informazioni nelle imprese agricole: le informazioni, che originano sempre da dati grezzi, diventano tali quando trovano un concreto utilizzo in ambito aziendale (A: quando servono a prendere decisioni) o extra-aziendale (B: quando servono a documentare specifici aspetti delle attività produttive)*

9000, ove i sistemi di qualità di fatto coincidono con i sistemi di controllo. In ogni caso, è chiaro come l'utilità del fattore "informazione" si estrinsechi

a livello di attività sia di *controllo* e sia di *documentazione*, sempre comunque accompagnate da una necessaria fase con attività di *monitoraggio*.

Peraltro, l'informazione come "prodotto" è ravvisabile anche in attività imprenditoriali non necessariamente coincidenti con il sistema "azienda agricola". Si pensi, per esempio, alle imprese agromeccaniche e al nuovo ruolo che esse potrebbero assumere con la *vendita di informazioni* nell'ambito di prestazioni di servizi quali la mappatura delle produzioni o delle dosi di distribuzione di un dato fertilizzante.

2.3 *Informazione e ambiti decisionali aziendali*

La disponibilità di informazione presuppone l'esistenza di flussi informativi tra i tre diversi ambiti decisionali (1. *operativo*; 2. *direttivo*; 3. *strategico*) con cui viene tradizionalmente schematizzata la gerarchia organizzativa aziendale (Anthony, 1965; fig. 2). In generale, i flussi di informazioni generati a livello operativo devono essere trasformati, combinati e consolidati prima di raggiungere l'ambito direttivo. Essi devono poi essere ulteriormente trasformati e consolidati prima di ritornare a livello operativo o di raggiungere il livello strategico. Ne consegue che è proprio il livello decisionale direttivo ad avere in carico i maggiori oneri di lavoro relativi al trattamento dei dati e alla produzione di informazioni. Configurandosi come ambito in posizione intermedia rispetto agli altri, deve continuamente gestire flussi di messaggi bidirezionali con gli ambiti operativo e strategico, producendo informazioni attraverso processi di:

- *sintesi strategica*: quando destinate all'imprenditore per attività di pianificazione a lungo termine;
- *sintesi operativa*: quando destinate ai responsabili (es. operai e trattoristi) dello svolgimento dei singoli processi elementari.

Per far ciò, oltre a trasmettere informazioni, la direzione deve essere anche in grado di ricevere continuamente dati per la loro elaborazione. Deve, cioè, attivare un *monitoraggio* delle varie attività a tutti i livelli. Il che comporta oneri di lavoro con coinvolgimento di personale appositamente responsabilizzato tutt'altro che indifferenti. Tali responsabilità ben difficilmente possono essere assegnate agli addetti dell'ambito operativo in quanto, oltre a essere già impegnati nelle loro specifiche attività, raramente hanno le competenze per svolgere un monitoraggio completo dei vari processi (il rischio di perdita dei dati rimarrebbe, comunque, elevato).

Si tratta di un problema comune a tutte le strutture produttive: nei settori industriale e terziario la progressiva informatizzazione delle procedure



Fig. 2 Il triangolo di Anthony (1965) convenzionalmente adottato per schematizzare gli ambiti decisionali aziendali. Il diffondersi delle tecnologie informatiche impone di articolare il livello direttivo in ambito manageriale e ambito dei cosiddetti “lavoratori della conoscenza”

aziendali ha reso ormai indispensabile una nuova figura professionale di supporto alla direzione aziendale vera e propria. Si tratta dei cosiddetti *knowledge workers* (ovvero *lavoratori della conoscenza*; Laudon et al., 2005) il cui ruolo è quello di: coordinare e gestire la raccolta dei dati aziendali; svolgere elaborazioni intermedie e analisi con produzione di informazioni di sintesi; provvedere alla produzione di documentazione e alla distribuzione delle informazioni nei vari settori aziendali per mettere in pratica i processi decisionali dell’ambito direttivo (fig. 2).

Il graduale trasferimento delle tecnologie informatiche che si prospetta per il settore agrario, soprattutto se associato all’introduzione di tecniche AP, comporterà, anche per le aziende agricole, la necessaria presenza aggiuntiva di tali figure professionali – solo in parte gestibili attraverso consulenze esterne – con conseguenti ripercussioni sull’organizzazione del lavoro e sui costi aziendali.

Il trasferimento di informazioni tra i vari ambiti decisionali, peraltro, deve essere realizzato con la tempestività adeguata al tipo di decisione da intraprendere. Così, a livello aziendale, la *concimazione* è un’operazione con limitati vincoli temporali; raramente riveste caratteristiche d’urgenza e di norma non richiede verifiche e riscontri immediati sulle sue modalità di esecuzione. Viceversa, altre operazioni – come i *trattamenti fitosanitari* – richiedono decisioni

ed esecuzioni tempestive, con necessità di frequenti osservazioni sullo stato fitosanitario delle colture e di monitoraggi continui delle condizioni climatiche dell'ambiente di coltivazione. In quest'ultimo caso, è evidente il limite della "capacità di osservazione" e di "movimento" dei responsabili addetti al monitoraggio (*scouting*): vaste estensioni colturali richiedono l'individuazione di opportune aree campione, eventualmente attrezzate con sensori per il rilievo dei vari parametri. Questi potrebbero essere registrati in archivi opportunamente strutturati in modo tale da facilitare una loro pronta elaborazione e visualizzazione.

L'ambito strategico, dal canto suo, deve sempre avere un pronto accesso a qualunque tipo di archivio. Essendo preposto alla pianificazione di lungo termine, il responsabile delle decisioni strategiche ha, in genere, molto interesse – analogamente a quello delle decisioni direttive – nel mantenere aggiornata la memoria storica delle attività aziendali, articolate nei loro vari aspetti. In definitiva, mentre fino a oggi le informazioni sono state essenzialmente patrimonio delle persone, è evidente come sia ormai diventata improcrastinabile la necessità di raccoglierle su supporti informatizzati indipendenti.

3. I SISTEMI INFORMATIVI AZIENDALI (SIA)

3.1 *Caratteristiche generali*

La gestione dell'informazione tra e per i diversi ambiti decisionali si effettua per mezzo dei sistemi informativi aziendali (SIA). Al contrario delle informazioni (immateriali), un sistema informativo è un insieme di strumenti fisici ben definiti che, interagendo tra loro, mettono il decisore in condizioni di (Latini, 1986):

- raccogliere i dati a livello di ciascun singolo processo (evento produttivo);
- elaborare e archiviare i dati raccolti, mediante modelli e database progettati in funzione della natura delle decisioni che, in un secondo momento, si dovranno intraprendere;
- utilizzare i dati previamente elaborati, completando la loro trasformazione in informazione nell'ambito di un ben preciso processo decisionale.

I principali componenti di un SIA devono, conseguentemente, prevedere:

1. sistemi di automazione, controllo e acquisizione dati;
2. sistemi di supporto alle decisioni (fogli elettronici, applicazioni modellistiche con modelli di tipo rappresentativo e/o decisionale, sistemi esperti, ecc.);
3. sistemi di comunicazione e trasferimento dati.

Sistemi di acquisizione dati, archivi delle informazioni e programmi devono rimanere permanentemente in collegamento fra loro attraverso opportune *reti di comunicazione*, senza le quali si devitalizza l'efficienza del sistema informativo nel suo complesso. Per quanto detto, la responsabilità della gestione del sistema globale spetta alla direzione aziendale e la sua progettazione va, quindi, tarata sulle esigenze di quest'ultima.

Due sono gli aspetti essenziali da considerare nella realizzazione di un sistema informativo:

- Innanzitutto, la progettazione di un SIA deve essere orientata alla raccolta di “informazioni” (approccio *infologico*) e non alla raccolta di “dati” (approccio *datalogico*); tale impostazione terminologica e metodologica – di derivazione ISO 9000 – sottolinea ancora la distinzione tra *dato* (generico messaggio relativo a particolari stati di un sistema reale) e *informazione* (dato che, eventualmente anche in seguito a processi di elaborazione e sintesi, trova impiego in un processo decisionale).
- In secondo luogo, uno dei primi problemi da affrontare è *come bilanciare la composizione dei componenti hardware* (sensori e regolatori; sistemi di acquisizione dati; reti di comunicazione) *e software del sistema* (modelli di elaborazione, sintesi e archiviazione dei dati; fogli elettronici; programmi di statistica; modelli di ottimizzazione; database).

Per quanto concerne il secondo punto, sono sicuramente da evitare le soluzioni estreme: un sistema totalmente orientato verso dispositivi di acquisizione dati e reti di comunicazione si rivela, alla fine, inutile se non dispone di adeguati strumenti per la loro gestione (viene, cioè, compromessa la trasformazione *dato* → *informazione* → *decisione*). Viceversa, sofisticati modelli di supporto decisionale sono inservibili qualora richiedano enormi quantità di dati in ingresso da introdurre manualmente. In merito, secondo un'impostazione metodologica derivata dal settore industriale (Pighin et al., 2005), è utile prevedere l'articolazione di un SIA in due distinti sottosistemi tra loro interagenti: i sistemi *operazionali* e i sistemi *informativi*.

3.2 Sistemi operazionali

I sistemi operazionali costituiscono l'infrastruttura informatica su cui appoggia l'attività esecutiva. Per mezzo loro l'azienda svolge tutte le sue principali funzioni: dalla pianificazione e gestione delle operazioni, alla vendita dei prodotti o all'erogazione di servizi. Devono includere tutte le funzioni

di pianificazione e gestione dei controlli operativi, finanche a fornire eventuali supporti per l'amministrazione e la contabilità.

Si tratta di sistemi che aiutano nella gestione di problemi *ben strutturati*, ovvero di problemi per i quali è possibile fissare a priori una sequenza di passaggi elementari da compiere per arrivare a una soluzione. Come tali, questi sistemi hanno la tendenza a strutturare i vari flussi informativi secondo schemi predefiniti, nonché a standardizzare i contenuti informativi per minimizzare la possibilità di commettere errori e, nello stesso tempo, rendere le operazioni fluide e rapide.

La sua struttura dovrebbe essere ottimizzata nell'ottica di sostenere l'attività di un numero potenzialmente elevato di persone che interagiscono puntualmente con la base di dati in attività di ricerca, creazione e aggiornamento delle informazioni. Tale base di dati è unica per tutta l'impresa, risultando dall'integrazione dei dati derivanti dal funzionamento dei vari settori funzionali in cui risulta articolata l'azienda.

Per quanto detto, le funzioni principali del sistema operativo riguardano:

1. il *monitoraggio*, ovvero la raccolta dei dati relativi a eventi e parametri che concernono il contesto produttivo nei suoi vari aspetti e che presentano una palese utilità nel supportare le decisioni finalizzate al controllo dell'attività operativa;
2. la *documentazione*, ovvero la capacità di rendere disponibile le informazioni secondo tempi, modi e procedure variabili in funzione: sia delle figure decisionali interne che le richiedono; sia di eventuali figure esterne all'azienda ma con essa coinvolte in attività di certificazione o controllo funzionale;
3. il *controllo operativo*, ovvero la capacità di guidare un responsabile esecutore attraverso procedure e flussi predefiniti e controllati, con poche possibilità di incorrere in errori, fino a giungere alla capacità di rendere automatica – o semiautomatica – l'esecuzione stessa dei singoli eventi.

In definitiva, per un sistema operativo risultano fondamentali:

- le *procedure*, attraverso cui si definiscono i corretti flussi di informazione e si guidano gli operatori nella loro attività quotidiana, esecutiva o di controllo operativo;
- la *base di dati*, che deve essere strutturata in modo tale da fornire buone prestazioni in relazione alla tipologia e al numero di operazioni effettuate dagli utenti e gestite dal sistema.

3.3 Sistemi informazionali

I processi decisionali dei livelli superiori (direttivo e strategico) riguardano scelte di vario orizzonte temporale, spesso legate alla pianificazione delle attività aziendali. Come tali, tali processi di norma non sono standardizzabili né tanto meno riconducibili a procedure automatizzate (*problemi strutturati o semistrutturati*); infatti, essi sono influenzati dai modelli di realtà che i singoli decisori soggettivamente utilizzano per effettuare le scelte.

I sistemi informazionali *sono pensati per supportare il processo decisionale seguendo i passaggi logici del decisore e offrendogli, nel contempo, la possibilità di avere visioni diversamente organizzate dei dati*. In tal senso, risultano fondamentali gli strumenti che potenziano le capacità di analisi dei decisori attraverso: i) analisi interattive, ii) raffronti comparativi tra diversi quadri di sintesi, iii) strumenti di ricerca di correlazioni, singolarità e aggregazione dei dati, iv) simulazioni condotte a partire sui dati operativi ipotizzando scenari per il futuro.

La natura delle informazioni direzionali sono sostanzialmente diverse da quelle operazionali. Infatti prevedono:

- l'*aggregazione dei dati*, in quanto le decisioni richiedono informazioni sintetiche, anche per poter effettuare valutazioni comparative sulle decisioni attuate in passato;
- la *profondità temporale*, poiché molte valutazioni richiedono di quantificare uno o più indicatori attraverso opportune linee di tendenza; spesso, peraltro, è indispensabile il raffronto tra i dati attuali con quelli di analoghi periodi in anni precedenti; per tale motivo, il sistema informazionali deve poter effettuare l'integrazione tra i dati operativi correnti (forniti dal sistema operativo) con i dati storici; come tale, il sistema è responsabile della gestione della *memoria storica aziendale*;
- la *ricerca per soggetto*, anziché per evento (tipica dei sistemi operazionali); infatti, mentre per il controllo operativo è indispensabile poter seguire i passaggi elementari dei singoli processi, nel controllo direttivo prevale l'analisi su entità aziendali aggregate; in tal senso, si parla anche di *analisi per centri di costo*; per esempio, prevale l'interesse per conoscere i costi e i tempi di esecuzione delle arature svolte su mais nell'anno corrente, piuttosto che poter analizzare i dettagli di ogni singola operazione eseguita su uno specifico appezzamento in una certa data;
- l'*analisi multidimensionale*, nel senso che uno degli aspetti fondamentali del processo decisionale riguarda il poter incrociare e correlare informazioni di natura diversa, ovvero poter guardare gli eventi aziendali da *differenti*

punti di vista. Il sistema deve, pertanto, consentire la ricerca di dati che corrispondano a coordinate di interesse per il decisore; per esempio, analizzare le rese di una coltura per tipo di lavorazioni del terreno praticate, per dosi di concimazioni e/o trattamenti eseguiti, per tempestività di esecuzione dei lavori, ecc.

Il punto focale dei sistemi operazionali riguarda esclusivamente la *base di dati*, che nei settori dell'industria e del terziario assume esplicitamente il nome diverso di *data warehouse* (*magazzino dei dati*), a indicarne l'assoluta centralità. Esso deve essere:

1. *altamente strutturato* sia per contenere tutti i possibili dati indispensabili al processo decisionale, sia per poter ridurre i tempi della loro interrogazione;
2. *periodicamente aggiornato* con dati coerenti, completi, corretti e attendibili (necessario, in tal senso, la sua integrazione col sistema operazionali onde poter attingere direttamente ad aggregazioni ottenibili da dati raccolti col monitoraggio); contrariamente al sistema operativo, l'accesso ai dati è prevalentemente *in sola lettura*;
3. *permanente*, ovvero l'esito di una sintesi deve essere sempre lo stesso, indipendentemente dal momento o dalla modalità dell'interrogazione dei dati;
4. *facilmente interrogabile* secondo criteri variamente articolabili e percorsi liberi (sono previste periodiche funzioni di aggiornamento automatico).

3.4 *I sistemi a supporto dell'Agricoltura di Precisione*

Le maggiori difficoltà finora riscontrate – sia all'estero sia in Italia – nelle esperienze applicative della AP derivano tutte, sostanzialmente, dall'aver proposto una serie di tecnologie principalmente finalizzate al controllo operativo senza aver preventivamente risolto il problema di come creare le condizioni più favorevoli a un trasferimento dei sistemi informativi nel contesto dell'azienda agraria.

Nella sua forma più completa, infatti, l'AP prevede di controllare e gestire la variabilità territoriale dell'ambiente produttivo secondo i citati approcci sito-specifici, specie in riferimento alla possibilità di automatizzare le dosi di distribuzione nelle operazioni tipiche delle cure colturali (concimazioni e trattamenti). Ciò comporta: i) la disponibilità di idonee tecnologie meccaniche, elettroniche e informatiche da incorporare a bordo dei mezzi adibiti all'esecuzione del lavoro; ii) la capacità di generare mappe prescrittive – in

base a dettagli di diversa granularità, a seconda degli obbiettivi del lavoro – a partire dai dati storici preventivamente registrati con riguardo alla specifica zona interessata.

Si tratta, in definitiva, di disporre: sia di un *sistema operativo* in grado di registrare i dati e gestire le fasi di automazione del controllo operativo; sia di un *sistema informazionale* in grado di archiviare i dati storici secondo coerenti forme di aggregazione e di coadiuvare i decisori nelle fasi di analisi, fino a pervenire alla definizione delle mappe prescrittive.

In termini pratici, le difficoltà più rilevanti – non ancora pienamente risolte – riguardano le modalità con cui i due sistemi operativo e informazionale vengono fatti *dialogare* tra loro. Si tratta, comunque, di sistemi la cui disponibilità funzionale deve sempre risultare *in linea*; ovvero, le tecnologie informatiche per la loro gestione devono garantire costantemente l'accesso ai dati (in lettura o scrittura, a seconda dei casi) indipendentemente dai tempi o dai luoghi in cui ciò si renda necessario.

In merito, è utile rifarsi alla terminologia dell'informatica gestionale affermata nel settore industriale, in base alla quale si distinguono le due diverse famiglie di sistemi tecnologici destinate – nell'ambito del trattamento dei dati aziendali – a mantenere separate le elaborazioni di tipo analitico da quelle legate alla gestione dei singoli eventi produttivi (denominati anche, in gergo tecnico, *transazioni*). Tali famiglie riguardano:

- sistemi OLTP (*On Line Transaction Processing*), che includono i componenti dei sistemi operazionali adibiti al trattamento delle informazioni connesse ai singoli processi od eventi aziendali (le transazioni, appunto), per garantire la massima efficienza nella gestione – eventualmente automatizzata – dei processi operativi; devono garantire una elevata interattività sistema-utente in fase sia di monitoraggio (modifica o ricerca di informazioni puntuali) sia di controllo dell'avanzamento dei processi;
- sistemi OLAP (*On Line Analytical Processing*), che includono i componenti dei sistemi informazionali adibiti all'analisi interattiva dei dati da parte di un ristretto numero di responsabili, ottimizzati per garantire la massima efficienza nell'elaborazione dei dati di sintesi e la massima flessibilità nelle interrogazioni.

Il ruolo di tali sistemi è sinteticamente descritto in figura 3. Essa illustra una sorta di “manifesto metodologico”, in base al quale è stata originariamente proposta l'AP, che considera il processo decisionale e gestionale dell'attività produttiva articolato in tre fasi distinte:

1. registrazione dei dati (monitoraggio delle attività; rilievi fenologici; monitoraggio fitosanitario; consumo di fattori; rese produttive, ecc.);

2. analisi e pianificazione (elaborazione e sintesi integrata dei dati previamente raccolti; sviluppo di processi decisionali e gestionali a carico della direzione aziendale; generazione di mappe tematiche descrittive o prescrittive);
3. controllo puntuale delle operazioni di campo (attività di controllo operativo in cui è possibile esplicitare sul campo la *precisione* attraverso gli approcci sito-specifici della AP).

Per quanto detto, la gestione delle fasi 1 e 3 è a carico di sistemi OLTP, mentre la gestione della fase 2 è a carico di un sistema OLAP. Non è possibile

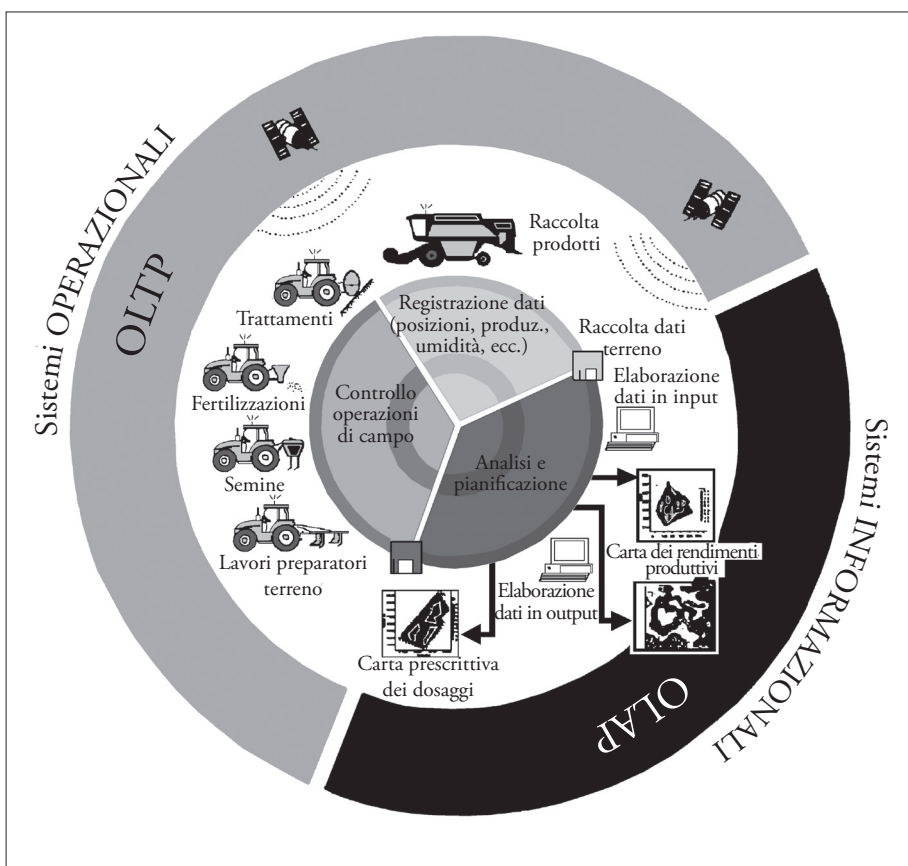


Fig. 3 Sistema informativo aziendale (SIA) completo per l'agricoltura di precisione. I sistemi operazionali (OLTP), relativi alla registrazione dati e al controllo automatico delle operazioni di campo, si devono integrare con sistemi informazionali (OLAP) per l'analisi e la pianificazione delle attività

procedere con la terza fase se prima non si sono impostate e svolte coerentemente le prime due. Viceversa, è inutile – e peraltro costoso – procedere con la prima fase (ad esempio, con la mappatura delle produzioni) se non è prevista la messa in essere delle due fasi successive.

In un sistema AP completo e integrato le tre fasi devono, pertanto, coesistere. E ciò significa che risultano contestualmente necessari sistemi informativi di tipo sia OLTP sia OLAP. Da qui le notevoli difficoltà di realizzazione, soprattutto se si pensa alle caratteristiche del loro contesto applicativo – il settore agrario – tradizionalmente più reticente rispetto ad altri (per cause di natura tecnica, economica e culturale) a recepire le innovazioni delle tecnologie informatiche. Una prima possibile e ragionevole soluzione al problema è quella di proporre un'introduzione graduale delle varie tecnologie, privilegiando logiche più orientate al controllo e alla gestione operativa dei processi che non all'impiego di sofisticati e complessi strumenti di analisi.

Ciò significa che il punto di partenza ottimale per l'attivazione di tecniche AP dovrebbe innanzitutto prevedere la messa in essere di sistemi OLTP deputati: sia alla registrazione dei dati aziendali attraverso forme di monitoraggio le più automatizzate possibili (*fase 1*); sia alla realizzazione di soluzioni che agevolano – sino a giungere all'eventuale automazione – l'esecuzione di specifici processi (si pensi ai dispositivi di guida assistita o automatica da installare a bordo dei trattori; *fase 3*). Il continuo utilizzo di tali strumenti avrebbe, peraltro, il grande vantaggio di rendere familiare ai decisori aziendali l'impiego delle tecnologie informatiche. È ragionevole ipotizzare che ciò potrebbe progressivamente indurre l'esigenza di strumenti di analisi sempre più sofisticati, come ad esempio il passare dall'analisi di dati organizzati in semplici tabelle di un foglio elettronico all'uso di veri e propri database o alla loro visualizzazione su mappe georeferenziate, eventualmente anche attraverso elaborazioni geostatistiche, fino a giungere alla rappresentazione delle informazioni su layer sovrapponibili tipica degli ambienti GIS.

In altre parole, l'esigenza di integrare nel sistema anche la funzionalità di componenti OLAP sarebbe destinata a maturare come naturale conseguenza dell'impiego di strumenti OLTP. I problemi di integrazione, tuttavia, non sussistono solamente tra i componenti di sistemi informativi relativi ad ambiti decisionali diversi; essi, infatti, sono anche presenti tra i componenti di uno stesso sistema OLTP (od OLAP). Un'integrazione efficace implica la modularità dei suoi componenti, con forme standardizzate di comunicazione e trasferimento dati. Ciò, da un punto di vista pratico, significa individuare innanzitutto idonee soluzioni tecnologiche (sensori, bus di comunicazione, dispositivi attuatori, ecc.) da confezionare in vista del conseguimento di detta

modularità e standardizzazione. Il tutto tenendo conto dello stato dell'arte delle varie tecnologie che spesso soffrono di una certa carenza nell'interfaciarsi tra le diverse funzioni delle tecniche AP (monitoraggio, analisi, documentazione e controllo).

Va da sé, infine, che il peso relativo tra componenti OLTP e OLAP dipende anche dagli obiettivi del controllo decisionale, ovvero dall'orientamento delle aziende stesse. Così, ad esempio, gli estensori anglosassoni delle tecniche AP prevedevano innanzitutto il loro impiego in aziende cerealicole di grandi estensioni, ove la regolazione sito-specifica automatica di processi di campo (*fase 3*) derivava dalla necessità di gestire la notevole variabilità delle caratteristiche pedo-climatiche del territorio, distribuito anche su diverse migliaia di ettari (realtà, questa, che a livello nazionale potrebbe riguardare entità organizzative come i consorzi di raccolta o tutela). Da la tendenza dei sistemi OLTP a prevalere sui sistemi OLAP, specie sottoforma di sofisticati attrezzature sia di monitoraggio sia di automazione da installare a bordo delle macchine agricole.

Diversamente, le esperienze maturate in altri settori produttivi come la viticoltura (da cui deriva il termine di *viticoltura di precisione*), hanno profuso maggiori sforzi tecnologici nel migliorare lo svolgimento delle *fasi 1* (*monitoraggio*) e *2* (*controllo e pianificazione*). In altri termini: tali sistemi richiedono un bilanciamento pressoché paritario di componenti OLTP e OLAP, a supporto di sistemi informativi caratterizzati dalla capacità di un elevato grado di automazione nell'acquisizione dei dati previsti dal monitoraggio, il tutto accompagnato dalla disponibilità di una adeguata dotazione di modelli e strumenti informatici per un più accurato svolgimento della fase di analisi e pianificazione. *Infatti, all'aumentare dei dati deve necessariamente seguire anche un aumento delle capacità analitiche da applicare ai dati stessi, trasformandoli in informazioni all'interno di un processo decisionale.*

3.5 Le tipologie di monitoraggio nel management informatizzato

Nei sistemi AP il monitoraggio a livello aziendale dovrebbe essere sempre impostato con riguardo a tre ambiti distinti:

- *monitoraggio ambientale*, prevede l'acquisizione di vari parametri di natura fisica (temperatura, umidità, radiazione solare, tessitura del terreno, ecc.) e/o chimica (pH, contenuto nutrienti nel suolo, ecc.) connessi all'ambiente in cui ha luogo l'attività produttiva; nel caso delle produzioni vegetali, di norma riguarda la misura dei parametri pedologici e climatici;

- *monitoraggio operativo*, prevede l'acquisizione di tutti i principali dati relativi allo svolgimento di attività produttive aziendali (aspetti propri delle attività dell'uomo, organizzazione aziendale e metodi di lavoro);
- *monitoraggio produttivo*, prevede l'insieme delle osservazioni direttamente svolte a livello delle entità biologiche che costituiscono l'oggetto della produzione vera e propria; a seconda che si tratti di produzioni vegetali o animali, è più pertinente parlare, rispettivamente, di *monitoraggio colturale* e di *monitoraggio zootecnico*; nel primo caso le osservazioni si svolgono sulle colture in atto e sono volte a raccogliere informazioni in merito a stadi fenologici, stati nutrizionali, stati fitosanitari, attese produttive, ecc.; nel secondo caso, la raccolta di informazioni riguarda il comportamento degli animali (singolarmente o in gruppi) in merito a produzioni giornaliere, stati sanitari, condizioni riproduttive (monitoraggio calori), assunzione di alimenti, trattamenti veterinari, ecc.

Quest'ultimo punto lascia intendere come le tecniche AP, benché inizialmente proposte come esclusiva innovazione tecnologica per i sistemi colturali, trovino – in realtà – una ragion d'essere in tutti i settori produttivi agro-ambientali. In particolare, l'informatizzazione tecnologica del settore zootecnico risulta ormai diffusa da anni, ben prima che si potesse parlare di controllo sito-specifico della variabilità di campo. Ciò anche grazie al fatto che le produzioni zootecniche – soprattutto quelle relative agli allevamenti da latte – presentano caratteristiche che, sul piano organizzativo, le rendono più simili ad attività industriali che non agricole (indipendenza dalla variabilità climatica; ripetitività giornaliera delle operazioni in ambienti circoscritti e facilmente controllabili; maggiori disponibilità finanziarie). Per tali settori, da tempo sono commercializzati strumenti hardware e software per sistemi OLTP (misura individuale delle produzioni, identificazione degli animali con relativo dosaggio automatico del mangime, podometri per il controllo dei calori, programmi gestionali per la stalla, ecc.), e si incominciano anche a proporre soluzioni per sistemi OLAP in risposta ai problemi posti per la *tracciabilità* delle produzioni.

Le tre succitate forme di monitoraggio dovrebbero tutte coesistere nell'ambito di uno stesso sistema OLTP, indipendente dalla soluzione fisicamente adottata per la raccolta dei dati, *manuale* o *automatica*: in entrambi i casi, infatti, è necessaria la gestione di specifici database, così come indicato in figura 4.

Il *monitoraggio ambientale* è l'unico che potrebbe esistere da solo. Non a caso è ormai diventato frequente osservare la presenza di stazioni di registrazione dei dati climatici in aziende in cui non si applica alcuna tecnologia “di

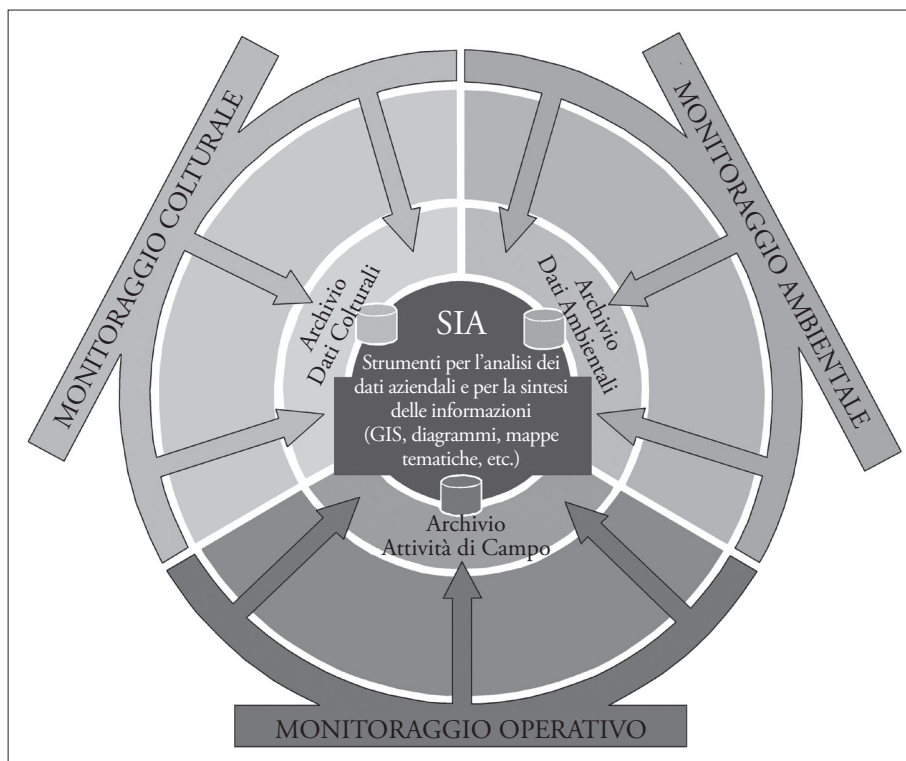


Fig. 4 Le forme del monitoraggio da prevedere in un sistema informativo aziendale completo a supporto dell'agricoltura di precisione

precisione". Questa forma di monitoraggio, tuttavia, può essere vista come l'atto primario della realizzazione di un sistema informativo aziendale. Esso, infatti, contempla innanzitutto una serie di *misure una tantum* dell'ambiente per poter pervenire a una prima rappresentazione informatica dell'ambiente produttivo stesso, organizzata in database indispensabili al sistema informativo. Si pensi all'informatizzazione delle aree aziendali, rappresentate da punti, linee e poligoni opportunamente gestiti attraverso un GIS. Oppure, ancora, alle analisi pedologiche (chimiche e fisiche) o ai rilievi sui profili colturali dei suoli. Si tratta sempre di misure saltuarie, il cui aggiornamento è prevedibile solo a seguito di modificazioni repentine dell'ambiente produttivo (nuovi impianti, formazione di nuovi appezzamenti, livellamento con riporti di terreno, ecc.) o su archi di tempo assai lunghi (> 5 anni). All'opposto, altre funzioni del monitoraggio ambientale richiedono osservazioni continue, con un costante aggiornamento dei relativi database. È il caso dei citati parametri

climatici, il cui impiego deve – comunque – trovare un adeguato grado di sintesi nell'ambito del sistema informativo aziendale.

L'*automazione* del monitoraggio ambientale è fattibile solamente per quest'ultima tipologia di osservazioni. In generale, essa non presenta alcuna limitazione tecnologica (sono ormai reperibili numerose soluzioni in commercio) se non la necessità di provvedere a una sua coerente integrazione con le informazioni provenienti dagli altri due settori del monitoraggio nell'ambito del sistema informativo globale. L'*automazione* dei monitoraggi operativo e colturale richiede, all'opposto, sia una gestione più accurata, sia investimenti tecnologici più consistenti.

Il *monitoraggio operativo* automatizzato richiede, oltre a dei convenzionali sensori per la misura di parametri fisici ritenuti rilevanti per la documentazione dell'evento osservato (flussimetri, sensori di velocità o per i regimi di rotazione del motore, ecc.), anche l'impiego di sistemi di identificazione per riconoscere autonomamente i principali soggetti che contribuiscono alla realizzazione dell'evento di campo in osservazione. L'esigenza di tale monitoraggio è, di norma, tanto più sentita quanto maggiori risultano:

1. l'*estensione spaziale* interessata dall'evento;
2. l'*aleatorietà* dei fenomeni che rendono fattibile, una volta pianificata, la reale esecuzione dell'evento stesso (correnti condizioni pedo-climatiche).

Ne consegue che l'utilità del monitoraggio operativo è nettamente superiore nelle imprese in cui prevalgono le produzioni vegetali rispetto a quelle animali.

L'*automazione* del *monitoraggio produttivo*, infine, prevede soluzioni tecnologiche estremamente variabili a seconda del tipo di impresa (colturale o zootecnica). Anche qui, infatti, un conto è prevedere l'osservazione di situazioni circoscritte e controllabili, come le stalle o le sale di mungitura, con l'impiego di sensori installati su impianti a punto fisso o telecamere poste in punti chiave; altra cosa è l'osservazione di vaste porzioni di territorio che risulta fattibile con l'impiego: o del telerilevamento con tecnologie extra-aziendali (da satellite o aereo); o di sensori attrezzati a bordo delle macchine agricole che periodicamente percorrono tutta la superficie aziendale durante lo svolgimento delle operazioni aziendali.

Un esempio di organizzazione integrata delle tre forme di monitoraggio in un'azienda viticola è descritto in tabella 1. Nelle aziende con seminativi o a indirizzo arboreo le forme di monitoraggio *operativo* e *colturale* dovrebbero sempre coesistere. Infatti, il monitoraggio operativo a poco servirebbe senza la possibilità di stabilire le ricadute delle diverse operazioni a livello colturale; viceversa, il monitoraggio colturale – da solo – non consentirebbe alcuna pia-

INFORMAZIONE O DATO	FREQUENZA ACQUISIZIONE	UTILIZZO E FINALITÀ	OPERAZIONI DA COMPIERE
MONITORAGGIO AMBIENTALE			
Mappe topografiche	Una tantum	Posizionamento geografico, inquadramento generale (es. CTR)	Digitalizzazione mappe, importazione su GIS
Definizione confini appezzamenti	Una tantum	Georeferenziazione appezzamenti, misura aree aziendali, database su base appezzamenti	Digitalizzazione mappe, o misurazioni topografiche dirette (convenzionali o con GPS), importazione su GIS
Profilo altimetrico appezzamenti	Una tantum	Inclinazione appezzamenti, esposizione	Misurazioni topografiche dirette (convenzionali o con GPS), importazione su GIS
Posizionamento filari	Una tantum	Georeferenziazione dei filari all'interno dei singoli appezzamenti (conoscenza sito-specifica delle cv. coltivate)	Misurazioni topografiche dirette (convenzionali o con GPS), importazione su GIS
Mappa tessitura	Una tantum	Georeferenziazione tessitura suoli all'interno degli appezzamenti	Analisi fisiche terreni su campioni, elaborazioni geostatistiche dei dati, importazione su GIS
Dati climatici	Giornaliera (monitoraggio continuo)	Previsione e pianificazione di interventi colturali	Archiviazione e consultazione database
Nutrienti nel suolo	Annuale o poliennale	Georeferenziazione principi nutritivi all'interno degli appezzamenti	Analisi chimiche terreni su campioni, elaborazioni geostatistiche dei dati, importazione su GIS
MONITORAGGIO OPERATIVO			
Esecuzione operazioni	Periodica (monitoraggio continuo)	Raccolta e organizzazione delle attività svolte in quaderni di campagna; analisi di tempi e metodi di lavoro	Registrazione dati relativi a operazioni svolte (manuale o automatica), archiviazione e consultazione database
Volumi/dosi fattori produttivi distribuiti	Periodica	Georeferenziazione delle quantità di fattori produttivi distribuiti all'interno degli appezzamenti, prescrizioni per distribuzioni future	Registrazione con elaborazioni geostatistiche dei dati, importazione su GIS
MONITORAGGIO COLTURALE (produttivo)			
Osservazioni fenologiche	Periodica	Monitoraggio fasi produttive e stadi fitosanitari, adattamento tecniche colturali	Scouting con acquisizione osservazioni, importazione su GIS
Remote sensing	Una tantum o periodica	Definizione di aree omogenee rispetto a parametri rilevati, monitoraggio fasi produttive e stadi fitosanitari, stima rese produttive	Digitalizzazione e/o importazioni su GIS, analisi di spettro multibanda
Rese produttive	Annuale	Conoscenza rese reali, efficienza dei fattori impiegati, perdite di raccolto, ricognizione di problemi	Misurazione automatica delle rese in continuo con elaborazioni geostatistiche dei dati, importazione su GIS

Tab. 1 Esempi di gestione di dati in un sistema informativo per aziende viticole

nificazione preventiva sul da farsi, senza la conoscenza di tutto ciò che è stato fatto sino a quel momento sulla coltura.

4. INQUADRAMENTO DEI COMPONENTI TECNOLOGICI DI BASE

I componenti di un sistema AP possono includere tecnologie meccaniche, elettroniche e informatiche (hardware e software) di varia complessità. Le modalità con cui esse si integrano all'interno del sistema dipendono:

- dall'insieme complessivo degli obiettivi che il sistema si prefigge di soddisfare attraverso le proprie funzionalità;
- dalle soluzioni con cui si interfacciano tra loro i componenti OLTP e OLAP.

Contrariamente ai sistemi OLAP in cui predominano le tecnologie informatiche software (GIS, database, pacchetti di statistica e geostatistica, applicativi specifici, ecc.), i sistemi OLTP includono tecnologie di diversa natura da installarsi sia presso il centro direzionale, sia a bordo di macchine e impianti. Esse prevedono varie forme di organizzazione e integrazione a seconda che le loro funzionalità siano limitate al solo monitoraggio o si estendano anche al controllo operativo dei processi di campo.

Un quadro globale riassuntivo di tutte queste tecnologie viene descritto in tabella 2. Esse vengono innanzitutto articolate distinguendo tra:

1. *Tecnologie elettroniche di base*, preposte sia all'acquisizione del dato (*monitoraggio*), sia all'impiego dell'informazione all'interno del contesto produttivo (*controllo operativo*); sono, pertanto, tecnologie che generano e usano *informazione*, gestendo i dati rispettivamente nelle fasi iniziali e finali del loro ciclo di vita.
2. *Tecnologie di posizionamento*, indispensabili quando il *contenuto* dell'informazione necessita di ulteriori attributi in grado di localizzare l'informazione stessa all'interno di un sistema spaziale di riferimento.
3. *Tecnologie informatiche hardware*, preposte alla *gestione fisica delle informazioni*, ovvero al trattamento dei dati in formato digitale mediante la messa a disposizione dei supporti fisici che consentono le funzioni di registrazione, visualizzazione, modifica e trasmissione dei dati; come tali, includono tutte le varie tecnologie previste sia per i "calcolatori" propriamente detti, sia per le modalità di connessione tra questi ultimi (reti e sistemi di comunicazione).
4. *Tecnologie informatiche software*, preposte alla *gestione semantica delle informazioni*, ovvero all'archiviazione e all'elaborazione dei dati attraverso strumenti (*programmi*) che consentono di interfacciare le funzionalità digitali

		TIPO DI COMPONENTE	OLTP				OLAP
			MONITORAGGIO			CTR	
			AMBI	PROD	OPER		
A	1	Sensori per la misura di parametri chimici e/o fisici inerenti l'ambiente e/o il contesto produttivo	■■■	■■■	■■■	■■■	○
	2	Sistemi di identificazione	○	■■	■■■	■	○
	3	Dispositivi per telerilevamento prossimale o remoto (remote sensing o ground sensing)	■	■■■	○	■	○
	4	Dispositivi attuatori per la regolazione e/o automazione del funzionamento di macchine o impianti, inclusi i sistemi per il dosaggio a rateo variabile dei fattori (VRT, Variable Rate Technologies)	○	○	○	■■■	○
B	5	Dispositivi per il controllo dei transiti (gate detecting)	○	○(c) ■■(z)	■■	○	○
	6	Sistemi GPS	■	■	■■■	■	○
	7	Sistemi DGPS	○	■■	■	■■■	○
C	8	Computer mobili (anche con funzioni di data-Hlogger)	■■	■■	■■■	■■■	○
	9	Computer fissi	■■	■■	■■	○	■■■
	10	Reti (Intranet locali e Internet)	■	■	■	○	■■
	11	Sistemi di comunicazione e trasferimento dati (can bus, trasmissioni in RF, soluzioni wireless e bluetooth, ecc.)	■■	■■	■■	■■■	■
D	12	DBMS (Database Management Systems)	■■■	■■■	■■■	■	■■■
	13	gis (Geographical Information Systems), incluse eventuali procedure di supporto alla rappresentazione ed elaborazione dei dati cartografici (geostatistica, georeferenziazione e ortorettifica delle immagini)	■■■	■■■	■■■	■	■■■
	14	Pacchetti software multifunzionali (Office Automation) o per applicazioni specifiche (statistica, analisi costi di esercizio, razionamenti, prescrizione concimazioni, analisi delle immagini, diagnostica attraverso indici multispettrali, ecc.)	■■	■■	■■	○	■■■
○) Non previsto o inadatto; ■) Non indispensabile, benché potenzialmente utile; ■■) Consigliato, sicuramente utile; ■■■) Necessario o estremamente utile. c) monitoraggio colturale; z) monitoraggio zootecnico							

Tab. 2 *I componenti tecnologici di base dei sistemi per l'agricoltura di precisione. Si distingue, innanzitutto, tra ambiti relativi ai sistemi informativi di tipo operativo (OLTP) e informazionale (OLAP). Le attività di monitoraggio sono poi articolate in ambientali (AMBI), produttive (PROD) e operative (OPER). Sono incluse le funzioni di controllo operativo (CTR).*

dell'hardware con le forme di comunicazione proprie degli utenti "umani" finali.

5. TECNOLOGIE ELETTRONICHE

5.1 Generalità

In quest'ambito per tecnologie elettroniche si intendono tutti quei dispositivi volti sia all'acquisizione dei dati all'interno del sistema produttivo sottoposto a monitoraggio, sia al loro utilizzo in eventuali attività di controllo operativo. Per una loro classificazione è utile schematizzare l'attività produttiva come una sequenza più o meno articolata di eventi, ciascuno caratterizzato da:

1. l'insieme delle *entità* che risultano coinvolte durante l'esecuzione dell'evento, o che comunque prendono parte allo svolgimento di un dato fenomeno (a esempio: il trattore utilizzato durante un'aratura; il trattorista che la esegue; gli animali che, in un dato istante, sostano in sala di mungitura; i filari di un vitigno colpiti da un attacco patogeno; il tipo di fertilizzante distribuito; l'appezzamento cui dare maggiore priorità in fase di raccolta, ecc.); *l'attribuzione di valore a una entità richiede un'operazione di identificazione*;
2. una serie di *parametri fisici o chimici* relativi a specifici aspetti del comportamento sia di dette entità, sia della manifestazione dei fenomeni nel loro complesso (a esempio: i consumi di carburante durante un'aratura; la produzione giornaliera di latte di una bovina; l'intensità di una manifestazione patologica in un vigneto; la quantità di fertilizzante distribuito; i tempi di lavoro e le rese durante una raccolta, ecc.); *l'attribuzione di valore a un parametro richiede un'operazione di misura di grandezze fisiche o chimiche*;
3. l'insieme delle *azioni elementari* che costituiscono la realizzazione vera e propria dell'evento (a esempio: il rilascio a terra di un elemento fisico da parte di una macchina operatrice; l'erogazione di una portata; l'apertura o la chiusura di un accesso, ecc.).

In base a tale schematizzazione, le tecnologie elettroniche cui ci si riferisce in questa sede possono riguardare:

1. *sistemi di identificazione*, preposti al riconoscimento di una entità coinvolta in un dato evento;
2. *sensori* e relativi *sistemi di misura*, preposti alla misura di specifiche grandezze fisiche o chimiche inerenti fenomeni caratterizzanti l'evento;
3. *attuatori*, tipicamente impiegati in sistemi per l'automazione del controllo operativo e, come tali, preposti all'esecuzione automatizzata di singole azioni elementari all'interno di un processo.

Nelle applicazioni di *monitoraggio* i *sistemi di acquisizione dati* prevedono un computer con funzione di data-logger: si tratta di dispositivi con sole periferiche di input costituite sia da sensori, sia da sistemi di identificazione, spesso con soluzioni in combinazione tra loro. Nelle applicazioni di *controllo operativo*,

invece, si hanno *sistemi di automazione* costituiti da un dispositivo *controllore* (ECU, *Electronic Control Unit*, ovvero un semplice *microprocessore* con relative *memorie* o, più frequentemente, un vero e proprio *computer*) le cui periferiche di input e output sono formate, rispettivamente, da sensori e attuatori.

5.2 Sistemi di identificazione

In generale, essi prevedono:

1. *un'entità da riconoscere*, al quale viene assegnato un prefissato codice;
2. *un sistema riconoscitore*, in grado di acquisirne il relativo codice;
3. una *tabella di associazione*, normalmente integrata in specifici database, con la funzione di rendere persistente il riferimento biunivoco tra entità da riconoscere e relativo codice.

I codici possono essere di tipo numerico o alfanumerico. L'entità da riconoscere può trasmettere il proprio codice: a) o *in continuo*, indipendentemente dalla presenza di un riconoscitore; b) o *solo in prossimità del riconoscitore* stesso quando, per mezzo di varie soluzioni (carica di condensatori, attivazione di attuatori, sensori a vibrazione, ecc.), quest'ultimo risulta in grado di attivare, a distanza, la trasmissione del segnale.

Comunque sia, la caratteristica comune a tutti questi sistemi è la comunicazione cosiddetta *wireless* (ovvero, senza alcun tipo di connessione fisica) tra entità e riconoscitore. Essa può essere svolta a mezzo di *sistemi ottici* (codici a barre, onde elettromagnetiche nell'infrarosso, scanner) o di *sistemi con trasmissione in radiofrequenza* (soluzioni RFID), nel qual caso la trasmissione tra i due sistemi può avvenire anche senza la loro visibilità diretta. Le precarie condizioni di pulizia e polverosità degli ambienti agricoli rendono sconsigliabile il ricorso ai sistemi ottici, pena l'elevato rischio di non leggibilità dei codici da parte del riconoscitore.

Con le tecnologie RFID, il riconoscitore è dotato di un'antenna con cui capta il codice dell'entità da riconoscere. Quest'ultima, a sua volta, è attrezzata con un dispositivo di trasmissione che può essere di tipo *attivo o passivo*, a seconda che i suoi circuiti siano alimentati, rispettivamente, o da una fonte energetica autonoma (come una comune batteria al litio), o dalle onde elettromagnetiche previamente trasmesse dal riconoscitore stesso.

Una tecnologia RFID ormai relativamente diffusa nel settore agricolo è il cosiddetto *transponder* (termine che deriva dalla fusione delle parole inglesi *transmitter* e *responder*). Si tratta di un dispositivo che integra, all'interno di apposite strutture, l'antenna trasmittente e un microprocessore di controllo

con relativi supporti di memoria. Il dispositivo, attivato dalla trasmissione dell'antenna del riconoscitore, risponde contestualmente a quest'ultimo – su una frequenza diversa – inviando dati relativi sia al proprio codice di identificazione, sia a eventuali altri messaggi circa grandezze fisiche previamente misurate da sensori connessi al dispositivo e poi memorizzate nella sua memoria.

Nei *trasponder passivi* l'antenna trasmittente è collegata a un condensatore che viene energeticamente caricato dalla trasmissione del segnale del riconoscitore. Si tratta di soluzioni solitamente di tipo *read only* che prevedono la sola trasmissione del codice di identificazione. Le distanze di trasmissione variano da pochissimi centimetri a poco più di 1 m e sono largamente influenzate dalla presenza di masse metalliche che tendono ad attenuare la potenza in trasmissione dei segnali. Per tale motivo, sono poco adatti ad applicazioni su macchine agricole mentre sono molto utilizzati in campo zootecnico (e ciò anche grazie alla spinta miniaturizzazione con cui possono essere realizzati, tale addirittura da permettere il loro innesto sottocute negli animali).

Decisamente più sofisticate sono le prestazioni dei *trasponder attivi*, con raggi d'azione anche oltre i 30 m e con possibilità di funzionamento in lettura e scrittura (*read and write*). Tuttavia, i loro sistemi di controllo sono ancora molto costosi e a essi si preferiscono soluzioni in RF più semplici, senza memorie, con circuiti di trasmissione derivati dai comuni dispositivi commerciali di telecomando (tipo antifurti delle automobili o azionamento automatico dei cancelli elettrici) in grado di operare con un campo di trasmissione inferiore ai 10 m.

Questi ultimi dispositivi hanno trovato impiego *nell'automazione del monitoraggio operativo*, consentendo di realizzare la forma più completa dei cosiddetti *quaderni di campagna informatici* in cui i trattori, attrezzati con opportuni dispositivi di registrazione e relative antenne riceventi, si comportano come sistemi riconoscitori atti a identificare tutte le attività meccanizzate svolte in azienda per registrarle, poi, in appositi "registri informatici". Infatti, sono in grado di riconoscere la macchina operatrice a essi accoppiata in quanto questa è attrezzata con un trasmettitore in RF, di dimensioni contenute, solitamente attivato da un interruttore a vibrazione. L'identificazione dell'operatrice è eseguita e memorizzata solamente quando questa si trova nelle immediate vicinanze del trattore ed è in movimento solidale con esso.

5.3 Sensori e attuatori

Tali dispositivi occupano una quota preponderante della produzione inter-

nazionale di componenti elettronici, essendo ormai diffusamente impiegati – analogamente ai componenti hardware dei calcolatori – in tutti i settori produttivi.

I *sensori* sono dispositivi costituiti da dei *trasduttori* che rilevano i valori di una grandezza fisica o chimica (a esempio; temperatura, pressione, pH, ecc.), o i suoi cambiamenti, per trasmetterli poi: o a un *sistema di registrazione (monitoraggio)*, o a un *sistema di regolazione e controllo* (ECU). In pratica, il trasduttore effettua le misure convertendo le manifestazioni energetiche connesse alla grandezza stessa in opportuni segnali elettrici. In un sistema pienamente informatizzato, la gestione di tali segnali – di tipo *analogico* – richiede la loro ulteriore trasformazione in *segnali digitali*, a mezzo di specifici *convertitori analogico-digitali*, eventualmente integrati o direttamente alla struttura di contenimento del sensore, o all'interno del suo sistema di gestione (sistema di registrazione o ECU).

Gli *attuatori*, dal canto loro, sono costituiti da un qualunque dispositivo di un sistema di controllo che effettua una regolazione automatica attraverso l'esecuzione di azioni elementari sull'ambiente esterno. Si tratta, di norma, di dispositivi idraulici o elettromeccanici dotati della potenza meccanica necessaria per intervenire sull'apparato regolato, apportando le correzioni previste, all'interno di tempi prefissati (solitamente misurabili in frazioni di secondo). Il loro comportamento è integralmente impostato dal microprocessore integrato nell'ECU.

Alcuni esempi di sensori con relativi campi di applicazione sono presentati in tabella 3. Si tratta di tecnologie che, proprio nell'ambito dell'AP, hanno trovato negli ultimi anni una forte spinta evolutiva soprattutto nei settori riguardanti i monitoraggi ambientale e colturale, nonché nelle loro applicazioni integrate col monitoraggio operativo. Per quest'ultimo, le applicazioni AP hanno anche potuto giovare di uno sviluppo tecnologico già decisamente avanzato, grazie alle ricerche svolte per migliorare l'elettronica deputata alle funzioni di regolazione e controllo del funzionamento di trattori e operatrici.

In generale, è ragionevole prevedere che le macchine agricole saranno destinate a innovazioni tecnologiche sia incrementali sia radicali in cui nuove tipologie di sensori avranno un ruolo sempre più dominante. In merito, tra i vari sensori menzionati in tabella 3 quelli relativi alla misura delle rese di cereali nell'ambito del monitoraggio produttivo svolto automaticamente dalle mietitrici (*mappatura delle produzioni di granella*) hanno ormai raggiunto un elevato grado di maturità tecnologica, con buona diffusione anche a livello commerciale. In particolare:

- per la *pesatura della granella* (portate massiche), benché siano disponibili

diverse soluzioni, quella che impiega sensori a impatto risulta essere la più semplice e affidabile; essa prevede che il flusso di granella venga lanciato contro un piatto mobile connesso a un sensore a cella di carico, in grado di misurarne gli spostamenti direttamente proporzionali al flusso stesso;

- per l'umidità del prodotto alla raccolta, le soluzioni più diffuse prevedono misure dielettriche con sensori capacitivi, per i quali si è passati da sistemi in continuo, molto imprecisi, a quelli con misura a campione, simili a quelli già in uso negli essiccatoi.

Per entrambe le soluzioni, tuttavia, permangono ancora sensibili difficoltà operative dovute alla necessità di provvedere con costanza alla ricorrente taratura dei sensori in funzione delle condizioni e delle caratteristiche del prodotto da raccogliere.

In merito agli attuatori, infine, è indispensabile ricordare le cosiddette *tecnologie a dosaggio variabile* (VRT, *Variable Rate Technologies*), ovvero dei sistemi a servizio delle operatrici adibite alla distribuzione dei prodotti in grado di garantire un *dosaggio costante*, impostabile manualmente o elettronicamente tramite un'annessa ECU, indipendentemente dalla velocità di avanzamento dei mezzi. Ciò agendo automaticamente sul grado di apertura dei dispositivi erogatori secondo azioni elementari diverse a seconda che si tratti di fertilizzanti solidi o liquidi e delle caratteristiche costruttive degli erogatori stessi. Le VRT derivano da precedenti dispositivi denominati DPA (*Distribuzione Proporzionale all'Avanzamento*), originariamente nati per garantire la costanza delle dosi degli spandiconcime con sistemi di regolazione meccanica in grado di derivare il moto dalle ruote delle macchine. Tali dispositivi si sono poi evoluti con servocomandi azionati da piccoli motori elettrici passo-passo, fino ad arrivare alle attuali VRT capaci di tempi di risposta, con adeguamento automatico delle dosi, molto brevi e secondo modulazioni pressoché continue.

5.4 Sensori ottici e metodi di telerilevamento aziendale

Nell'ambito del monitoraggio culturale, di grande utilità risultano essere i sensori che svolgono *misure ottiche* mediante sistemi di *telerilevamento* (*remote sensing*). Tali sistemi offrono la possibilità di valutare otticamente lo stato fisiologico delle colture basandosi sulle modificazioni che la radiazione luminosa subisce incidendo sulla pianta e interagendo coi suoi tessuti.

In sintesi, gli scambi di energia tra un individuo vegetale sano e il suo ambiente circostante dipendono dallo stato fitosanitario delle sue cellule. In stato di alterazione metabolica, a parità di irraggiamento solare incidente, si

osserva una sensibile diminuzione di riflettanza nell'infrarosso vicino accompagnata sia da un aumento del calore emesso, sia da un contestuale incremento di riflettanza nelle bande spettrali del verde e del rosso.

Tali proprietà sono conseguentemente utilizzabili per valutare lo stato fisiologico della vegetazione. E ciò risulta di grande interesse per le applicazioni pratiche in agricoltura, anche in virtù di alcune caratteristiche peculiari dei sensori ottici. Essi infatti:

- consentono *misure non distruttive* che, quindi, possono essere effettuate su ogni singola pianta dell'appezzamento e ripetute in momenti successivi della stagione, senza interferire col normale sviluppo delle colture;
- non richiedono *contatto* col campione esaminato e dunque si possono eseguire dalla distanza ritenuta più opportuna;
- si basano su *fenomeni istantanei*, permettendo misure rapide e idonee a essere effettuate anche da veicoli in movimento.

Tali caratteristiche rendono tali tipi di sensori degli strumenti essenziali ai fini dell'automazione del monitoraggio colturale, benché i sistemi derivanti non siano ancora di semplice utilizzo e comprensione (di norma è necessario un supporto tecnico esterno all'azienda per l'analisi dei dati e le valutazioni sugli interventi da effettuare). Peraltro, uno dei problemi di rilievo da considerare in merito al loro impiego riguarda anche la realizzazione dei sistemi di ripresa. Tradizionalmente esistono fotocamere multispettrali complesse e costose allestite a bordo di *aerei* che, periodicamente o su richiesta, effettuano una ricognizione del territorio da investigare. In alternativa, è anche possibile far ricorso a *riprese da satellite*, a patto di riuscire a gestire sia una maggiore rigidità negli intervalli temporali delle riprese (dipendenti dalle orbite dei satelliti e dalle condizioni climatiche al suolo), sia una minor risoluzione delle immagini ottenibili.

In merito, sia le esperienze sperimentali, sia le applicazioni operative già realizzate (in particolare all'estero) sono numerose. Soprattutto in viticoltura, si è cercato di individuare soluzioni tecnologiche in grado di sostituire forme di monitoraggio da rilievi con telerilevamento (sia aereo sia da satellite) gestiti da imprese esterne specializzate con tecniche di misura svolte direttamente in azienda con sistemi di proprietà dell'impresa. La prima soluzione, che rappresenta la norma nei contesti viticoli statunitensi e australiani – caratterizzati da economie di scala più favorevoli, grazie alle vaste superfici interessate – è stata oggetto di sperimentazione, come telerilevamento aereo, anche a livello nazionale. Si ritiene, tuttavia, che tale tecnica possa essere percorribile solo a livello di organizzazioni sovrazionali (cantine sociali, consorzi di tutela, osservatori fitopatologici, ecc.), visti: i) sia gli obiettivi dei singoli imprenditori

che puntano a forme di gestione sito-specifica relativamente accentuate, con richieste di dettagli non garantibili da monitoraggio con osservazioni eccessivamente *remote*; ii) sia gli elevati costi ancora richiesti per il servizio offerto.

Tuttavia, ricerche recenti (Mazzetto et al., 2005) si sono anche orientate allo sviluppo di sensori ottici semplificati che – pur sfruttando sempre i principi del telerilevamento – risultano più vantaggiosamente applicabili direttamente dalle singole realtà aziendali. Si tratta di soluzioni cosiddette *ground sensing*, che prevedono l'allestimento di sensori:

1. sia direttamente *a bordo delle macchine agricole* utilizzate nei normali processi di campo;
2. sia su sistemi fissi di registrazione dati, installati in opportuni *punti spia* presso le coltivazioni interessate.

Si tratta, pertanto, di realizzare dei sistemi di monitoraggio colturale automatizzato basati su una gestione integrata di *rilevi mobili periodici* (da trattore) e di *rilevi continui da postazioni fisse*. I due sistemi hanno natura complementare. Infatti, mentre i rilievi fissi consentono di ottenere osservazioni con informazioni di elevato dettaglio (*alta sensibilità*), benché *poco rappresentative* (essendo fissi sui singoli punti spia del vigneto), i rilievi mobili tendono a garantire un comportamento esattamente opposto, con rilievi di *elevata rappresentatività* (essendo estesi a tutta la superficie del vigneto interessata alle varie lavorazioni) e *bassa sensibilità* (il dettaglio informativo risulta necessariamente contenuto trattandosi di riprese in movimento). La ricerca sta ancora affrontando il problema di come integrare e correlare il livello informativo dei due sistemi di monitoraggio.

In merito ai rilievi fissi, le esperienze finora maturate hanno consentito l'applicazione di sensori ottici costituiti da telecamere sia convenzionali, sia multispettrali; queste vengono programmate per memorizzare un'immagine a intervalli di tempo predefiniti (si ritengono più che sufficienti riprese fissate a intervalli di 4-6 ore durante il periodo di luce, ovvero 2-3 immagini/giorno). In sintesi, si è appurato che:

1. anche l'impiego di una normale telecamera – con ripresa limitata alla banda della luce visibile – può fornire un'utile funzione di *field server*, riuscendo a svolgere un monitoraggio automatizzato e localizzato dello sviluppo fenologico e del vigore colturale (il tutto, comunque, vincolato alla possibilità di poter trasferire le immagini in remoto con soluzioni wireless); ciò a patto che la telecamera: a) possa garantire la realizzazione di immagini di dimensioni non inferiori a 480x640 pixel; b) sia dotata di un sistema di regolazione automatica della luce; c) venga posizionata in modo da garantire riprese con più strati prospettici, a diversa risoluzi-

- zione, sulla stessa immagine (da 100-300 pixel/foglia in primo piano, a 5-20 pixel/m² sullo sfondo, con visibile solo la parte superiore dei filari a guisa di volo aereo);
2. le più sofisticate telecamere multispettrali garantiscono risultati molto più promettenti riuscendo a ottenere – anche nelle normali condizioni di ripresa in esterni – delle immagini relative a specifici indici spettrali (NDVI o NIR/R), ottenuti come combinazione algebrica (pixel per pixel) dei valori spettrali misurati a due o più specifiche lunghezze d'onda; si tratta di strumenti indispensabili per diagnosi precoci di eventuali stress idrici, nutrizionali o sanitari; tuttavia, l'elevato costo delle telecamere multispettrali convenzionali limita tale applicazione a un ambito di ricerca;
 3. vi sono i margini per realizzare dispositivi di ripresa multispettrale sem-

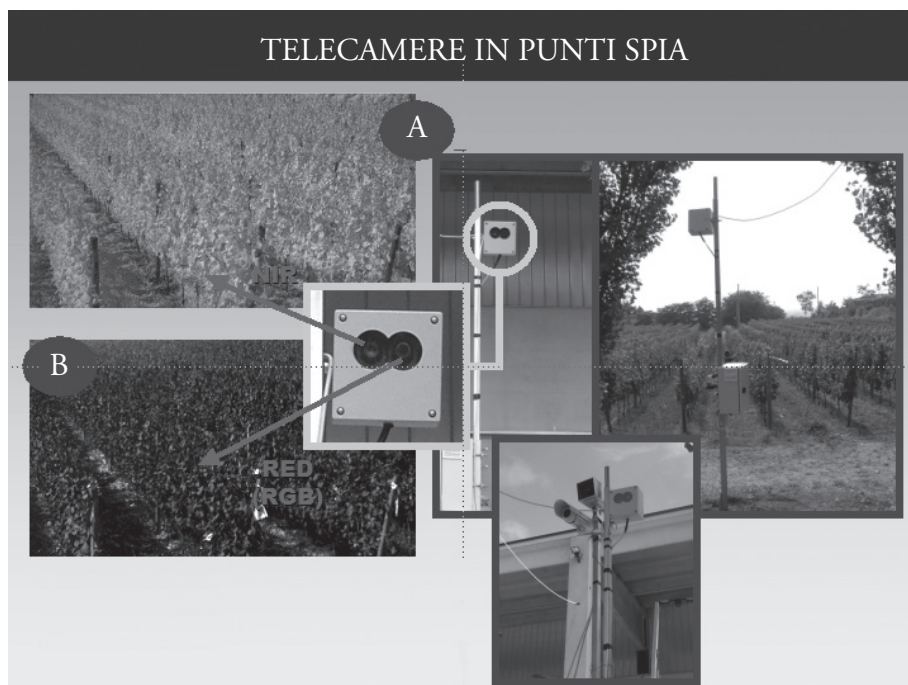


Fig. 5 Esempi di realizzazione di monitoraggio culturale in vigneto attraverso l'impiego di sensori ottici in punti spia. Possibile l'impiego di telecamere multispettrali per il computo di indici correlati agli stati della vegetazione. L'esempio riporta una telecamera semplificata a doppia ottica per l'acquisizione di immagini sia monocromatiche all'infrarosso (A), sia a colori secondo codifica RGB da cui si estrapolano poi le immagini monocromatiche sulla banda del rosso (B)

plificati e di basso costo, a partire da semplici telecamere convenzionali; due sono le strade percorribili in tal senso: a) appaiare due telecamere, attrezzate con la stessa ottica, ma adibite a riprese su bande diverse (luce visibile, su standard RGB; infrarosso, NIR); b) utilizzare una stessa telecamera antepo- nendo tutti i filtri di regolazione cromatica esternamente alla sua ottica, previamente montati su un sistema che consente il cambiamento automatico dei filtri stessi in modo da consentire in tempi molto ravvicinati (benché non simultaneamente) la ripresa di due immagini distinte in RGB e NIR.

A titolo di esempio in figura 5, oltre alle indicazioni delle modalità realizzative di un rilievo in punti spia, sono mostrate due immagini monocromatiche della porzione di un vigneto sottoposto a monitoraggio, relative alle bande sia del rosso (RED) sia del vicino infrarosso (NIR). Questa coppia di immagini è stata registrata nelle prime ore del mattino, in condizioni di illuminazione laterale. L'area di ripresa corrisponde a un tratto di circa 4 m di vegetazione su due filari, previamente identificata come un "punto spia" particolarmente rappresentativo delle condizioni del vigneto.

Lo schema superiore di figura 6 mostra l'immagine virtuale RED/NIR di tale area, calcolata a partire dalle due immagini monocromatiche di figura 6. In essa, i riquadri evidenziano quattro zone della coltre fogliare che presentano sintomi di senescenza o di depigmentazione. In particolare i riquadri 1 e 4 indicano aree necrotiche estese a più foglie; i riquadri 2 e 3, invece, si riferiscono a singole foglie depigmentate che ricoprono un'area di circa 10 cm di diametro. Nell'immagine virtuale, tali zone appaiono caratterizzate da valori significativamente superiori dell'indice RED/NIR, con un'intensità dei pixel mediamente doppia o tripla rispetto a quella dei pixel che ricadono nelle zone sane della coltre fogliare circostante. Ciò è legato alla degradazione della clorofilla nel tessuto vegetale clorotico o necrotico e la conseguente diminuzione localizzata della capacità di assorbire la luce visibile, con un particolare incremento della riflettanza nella banda del rosso, regione nella quale la clorofilla ha il massimo assorbimento spettrale. L'immagine virtuale inferiore di figura 7 rende più "leggibile" il fenomeno attraverso algoritmi di classificazione che attribuiscono ai vari pixel lo status di *sfondo* (in nero), *vegetazione sana* (in grigio) e *vegetazione non sana* (o comunque con lesioni sospette, in bianco). Si può notare come le zone clorotiche e necrotiche nei riquadri siano state correttamente individuate e la loro estensione sia realisticamente rappresentata. Inoltre, l'algoritmo ha individuato una miriade di areole aventi caratteristiche spettrali sospette che, a un'attenta valutazione delle immagini originali, sono risultate poi effettivamente associate a lesioni necrotiche o depigmentate limi-

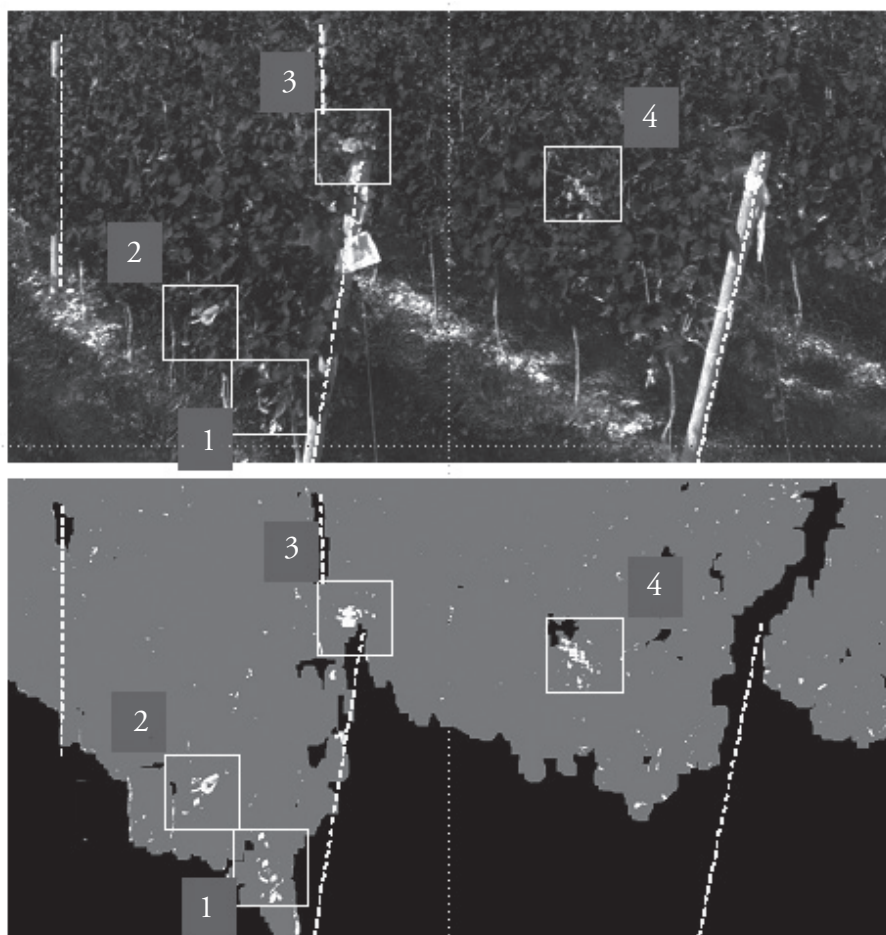


Fig. 6 Immagini monocromatiche che “mappano” degli indici vegetazionali ricavati dalle immagini riportate in Fig. 5. La foto superiore descrive l'indice RED/NIR, mentre quella inferiore mostra una classificazione delle entità riprese in 3 stati: “sfondo” (nero), “vegetazione sana” (grigio), “vegetazione non sana” (bianco)

tate a porzioni fogliari di qualche cm.

In merito, invece, ai rilievi mobili si possono attrezzare trattori con sensori ottici sempre funzionanti secondo gli stessi principi di ripresa. Tuttavia, le condizioni ambientali d'uso (umidità, polveri e – soprattutto – vibrazioni) rende necessario l'impiego di dispositivi più “spartani” e robusti a discapito dei dettagli di ripresa. Le esperienze già svolte in merito – sempre in vignetto – hanno previsto l'utilizzo di sensori commerciali (da allestire su trattori

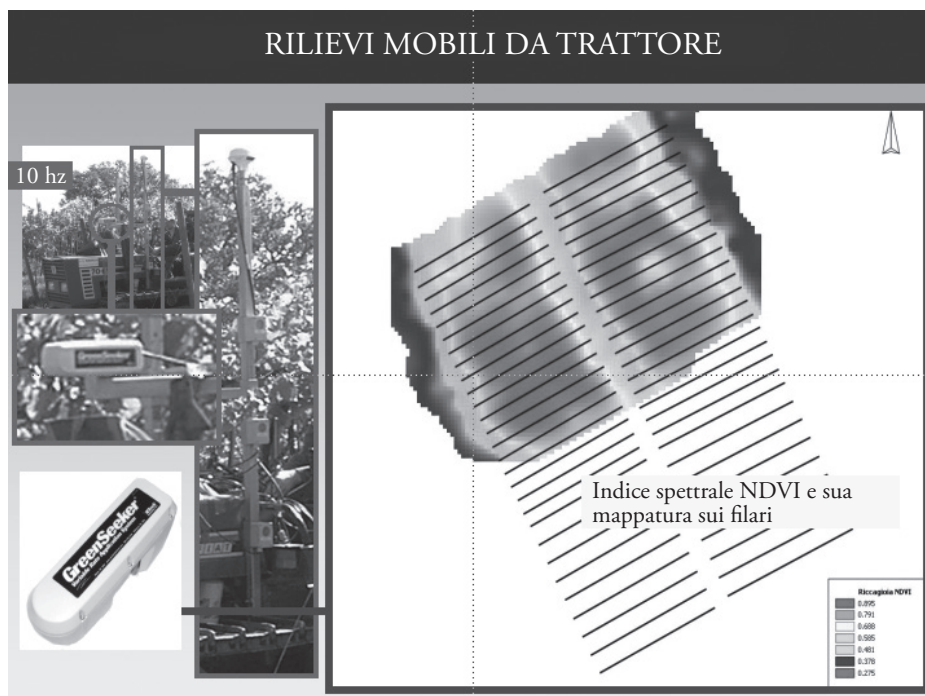


Fig. 7 Esempio di mappatura del vigore di un vigneto mediante sensori ottici montati su trattore

in movimento) in grado di restituire misure puntuali di indici vegetazionali, quali i già citati NDVI e RED/NIR. I sensori, di norma collocati in posizione centrale rispetto all'interfilare, effettuano misure di riflettanza perpendicolarmente alla parete dei filari stessi. Gli indici stimano, in tal modo, le condizioni di vigore vegetale e di eventuali stress relative alla canopy. La risoluzione delle misure, tuttavia, non è riferibile ai singoli pixel di un'immagine. Essa fa piuttosto riferimento alla media puntuale ottenibile sulla scansione di aree di 0,02-0,05 m², in funzione della distanza tra sensore e parete fogliare. Tali rilievi possono: a) sia essere integrati da contestuali misure di spessore della parete fogliare a mezzo di sensori a ultrasuoni; b) sia essere successivamente elaborati secondo procedure geostatistiche al fine di produrre mappe tematiche del vigore, successivamente da archiviare secondo le necessità dei sistemi informativi in uso presso l'azienda (figura 7).

6. I SISTEMI DI POSIZIONAMENTO

6.1 Classificazione dei sistemi di posizionamento

	ENTITÀ INTERESSATE	GRANDEZZA MISURATA	TIPOLOGIA MISURA
A	Umidità del suolo	1. Radiazione multispettrale riflessa 2. Conducibilità elettrica 3. Riflessione onde radio (1-1000 MHz)	1. OTTICA (telerilevamento aereo o da satellite) 2. DIELETTTRICA 3. ELETTROMAGNETICA (GPR: Ground Penetrating Radar)
	Proprietà fisiche del suolo	1. Resistenza alla penetrazione (Cone Index) 2. Riflessione onde radio (1-1000 MHz) 3. Emissione nell'infrarosso	1. MECCANICA o MAGNETICA (penetr. manuale o con celle di carico) 2. ELETTROMAGNETICA (GPR: Ground Penetrating Radar) 3. OTTICA (sensori NIR)
	Configuraz. superficiale del terreno	Riflessione onde radio o elettromagnetiche	ELETTROMAGNETICA (Radar o Scan Laser da rilievo aereo)
	Cont. sost. organica nel suolo	Radiazione multispettrale riflessa	OTTICA (telerilevamento aereo o da satellite)
B	Presenza di infestanti	1. Radiazione multispettrale riflessa 2. Radiazione visibile	1. OTTICA (telerilevamento con sensori a bordo delle macchine agricole, calcolo indici multispettrali) 2. OTTICA (sensori fotoelettrici)
	Quantità di biomassa culturale	1. Deviazione posizione pendolo (seminativi) 2. Distanza da centro filare (vigneti e frutteti) 3. Radiazione multispettrale riflessa	1. MECCANICA o MAGNETICA 2. ACUSTICA (sensori a ultrasuoni) 3. OTTICA (telerilevamento da satellite, aereo o da sensori a bordo delle macchine agricole)
	Vigore e stato fitosanitario delle colture	Radiazione multispettrale riflessa	OTTICA (telerilevamento da satellite, aereo o da sensori a bordo delle macchine agricole; calcolo indici di vegetazione)
	Flussi di granella (su macchine per raccolta)	Portate massiche o volumiche	1. MAGNETICA (a palette mobili con celle di carico) 2. OTTICA (sensori a fotocellule) 3. ELETTROMAGNETICA (sensori a raggi gamma) 4. DIELETTTRICA (sensori capacitivi)
	Umidità della granella	1. Variazioni di conducibilità 2. Emissione nell'infrarosso	1. DIELETTTRICA (sensori capacitivi) 2. OTTICA (sensori NIR)
	Contenuto proteico della biomassa	Emissione nell'infrarosso	OTTICA (sensori NIR)
C	Trattore o semovente	Velocità di avanzamento	1. MAGNETICA (sensori a effetto Hall) 2. ELETTROMAGNETICA (Radar Doppler)

Tab. 3 *Esempi di applicazioni ricorrenti di misure, con relativi sensori, nei vari ambiti dell'AP (A: monitoraggio ambientale; B: monitoraggio culturale; C: monitoraggio e controllo operativo)*

	Trattore o semovente	Regime di rotazione del motore	MAGNETICA (sensori a effetto Hall o a induzione)
	Trattore o semovente	Temperatura dei gas di scarico (proporzionale al carico motore)	RESISTIVA (termoresistenze o termocoppie)
	Macchine agricole	Tempi di funzionamento	OROLOGIO (da ricevitore GPS, qualora disponibile)
	Macchine per distribuzione liquidi	Portata volumico	MAGNETICA (sensori a induzione o a turbina)
	Macchine per distribuzione solidi	Portata massica	MAGNETICA (celle di carico)
	Concentr. dei soluti distrib.	Conducibilità elettrica	DIELETTRICA

Tab. 3

Nella maggior parte delle applicazioni previste da un sistema AP risulta indispensabile poter localizzare i dati all'interno di un sistema di coordinate di riferimento. Ciò, in particolare, quando si tratta di risolvere il posizionamento in campo dei mezzi meccanici nell'ambito di attività relative sia al monitoraggio, sia all'automazione del controllo operativo. Secondo un'impostazione ormai consolidata, i sistemi di posizionamento per veicoli in movimento si possono innanzitutto distinguere, in base a quanto indicato in figura 8, come segue:

- sistemi con *strumentazione autonoma a bordo* del veicolo;
- sistemi con *strumentazione indipendente dal veicolo* (quest'ultimo è attrezzato con dispositivi di ricezione/trasmissione per dialogare con il sistema di posizionamento esterno).

I sistemi A e B prevedono il solo impiego di sensori a bordo delle macchine. Il primo, sperimentato in alcune aziende tedesche di piccole dimensioni, ha scarsa flessibilità di impiego poiché richiede la predisposizione di linee di traffico in posizioni note (potrebbe rivestire un certo interesse nelle colture a filari). Il posizionamento, restituito da un *radar*, è monodimensionale limitandosi a indicare la distanza da un punto prefissato. Il secondo (*dead reckoning*) ha finora trovato poche applicazioni in campo agricolo poiché complicato e costoso. Utilizza diverse tipologie di sensori (radar, rilevatori dell'angolo di sterzata, giroscopi) che consentono di ricostruire tutti i percorsi del mezzo a partire da un punto iniziale. Anche in tal caso si ha scarsa flessibilità d'uso poiché, comunque, il riconoscimento del punto iniziale non avviene in modo automatico.

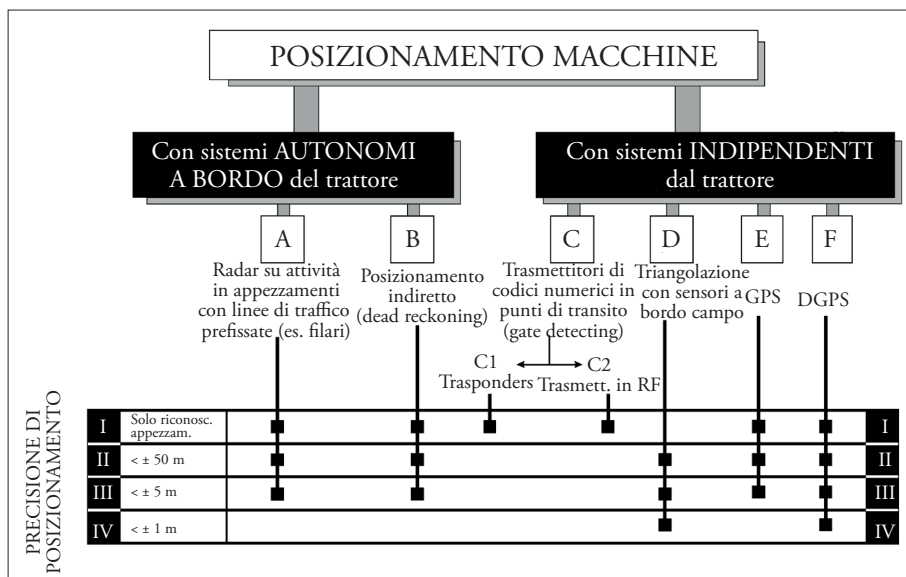


Fig. 8 Classificazione dei sistemi di posizionamento delle macchine

Tra i sistemi di posizionamento indipendenti dal mezzo, la *triangolazione con sensori a terra* (D) offre elevata precisione ma, ancora, scarsa flessibilità e costi elevati. Vengono utilizzati dei riflettori di posizione (a ultrasuoni o laser) che, di volta in volta, devono essere localizzati a bordo campo. La posizione è calcolata in base ai tempi di invio e risposta del segnale.

Una soluzione prontamente trasferibile a costi accettabili è rappresentata dal *gate detecting* (C). Si tratta di un sistema di posizionamento molto semplificato che si limita a registrare il passaggio di specifiche entità (macchine, persone, animali, ecc.) presso punti di transito predefiniti. In pratica, si impiegano dei sistemi di identificazione in cui l'entità in transito viene attrezzata: o con un trasmettitore RF di codice o con una vera e propria unità di registrazione connessa a un'antenna ricevente, a seconda che se ne imposti il comportamento, rispettivamente, a mo' di oggetto da riconoscere o di sistema riconoscitore. La seconda soluzione è quella che ha riscosso maggiore successo in campo agricolo: i trattori si comportano come sistemi riconoscitori che registrano i codici generati dai trasmettitori installati in postazioni fisse presso i punti di transito (ingresso di edifici, stalle, appezzamenti; specifici luoghi di lavoro come punti carico o rifornimento, stazioni di pompaggio, ecc.). Tuttavia, si hanno seri problemi operativi di manutenzione quando si devono gestire

molti punti di transito su una estesa porzione di territorio (molti trasmettitori lasciati a lungo all'aperto possono subire danni di vario tipo). Per tale motivo, è suggeribile limitare l'uso di tale soluzione solamente in quelle situazioni in cui i sistemi di posizionamento satellitari non sono in grado di funzionare correttamente (luoghi chiusi o molto schermati da alberi o edifici).

6.2 Sistemi di posizionamento satellitari: il GPS

Il posizionamento a mezzo di sistemi satellitari è la soluzione che attualmente garantisce la miglior flessibilità d'uso a costi sostenibili, tanto che spesso – ed erroneamente – a livello comune si tende a far coincidere il concetto di posizionamento satellitare con il concetto stesso di agricoltura di precisione.

Tali soluzioni rappresentano dei *sistemi di posizionamento globali* (da cui il noto acronimo GPS, *Global Positioning System*). I sistemi sono detti “globali” in quanto il loro servizio è garantito: i) in qualunque punto della superficie terrestre; ii) in modo continuativo nel tempo; iii) indipendentemente dalle condizioni atmosferiche locali.

Due sono i sistemi satellitari attualmente in uso: a) il NAVSTAR americano (*NAVigation System Time And Ranging*, quello più usato e che ha poi anche coniato il termine GPS); b) il GLONASS russo (*Global Orbiting Navigation Satellite System*). Entro il 2008 sarà disponibile anche il sistema europeo GALILEO che – a differenza dei due precedenti – nasce per applicazioni esclusivamente limitate al settore civile.

Un sistema GPS, per risolvere un qualunque problema di posizionamento, richiede i seguenti dispositivi:

1. *un'antenna ricevente*, in grado captare le informazioni trasmesse da ogni satellite in quel particolare momento visibile nella volta celeste;
2. *un ricevitore*, connesso a detta antenna, preposto all'elaborazione – secondo procedure matematico-statistiche – dei segnali captati e alla conseguente determinazione delle coordinate di posizionamento. Poiché il sistema richiede alimentazione, negli impieghi su mezzi mobili risulta preferibile la loro installazione direttamente a bordo dei trattori.

Il sistema americano consta di 24 satelliti a circa 22.000 km dalla superficie terrestre (su 6 distinti piani orbitali) e in grado di percorrere 2 orbite complete in poco più di 24 ore. Le orbite sono state definite in modo tale da garantire la visibilità di almeno 4 satelliti, in ogni istante, a un apposito ricevitore posto in qualunque punto della terra. Ciascun satellite, identificato da un proprio codice, è equipaggiato con oscillatori atomici in grado di misu-

rare il tempo con una precisione dell'ordine di 10^{-9} s. La precisione di questi "orologi" è fondamentale per la soluzione dei problemi di posizionamento e per la navigazione. Ogni satellite, infatti, trasmette in continuo, su diverse bande di frequenza, dei messaggi contenenti *informazioni digitali* fondamentali quali: i) il proprio identificativo; ii) la posizione corrente sull'orbita; iii) l'istante temporale in cui viene generato il messaggio dal satellite. In base a ciò, il ricevitore è in grado di calcolare la propria distanza dal satellite e conseguentemente, attraverso una *triangolazione* con tutti i segnali elaborati dai satelliti visibili sull'orizzonte, di determinare la propria posizione all'interno di un sistema assoluto di coordinate di riferimento.

La conoscenza della *distanza satellite-ricevitore* è, pertanto, fondamentale nella risoluzione del posizionamento. Immaginando di conoscere una sola di queste distanze, il ricevitore si potrebbe collocare su un qualunque punto della sfera immaginaria il cui centro coincide con la posizione del satellite. Con due distanze note, l'incertezza della posizione del ricevitore si ridurrebbe alla circonferenza risultante dall'intersezione di due sfere, e così via. Per ottenere il posizionamento "esatto" del punto R occupato dal ricevitore in uno spazio tridimensionale, con coordinate $R[x, y, z]$, si deve disporre di almeno quattro distanze satellite-ricevitore (il che significa che il ricevitore deve poter "vedere" almeno quattro satelliti).

Il sistema di coordinate cartesiane di riferimento, noto come WGS84, è geocentrico, avendo l'origine coincidente con il centro della terra. A esso è associato un ellissoide (GRS80) che consente di convertire le coordinate cartesiane $R[x, y, z]$ in coordinate geografiche (latitudine e longitudine) riferite a tale ellissoide.

6.3 Prestazioni dei ricevitori: accuratezza e precisione

Nei ricevitori più semplici e meno costosi, la distanza ricevitore-satellite viene calcolata in base al computo del tempo di volo dei messaggi tra ricevitore e satellite. Ogni ricevitore, infatti, è dotato di un orologio in grado di valutare l'intervallo di tempo tra istante di ricezione e istante di inizio trasmissione del segnale dal satellite. Tale computo, tuttavia, è soggetto a vari errori di misura: primo tra tutti la minore precisione dell'orologio del ricevitore rispetto a quello atomico del satellite, cui si aggiungono altri disturbi nelle misure quali le interferenze dell'atmosfera durante la trasmissione dei segnali e la ricezione di segnali indesiderati di disturbo (errore di *multipath*). In definitiva, l'intervallo di tempo misurato (*range*) è uno pseudo-intervallo (ΔT), in quanto in-

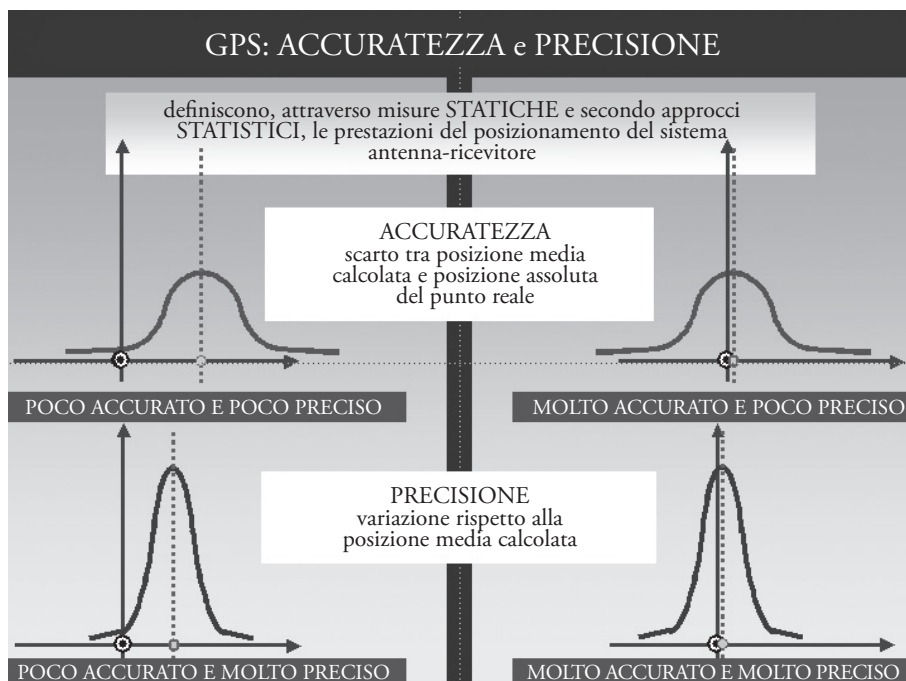


Fig. 9 Definizione di accuratezza e precisione di un ricevitore GPS

ficiato da imprecisioni. Da qui il termine tecnico di *pseudorange* per indicare tali tipi di misure. La relativa *pseudo-distanza* tra ricevitore e satellite viene, infine, calcolata come $D = c \cdot \Delta T$, ove c è la velocità della luce.

Tutto ciò avviene su una banda di trasmissione del satellite di 1023 MHz, indicata dalla sigla *C/A* (*Coarse Acquisition code*, codice di acquisizione grezza). I ricevitori più complessi e costosi sono in grado di comunicare anche su ulteriori frequenze. In merito, si distingue tra ricevitori in *singola frequenza* *L1* (1575 MHz) e in *doppia frequenza*, sia *L1* sia *L2* (1227 MHz). Le lunghezze d'onda delle trasmissioni su *L1* e *L2* sono, rispettivamente, pari a circa 19 e 24 cm. La risoluzione del posizionamento risulta, in tal modo, affetta da errori più contenuti in quanto le distanze ricevitore-satellite si computano non solo in base ai tempi di volo – sempre in base a *C/A* – ma anche contando il numero di onde, ciascuna lunga 19 o 24 cm, contenute nella distanza ricevitore-satellite (*misure di fase*).

Le prestazioni di un ricevitore GPS si valutano mediante misure statiche (cioè con ricevitore immobile in posizione a coordinate note) protratte nel

tempo (2-6 ore). I dati ottenuti sono poi sottoposti a elaborazioni statistiche per calcolare la qualità del posizionamento in base ai due seguenti parametri (entrambi espressi in m ; figura 9):

- *accuratezza*: scarto tra la posizione media calcolata e la posizione reale assoluta del punto indagato;
- *precisione*: variabilità (di norma in termini di deviazione standard, RMS) della distribuzione dei punti rilevati rispetto alla loro posizione media calcolata.

Tuttavia, le applicazioni agricole di detti sistemi in ambito AP riguardano problemi di posizionamento su mezzi in movimento. Pertanto, risulta di notevole utilità anche la possibilità di poter ottenere i suddetti parametri da misure dinamiche. Ciò è possibile utilizzando un opportuno apparato di misura in grado di consentire l'esecuzione contestuale di prove statiche e dinamiche in modo che i ricevitori GPS siano sottoposti alle medesime condizioni ambientali (errore ionosferico, multipath, geometria dei satelliti, ecc.). Una realizzazione di tale apparato, denominato *RotoGPS* (fig. 10), è stata allestita

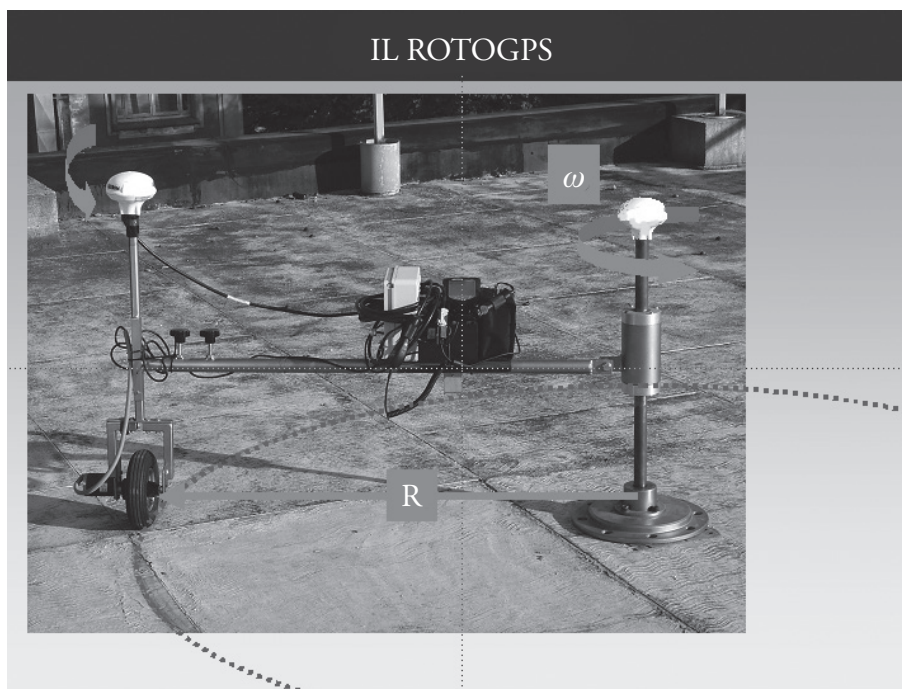


Fig. 10 Il dispositivo di prova denominato *RotoGPS* per testare contestualmente dei ricevitori GPS attraverso misure statiche e dinamiche

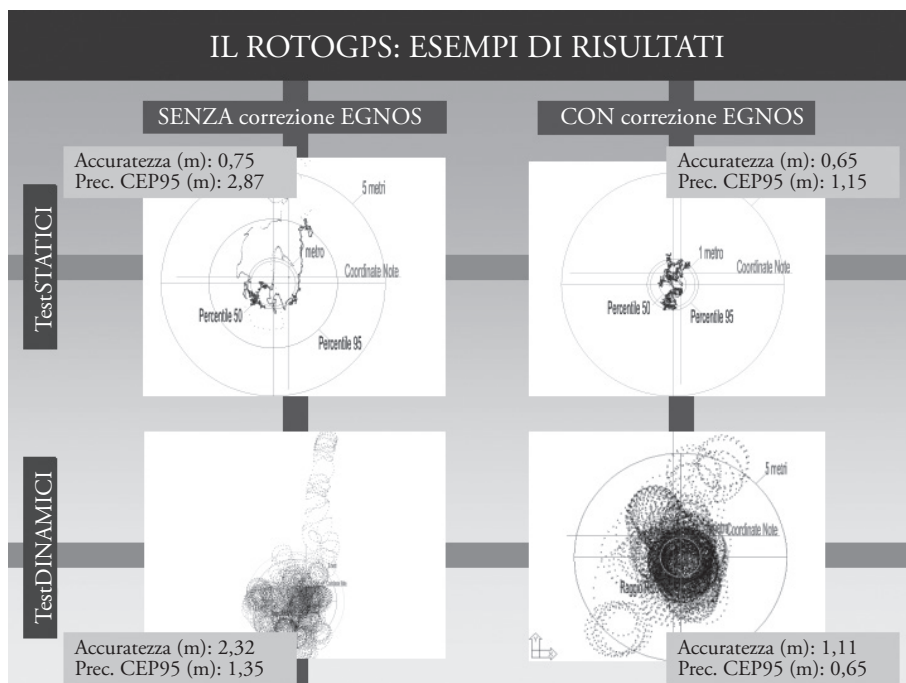


Fig. 11 *Esempi di risultati ottenibili con i test svolti con RotoGPS*

presso l'Istituto di Ingegneria Agraria di Milano e prevede cicli di test su due ricevitori dello stesso tipo (per l'appunto, uno in condizioni statiche, l'altro in condizioni dinamiche) su intervalli temporali variabili da 1 a 3 ore. Un esempio di risultato ottenibile è riportato in figura 11, relativamente a un ricevitore sul quale si può attivare o meno una correzione differenziale satellitare (secondo il protocollo Waas-Egnos, come specificato in seguito) per migliorare le condizioni di accuratezza e precisione (quest'ultima espressa come CEP95, ovvero come raggio della circonferenza che racchiude il 95% dei fixing di posizionamento registrati).

Nel caso delle prove dinamiche, è interessante notare la generazione di svariate circonferenze, corrispondenti a modificazioni che occorrono al parametro della precisione ogni qualvolta il ricevitore è soggetto a un cambiamento della costellazione dei satelliti visibili. Quanto più ridotto è il numero di circonferenze visibili, tanto più elevato è il grado di precisione del ricevitore (indipendentemente dalla sua accuratezza) in quanto più stabile – anche in condizioni di misura dinamiche – al cambiamento dei satelliti.

Accuratezza e precisione condizionano, ovviamente, i costi dei ricevitori.

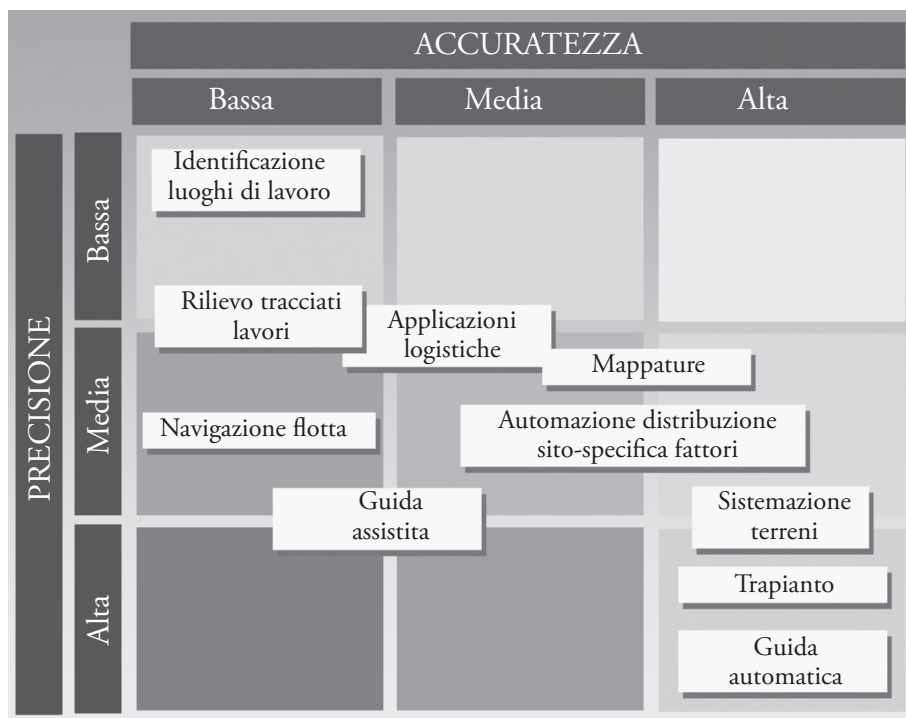


Fig. 12 *Esigenze di accuratezza e precisione nelle diverse applicazioni agricole*

In molte applicazioni agricole – specie in quelle che prevedono il solo monitoraggio – non sono necessari elevati livelli di accuratezza e precisione. Anche in talune applicazioni di controllo operativo (come nel caso della guida assistita) risulta più importante guardare alla precisione che non all'accuratezza. Quest'ultima è indispensabile solamente in applicazioni avanzate di automazione, quali la guida o il trapianto automatico. Un quadro d'insieme delle varie esigenze rispetto a tali parametri è riassunto in figura 12.

6.4 *La correzione differenziale: il DGPS*

Benché più accurati, anche i ricevitori a singola o doppia frequenza risultano affetti da errori sensibili. L'unica soluzione per poterli ridurre drasticamente è quella di poter comparare gli errori del ricevitore in questione (denominato *rover*) con quelli di un analogo ricevitore operante in postazione fissa di coordinate note (stazione *master*). Tale procedura, nota come *correzione differenziale* (DGPS), è attualmente la miglior soluzione in grado di garantire

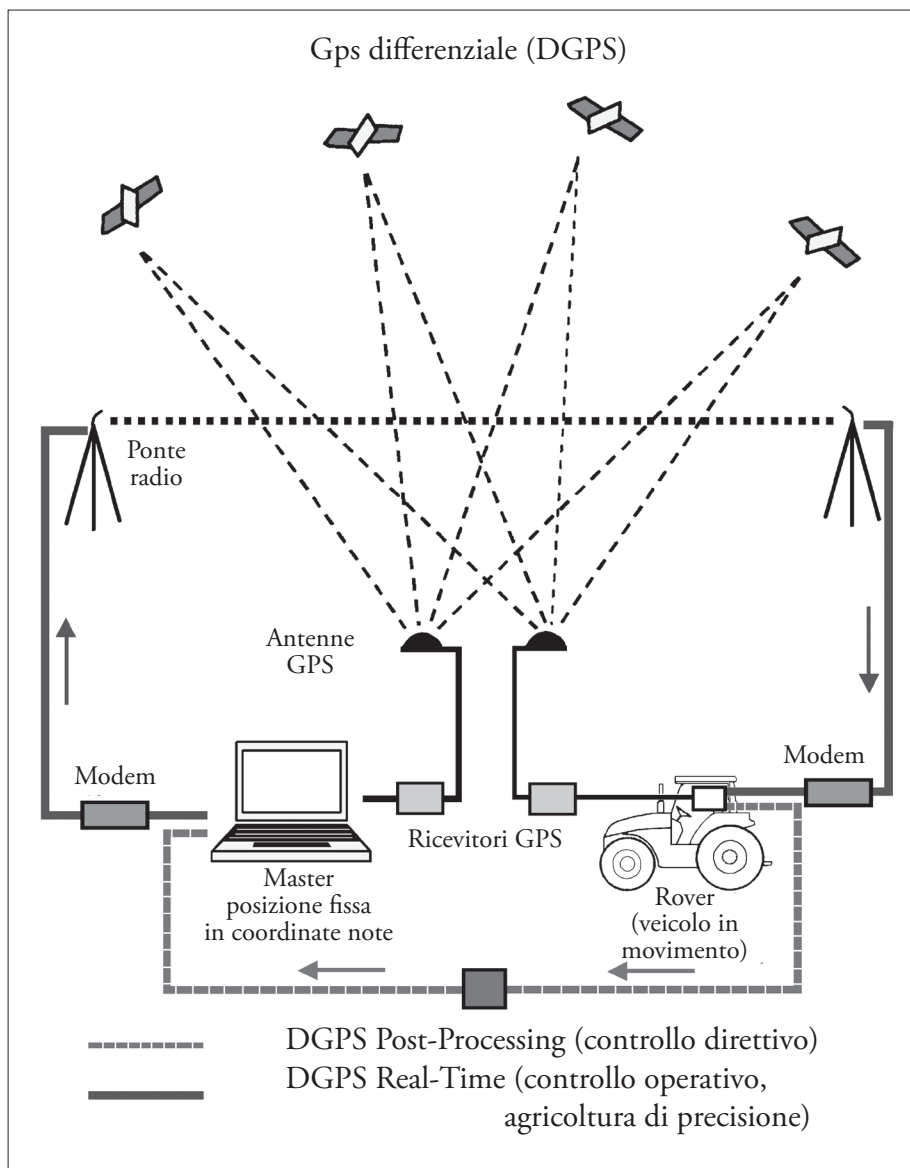


Fig. 13 Possibili forme di impiego del GPS differenziale (DGPS) nell'agricoltura di precisione

precisioni centimetriche anche su veicoli in movimento e può essere applicata (fig. 13):

- in *post-processing*: quando le comparazioni e le correzioni vengono appor-

tate in tempi successivi ai rilievi effettuati; come tale, applicabile solamente in attività di monitoraggio;

- in *real time*: quando le correzioni sono indispensabili contestualmente al rilievo svolto; ciò regolarmente si verifica a fronte di ogni intervento di automazione del controllo operativo dei processi di campo; in tal caso, il sistema DGPS deve anche provvedere alla trasmissione dati in tempo reale tra master e rover.

La comunicazione tra master e rover prevede l'impiego di protocolli standard (RTCM o RTK). La soluzione che offre migliori prestazioni, soprattutto su veicoli in movimento attrezzati con ricevitori in doppia frequenza, è lo standard RTK (*Real Time Kinematic*) grazie al quale si conseguono accuratèzze centimetriche seppur con maggiori costi. Questi sono anche condizionati dalla necessità di dover acquisire un secondo ricevitore, già di per sé costoso, con funzione master da installare, anche momentaneamente, in una zona prossima al rover in lavoro (è normalmente ciò che avviene nelle applicazioni relative alla guida automatica dei trattori o alle trapiantatrici con individuazione automatica dei punti di rilascio a terra del prodotto). In tal modo, i costi possono risultare anche da 10 a 20 volte superiori rispetto a un buon ricevitore a singola frequenza, usato da solo senza alcun tipo di correzione e con un'accuratezza variabile da 2 a 10 m.

In Italia non sono ancora disponibili reti locali, pubbliche o private, per la trasmissione dei segnali di correzione differenziale in tempo reale come, ad esempio, le stazioni messe a disposizione dalla guardia costiera americana (con trasmissione in HF o VHF) o la rete DGPS privata tedesca che fornisce – a pagamento – la trasmissione dei segnali di correzione in modulazione di frequenza (FM) utilizzando il protocollo internazionale RDS (Radio Data System), ormai ampiamente diffuso per la trasmissione dei programmi radiofonici, sia pubblici sia privati.

L'unica soluzione di un certo interesse, disponibile anche sul territorio nazionale, riguarda la possibilità di ricevere in tempo reale – su protocolli RTCM – i segnali di correzione trasmessi via satellite attraverso servizi pubblici (EGNOS) o privati (Racal, Omnistar, John Deere). Mentre per i primi il servizio è gratuito (è sufficiente l'acquisto di ricevitori appositamente abilitati a tale ricezione) per i secondi è di norma previsto il pagamento di un canone annuo. Comunque sia, tale soluzione si appoggia ad alcuni satelliti geostazionari (del tutto autonomi rispetto alla rete GPS vera e propria) il cui compito è quello di veicolare le informazioni di correzione elaborate da stazioni master a terra. I risultati ottenibili sono confortanti, riuscendo a ottenere accuratèzze metriche (1-2 m) o sub-metriche (0,5 m) per ricevitori, rispettivamente, in

FREQUENZA	CONFIGURAZIONE	ACCURATEZZA MEDIA (cm)	COSTO (€)
SINGOLA	L1	500	250
	LI+ EGNOS	100	1000
	L1+OMNISTAR	50	2500
	(L1+RTK)X 2 (1)	10	12000
DOPPIA	L1+L2	200	5000
	L1+L2+EGNOS	50	6000
	L1+L2+OMNISTAR HP	10	8000
	(L1+L2+RTK)X 2	1	20000

Tab. 4 Accuratezza riscontrabile in diverse configurazioni di ricevitori GPS, *con relativi costi*

singola e doppia frequenza (tab. 4).

7. MONITORAGGIO OPERATIVO E QUADERNI DI CAMPAGNA

7.1 Architetture costruttive

L'automazione del monitoraggio operativo è oggi possibile attraverso l'applicazione dei cosiddetti *quaderni di campagna informatici* (QCI). In sintesi, si tratta di soluzioni tecnologiche che consentono di monitorare – parzialmente o integralmente – in modo del tutto automatico le operazioni meccanizzate di campo di una impresa agraria, fornendo informazioni di dettaglio sulle modalità di svolgimento delle operazioni stesse. E ciò fino a giungere alla possibilità di visionare mediante animazioni grafiche su mappe digitalizzate le varie dinamiche di esecuzione dei lavori (fig. 14).

I dispositivi di rilevazione dei QCI si basano su processi di *identificazione a distanza*, ove trattori e macchine operatrici – opportunamente attrezzati – si comportano, rispettivamente, come *sistemi ricognitori* (e di registrazione dati) e *oggetti da riconoscere* (l'identificazione di un'operatrice comporta il contestuale riconoscimento della tipologia di operazione svolta dall'operatrice stessa).

Quando la tecnologia QCI è estesa a tutti i mezzi aziendali, nel suo insieme è in grado di costruire e mantenere aggiornato in modo del tutto automatico il database relativo alla cosiddetta *memoria storica aziendale*. Come tale, *questo strumento è destinato a costituire l'ossatura principale di qualunque sistema*

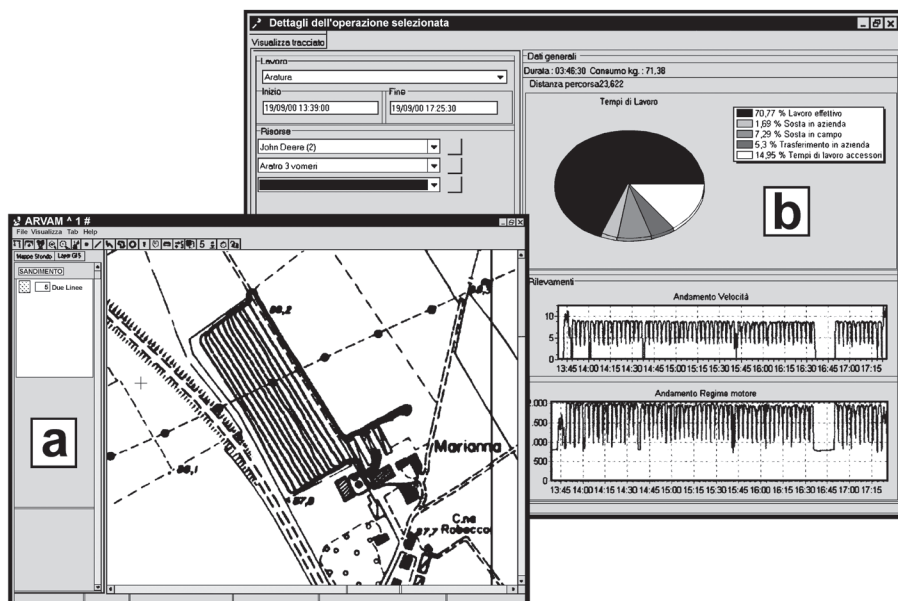


Fig. 14 Soluzioni software per i quaderni di campagna informatici. A: visualizzazione dei tracciati delle operazioni su supporti gis. B: dettagli operativi dei lavori svolti

informativo per aziende agricole.

Le architetture applicative di questa tecnologia possono prevedere diversi gradi di complessità, a seconda dell'oggetto e degli obiettivi del monitoraggio. Esse sono classificabili nei termini che seguono.

Dal punto di vista *organizzativo*, il monitoraggio può essere:

- *parziale*: quando prevede la registrazione di un limitato numero di operazioni aziendali;
- *globale*: quando vengono monitorate tutte le attività aziendali.

Dal punto di vista delle *capacità di osservazione*, il monitoraggio può essere a:

- *ricognizione autonoma*: quando viene automaticamente rilevato il tipo di operazione svolta; in tal caso si rende necessaria la presenza di un sistema di identificazione;
- *ricognizione assistita*: quando le varie attività registrate devono essere classificate manualmente dall'operatore incaricato della gestione dei dati.

Ancora, dal punto di vista *costruttivo*, il monitoraggio può essere realizzato con architetture (fig. 15):

- *tractor-oriented*: quando l'unità centrale del sistema di acquisizione è installata a bordo del trattore;

- *implement-oriented*: quando l'unità centrale del sistema di acquisizione è installata a bordo della macchina operatrice.

Infine, dal punto di vista dell'*attivazione del sistema* di acquisizione dati, il monitoraggio può essere allestito con dispositivi di:

- *accensione automatica*: l'unità centrale del sistema di acquisizione si attiva autonomamente, nel momento in cui ha inizio l'utilizzo del mezzo su cui è installata;
- *accensione manuale*: l'unità centrale del sistema di acquisizione richiede di essere attivata manualmente dall'operatore responsabile dell'utilizzo del mezzo, nel momento in cui ritiene opportuno dare inizio alla fase di monitoraggio (tale situazione, ovviamente, comporta seri rischi di perdite di

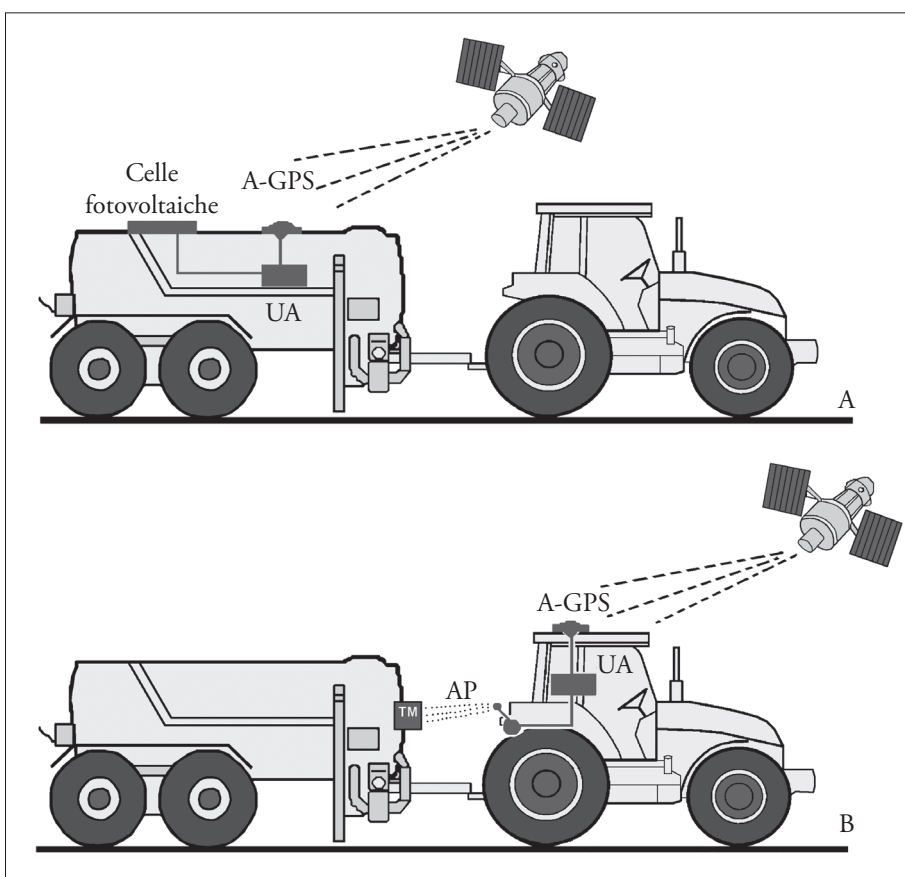


Fig. 15 Architetture costruttive dei quaderni di campagna informatici. Differiscono per la possibilità di installare le unità di acquisizione dati (UA) o direttamente sulle operatrici (A: *implement-oriented*) o a bordo dei trattori (B: *tractor-oriented*)

dati).

A livello pratico, si possono avere più combinazioni realizzative delle suddette classificazioni. Per esempio, nel caso di un monitoraggio a ricognizione autonoma con dispositivi tractor-oriented, a seconda del numero e della tipologia delle macchine operatrici allestite con trasmettitore RF per la loro identificazione automatica, i quaderni prodotti potranno risultare di tipo: a) *globale*: tutte le macchine attrezzate con un trasmettitore di codice; b) *parziale*: solo un ristretto numero di macchine, solitamente adibite allo svolgimento di operazioni omogenee, viene dotato dei trasmettitori di riconoscimento. Quest'ultimo caso potrebbe riguardare, ad esempio, il monitoraggio delle operazioni adibite ai trattamenti fitosanitari delle colture (informatizzazione del quaderno "trattamenti aziendali").

Le architetture implement-oriented, ovviamente, risultano sempre necessariamente combinato a soluzioni di monitoraggio parziale a ricognizione assistita. I problemi costruttivi relativi a queste soluzioni riguardano la necessità di allestire la macchina con idonei sistemi di alimentazione (batterie e/o celle fotovoltaiche) per sopperire alle necessità di funzionamento del sistema di monitoraggio indipendentemente dalla presenza del sistema di alimentazione del trattore.

7.2 Applicazioni aziendali nel settore viticolo

In base a quanto detto, dovrebbe essere chiaro come il settore viticolo possa più di altri avvantaggiarsi delle applicazioni aziendali dei QCI in quanto:

- si tratta di un ordinamento produttivo in cui, più di altri, è consolidata la prassi di attivare forme continue di monitoraggio colturale; tuttavia, l'interpretazione e l'utilizzo di molte delle informazioni ottenibili necessitano spesso di essere integrate con altre informazioni derivabili dalle modalità di svolgimento degli interventi operativi;
- l'intensità di impiego dei vari presidi fitosanitari rende più esposto tale settore alla necessità di mantenere registrazioni complete e oggettive relative a tutti i vari trattamenti effettuati nel corso della stagione produttiva, indipendentemente dal modo in cui essi sono pianificati (a calendario e/o in base alle specifiche condizioni ambientali); non è un caso che il termine *quaderno di campagna*, riferito al mantenimento di un registro cartaceo relativo agli interventi svolti, si sia proprio consolidato nell'ambito di questo settore;
- la necessità di automatizzare la raccolta delle informazioni sulle attività

aziendali è una viva necessità dell'impresa viticola nel suo complesso, e ciò anche in vista della messa in essere di forme di rintracciabilità, spesso in connessione coi flussi di prodotto da realizzare a valle con la cantina.

Come già brevemente accennato, la cosiddetta *viticoltura di precisione* (da intendersi come una sorta di specializzazione della AP) prevede innanzitutto l'applicazione – aziendale o territoriale – di forme di monitoraggio culturale (eventualmente integrate con forme di monitoraggio ambientale) di norma limitate all'impiego di tecniche di telerilevamento aereo o da satellite. Le principali esperienze maturate negli USA e in Australia non hanno mai tenuto conto della necessità di adottare anche forme di monitoraggio operativo. Tra le prime esperienze maturate in merito anche in Italia, il progetto MESOVIP (*Sviluppo di METodi e SOLuzioni tecnologiche per la VITicoltura di Precisione in Italia*; Mazzetto et al., 2005) ha cercato di individuare delle proposte metodologiche atte a superare tali limitazioni prevedendo soluzioni: a) sia che evidenziassero il ruolo centrale del monitoraggio operativo attraverso l'impiego dei QCI; b) sia che prevedessero forme di integrazione stretta tra le forme di monitoraggio operativo e culturale.

In breve, sono state sviluppate e testate diverse soluzioni tecnologiche per la realizzazione dei QCI, implementanti varie architetture costruttive in merito ad aspetti sia *organizzativi* (monitoraggio parziale o globale, a seconda della possibilità di prevedere la registrazione di un limitato numero di operazioni o di tutte le attività aziendali meccanizzate), sia *della capacità di osservazione* (ricognizione autonoma o assistita, a seconda della capacità di identificare automaticamente, o meno, l'operazione monitorata). In dettaglio, si sono realizzati i tre dispositivi (fig. 16) sommariamente descritti in tabella 5 (le denominazioni proposte fanno riferimento all'acronimo generale SIAVIT, ovvero *Sistemi Informativi Aziendali per la VITicoltura*). Si tratta di due tipologie di sistemi di acquisizione dati da montare su trattore (architettura tractor-oriented) e di una soluzione semplificata – sostanzialmente configurabile come palmare dedicato – da adibire esclusivamente al monitoraggio delle operazioni manuali in vigneto (potatura e raccolta) e da posizionarsi direttamente sull'operatore in lavoro (architettura assimilabile a un implement-oriented). Quest'ultima soluzione potrebbe comportare notevoli problemi di ordine sia sindacale sia di privacy da dirimere, preventivamente, con tutte le maestranze aziendali. Si è, comunque, inteso proporla nell'ambito del progetto in quanto potenzialmente utile per poter prevedere, indirettamente attraverso indici basati sulle velocità di traslazione intrafilare – sia la biomassa legnosa asportata con le potature, sia le produzioni di uva in fase di raccolta.

In breve, dalle esperienze condotte si è potuto appurare che:

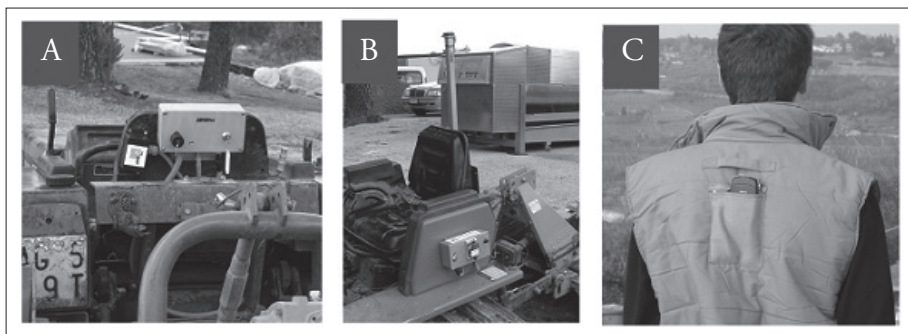


Fig. 16 Tipologie di QCI realizzate nel corso del progetto MESOVIP. Linea SIAVIT: A) Global/SelfDetect; B) Global/Assisted; C) Walk

1. tutti i sistemi garantiscono una elevata o soddisfacente sicurezza nell'acquisire dati in modo preciso e completo; problemi di perdita dei dati si hanno solamente in caso di avarie non prontamente segnalate o per dimenticanze nell'accensione manuale del *Siavit Walk*;
2. la soluzione più tecnologicamente più avanzata è il *Siavit Global/SelfDetect*, in quanto – grazie al sistema di riconoscimento delle operazioni tramite dei trasmettitori RF di codice-operatrice – è in grado di monitorare tutte le attività aziendali realizzando il database dei processi meccanizzati con minime richieste di integrazione dati (sostanzialmente, si tratta di specificare manualmente le tipologie dei prodotti distribuiti); per contro, risulta essere la soluzione più gravosa in fase sia di acquisizione (ha i costi più elevati e l'installazione è relativamente più complessa dovendo anche prevedere di equipaggiare tutte le operatrici coi trasmettitori RF), sia di manutenzione (periodicamente si deve sostituire la batteria di alimentazione dei trasmettitori RF);
3. in termini di cura e manutenzione, gli oneri maggiori sono, comunque, da segnalare a carico del *Siavit Walk*, la cui gestione deve essere necessariamente affidata a un responsabile aziendale che deve provvedere a: i) mettere quotidianamente sotto carica, a fine giornata, le batterie dei ricevitori GPS; ii) consegnare il dispositivo sempre allo stesso operatore a inizio giornata, provvedendo poi al suo ritiro al termine del lavoro; iii) procedere allo scarico dei dati che risulta, rispetto alle versioni *Global/SelfDetect* e *Global/Assisted*, sensibilmente più complesso poiché si deve saper gestire un'interfaccia wireless bluetooth sia sui GPS, sia sul computer palmare dell'azienda; quest'ultimo viene anche usato per lo scarico dati dagli altri due dispositivi, con i quali è sufficiente una semplice connessione via cavo

OPERAZIONE		Trattamento antiperonospora	
Vigneto/i:	Rampaneto A (2,18 ha) Rampaneto B (0,62 ha)		
Superficie lavorata (ha):	2,80 ha		
Periodo pianificato:	26/7/2004 – 31/7/2004		
Periodo esecuzione effettivo:	27/7/2004		
Trattore:	SAME Golden 85 CV		
Operatrice:	Atomizzatore VMA 1000		
Tempo totale (min):	169		
di cui Lavoro Effettivo(min; %):	95;	56%	
di cui Tempi Accessori (min; %):	52;	31%	
di cui Pause(min; %):	23;	13%	
Capacità operativa di lavoro (ha/h):	0,994		
Prodotto distribuito:	CUPRAVIT IDRO (2,7 kg/ha)		
Quantità totale prevista (kg):	7,6		
Quantità totale effettiva (kg):	10,0		

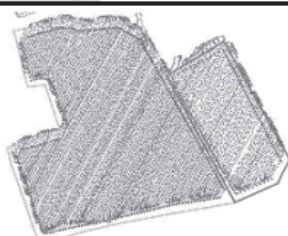


Fig. 17 Esempio di record estraibile dal database realizzabile con i QCI applicati in contesti viticoli

seriale.

4. nel complesso, la soluzione *Siavit Global/Assisted* offre prestazioni accettabili nell'ottica di realizzare le basi di un SIA aziendale, benché sia ancora richiesto un certo intervento diretto da parte dell'utente nel completamento dei database; i dati registrati automaticamente consentono, in ogni caso, la costruzione automatica di un QCI con i tempi e i luoghi di lavoro determinabili per ciascun trattore; l'integrazione manuale consiste, fondamentalmente, nel dichiarare il tipo di operazione svolta; con tutti i dispositivi, è possibile – in definitiva – pervenire a informazioni sulle attività strutturate in record come da figura 17.

Restano ancora da risolvere alcune problematiche riguardanti affinamenti sui componenti software del SIA, soprattutto per quanto concerne aspetti inerenti:

1. una maggior gestione interattiva dei database prodotti dai QCI da parte dell'utente;
2. una più efficiente gestione degli errori, con procedure diagnostiche in grado di rilevare, automaticamente, incongruità nei dati acquisiti o guasti ai

Oggetto monitoraggio	SIAVIT GLOBAL/ SELFDETECT	SIAVIT GLOBAL/ ASSISTED	SIAVIT WALK
Architettura	Attività meccanizzate	Attività meccanizzate	Attività manuali
Descrizione	Tractor-oriented	Implement-oriented	Implement-oriented (direttamente portato dall'operatore)
	Data-logger a 2 ingressi seriali per: ricev. GPS integrato + ricev. rf per codici macchina; contenitore metallico antiurto; antenna GPS su supporto metallico; trasmett. rf per operatrici con interruttore a vibraz.	Data-logger a singolo ingresso per ricev. GPS integrato; contenitore metallico antiurto; antenna GPS su supporto metallico	Data logger a singolo ingresso per ricev. e antenna GPS integrati; portabilità su giubbotto predisposto
Alimentazione	Batteria trattore	Batteria trattore	Batteria al litio
Accensione	Automatica	Automatica	Manuale
Estensione monitor	Globale	Globale	Parziale
Tipo ricognizione	Autonoma	Assistita	Assistita
Sicurezza dati	XXX	XXX	XX
Dettaglio attività	XXX	XX	X
Necessità di integrare informazione	X	XX	XX
Complessità di installazione	XXX	XX	○
Cura e manutenzione	XX	X	XXX
Difficoltà scarico dati	X	X	XX
Impatto sul lavoro	○	○	X
Problemi di privacy	○	○	XXX
Costi di acquisizione	XXX	XX	X
Legenda ○: nullo o inesistente; X: basso; XX: medio; XXX: alto			

Tab. 5 *Valutazione comparativa dei dispositivi QCI (linea SIAVIT) realizzati per il monitoraggio operativo nell'ambito del progetto MESOVIP*

dispositivi di raccolta dati (manutenzione pilotata);

- le esigenze di modularità tra componenti, in particolare con le osservazioni dal monitoraggio culturale.

Su tali aspetti si dovranno maggiormente concentrare le attività sperimentali future.

7.3 Applicazioni territoriali: la gestione dei reflui in aree vulnerabili

Nelle aree vulnerabili ad alta intensità zootecnica, ove il rischio di inquinamento di nitrati derivanti da operazioni di spandimento di reflui zootecnici è

particolarmente elevato, i vari attori – produttori, tecnici e pubblici amministratori – operanti sul territorio dovrebbero essere maggiormente sensibilizzati sulla necessità di svolgere un monitoraggio automatico e capillare di dette operazioni. Ciò, infatti, permetterebbe:

1. *all'amministratore pubblico* di verificare le reali modalità di spandimento dei reflui da parte degli agricoltori; ciò attraverso strumenti e metodi che garantiscano quanto più possibile di stabilire l'oggettiva aderenza delle dinamiche di spandimento rispetto a dei piani concordati con l'amministrazione locale in vista di una limitazione del carico di inquinanti di origine zootecnica;
2. *all'agricoltore* che opera in proprio di gestire al meglio l'impiego dei fattori produttivi per ottenere: da un lato, un'ottimizzazione nell'uso di risorse attraverso un dosaggio controllato dei concimi, limitando situazioni di carenze o eccessi nelle diverse condizioni pedologiche e sito-specifiche della propria azienda; dall'altro, la possibilità di poter documentare con oggettiva certezza le condizioni del proprio lavoro in un contesto di certificazione della qualità a fini sia produttivi, sia ambientali;
3. *all'impresa agromeccanica* che opera la distribuzione per conto di terzi di poter certificare la qualità dei propri servizi – rispetto sia all'agricoltore, sia all'ente pubblico – con la possibilità di fornire a lavoro ultimato una documentazione completa in merito ai dosaggi e agli aspetti logistico-operativi (area effettivamente lavorata, rifornimenti eseguiti, tempi di lavoro, mappe di distribuzione, ecc.) delle operazioni svolte.

È nell'ambito di un simile contesto di riferimento che, da una collaborazione tra l'Istituto di Ingegneria Agraria di Milano e l'Assessorato Agricoltura e Ambiente della Provincia di Modena, è nato il progetto MOSAICO (*"Monitoraggio delle Operazioni di Spandimento di liquami e letami per le attività Agricole della Provincia di Modena ai fini di una riduzione dei rischi da Inquinamento da nitrati nelle zone di CONoide"*). Come tale, l'obiettivo principale del progetto cerca di soddisfare innanzitutto le esigenze dell'amministratore pubblico, definendo soluzioni di monitoraggio territoriale delle attività di spandimento reflui tali consentire ai funzionari provinciali di controllare – in modo del tutto sicuro e oggettivo – le modalità di distribuzione dei reflui zootecnici da parte di ciascun allevamento, in base a quanto stabilito dai vincoli spazio-temporali annuali fissati dall'amministrazione stessa.

L'approccio "sicuro e oggettivo" dovrebbe essere, appunto, garantito dall'impiego dei QCI, in grado di generare, in modo automatico, delle tabelle riepilogative di lavoro onde consentire un controllo sito-specifico delle dosi di azoto effettivamente distribuite. La metodologia di ricerca ha, così, stabilito

che, per ogni azienda, si dovesse poter redigere, in automatico, il quaderno di campagna relativo alle attività di tutte le macchine operatrici (MO) preposte alle operazioni di distribuzione dei reflui zootecnici in uso presso l'azienda stessa. Per tale motivo, ogni MO è stata allestita con una opportuna unità di registrazione e monitoraggio. In fase sperimentale, pertanto, le diverse MO delle aziende pilota sono state attrezzate con diversi prototipi di registrazione, ciascuno in grado di esprimere una propria *sintassi comportamentale* (ovvero: le regole con cui si identificano e analizzano le diverse fasi di lavoro della MO), da tenere in debita considerazione in fase di elaborazione dati nell'interpretare e archiviare il tipo di operazione svolta.

In generale, le diverse MO hanno riguardato attrezzature adibite alla distribuzione: sia di liquame (*carribotte* e *sistemi di fertirrigazione* a tubazione flessibile mobile), sia di letame (*carri spandiletame*). L'identificazione del tipo di prodotto distribuito è, pertanto, effettuata automaticamente in base a:

1. corrispondenza biunivoca tra *tipologia di refluo* e *tipo di MO*;
2. corrispondenza biunivoca tra *tipologia di refluo* e *tipologia dell'area di prelievo* (vasca di stoccaggio, concimaia, lagone, ecc.).

Nella sua versione attuale, il sistema di monitoraggio non effettua misurazioni dirette dei quantitativi distribuiti. Tuttavia, una *stima* – seppur approssimata – dei *volumi di distribuzione* è possibile contando il numero di viaggi tra zona di carico e campi destinati allo spandimento (il volume di carico massimo per ciascuna MO è sempre noto a priori).

In termini generali, la stima sito-specifica delle dosi di azoto distribuite richiede la conoscenza simultanea delle seguenti informazioni:

1. *luogo lavoro*: individuazione non ambigua dell'appezzamento su cui ha avuto luogo la distribuzione;
2. *quantità distribuite*: valutazione dei volumi (m^3) o delle masse (kg o t) effettivamente o presumibilmente distribuite su quel luogo di lavoro; la conoscenza effettiva si ottiene con la misura reale dei flussi di distribuzione a mezzo di specifici sensori; la conoscenza presunta si ottiene con la stima dei carichi distribuiti a mezzo di algoritmi che valutano il comportamento cinematico (previamente registrato) dei mezzi in fase di lavoro;
3. *concentrazione di azoto*: in kgN/m^3 o kgN/kg , relativa al contenuto in azoto per ogni unità di volume o di massa (tal quale) distribuiti nel corso dell'attività monitorata; anche in tal caso, la conoscenza di tale concentrazione può essere effettiva (qualora misurata da specifici sensori) o presunta (stimata attraverso opportune tabelle).

L'ordine di elencazione delle tre precedenti informazioni rispetta anche un rigoroso ordine di priorità. Infatti, poco importerebbe conoscere le quantità

distribuite, senza sapere dove tali quantità sono state realmente collocate. E ancora: sarebbe inutile la conoscenza di una concentrazione di azoto senza poterla mettere in relazione a una quantità distribuita.

Nel realizzare il sistema di monitoraggio si è proprio cercato di tener conto di tali priorità. Nella sua attuale versione, infatti, il sistema provvede a registrare i dati di posizionamento dei mezzi sul territorio per consentire, innanzitutto, l'identificazione dei luoghi di lavoro. Tale approccio offre anche la possibilità di analizzare il comportamento cinematico complessivo del cantiere adottato (spostamenti, controllo dei punti di carico, ecc.). L'analisi dei percorsi svolti, peraltro, soddisfa poi anche l'esigenza di stimare le quantità distribuite, come già sopra accennato. La stima delle concentrazioni di azoto, per il momento, si limita all'identificazione della "tipologia di reflu" secondo la logica già descritta, da mettere poi in relazione coi valori di concentrazioni medie registrati in opportune tabelle. Il principale punto debole di tale approccio riguarda la non conoscenza dei contenuti in s.s. del reflu (da cui dipendono in modo rilevante i valori di concentrazione). Un sensore di conducibilità elettrica da installare in corrispondenza delle vasche di stoccaggio potrebbe, in prospettiva, migliorare l'efficacia del sistema di monitoraggio nel suo complesso.

Il sistema di monitoraggio viene, in definitiva, concepito come un insieme di dispositivi di registrazione da installare a bordo delle MO, la cui gestione – scarico dei dati a parte – è responsabilità diretta del proprietario delle macchine stesse (agricoltore o allevatore). Rimane, pertanto, escluso il monitoraggio delle operazioni di spandimento eventualmente effettuate in contoterzi. Ciò a meno che il contoterzista stesso non faccia parte della rete di monitoraggio.

Sul piano gestionale, il sistema consente la costruzione di un database aziendale ove record corrisponde a una singola operazione di spandimento, definibile come: «insieme di attività meccanizzate omogenee svolte nell'ambito di una *giornata di lavoro*, aventi come fine il prelievo, per mezzo di una specifica MO, di una data quantità di reflu zootecnico da un punto di stoccaggio (S) e la sua successiva distribuzione sull'area di uno appezzamento (A), non necessariamente appartenente all'azienda che detiene il possesso della MO».

L'univocità di una operazione è, quindi, data dalla conoscenza del quadrimio:

1.Data – 2.MO – 3.S – 4.A.

Così, due operazioni di spandimento risultano distinte, a esempio, quando:

- pur lavorando su uno stesso appezzamento, sono eseguite con MO diverse

(anche se di proprietà della stessa azienda) o prevedono il prelievo del prodotto in punti di stoccaggio diversi;

- vengono svolte in date diverse, pur a parità di tutte le altre condizioni di lavoro (MO, punti prelievo, appezzamento).

Sul *piano costruttivo*, le strategie di sviluppo dei prototipi hanno cercato di soddisfare le seguenti esigenze:

- contenimento dei costi, da individuare come ragionevole compromesso tra semplicità costruttiva, necessità di garanzia di un funzionamento continuo (in condizioni di lavoro molto gravose) e robustezza;
- semplicità d'impiego, senza alcuna interferenza con il lavoro normalmente svolto dagli addetti alle operazioni di spandimento (questi, in linea teorica, non dovrebbero essere nemmeno informati dell'esistenza delle unità di registrazione, nel senso che il loro funzionamento dovrebbe essere del tutto autonomo rispetto alla presenza di qualunque responsabile aziendale);
- garanzia di completezza dei dati raccolti, con minimi rischi di alterazioni e manomissioni;
- essere di potenziale interesse anche per la stessa direzione aziendale, ovvero: oltre a svolgere una funzione di monitoraggio ambientale, il sistema potrebbe trovare impieghi anche a livello di management aziendale (controllo e modalità delle operazioni svolte, management delle risorse, piani di concimazione, ecc.).

Le varie soluzioni allestite sono descritte in figura 18. Per il monitoraggio dei *carribotte*, si sono messe a punto architetture implement-oriented costituite dai seguenti dispositivi: a) ricevitore e antenna GPS (10 canali) a singola frequenza; b) data-logger con memoria su MMC a 32 Mbyte; c) batteria al piombo, 12V-24Ah; d) pannello fotovoltaico per mantenere lo stato di carico della batteria; e) interruttore di accensione del sistema con sensore di vibrazione, in modo da attivare automaticamente la registrazione dei dati solamente quando la macchina è in movimento. Si tratta delle soluzioni più affidabili con garanzia di una raccolta completa dei dati. Soluzioni, queste, che purtroppo non si sono potute applicare anche per il monitoraggio degli *spandiletame* a causa dell'eccessivo grado di imbrattamento di materiale organico cui sono soggetti questi mezzi, tale da precludere a priori l'uso dei pannelli fotovoltaici. Ciò ha imposto l'adozione di soluzioni tractor-oriented a ricognizione assistita, ovvero senza sistemi di identificazione per il rischio di rendere proibitivo l'impiego di queste tecnologie a causa dei costi elevati.

Sul piano gestionale, gli strumenti software annessi al sistema devono comunque sempre prevedere:

1. la consultazione di database, attraverso interfacce-utente molto semplici;

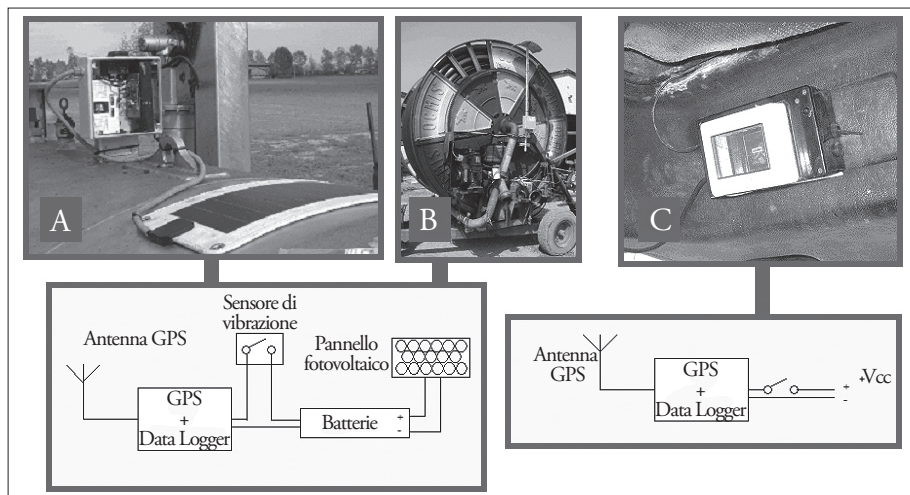


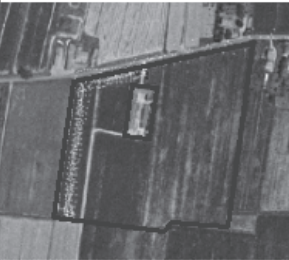
Fig. 18 Principali dispositivi QCI realizzati nel corso del progetto MOSAICO e utilizzati per il monitoraggio operativo di: A) corribotte; B) sistemi di fertirrigazione; C) spandilettame

2. l'accesso a strumenti GIS di facile impiego per poter visionare la gestione dei mezzi sul territorio.

Comunque sia, lo sviluppo del software riguarda due aspetti: a) le esigenze gestionali del singolo agricoltore aderente alla rete di monitoraggio (*fronte aziendale*); b) le strategie di controllo del funzionario pubblico a livello di intera rete di monitoraggio (*fronte territoriale*).

Nel primo caso, si tratta semplicemente di rendere disponibili all'agricoltore dei record di sintesi tipo quelli descritti in figura 19, secondo un'impostazione analoga a quanto già visto per i QCI in viticoltura. Per entrambi i fronti (*aziendale + territoriale*) risulta, poi, fondamentale ai fini delle attività di controllo mantenere aggiornati i quantitativi di azoto complessivamente distribuiti sulle singole parcelle durante l'anno in corso (fig. 20). Ciò unitamente alla consultazione di indici di riepilogo che quantificano la qualità del lavoro svolto in termini di:

- *superficie reale coperta* (SRC, %), ovvero il rapporto tra l'area effettivamente fatta oggetto di distribuzione durante la singola operazione e l'area totale della parcella (o dell'appezzamento, a secondo delle modalità di impostazione dell'analisi);
- *indice medio della regolarità di distribuzione* (IRD, %), ovvero il rapporto tra l'area in cui, durante la singola operazione, la distribuzione del prodotto è avvenuta una sola volta e l'area effettivamente fatta oggetto di distribuzione; in pratica viene valutato il gradi di sovrapposizione tra passate adiacenti.

OPERAZIONE: SAVBOT090904		Mappa di Distribuzione
Particella Catastale	Comune F257, Foglio 134, Part.93	
Superficie Particella (ha)	4.2	
Superficie lavorata (ha)	1.02	
Periodo di esecuzione	09/09/2004	
Macchina Operatrice	Botte Spandiliquame (capacità: 15 t)	
Tempo Totale (min)	342	
di cui Lavoro Effettivo (min; %)	20; 5.8	
di (min; %)i cui Tempi Accessori	322; 94.2	
Capacità Operativa di Lavoro (ha/h)	0.179	
Refluo distribuito	Liquame bovino (N tot: 0.3%)	
Numero di distribuzioni	4	
Quantità totale (t di refluo)	60	
Quantità totale di N distribuito (kg)	180	
Carico di N già presente in campo (kg/ha)	96	
Nuovo carico di N in campo (kg/ha)	139	

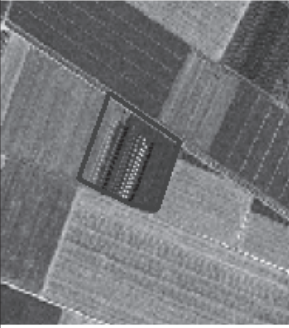
OPERAZIONE: AGRBOT030703		Mappa di Distribuzione
Particella Catastale	?	
Superficie Particella (ha)	?	
Superficie lavorata (ha)	1.20	
Periodo di esecuzione	09/09/2004	
Macchina Operatrice	Botte Spandiliquame (capacità: 6 t)	
Tempo Totale (min)	692	
di cui Lavoro Effettivo (min; %)	-	
di (min; %)i cui Tempi Accessori	-	
Capacità Operativa di Lavoro (ha/h)	0.104	
Refluo distribuito	Liquame suino (N tot: 0.25%)	
Numero di distribuzioni	8	
Quantità totale (t di refluo)	48	
Quantità totale di N distribuito (kg)	100	
Carico di N già presente in campo (kg/ha)	89	
Nuovo carico di N in campo (kg/ha)	154	

Fig. 19 Esempio di record estraibili dal database realizzabile coi QCI applicati nel contesto del progetto MOSAICO (monitoraggio operativo su scala territoriale)

Rimangono, comunque, ancora da affrontare compiutamente molti dei problemi relativi allo sviluppo del software sul fronte territoriale. Si tratta, infatti, di un'architettura complessa che richiede impostazioni *client-server* appoggiate a database di grandi capacità (si pensa a una piattaforma Oracle). Tale architettura potrà essere definita solo quando si potranno ritenere a regime le strutture DB a livello di singole aziende. La complessità dell'architettura, infatti, risiede nel fatto che si è di fronte a una struttura di server distribuiti sul territorio (ovvero i DB dei singoli fronti aziendali). Il fronte territoriale, per potersi aggiornare, è destinato a comportarsi come singolo client di molteplici server. Peraltro, rimane ancora da valutare anche l'opportunità che la gestione dei singoli DB sul fronte aziendale

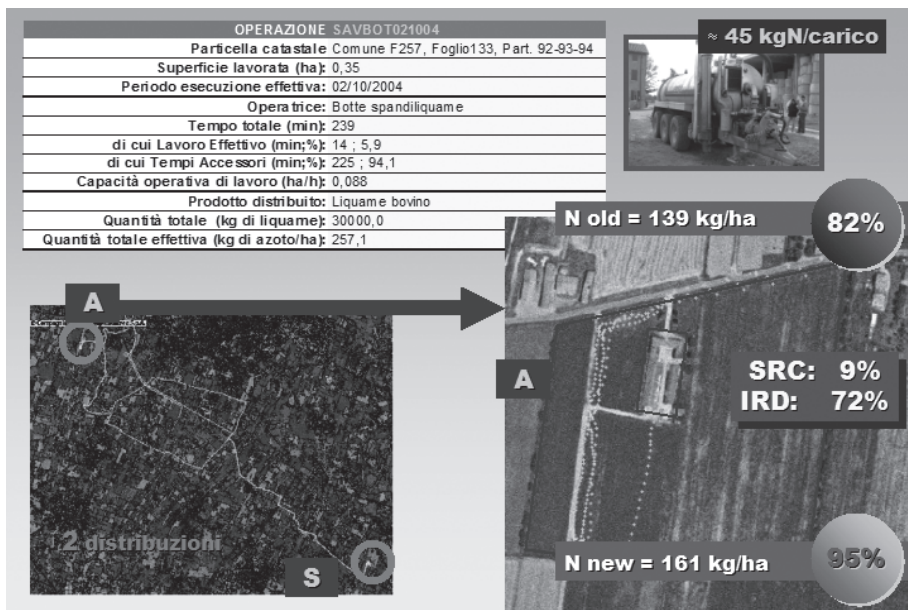


Fig. 20 Esempio di record con indicatori che descrivono la qualità del lavoro svolto in fase di distribuzione dei reflui

venga garantita direttamente come servizio dagli uffici provinciali.

Infine, è utile sottolineare il fatto che il successo futuro di simili iniziative, in termini di applicabilità del progetto verso un elevato numero di imprese *volontariamente aderenti* alla rete di monitoraggio, potrà essere garantito solo attraverso la parallela proposta di opportune *incentivazioni* offerte dall'amministrazione pubblica ai potenziali interessati. In merito, alcune iniziative potrebbero riguardare:

1. la *certificazione di qualità agro-ambientale* da attribuire all'azienda volontaria aderente (una sorta di "bollino blu" da attribuire alle aziende che nel tempo riescono a evitare eccessivi ammonimenti);
2. le *semplificazioni burocratiche* nelle richieste di spandimento (chi aderisce non deve più presentare domande in forma cartacea all'amministrazione pubblica);
3. la garanzia di una *assistenza nei piani colturali e di concimazione* (grazie a un eventuale consulente professionista messo a disposizione dall'amministrazione);
4. l'attivazione di una *banca dati terreni*: in caso di necessità, l'amministrazione dà indicazione del luogo su cui poter andare a svolgere distribuzioni

con carattere d'urgenza, a patto che l'operazione possa essere eseguita in termini certificabili (ovvero: chi distribuisce deve poter poi esibire sia agli agricoltori destinatari, sia ai funzionari provinciali, una mappa di distribuzione, realizzabile solamente con la nuova generazione di prototipi che si sta mettendo a punto).

8. CONCLUSIONI

Nonostante ci si interroghi spesso sulle cause che rendono ancora difficoltosa una diffusa applicazione dell'Agricoltura di Precisione nel nostro Paese, è ferma convinzione di chi scrive che si tende di norma a sottovalutare, durante l'analisi del problema, il reale peso delle barriere che si oppongono al trasferimento delle tecnologie informatiche in agricoltura.

Prima ancora che su un piano tecnico-economico, il problema deve essere affrontato da un punto di vista culturale e sociale, tenendo anche in debito conto il potenziale ruolo della formazione professionale.

Peraltro, i principali problemi riguardano – appunto – l'AP propriamente detta, ovvero le applicazioni relative alla distribuzione dei fattori della produzione con controllo automatico delle dosi secondo logiche sito-specifiche, sulla base di mappe prescrittive predisposte a priori. Come detto, la principale causa riguarda l'incapacità di gestire adeguatamente tutte le informazioni richieste da tale pratica, la cui complessità ha natura sia *quantitativa* (enormi quantità di dati da gestire) e *qualitativa* (la loro gestione richiede strumenti di analisi complessi). Tale gestione necessita di integrare tra loro sistemi informativi aziendali di tipo operativo e informativo, il che ci riporta alle citate difficoltà informatiche.

Il tutto, peraltro, deve poi prevedere anche la quadratura di un tornaconto economico, difficilmente evidenziabile nel breve periodo secondo le classiche impostazioni dell'analisi costi-benefici.

In definitiva, il problema non è certo di semplice soluzione e impone di essere inquadrato e affrontato con rigore quantomeno sul piano metodologico e terminologico. Queste note sono state redatte con l'obiettivo principale di cercare di soddisfare – almeno in parte – tale pretesa.

L'AP va vista, innanzitutto, come un punto d'arrivo. La sua realizzazione comporta delle profonde modificazioni nelle strategie di gestione che impongono ai responsabili della produzione un nuovo tipo di rapporto con i vari ruoli dell'informazione aziendale. In tal senso, impostare correttamente e gradualmente le varie forme di monitoraggio aziendale potrebbe costituire

un'utile prassi per avvicinarsi al problema e per familiarizzare sia con le nuove tecnologie, sia con i necessari metodi avanzati di gestione.

BIBLIOGRAFIA

- ANTHONY R.N. (1965): *Planning and control systems: a framework for analysis*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- AURENHAMMER H., MUHR T. (1991): *GPS in basic rule for environment protection in agriculture*, Automated agriculture for the 21st century, 16-17 December, ASAE, Chicago, pp. 394-401.
- BASSO B., SARTORI L., BERTOCCO M. (2005): *Agricoltura di precisione – Concetti teorici e applicazioni pratiche*, Edizioni L'Informatore Agrario, Verona, pp. 1-154.
- BLACKMORE, B.S., WHEELER P.N., MORRIS R.M., MORRIS J., JHONES R.J.A. (1994): *The role of precision farming in sustainable agriculture: a european perspective*, Proceeding of 2nd International Conference on Site-Specific Management for Agricultural System, March 27-30, Minneapolis, <http://www.cranfield.ac.uk>.
- CASTELLI G., LAZZARI M., MAZZETTO F. (1993): *L'uso dei modelli nella meccanizzazione agricola: aspetti metodologici e problematici*, «Rivista di Ingegneria Agraria», 1, pp. 24-33.
- COLVIN T.S., KARLEN D.L., TISCHER N. (1991): *Yield variability within fields in central Iowa*, Automated agriculture for the 21st century, 16-17 December, ASAE, Chicago, pp. 366-384.
- GUBIANI R., LAZZARI M. (2000): *Precisione della mappatura automatica di un sistema DGPS*, «L'Informatore Agrario», 4, pp. 87-90.
- GUBIANI R., LAZZARI M. (2001): *Problematiche connesse con la raccolta e utilizzazione dei dati puntuali di produzione forniti dai sistemi Yield mapping montati su mititrebbitrici in un'ottica di agricoltura di precisione*, Atti del VII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria (AIIA) "Ingegneria Agraria per lo Sviluppo dei Paesi del Mediterraneo", Vieste (FG), 11-14 settembre.
- GUIDOBONO CAVALCHINI A., LAZZARI M. (1987): *L'automazione di alcune operazioni agricole*, «L'Informatore Agrario», 29, pp. 35-42.
- JAHS G. (1996): *A contribution to asse requirements and benefits of precision farming*, Proceeding AgEng 96, paper 96G-031, Madrid.
- LAZZARI M. (1987): *Sistemi di monitoraggio e controllo automatico nelle macchine agricole*, «Agricoltura 2000», 10, pp. 50-54.
- LAZZARI M., MAZZETTO F. (1991): *Quality and innovation in agriculture*, in *Total quality system applied to agricultural mechanization*, Fiat-Geotech, pp. 75-142.
- LAZZARI M., MAZZETTO F. (1995): *Informatica ed agricoltura: un bionomio che fatica a decollare*, «L'Informatore Agrario», 8, pp. 77-95.
- LAZZARI M., MAZZETTO F., VACCARONI M. (1998): *Evaluation methods to assess the benefits of precision agriculture techniques in the Italian situation*, Proceedings XIII CIGR Int. Conference on Agricultural Engineering, Rabat (Morocco), 2-6 February, Vol. 3, pp. 39-50.
- LAZZARI M., MAZZETTO F. (1998): *Evaluation methods to assess the benefits of precision agriculture techniques in the Italian situation*, Euro AgEng, Congress 1998, Oslo, report N98.

- LOWENBERG-DEBOER (1996); *Economics of precision farming: payoff in the future*, <http://pasture.ecn.purdue.edu>.
- MANGOLD G. (1995): *Entrapped or empowered by technology?*, ASAE Resource, 5, pp. 9-13.
- MAZZETTO F., AZZOLI G., CALCANTE A., CASTELLI G. (2005): *Il "ROTOGPS": uno strumento per la misura di precisione e accuratezza di ricevitori GPS*, VIII Convegno Nazionale AIIA, "L'ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea", Catania, 27-30 giugno (*The "ROTOGPS": a GPS receiver's accuracy and precision measuring tool*).
- MAZZETTO F., CALCANTE A., LANDONIO S. (2005): *Progetto MOSAICO: monitoraggio automatico dello spandimento dei reflui zootecnici*, VIII Convegno Nazionale AIIA, "L'ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea", Catania, 27-30 giugno (*The MOSAICO Project: automatic monitoring of animal waste spreading*).
- MAZZETTO F., CALCANTE A., NALDI E., OBERTI R. (2005): *Progetto MESOVIP: applicazione di tecniche di viticoltura di precisione in contesti nazionali*, VIII Convegno Nazionale AIIA, "L'ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea", Catania, 27-30 giugno (*The MESOVIP Project: solutions for national applications of Viticulture Precision techniques*).
- MAZZETTO F., BONERA R., CALCANTE A., LAZZARI M. (2003): *An algorithm for the traceability of farm field activities*, XXX CIOSTA-CIGR V Management and technology applications to empower agriculture and agro-food systems, 22-24 September 2003, University of Turin, Turin, Italy.
- MAZZETTO F., LAZZARI M., VACCARONI M. (1997): *Agricoltura di precisione: realtà e prospettive*, Atti VI Convegno Nazionale AIIA di Ingegneria Agraria, Ancona 11-12 settembre, 3, pp. 271-280.
- MULLA D.J. (1991): *Using geostatistics and GIS to manage spatial patterns in soil fertility* - Automated agriculture for the 21st century, 16-17 December, ASAE, Chicago, pp. 336-345.
- PELLIZZI G., MAZZETTO F., PICCAROLO P., BALSARI P., BONFANTI P.L., LAZZARI M. (1998): *The AP project: precision farming systems for environmental protection and the reduction of production costs*, ICCTA '98 Congress, Firenze.
- PELLIZZI G. (1996): *Nuovi traguardi per la meccanizzazione: la tecnica dell'agricoltura di precisione*, «Mondo Macchina», 4, pp. 16-19.
- PIGHIN M., GARZONA A. (2005): *Sistemi informativi aziendali. Struttura e applicazioni*.
- STAFFORD J.V., AMBLER B., SMITH M.P. (1991): *Sensing and mapping grain yield variation*, Automated agriculture for the 21st century, 16-17 December, ASAE, Chicago, pp. 356-365.
- YULE I.J., CAIN P.J., EVANS E.J., VENUS C. (1996): *A spatial inventory approach to farm planning*, «Computers and Electronics in Agriculture», 14, 2-3, pp. 151-161.

Il controllo delle macchine agricole mediante GPS: dalla agricoltura di precisione alla guida automatica

I. INTRODUZIONE

Quando sono alla guida dei mezzi agricoli, gli operatori usano tutte le loro energie psico-fisiche per regolare sia le funzioni di lavoro, sia la direzione di avanzamento dei mezzi stessi. Comparando le attività lavorative degli operatori agricoli con quelle degli altri addetti dei settori industriali è difficile non rimanere stupiti. Nel settore dell'industria meccanica agli operai – se così si possono ormai chiamare – sono per lo più assegnati compiti di sorveglianza delle macchine che provvedono a caricare, lavorare e inviare allo stoccaggio i pezzi che debbono elaborare. Nei casi a minor grado di automazione si può ancora trovare il lavoratore che manualmente provvede a caricare o scaricare il pezzo all'interno della macchina: tutto il resto è automatizzato. Da un punto di vista dell'automazione il settore agricolo non è sicuramente al passo con i tempi. È vero che esistono grosse differenze tra l'ambiente strutturato di una fabbrica e quello destrutturato dei campi. In fabbrica è facile creare un sistema di riferimento locale fisso rispetto al quale spostare e posizionare pezzi e utensili. In campo questo è molto difficile da realizzare. Ulteriore differenza è relativa al fatto che, mentre in fabbrica il pezzo va alla macchina per farsi lavorare, in campagna è la macchina che va al campo per lavorarlo. Questa peculiarità di non avere ancora trovato soluzioni per automatizzare il lavoro di regolazione di trattori e macchine operatrici semoventi confina l'agricoltura a un livello tecnologico che è più vicino a quello dell'artigianato che non a quello industriale. L'abilità manuale dell'operatore è determinante per lo svolgimento delle operazioni. Non si tratta certo di farne una questione filosofica: l'automazione non è il bene e il controllo manuale, per contro, il male. Il

* VSA – Università degli Studi di Milano

passaggio a maggiori gradi di automazione è, invece, una mera questione di efficienza produttiva per ottenere:

1. maggiore precisione delle lavorazioni;
2. minore affaticamento umano;
3. minor pericolo di incidenti;
4. possibilità di impiego di operatori tecnicamente preparati ma con limitata esperienza anche nelle operazioni più onerose.

Per la verità, seppure in modo parziale, su trattori e macchine operatrici l'evoluzione dell'automazione dei controlli delle funzioni è da ormai qualche anno in atto. Esempio classico è quello del controllo del sollevatore:

1. già negli anni '60 venne introdotto un sistema automatico completamente meccanico per la sua regolazione;
2. dagli anni '80 sono poi stati sviluppati i vari tipi di sollevatore a controllo elettronico;
3. più recentemente sono stati introdotti degli strumenti di bordo che possono assegnare a tasti funzione una serie di regolazioni di posizione del medesimo, quelle che, in genere, l'operatore deve eseguire con più frequenza.

Analoghi "tasti funzione", con relativi processori in grado di memorizzare le regolazioni più appropriate dei diversi organi di lavoro, si stanno estensivamente diffondendo specie sulle macchine raccoglitrici semoventi. Anche l'introduzione di cambi sempre più sofisticati, con i quali non è necessario intervenire sulle convenzionali leve di comando, va in detta direzione.

In questo quadro, il maggior ostacolo che praticamente e concettualmente si oppone alla realizzazione di una estensiva evoluzione verso una completa automazione rimane quello della regolazione della guida del trattore, cioè del come alimentare agli utensili delle macchine operatrici la superficie da processare. Questo è sempre stato un problema che ha affascinato ricercatori e operatori del settore che hanno via via messo a punto innumerevoli soluzioni.

2. STATO DELL'ARTE

Tra le prime soluzioni proposte per risolvere il problema della guida senza il controllo diretto dell'operatore, si ricorda quella proposta in un brevetto USA del 1924 in cui una ruota, che operava all'interno di un solco precedentemente tracciato, fungeva da sensore meccanico per regolare lo sterzo della macchina in movimento (fig. 1).

Per l'Italia, come non ricordare la "trattrice senza pilota BOPS 1960" realiz-

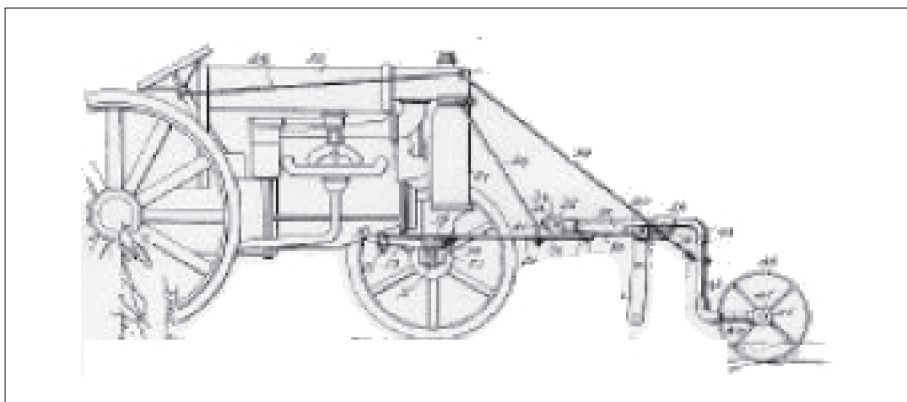


Fig. 1 *Brevetto statunitense di guida automatica con sensore meccanico (Willrodt, 1924)*

zata dall'Istituto di Meccanica Agraria dell'Università di Bologna e sperimentata in quell'anno in prove di aratura (Stefanelli, 1992). Queste tecnologie – attraverso numerose varianti – sono giunte fino ai nostri giorni e una soluzione di questo tipo, ad esempio, è commercializzata in Australia dalla ditta AgGuide Pty Ltd. Esse sintetizzano le difficoltà intrinseche nel realizzare un sistema di guida automatico in campo. Non avendo a disposizione sistemi di riferimento sicuri e precisi si ha la necessità di creare in modo artificiale tale sistema di riferimento rispetto al quale fare poi operare il sensore che identifica la posizione della macchina. Questo è il problema fondamentale che fino ai nostri giorni ha precluso un'ampia diffusione della guida automatica nell'agricoltura di campo, essendo che non si è mai avuto a disposizione un sistema generalizzato di coordinate funzionante in modo sufficientemente preciso che permettesse di realizzare un sistema di posizionamento universale, cioè non funzionante con riferimenti locali appositamente ricercati in campo o creati allo scopo. Fino a pochi anni orsono, solo con i sistemi utilizzando il campo elettromagnetico terrestre – che, come tali, impiegano come sensori bussole o giroscopi –, ci si poteva riferire a un sistema di coordinate non creato localmente in modo artificiale, ma la precisione delle misure effettuate con i sensori in questione non risultava (e non risulta ancor oggi) sufficiente a realizzare sistemi di navigazione in campo sufficientemente precisi, affidabili e sicuri. Nella tabella 1 – ripresa e aggiornata da Tillet (1990) utilizzando la vasta bibliografia disponibile in argomento (Grovum et al., 1970; Harries et al., 2000; Hague et al., 2000; Hellebrand et al., 1997; Reid et al., 2000; Wilson, 2000) – è riportata una sintesi riassuntiva dei diversi sensori adottati per risolvere il problema, delle loro caratteristiche fondamentali e del successo da essi raggiunto.

PRINCIPIO FISICO UTILIZZATO	ACCURATEZZA	AFFIDABILITÀ	COMPATTEZZA	FATTIBILITÀ ECONOMICA	APPLICAZIONI AGRICOLE
Meccanico					
Sensori a contatto con coltivazione in atto	Variabile, tipicamente ± 50 mm	Dipende dalla continuità della coltivazione	I sensori meccanici sono esposti a urti e facilmente deformabili	Potenzialmente molto buona	Commerciale, raccolta mais e frutta
Sensori a contatto di solchi	Variabile, tipicamente ± 50 mm	Piuttosto affidabile	Come sopra	Come sopra	Commerciale, colture a file su ampie dimensioni
Sensori a contatto con cavi più o meno interrati	Variabile, tipicamente ± 50 mm	Piuttosto affidabile	Come sopra	Costi alti per la messa in essere dei cavi di riferimento	Nessuna
Sensori a contatto con binari o tracce di terreno compattate e dedicate	Tipicamente ± 10 mm	Molto affidabile	Estrema, non si hanno dispositivi ancillari	Costi alti per la messa in essere delle rotaie o delle tracce compattate	Commerciale, disponibile per lavorazioni ad alto reddito (serra)
Ottico					
Laser con emettitore a punto fisso a fascio o piano di luce	Tipicamente ± 10 mm, limitato dalle inerzie dei sistemi di attuazione	Molto affidabile, ma si accumulano errori spostando l'emettitore da una passata all'altra	Elevata	Buona	Limitata dalla necessità di trasferire la stazione di riferimento. Trapiantatrici
Laser con emettitore a punto fisso a fascio rotante	Tipicamente ± 10 mm, limitato dalle inerzie dei sistemi di attuazione	Non provata	Elevata	Abbastanza costoso	In teoria sarebbe possibile realizzare sistemi completamente automatici, senza guidatore a bordo
Laser mobile sulla macchina per rilevare differenze di stato tra porzioni di terreno	Tipicamente ± 10 mm, limitato dalle inerzie dei sistemi di attuazione	Molto affidabile, ma si accumulano errori da una passata all'altra	Elevata	Buona (1.500 euro)	Sulle mietitrebbie sensori ottico-elettronici tastano con i loro impulsi luminosi il bordo fra il prodotto in piedi e quello già trebbiato

Tab. 1 *Soluzioni di guida automatica alternative al GPS (rielaborato da Tillet, 1990)*

PRINCIPIO FISICO UTILIZZATO	ACCURATEZZA	AFFIDABILITÀ	COMPATTEZZA	FATTIBILITÀ ECONOMICA	APPLICAZIONI AGRICOLE
A infrarossi per rilevare porzioni di terreno o coltivazione coltivate o meno	Tipicamente ± 50 mm, in buone condizioni	Abbastanza affidabile, ma si accumulano errori da una passata all'altra	Sensore montato in posizione anteriore vicino al terreno	Potenzialmente molto buona	Lavorazioni secondo traiettoria predefinita dalla prima passata
Analisi dell'immagine	Potenzialmente accurata ma variabile in funzione dello scenario	Dipende dalla qualità dei sensori, dalla robustezza degli algoritmi e dalla continuità degli elementi di riferimento, dalla presenza di malerbe	Molto compatto	Applicazioni commerciali esistenti a costi differenti	Ampie possibilità di utilizzazione ma solo in caso di presenza di adeguati sistemi di riferimento (solchi, file di colture, ecc.)
Ultrasuoni					
Sensori che rilevano presenza di alberi	Variabile da 0,1 a 10 m	Solo quando si ha una superficie con buone caratteristiche di riflessione del segnale	Sensori molto compatti da posizionare il più possibile vicini alla superficie riflettente	Costo dei sensori limitato (< 100 euro).	Impiegabile solo in presenza di ben definite pareti produttive verticali
Campo elettromagnetico					
Cavi emettitori interrati	± 5 cm	Buona, ma in funzione del tipo di cavo impiegato	In genere compatto	Investimenti di 200-400 euro/ha per il cavo interrato. Alcune migliaia per il sensore di rilevamento e la centralina di comando	A causa dell'elevato costo, può avere interesse solo in situazioni molto intensive dove si ripercorre lo stesso tragitto numerose volte in un anno
Dead reckoning					
Misura della distanza percorsa e della direzione	Molto limitata eccetto che per brevi tragitti e dove non si ha slittamento	Buona nei limiti di accuratezza indicati	Compatto	Relativamente bassi	Utile solo come complemento ad altri sistemi più accurati

Tab. 1

PRINCIPIO FISICO UTILIZZATO	ACCURATEZZA	AFFIDABILITÀ	COMPATTEZZA	FATTIBILITÀ ECONOMICA	APPLICAZIONI AGRICOLE
Onde radio					
Radionavigazione con più emettitori a punto fisso	30-50 cm	Molto affidabile	Molto compatto	Alcune migliaia di euro	A causa della relativamente bassa accuratezza e della necessità di spostare gli apparecchi di emissione, utilizzabile solo per raccolta foraggi e su colture ai primi stadi di accrescimento

Tab. 1

Delle soluzioni riportate nella tabella numerose sono arrivate sul mercato negli ultimi 15 anni. Tra quelle che hanno avuto maggior successo ricordiamo le meccaniche, quelle a ultrasuoni, a raggio laser, controllate da sistemi basati sulla visione artificiale. Ognuna di esse trova, nella migliore delle ipotesi, un'applicazione specifica in una determinata operazione (il trapianto delle barbatelle, la guida dei carri raccolta frutta, la raccolta delle colture a file, il diserbo interfila, ecc.) in cui si rivela molto efficiente, ma non costituisce una soluzione complessiva e universale al problema della guida automatica in campo.

A fronte di tale situazione, nel passato anche recente, numerosi Autori (Freyberger et al., 2000; Reid et al., 1999) hanno sostenuto che in agricoltura non esiste un sensore ideale per realizzare l'automazione della guida sotto tutte le condizioni d'uso. A parere di questi studiosi, il sensore più adatto dipende dallo stato del campo nel momento in cui si deve svolgere l'operazione. Per questo la maggior parte delle ricerche effettuate negli istituti universitari mira all'integrazione di differenti tipologie di sensori (di visione, meccanici, giroscopi, GPS, ecc.). Questo anche perché l'obiettivo dei ricercatori è quello di utilizzare poi questi sensori (a esempio quelli di visione) per altri scopi quali quelli del riconoscimento di malerbe e/o fitopatologici.

Tuttavia, si è del parere che – con la messa a punto di ricevitori GPS sempre più economici, precisi e affidabili, dovuta anche al loro diffuso impiego in altre pratiche di agricoltura di precisione (Stafford et al., 1994) –, il problema dell'avere a disposizione un sistema di coordinate universali sembra destinato

ad avviarsi a soluzione. Come dimostrato da O'Connor et al. (1996) e Bell (2000) su macchine operanti in larga coltura, è probabile che nel futuro l'integrazione dei sistemi sopra richiamata non si riveli poi così fondamentale in termini operativi, ma che il sensore base diventi sempre e comunque il ricevitore GPS associato ad altri sensori di secondo livello che possono incrementarne le prestazioni in determinate situazioni limite. Esistono ancora alcune barriere per quanto riguarda gli aspetti economici e di sicurezza, ma i sistemi di guida basati essenzialmente sul GPS sembrano destinati ad affermarsi su larga scala. Problemi possono ancora insorgere in aree montane o nelle coltivazioni arboree di alto fusto, ma negli altri ambienti il funzionamento dei ricevitori è sufficientemente affidabile. Inoltre le loro prestazioni operative sono destinate a diventare sempre maggiori, in vista delle prevedibili innovazioni tecnologiche che interesseranno i medesimi e degli ulteriori investimenti programmati in termini di messa in orbita di satelliti in grado di trasmettere segnali sempre più potenti e precisi.

Utilizzando i sensori GPS, quindi, sono state recentemente messe a punto soluzioni commerciali che incominciano ad avere una certa diffusione sul mercato nordamericano, australiano e, più recentemente, tedesco. In Italia si è assistito a una relativamente limitata diffusione di questi sistemi che, per ora, sono più che altro esposti nelle fiere specializzate di settore (Bertocco et al., 2005). Ciò, in quanto i medesimi sono più che altro adatti a operare in aziende e su appezzamenti di ben altre dimensioni rispetto a quelle che caratterizzano la nostra agricoltura. Così la ricerca e la diffusione dei sistemi di guida basati sul GPS si è per ora limitata agli ambiti specifici della risicoltura e del trapianto delle barbatelle dove è peraltro stato concentrato anche il massimo sforzo di ricerca in argomento. Di caratteristiche generali dei ricevitori GPS, della necessità di tenere in conto della architettura delle macchine nella definizione dei sistemi di guida, delle loro prestazioni di questi sistemi e del relativo utilizzo negli ambiti della risicoltura e del trapianto si tratterà nel seguito della presente memoria.

3. CARATTERISTICHE DEL SISTEMA GPS E DEI RICEVITORI IN COMMERCIO AI FINI DI UN LORO IMPIEGO NELLA GUIDA AUTOMATICA

Le caratteristiche tecniche del sistema complessivo GPS e, in particolare, della sua sezione utente – cioè dei ricevitori che vengono utilizzati come sensori nella guida automatica – si sono notevolmente evolute nel corso degli ultimi anni (Comparetti et al.; 2000; Evans et al., 2002). La tratta-

MODALITÀ RICEZIONE ED ELABORAZIONE	AREA LOCALE (LA) O AREA GLOBALE (WA)	ACCURATEZZA ORIZZONTALE (2 RMS) [m]	PRECISIO- NE (3σ min) [m]	COSTO RICEVITORE [EURO]	CANONE ANNUO O DOPPIO RICEVITORE
Codice C/A	LA privata	1-2	0,4-0,5	500	Si – canone
Codice C/A	WA pubblica	1-2	0,4-0,5	500	No
Codice C/A lisciato singola frequenza Filtro Kalman	WA pubblica	0,3-0,5	0,2-0,3	1.000-3.000	No
Codice C/A e P lisciato doppia frequenza Filtro Kalman	WA privata	0,1-0,2	0,1	3.000-5.000	Si – canone
Doppia frequen- za RTK	LA privata	0,01-0,02	0,01-0,02	10.000- 15.000 Singolo ricevitore	Si – canone o doppio ricevitore
Doppia frequenza post processing	LA privata	0,001-0,002	0,001- 0,002	10.000- 15.000 Singolo ricevitore	Si – canone o doppio ricevitore

Tab. 2 *Prestazioni complessive e costi dei ricevitori GPS*

zione di questa evoluzione evince dagli scopi principali di questo lavoro. Si ritiene tuttavia utile proporre a parte (*Appendice A*) una sintetica disamina di tale evoluzione. Nella tabella 2, sono indicate le conclusioni principali derivate dalla discussione in allegato. Tali conclusioni sono relative alle prestazioni complessive e ai costi delle tecnologie che sono disponibili per settore agricolo e che sono impiegabili e impiegate per realizzare sistemi di guida più o meno automatizzati. Solo l'ultima tecnologia non trova spazio in tale ambito, ma viene utilizzata in agricoltura solo per l'esecuzione di misure topografiche a elevato grado di precisione.

Come si può notare, il ventaglio delle prestazioni e dei prezzi è molto ampio. Per non incorrere in costi di investimento spropositati rispetto alle necessità reali, è quindi fondamentale che, prima di ricorrere all'impiego di una tecnologia invece di un'altra, si abbiano delle idee molto chiare su quali sono le necessità di accuratezza e precisione richieste dalle diverse possibili applicazioni di campo.

4. REQUISITI DI UN GENERICO SISTEMA DI CONTROLLO

DELLA GUIDA DI MEZZI AGRICOLI SEMOVENTI BASATO SUL GPS

Ciò detto in termini di offerta tecnologica relativamente ai sensori di posizionamento GPS e alle loro caratteristiche di accuratezza e precisione, dal lato della domanda di prestazioni per l'esecuzione delle principali operazioni agricole si hanno le esigenze sintetizzate nella tabella 3. Come si può notare, dunque, i valori riportati sono compatibili con quelli di diverse delle tecnologie GPS descritte nel precedente paragrafo.

Tuttavia, la realizzazione di un sistema di guida basato sul GPS non può avere successo se non si tiene conto anche dell'architettura delle macchine che debbono operare in campo e della dinamica dei loro movimenti durante la navigazione sul terreno. Anche in questo caso, gli aspetti relativi alla discussione di questi temi vengono riportati in allegato (*Appendice B*).

Come per il punto precedente, il lettore non interessato all'approfondimento di questi temi può tralasciare tale allegato senza che la comprensione di quanto riportato nel seguito risulti compromessa.

5. ALCUNI ESEMPI DI RICERCHE EFFETTUATE IN ITALIA

Negli ultimi anni in Italia sono stati sviluppati dispositivi di guida automatica a complessità crescente basati su GPS. In generale, questi dispositivi riflettono i principi evolutivi che hanno guidato la ricerca anche negli altri Paesi. Tuttavia nello specifico dei nostri ambienti sono stati particolarmente sviluppati sistemi per risolvere due problemi tipici della nostra agricoltura:

1. la guida in risaia durante le operazioni di semina e trattamento;
2. il trapianto meccanico delle barbatelle.

Nel primo caso l'esigenza che ha guidato i ricercatori a operare in questo settore è relativa al fatto che durante le operazioni citate si opera con risaia allagata e l'operatore non ha in genere nessun riferimento fisico di guida se non posizionato all'esterno del campo. Data la presenza di acqua, infatti, è impossibile impiegare i classici sistemi segnafile. Generalmente i sistemi di riferimento vengono riposizionati da una passata alla successiva da due addetti operanti sugli argini delle capezzagne.

Nel caso del trapianto delle barbatelle, si tratta di un'operazione che richiede una notevole precisione in quanto la posa del vigneto non influenza solo i successivi aspetti tecnico-agronomici di coltivazione, ma ha anche un impatto paesistico che risulta importante nelle aree tradizionalmente vocate anche a fini di marketing.

OPERAZIONE	PRECISIONE RMS [CM]	ACCURATEZZA
Applicazione concimi e fertilizzanti in pieno campo	50-100	Non richiesta
Aratura in solco	3-5	Non richiesta
Aratura fuorisolco	10-20	Non richiesta
Lavorazioni principali terreno con utensili a denti	20-40	Non richiesta
Lavorazioni secondarie del terreno	30-50	Non richiesta
Semina riso in risaia allagata	50-100	Non richiesta
Semina convenzionale	10-20	Non richiesta
Semina precisione	3-5	Richiesta se si intendono effettuare operazioni successive tra le file
Trapianto	3-5	Richiesta se si intendono effettuare operazioni successive tra le file
Diserbo	30-80	Non richiesta
Sarchiatura	3-5	Richiesta
Raccolta colture	20-30	Non richiesta
Raccolta colture	20-30	Non richiesta

Tab. 3 *Necessità di precisione e accuratezza per la sterzatura di trattore agricolo per le principali operazioni di campo*

Volendo seguire nella descrizione che segue uno schema che descrive i sistemi realizzati dai diversi gruppi di ricerca seguendo un approccio a complessità crescente si debbono distinguere:

1. sistemi per la guida assistita con operatore che mantiene il controllo del volante, studiati per i lavori in risaia;
2. sistemi per la guida semiautomatica con operatore che mantiene il controllo del volante durante le svolte, sempre per la risaia;
3. sistemi per la guida automatica integrale con operatore che interviene solo in casi di pericolo, per la risaia;
4. sistemi per il trapianto automatico delle barbatelle con controllo della distanza di posa tra le file.

Va da sé che applicazioni derivate da questi sistemi si sono diffuse o potranno diffondersi nel futuro anche in settori differenti da quelli della guida in risaia allagata e del trapianto meccanico delle barbatelle.

5.1 *Sistemi per la guida assistita con operatore che mantiene il controllo del volante, studiati per i lavori in risaia*

Il problema della sovrapposizione tra passate successive è particolarmente evidente nelle colture di pieno campo non seminate a file (riso). In questo caso si stima che una sovrapposizione del 3-5% sia abbastanza normale tra una passata e l'altra. Questo significa ovviamente avere maggiori consumi di lavoro, combustibili, usura delle macchine, sementi (nel riso), fertilizzanti e pesticidi rispetto alla situazione ideale.

Inoltre nel riso è pratica corrente che per procedere alla semina si debba ricorrere a 3 operatori di cui 1 alla guida del trattore e altri due in capezzaggia. Questi in pratica eseguono in tempo reale la picchettatura del campo in modo che l'operatore a bordo possa effettuare passate successive parallele. Al fine di limitare questi problemi, a partire dal 2000 le Università di Milano e di Udine, in collaborazione con la ARVAttec S.r.l., hanno intrapreso una ricerca volta a definire un sistema per la realizzazione della guida assistita (Mazzetto et al., 2003).

Il sistema studiato e realizzato (fig. 2) risulta essenzialmente costituito da:

1. un ricevitore GPS completo di antenna;
2. un computer di bordo del tipo laptop con video a elevata luminosità;



Fig. 2 Componenti del prototipo di sistema di guida assistita

3. un software di bordo in grado di indicare all'operatore, in tempo reale, l'errore costituito dallo scostamento del trattore dalla traiettoria ideale.

Di particolare interesse il software realizzato che visualizza in tempo reale a video il tracciato seguito dal trattore (fig. 3), il che distingue questo sistema da quelli attualmente in commercio nel nostro Paese (Sartori, 2001). In pratica l'operatore viene aggiornato, con la frequenza propria del sistema – che nel primo prototipo era fissata a 1 Hz – dell'entità dello scostamento e può così correggere la sua traiettoria.

Al fine di realizzare un prodotto di costo contenuto che potesse essere facilmente ammortizzabile dai risicoltori, durante la ricerca, condotta presso l'azienda sperimentale A. Menozzi dell'Università di Milano, sono stati provati diversi tipi di antenne e di ricevitori con e senza correzione DGPS EGNOS. Sono stati esclusi sia i ricevitori DGPS RTK, sia quelli DGPS con correzione privata a pagamento in quanto, da un'analisi preliminare, risultava difficile giustificare gli elevati investimenti (in un caso) e costi di acquisto dei servizi di correzione (nel secondo caso) che essi comportavano.

Le prove sono state eseguite montando a bordo del medesimo trattore sia

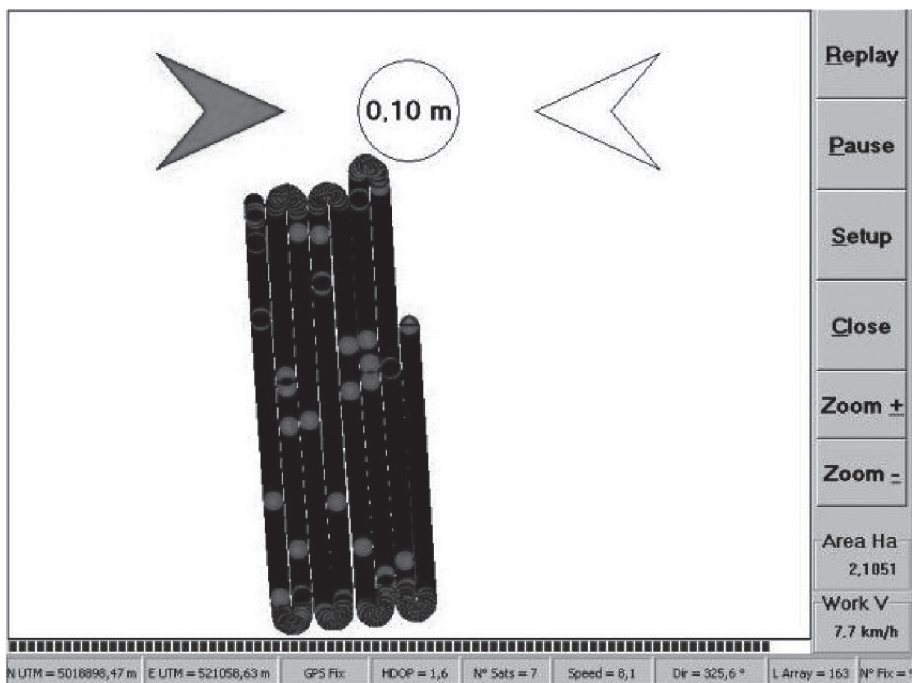


Fig. 3 *Interfaccia utente del prototipo di guida assistita*

il ricevitore a basso costo in fase di sperimentazione, sia un ricevitore RTK (Novatel Millenium). I fixing rilevati da quest'ultimo venivano poi corretti in post processing e rispetto a essi venivano calcolati gli errori di guida reali rispetto alle ideali traiettorie parallele di guida predefinite dal software del sistema. Ovviamente questi errori di guida dipendevano non solo dalla bontà del ricevitore ma anche dall'abilità dell'operatore a condurre in modo appropriato il mezzo. Proprio per questo, durante le prove sono state sempre eseguite dal medesimo operatore utilizzando lo stesso trattore in tempi successivi molto ravvicinati.

Nella tabella 4 che segue sono riportati i risultati delle prove relativamente al ricevitore Smart Antenna della CMC Inc. che poi è diventato il ricevitore commercializzato dalla ARVAtec integrato nel suo prodotto commerciale denominato ARVAnav.

Come si può notare, gli errori che l'operatore ha compiuto durante la guida utilizzando il sistema sono risultati più che accettabili e dello stesso ordine di grandezza di quelli propri della guida manuale assistita da operatori in capezzagna (Balsari et al., 2000, vedi anche nel seguito).

Da un punto di vista economico l'impiego di questi sistemi in risaia per la sola esecuzione dell'operazione di semina può essere valutato svolgendo una semplice analisi costi/benefici considerando i valori monetari, i tempi di ammortamento e i risparmi di manodopera indicati nella tabella 5. Si può notare, inoltre, che già su superfici di 65 ha si realizza la convenienza economica all'acquisto del sistema. L'analisi qui riportata è estremamente prudentiale. A essa andrebbero aggiunti i vantaggi di minori tempi complessivi di lavoro (circa il 15%) e di consumo di combustibile e di semente (circa il 10%). Che questi vantaggi realmente si realizzino è confermato dalla diffusione che questi sistemi stanno avendo nelle aree risicole del nostro Paese.

Prova	Errore medio	RMS	R95
1	0,46	0,67	1,06
2	0,81	1,06	2,35
3	0,50	0,74	1,16
4	0,36	0,52	0,86
5	0,36	0,66	0,93
6	0,71	0,81	1,43
7	0,47	0,63	1,02
media	0,52	0,73	1,26

Tab. 4 *Risultati delle prove di guida effettuate con l'ausilio del sistema proposto (errori espressi in [m])*

COSTI	
valore a nuovo (euro)	4.500
vita utile (anni)	6
valore recupero (euro)	0
tasso interesse (-)	0,05
costi fissi annui (euro/anno)	975
costi variabili annui (euro/anno)	0
costi totali annui (euro/anno)	975
BENEFICI	
risparmio manodopera semina (h/ha)	1
costo manodopera (euro/h)	15
AREA INDIFFERENZA ECONOMICA (ha)	65

Tab. 5 *Analisi economica relativa all'adozione del sistema proposto in risaia*

5.2 *La guida semiautomatica*

Dal 2004, a partire dai risultati ottenuti con la sperimentazione di cui al punto precedente e anche grazie alle ricadute commerciali derivate dal medesimo progetto, seguendo una impostazione che si sta facendo strada nel mondo della ricerca internazionale (Stombaugh et al., 1998, 2001) e che prevede che i medesimi componenti utilizzati per la guida assistita siano utilizzati per realizzare la guida semiautomatica, il medesimo gruppo di lavoro (Università di Milano e Udine in collaborazione con la ditta ARVAtec) ha deciso di intraprendere un lavoro sperimentale per definire un'architettura di sistema semplice e di basso costo che permetta ai risicoltori, con particolare attenzione agli utenti ARVAnav, di passare dalla guida assistita a quella semiautomatica.

Il progetto ha fino a oggi portato alla realizzazione di due prototipi sperimentali di cui si dà conto nelle successive figure 4 e 5.

In particolare il computer è stato interamente realizzato all'interno del progetto con specifiche di robustezza adatte a un suo impiego nel settore agricolo. La protezione è infatti del tipo IP65 e garantisce contro umidità e cadute accidentali. Esso monta un processore a 600 MHz e il sistema operativo installato è stato sviluppato con tecnologia Windows XP. Il video è del tipo "touch-screen" a elevata luminosità (400 candele) e alto contrasto e garantisce all'operatore una visione perfetta dei comandi e delle prestazioni conseguite. La scheda GPS di ricezione del segnale satellitare è montata direttamente all'interno del computer. La tecnologia impiegata prevede la ricezione in singola fase (L1) con correzione EGNOS. Inoltre sono impiegati filtri smooting

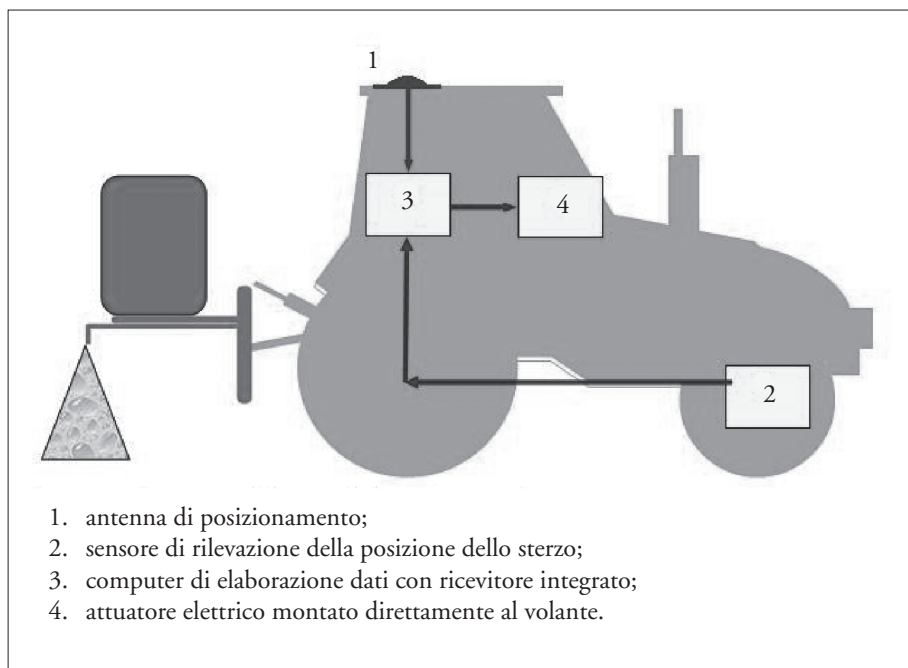


Fig. 4 *Rappresentazione schematica del primo prototipo sperimentale*

phase e Kalman. L'accuratezza 2RMS è inferiore a 1 m, ma per il lavoro in campo tra una passata e l'altra eseguite in modo consecutivo, si può raggiungere una precisione di 10 cm.

L'antenna viene montata sul cofano del trattore in modo da non rendere necessario uno specifico sensore per rilevare la direzione di marcia del medesimo. Sulle ruote anteriori è montato un potenziometro che permette di rilevare il valore di direzione delle ruote di sterzo. Il software è stato interamente sviluppato all'interno del progetto e si basa su algoritmi che, una volta fissata una traiettoria iniziale rettilinea identificata tramite due punti, permettono di realizzare la guida su file parallele, più o meno consecutive, secondo una larghezza di lavoro predefinita.

Infine, anche l'elettronica di controllo degli attuatori è montata direttamente all'interno della scatola di contenimento del computer rendendo così tutto il sistema molto compatto e facilmente collocabile all'interno della cabina di un normale trattore. Gli interventi di adattamento di quest'ultimo alla guida semiautomatica sono pressoché nulli nel caso delle soluzioni previste per il primo prototipo. Infatti il dispositivo di attuazione elettromeccanica viene in questo caso fatto agire direttamente sul volante di guida (oppure

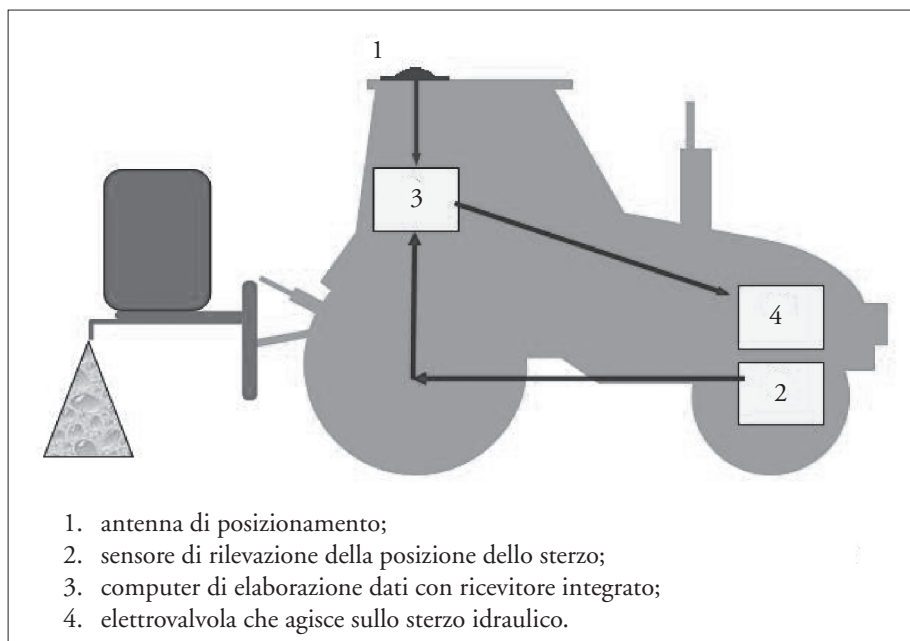


Fig. 5 *Rappresentazione schematica del secondo prototipo sperimentale*

su un apposito disco di alluminio montato sul volante stesso) senza che sia necessario intervenire su nessun organo del trattore.

Per la soluzione adottata nel secondo prototipo, invece, si interviene sull'impianto idraulico che controlla lo sterzo inserendo sul medesimo un circuito parallelo che, mediante una elettrovalvola, prende in carico il controllo della direzione delle ruote quando il sistema è attivo.

A oggi sono state eseguite solo prove iniziali funzionali che hanno dato risultati soddisfacenti in termini di precisione di guida tra passate successive (fig. 6). I due sistemi, operanti con una frequenza di 5 Hz, sono in grado di mantenere sotto controllo il funzionamento della guida del trattore alle velocità classiche di lavoro in agricoltura (7-8 km/h).

Al momento si sta passando alla messa a punto dei due prototipi e all'esecuzione di estensive prove sperimentali per definire le caratteristiche di accuratezza degli stessi alle diverse condizioni d'impiego. La successiva fase di ingegnerizzazione si prevede possa essere completata entro la primavera-estate del 2006.

Fondamentale è il prezzo obiettivo delle soluzioni in via di definizione che dovrebbe situarsi a un livello di poco superiore ai 7.000 euro.



Fig. 6 Sovrapposizione di due passate di lavoro successive sulla medesima traccia con trattore guidato dal secondo prototipo descritto nel testo

5.3 Sistemi per la guida automatica integrale con operatore che interviene solo in casi di pericolo

Si tratta di un pionieristico lavoro di ricerca realizzato a partire dal 1995 e completato nel 1997, nell'ambito dei progetti finanziati dal Conama, dalla ditta 3B6 in collaborazione con l'Istituto di Meccanica Agraria dell'Università di Torino. Essi hanno realizzato un "Sistema di guida automatica da applicare a trattori e macchine da raccolta": un trattore equipaggiato con questo sistema fu presentato all'EIMA e fu esposto nel padiglione delle novità tecniche. Test sono stati eseguiti sul sistema da Balsari et al. (1997; 1999; 2000; 2002). Il sistema provato (fig. 7) è essenzialmente costituito da:

1. un ricevitore master a bordo campo;
2. un ricevitore rover sulla macchina in movimento;
3. un sistema di comunicazione via radio;
4. un giroscopio;
5. un sensore per misurare l'angolo di sterzata;
6. un'unità centrale di elaborazione dati e controllo degli attuatori;
7. un'elettrovalvola montata sullo sterzo idraulico del veicolo.

Il sistema, una volta inserita la larghezza di lavoro, è in grado di definire

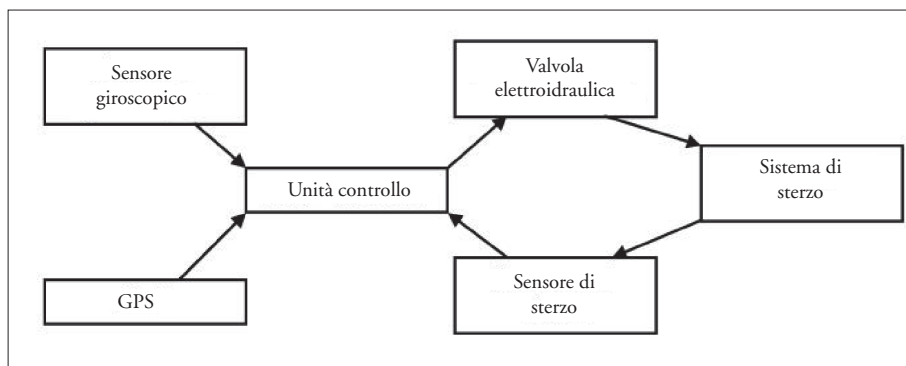


Fig. 7 Componenti del sistema di guida automatica utilizzato durante le prove

una serie di tracciati paralleli da seguire successivamente durante il lavoro. Questi tracciati possono essere definiti in campo, eseguendo un passaggio attorno al perimetro dello stesso, o caricati in memoria dopo che sono stati elaborati a punto fisso. Il sistema può essere attivato solo nel momento in cui il veicolo si trova a una distanza inferiore a 1 m rispetto a uno dei tracciati calcolati. Una volta inserito, il sistema provvede a guidare autonomamente il veicolo. Le svolte possono essere effettuate in modo manuale o automatico.

Nel primo caso un display fornisce all'operatore indicazioni utili per eseguire correttamente la manovra. Nel caso di esecuzione automatica, l'operatore deve scegliere il lato verso il quale effettuare la svolta. Questa è effettuata in tre fasi:

1. sterzata iniziale di 90°;
2. avanzamento rettilineo;
3. sterzata finale di 90°.

In particolare, i ricevitori utilizzati durante le prove sono stati:

1. Ashtech G12, a 12 canali, singola frequenza (L1), a precisione submetrica, frequenza di acquisizione di 5 Hz;
2. Ashtech GG24, 24 canali, singola frequenza (L1), a precisione centimetrica, frequenza di acquisizione di 5 Hz.

Nella tabella 6 e nella figura 8 è riportata una sintesi dei risultati delle prove eseguite operando a una velocità di 6 km/h confrontando la guida manuale con i due sistemi realizzati. Come si può notare la guida manuale è quella che consegue i peggiori risultati in termini di accuratezza. Il passaggio alla guida automatica comporta, di per sé, un miglioramento della qualità del lavoro. Tra i due diversi sistemi, quello impiegante il ricevitore più accurato è anche quello che consegue le migliori prestazioni in termini operativi.

I risultati di cui sopra possono essere sintetizzati dicendo che nei tre tipi

TIPO CONTROLLO	DISTANZA STABILITA A PRIORI	VALORE MINIMO [m]	DEVIAZIONE PERCENTUALE [%]	VALORE MASSIMO [m]	DEVIAZIONE PERCENTUALE [%]
Manuale	13 passi	9,10	-30,0	15,50	19,2
Con GPS sub-metrico	13 m	12,45	-1,1	13,51	3,8
Con GPS centimetrico	13 m	12,96	-0,3	13,12	0,9

Tab. 6 Errori massimi di guida in operazione di semina in risaia (13 m larghezza teorica che diventano 13 passi per l'operazione manuale; 6 km/h; fonte: Balsari et al., 2000)

di guida a confronto si realizzano mediamente sovrapposizioni o mancate lavorazioni che:

1. per la guida manuale sono dell'ordine dei 50 cm per ogni passata;
2. per la guida automatica con ricevitore submetrico sono di 20 cm per ogni passata;
3. per la guida automatica con ricevitore submetrico sono di 4 cm per ogni passata.

Con ciò, ipotizzando di impiegare macchine operatrici (in particolare irroratrici per i trattamenti) di diverse larghezze di lavoro, Balsari et al. arrivano a stimare gli effetti complessivi di cui alla figura 9.

In definitiva gli autori evidenziano che la guida automatica consegue ottimi risultati, perché in grado di garantire una precisione decisamente superiore rispetto alla guida manuale. I costi delle componenti del dispositivo,

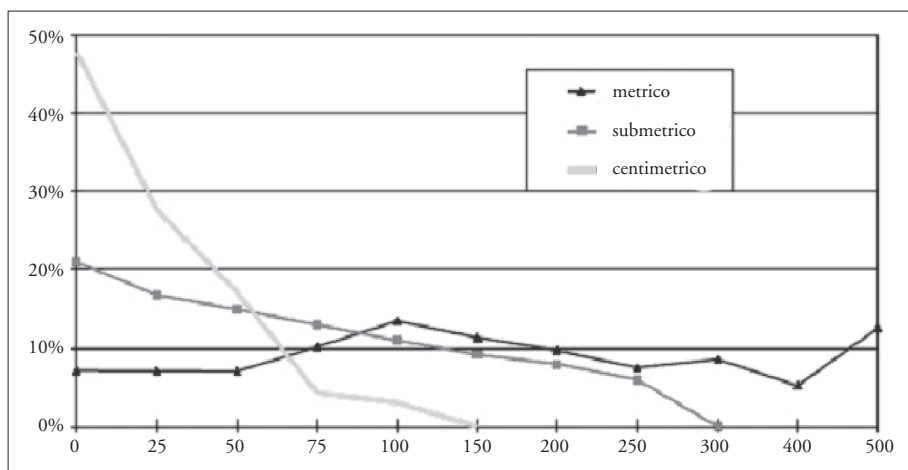


Fig. 8 Curve cumulative degli errori realizzati impiegando i tre diversi sistemi di guida provati (fonte: Balsari et al., 2000)

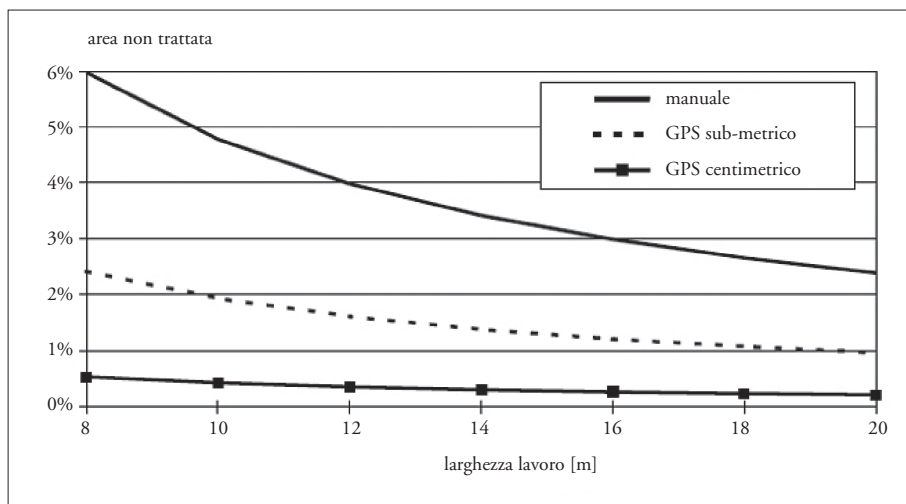


Fig. 9 Stima dell'area non trattata utilizzando i diversi sistemi di guida e al variare della larghezza di lavoro di una generica macchina per trattamenti (Fonte: Balsari et al., 2000)

in particolare del sistema GPS, rappresentano un ostacolo alla diffusione di questi sistemi nella cerealicoltura convenzionale. Solo nel riso in cui la scarsa visibilità dovuta ai campi allagati provoca notevoli errori nella guida manuale si può pensare a una applicazione economicamente giustificabile. In questo caso sono da preferirsi dispositivi di guida automatica che adottino un sistema GPS sub-metrico, meno preciso ma più economico.

5.4 La guida delle trapiantatrici

Le trapiantatrici meccaniche per barbatelle attualmente offerte sul mercato sono generalmente macchine portate da trattore agricolo, costituite da un telaio sul quale sono montati i seguenti organi di lavoro:

1. un dispositivo di *assolcatura e interrimento*;
2. un dispositivo di *alimentazione e distribuzione*;
3. dei dispositivi per la *regolazione dei punti di posa*.

Esse sono tipicamente monofila, di tipo portato da trattore e prevedono l'impiego di 2-3 operatori: 1 trattorista alla guida del mezzo semovente; 1-2 operatori a bordo della trapiantatrice che alimentano manualmente all'elemento rotante le barbatelle da trapiantare. Prima di incominciare le operazioni di campagna deve essere effettuato il rilievo topografico del campo al quale deve seguire lo squadro

del medesimo picchettando almeno i punti di inizio dei filari.

La regolazione della distanza di posa tra le file avviene, nelle soluzioni più avanzate, utilizzando dei dispositivi laser che gestiscono dei comandi elettroidraulici per mantenere costante la posizione dell'assolcatore (regolazione della distanza interfila). Queste soluzioni includono:

1. un proiettore laser a fascio piano verticale, posizionato sulle testate del campo;
2. un sensore sensibile a tale fascio laser, a bordo della macchina, che, nel momento in cui si registra una deviazione rispetto alla traiettoria prefissata, comanda idraulicamente la traslazione laterale dell'intero telaio della macchina operatrice portata dal trattore.

In queste macchine, un dispositivo sincronizzatore meccanico mantiene costante la distanza sulla fila; questo sincronizzatore è costituito da due pulegge ad assi paralleli e sovrapposte; quella inferiore, su cui è arrotolato un filo d'acciaio (lungo fino a 600 m), funge da ruota conduttrice, il moto della conduttrice è generato dal progressivo svolgimento del filo d'acciaio, la cui estremità libera viene fissata manualmente a terra all'inizio del filare.

Questa soluzione consente un'elevata produttività di lavoro (6-8.000 barbatelle/giorno). Tuttavia, presenta i seguenti inconvenienti di carattere tecnico-operativo:

1. necessità di picchettare il campo primo di iniziare le operazioni per definire i punti dove dovrà essere posizionata la stazione di trasmissione laser;
2. difficoltà a operare trasversalmente in terreni con pendenze accentuate;
3. problemi di visibilità dei sensori laser in presenza di condizioni atmosferiche avverse (nebbia, soprattutto);
4. eccessivi tempi di lavoro e impegno di ulteriore personale a terra per spostare con la dovuta precisione il proiettore tra una fila e l'altra (spesso si impiegano due trasmettitori da usare alternativamente) e per fissare manualmente l'estremità del cavo d'acciaio all'inizio del filare;
5. obbligo di seguire uno schema di lavoro con ritorno a vuoto per poter iniziare la posa delle barbatelle tutte a partire dal medesimo orizzonte di riferimento lineare;
6. inevitabili errori di posizionamento influenzano l'accuratezza della distanza tra le file.

Per eliminare alcuni di questi inconvenienti è stato proposto di impiegare il GPS come sensore per definire la direzione di posa (Sartori, 2004). Da parte sua il DPVTA di Udine, in collaborazione con le ditte Scalmana e AR-VAtec, ha studiato un prototipo di trapiantatrice a guida GPS (Pezzutti, 2003). Esso è in grado di:

1. eliminare definitivamente la necessità di eseguire il picchettamento del



Fig. 10 *Trapiantatrice a guida GPS portata da trattore. La macchina vera e propria è montata su un telaio a slitta (parte verde) in grado, a comando, di traslare trasversalmente rispetto alla direzione di avanzamento. Notare l'antenna montata solidale sulla trapiantatrice*

terreno;

2. svincolare il funzionamento della trapiantatrice da problemi di tipo orografico e climatico;
3. migliorare la precisione del posizionamento tra le file eliminando l'operatore che deve trasferire la stazione laser posta in capezzagna;
4. effettuare la progettazione automatica dell'impianto a seguito di un semplice rilevamento topografico effettuato con il medesimo GPS installato a bordo della macchina e utilizzando un apposito software dedicato.

La sua tecnologia di base prevede l'impiego di un sistema GPS con correzione differenziale (via satellite, tramite cellulare o RTK in doppia frequenza via radio-modem). Più in dettaglio, il sistema (fig. 10) risulta costituito dai

seguenti componenti:

- ricevitore *GPS-differenziale*, e antenna separata installata a bordo della macchina operatrice. Il ricevitore, collegato all'antenna, è invece montato a bordo del trattore adibito al traino della trapiantatrice ed è collegato via radio-modem alla stazione master di cui al punto successivo;
- un computer touch-screen (grado di protezione IP67) per gestire l'intero sistema mediante un opportuno pacchetto software, dedicato e modulare, in grado di elaborare i dati ricevuti dal rover al fine di: a) definire la posizione in cui debbono essere piantate le singole piantine per rispettare i dati di progetto delle singole parcelle da piantare; b) definire le traiettorie (direzione dei filari) rispetto alla quali la trapiantatrice deve lavorare; c) fornire, in fase di lavoro, i comandi di controllo attuativo per la regolazione della posizione del telaio delle trapiantatrici;
- un circuito idraulico – comandato da apposita elettrovalvola collegata al computer mediante una scheda elettronica – in grado di comandare il telaio mobile a slitta sul quale è montata la trapiantatrice determinando gli spostamenti laterali in modo da mantenere la traiettoria di progetto.

Nell'ambito del progetto di studio e realizzazione del primo prototipo semplificato (fig. 11) durante l'estate 2003 sono state condotte prove in campo utilizzando le varie soluzioni GPS di seguito elencate:

1. ricevitore modello Ashtech Z-Xtreme con correzione RTK, e antenna separata modello Geodetic 4 (stazione mobile), collegato via radio-modem a un secondo ricevitore GPS con antenna separata dello stesso tipo (stazione base). Questi sono stati provati con differenti frequenze di fixing (2-3-5 Hz);
2. ricevitore e antenna di cui al punto precedente, con correzione del segnale ricevuta via GPRS da una stazione fissa di Padova; provati con una frequenza di fixing di 5 Hz;
3. ricevitore-antenna (in un corpo unico) modello Novatel Smart Antenna, con correzione WAAS e provato con una frequenza di calcolo della posizione di 1 Hz;

Per il punto 1, il collegamento via radio è stato ottenuto utilizzando 2 radio-modem Adcon 500, operanti a una frequenza di 868 Mhz.

Riguardo alle prove con correzione WAAS, queste sono state eseguite in due modalità, realizzando il tracciato sia in entrambi i sensi di marcia lungo l'apprezzamento (modalità bidirezionale) che in uno solo (modalità monodirezionale), cioè con il ritorno a vuoto. Questo al fine di verificare se la modalità di esecuzione avesse qualche influenza sulla qualità dei dati di posizione rilevati.

Lo svolgimento delle prove ha riguardato l'esecuzione di passaggi paralleli,



Fig. 11 Telaio di supporto a slitta mobile di una trapiantatrice equipaggiato solamente di dente assolcatore per consentire l'esecuzione delle prove sperimentali. Notare l'antenna montata solidalmente al disopra del dente

a una distanza teorica impostata di 10 m, utilizzando un semplice dente assolcatore montato sul telaio mobile della trapiantatrice in sostituzione della medesima.

In seguito all'esecuzione dei vari passaggi, con una cordella metrica sono state misurate le distanze reali tra i tracciati realizzati. Il criterio adottato durante questa fase prevedeva l'acquisizione di una misura ogni 10 m, per tutta la lunghezza dell'appezzamento. In particolare la prima serie di misurazioni corrispondeva alla distanza tra la retta AB di riferimento e il primo tracciato, la serie successiva rappresentava la distanza tra il primo e il secondo e così via. I dati rilevati con questa procedura sono stati utilizzati per definire gli errori dei tracciati rispetto alla distanza teorica impostata. La velocità di avanzamento del cantiere durante le prove sperimentali, misurata con cronometro e paline a distanza nota, è risultata pari a 4 km/h, corrispondente a circa 1,11 m/s.

Nella tabella 7 sono riportati i risultati delle prove condotte.

L'analisi delle singole prove effettuate ha permesso di trarre alcune considera-

zioni specifiche riguardo ai dispositivi impiegati. In particolare, utilizzando l'antenna con correzione WAAS e frequenza di correzione della posizione pari a 1 Hz, la precisione del sistema è risultata di tipo submetrico. Alcuni valori hanno addirittura superato il metro di scostamento dalla traiettoria teorica. Inoltre, la distanza tra due file tracciate in successione ha prodotto un errore assoluto mediamente pari a 0,26 m e a 0,34 m. Questo si è ottenuto in due distinte prove, rispettivamente misurando la distanza tra le passate eseguite in entrambe le direzioni (prova n. 1) e misurando la medesima distanza tra le passate eseguite in una sola direzione (prova n. 2). Le due prove, hanno fatto riscontrare una deviazione standard di 0,47 m e di 0,29 m e un R95 di 0,81 m e 0,50 m rispettivamente.

Impiegando una strumentazione diversa, precisamente il GPS con correzione RTK, ed effettuando le misurazioni sulle file tracciate in successione in entrambe le direzioni, la precisione è stata di tipo subdecimetrico. In particolare, la distanza media tra le passate successive non ha, in nessun caso, prodotto errori assoluti superiori a 0,05 m.

Le prove migliori sono state realizzate impiegando una frequenza di fixing

N. PROVA E TIPO PASSATA	RICEVITORE/I	FREQUENZA ACQUISIZIONE [Hz]	DEVIAZIONE MEDIA [m]	RMS [m]	R95 [m]
1. bidirezionale	Singolo correzione WASS	1	0,26	0,47	0,81
2. monodirezionale	Singolo correzione WASS	1	0,34	0,29	0,50
3. bidirezionale	Due doppia frequenza L1/L2 RTK	2	0,05	0,11	0,19
4. bidirezionale	Due doppia frequenza L1/L2 RTK	3	0,00	0,05	0,09
5. bidirezionale	Due singola frequenza RTK	3	0,00	0,05	0,09
6. monodirezionale	Due doppia frequenza L1/L2 RTK	5	0,01	0,08	0,14
7. bidirezionale	Due doppia frequenza L1/L2 RTK	5	0,04	0,06	0,10
8. bidirezionale	Singolo correzione collegamento telefonico locale GPRS	5	0,02	0,11	0,19

Tab. 7 Risultati delle prove condotte su un prototipo di trapiantatrice a guida GPS

pari a 3 Hz (prove n. 4 e n. 5); in questo caso l'errore assoluto è risultato centimetrico, la deviazione standard è risultata pari a 0,05 m e l'errore R95 pari a 0,09 m, valori estremamente bassi, peraltro con nessuna differenza tra singola e doppia frequenza.

Sulla base di queste risultanze la ditta ARVAtec ha poi realizzato una soluzione commerciale, ora sul mercato con il marchio ARVAplant, funzionante con ricevitori RTK caratterizzati da una frequenza di acquisizione della posizione di 5 Hz e in grado di piantare 1200-1300 barbatelle/h con 3 operatori invece dei canonici 4. Il sistema richiede costi di investimento abbastanza elevati, dell'ordine dei 30-35.000 euro. L'analisi della convenienza economica dell'adozione di questa tecnologia può essere effettuata considerando il solo incremento di produttività del lavoro che si consegue con l'innovazione (+ 400 barbatelle/h) e la tariffa per il trapianto, che è attualmente di 0,3 euro/barabatella. Ipotizzando prudenzialmente che i costi orari di esercizio del cantiere (a esclusione di quelli aggiuntivi derivanti dall'investimento nel sistema di controllo) rimangano costanti prima e dopo l'introduzione della innovazione (in realtà si dovrebbe calcolare la riduzione della manodopera) è facile calcolare il TR (tempo di ritorno del capitale) in sole 250 ore di lavoro (pari a circa 125 ha).

La collaborazione tra ARVAtec e università è ancora in corso allo scopo di realizzare un modello innovativo di macchina in grado non solo di trapiantare le barbatelle rispettando il parallelismo tra le file, ma anche mantenendo distanze sulla fila predefinite, sempre con precisione centimetrica. Il lavoro sperimentale è in fase avanzato svolgimento e si prevede che entro l'anno in corso (2005) si arriverà alla brevettazione del trovato.

6. CONCLUSIONI

La guida automatica tramite controllo elettronico basato su misure di posizione utilizzando il sistema GPS è ormai una realtà. Per le diverse operazioni di campo, nella tabella 8 sono indicate, a fianco delle già viste esigenze in termini di precisione, le tipologie di sensori che possono essere impiegate.

Per le operazioni del gruppo 1, quelle che peraltro richiedono l'impiego della strumentazione più costosa, resta una certa perplessità sulla necessità di arrivare a una automazione delle operazioni di guida relative. Si tratta, infatti, di operazioni con larghezze di lavoro che sono raramente rilevanti, caratterizzate comunque da un ambiente operativo che presenta riferimenti molto (aratura e sarchiatura) o abbastanza (semina di precisione) evidenti.

OPERAZIONE	PRECISIONE RMS [cm]	TIPO DI RICEVITORE
1. Aratura in solco	3-5	Doppia frequenza L1/L2 RTK con stazione a bordo campo
Semina precisione	3-5	Doppia frequenza L1/L2 RTK con stazione a bordo campo
Sarchiatura	3-5	Doppia frequenza L1/L2 RTK con stazione a bordo campo
2. Semina convenzionale	10-20	Doppia frequenza L1/L2 con ricevitore a bordo campo oppure correzione di precisione in WA
Aratura fuorisolco	10-20	Doppia frequenza L1/L2 con ricevitore a bordo campo oppure correzione di precisione in WA. Singola frequenza con lisciatura della pseudorange
Raccolta colture	20-30	Doppia frequenza con correzione di precisione in WA Singola frequenza con lisciatura della pseudorange
3. Lavorazioni principali terreno con utensili a denti	20-40	Singola frequenza con lisciatura della pseudorange
Lavorazioni secondarie del terreno	30-50	Singola frequenza con lisciatura della pseudorange
Applicazione concimi e fertilizzanti in pieno campo	50-100	Singola frequenza correzione WASS
Semina riso in risaia allagata	50-100	Singola frequenza correzione WASS
Diserbo	30-80	Singola frequenza correzione WASS
Trapianto (con controllo operatrice)	3-5	Doppia frequenza L1/L2 RTK con stazione a bordo campo

Tab. 8 *Tipologie di sensori di impiego possibile per l'esecuzione delle diverse operazioni agricole di campo*

Quelle del gruppo 2, invece, costituiscono un gruppo intermedio per le quali i vantaggi conseguibili con l'adozione delle nuove tecnologie sono ancora sfumati e dipendono sia dalla tipologia delle macchine impiegate, sia dall'ambiente di lavoro.

Infine, le operazioni che fanno parte del gruppo 3 sono quelle che dovrebbero beneficiare già nel breve periodo di una diffusa adozione delle tecnologie di guida automatica. Per queste, infatti, i vantaggi operativi sono evidenti e i benefici economici facilmente calcolabili.

In questo quadro, di per sé positivo, risulta tuttavia auspicabile un ulteriore sforzo di ricerca teso a individuare soluzioni tecnologiche a più basso costo. Ciò specialmente per le applicazioni in pieno campo sulle colture cosiddette commodities per le quali i redditi attuali degli agricoltori sono decrescenti e quindi gli stessi non sono stimolati a investire in tecnologie innovative.

In prospettiva – così come proposto da molti Autori tra i quali recentemente Torii (2000), Noguchi et al. (2004) e Blackmore et al. (2004) – è necessario concentrare l'attenzione sulle ricerche che, partendo dalla tecnologia GPS e integrandola con altre tipologie di sensori, porti a soluzioni di macchine per le operazioni di campo completamente robotizzate che non richiedano più la presenza dell'operatore a bordo ma che possano essere controllate in modo remoto.

ABSTRACT

The “in field” automatic guidance of agricultural machines development has had a difficult journey. Starting from the first experiences at the beginning of the XX century, the agricultural machines manufacturers, University researchers and inventors have developed numerous solutions designed for single and specific needs of different types of agricultural operations. With the GPS technologies advent now, in the XXI century, the sector is reorienting its evolution towards the development of more generalist solutions able to solve, with enough precision level, the necessity of the automatic guidance for nearly all the agricultural operations. This contribution describes the Italian specific situation of the sector in terms of in field requirements and market and research development.

BIBLIOGRAFIA COMPLESSIVA (COMPRESA QUELLA CITATA NEGLI ALLEGATI)

- BALSARI P., TAMAGNONE M. (1999): *Un sistema automatico di guida del trattore e di gestione delle attrezzature*, Atti del Convegno nazionale L'Innovazione tecnologica per l'Agricoltura di Precisione e la Qualità produttiva. Grugliasco, 22-23 giugno 1999, pp. 87-94.
- BALSARI P., TAMAGNONE M. (2000): *An automatic tractor guidance*, Agricontrol 2000, International Conference on: Modelling and control in Agriculture, Horticulture and Post-Harvest Processing, 10-12 July 2000, Wageningen, The Netherlands.
- BALSARI P., TAMAGNONE M. (2002): *Evaluation of the Performance of Manual and Automatics Guidance in Paddy Fields*, The XIV Memorial CIGR World Congress 2000, 28 November-1 December 2000, Tsukuba, Japan.
- BALSARI P., TAMAGNONE M., BERTOLA S. (1997): *Directional control of agricultural vehicles*, «Precision Agriculture», 2, pp. 551-558.
- BELL T. (2000): *Automatic tractor guidance using carrier-phase differential G.P.S.*, «Computers and electronics in agriculture», 25, 1-2, pp 29-52.
- BERTOCCO M., SARTORI L. (2005): *I sistemi di navigazione*, «L'Informatore Agrario», 27, Supplemento *Agricoltura di precisione*, p. 19.
- BLACKMORE B.S., FOUNTAS S., TANG L., HAVE H. (2004): *Systems Requirements For a Small Autonomous Tractor*, «Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development», Manuscript PM 04, 001, July.
- CHOI C.H., ERBACH D.C., SMITH R.J. (1990): *Navigational Tractor guidance system*,

- «Transaction of the ASAE», 33, pp. 699-705.
- COMPARETTI A., FEBO P. (2000): *Valutazione di sistemi GPS e DGPS combinati con metodi di correzione e sistemi non satellitari*, «Rivista di Ingegneria Agraria», 1, pp. 31-37.
- EVANS A.G.; HILL R.W., BLEWITT G., SWIFT E.R., YUNCK T.P., HATCH R., LICHTEN S.M., MALYS S.; BOSSLER J., CUNNINGHAM J.P. (2002): *The Global Positioning System Geodesy Odyssey, Navigation*, «Journ. of the Institute of Navigation», 49, 1, pp. 7-34.
- FORD T.J., HAMILTON G. (2003): *A New Positioning Filter: Phase Smoothing in the Position Domain*, «Journal of the Institute of Navigation», 50, 2, pp. 65-78.
- FREYBERGER F.; JAHNS G. (2000): *Symbolic course description for semi-autonomous agricultural vehicles*, «Computers and electronics in agriculture», 25, 1-2, pp. 121-132.
- GROVUM M.A., ZOERB G.C. (1970): *An automatic guidance system for farm tractor*, «Transaction of ASAE», 13, 5, pp. 565-573.
- HAGUE T., MARCHANT J.A., TILLET N.D. (2000): *Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles*, «Computers and electronics in agriculture», 25, 1-2, pp. 11-28.
- HARRIES, G. O. & AMBLER, B. (1981): *Automatic ploughin: a tractor guidance system using opto-electronic remote sensing techniques and microprocessor based controller*, «J. Agric. Eng. Res.», 26, 1, pp. 33-53.
- HELLEBRAND H. J., BEUCHE H. (1997): *Multicomponent positioning for site-specific farming*, in: SCI (eds.) *Proceedings of the First European Conference on Precision Agriculture*, Warwick in the UK, 2, pp. 575-583.
- LENAIN R., THUÏLOT B., CARIOU C., MARTINET P. (2004): *A new nonlinear control for vehicle application to automatic guidance of farm in sliding conditions: vehicles using RTK GPS*, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans.
- MAZZETTO F., CALCANTE A., LANDONIO S., LAZZARI M. (2003): *A new on-board swath guidance tool for farm machinery*, XXX CIOSTA-CIGR V Management and technology applications to empower agriculture and agro-food systems, 22-24 September 2003, University of Turin, Turin, Italy.
- O'CONNOR M., BELL T., ELKAIM G., PARKINSON B. (1996): *Automatic Steering of Farm Vehicles Using GPS*, 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, Minnesota.
- O'CONNOR M., BELL T., ELKAIM G., PARKINSON B. (1997): *System Identification and Robust Control of Farm Vehicles Using CDGPS*, ION Conference, Kansas City, USA.
- NOGUCHI N., WILL J., REID J., ZHANG Q. (2004): *Development of a master-slave robot system for farm operations*, «Computers and electronics in agriculture», 44, pp. 1-19.
- PEZZUTTI M. (2003): *Studio, progettazione e realizzazione di un prototipo polivalente per l'esecuzione di operazioni agricole secondo traiettorie parallele*, Tesi di Laurea, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Udine.
- RAMALINGAM N., STOMBAUGH T.S., MIRGEAUX J. (2000): *DGPS-Based automatic vehicle guidance*, paper 001068, ASAE Annual International Meeting, Midwest Express Center, Milwaukee, USA.
- REID J.F., ZHANG Q., NOGUCHI N., DICKSON M. (2000): *Agricultural automatic guidance research in North America*, «Computers and electronics in agriculture», 25, 1-2, pp. 155-168.
- SARTORI L. (2001): *Guida parallela con GPS*, «L'Informatore Agrario», 30, pp. 55-60.
- SARTORI L. (2004): *Impianti del vigneto con il GPS*, «L'Informatore Agrario», 8, p. 91.
- SHARPE T., HATCH R., NELSON F., (2005): *John Deere's StarFire System: WADGPS for Precision Agriculture*, <http://www.navcomtech.com/docs/StarFireSystem.pdf>.

- STEFANELLI G. (1991): *L'evoluzione dei rapporti tra meccanizzazione ed uomo*, «Macchine e Motori Agricoli», 12, pp. 19-24.
- STAFFORD J.V., AMBLER B. (1994) *In-field location using GPS for spatially variable field operations*, «Computer and electronics in agriculture», 11, pp. 23-36.
- STOMBAUGH T.S., BENSON E.R., HUMMEL J.W. (1998): *Automatic guidance of agricultural vehicles at high field speed*, paper 983110, 1998 ASAE Meeting, Colorado Spring, USA.
- STOMBAUGH T.S., SHEARER S.A. (2001): *DGPS-Based Guidance of High-Speed Application Equipment*, paper 01-1190, ASAE Annual International Meeting, Sacramento Convention Center Sacramento, USA, 30 July-1 August.
- TILLET N.D. (1991): *Automatic guidance sensor for agricultural field machines: a review*, «J. Agr. Engineering Research», 50, pp. 167-187.
- TORII T. (2000): *Research in autonomous agricultural vehicles in Japan*, «Computers and electronics in agriculture», 25, 1-2, pp. 133-154.
- WILL J.D., STOMBAUGH T.S., BENSON E.R., NOGUCHI N., REID J.F. (1998): *Development of a Flexible Platform for Agricultural Automatic Guidance Research*, paper 983202 ASAE Annual International Meeting, Orlando Convention Center, Orlando, USA.
- WILLRODT, F. L. (1924): *Steering attachment for tractors*, U.S. Patent 1506706.
- WILSON J.N. (2000): *Guidance of agricultural vehicles – a historical perspective*, «Computers and electronics in agriculture», 25, 1-2, pp. 3-10.

Glossario dei termini e delle sigle più comunemente usati per descrivere il funzionamento del GPS

Ambiguità di fase	Difficoltà nel definire il numero intero di cicli nel caso di misure di fase
2-D GPS-mode	Posizione definita in due dimensioni – attraverso i segnali ricevuti da 3 satelliti – come latitudine e longitudine o metri X e Y,
3-D GPS	Posizione definita in tre dimensioni – attraverso i segnali ricevuti da 4 satelliti – come latitudine, longitudine e altitudine o metri X,Y e Z
Almanacco	Insieme di informazioni che indicano la posizione reciproca dei satelliti GPS nello spazio
Auto GPS mode	Passaggio automatico – in base al numero di satelliti in vista – da una posizione 2-D a una 3-D
C/A-code	Coarse o Clear/Acquisition code. Il codice messo a disposizione dalla DoD per gli utenti civili
Carrier Phase	Il segnale radio portante che modula i segnali di C/A code e P-code
Datum	Modello matematico utilizzato come sistema di riferimento per la localizzazione delle posizioni GPS su una regione specifica della terra (esempio NAD-27) o sull'intera superficie (esempio WGS-84)
DGPS o differential GPS	Procedura di correzione delle posizioni GPS per migliorare l'accuratezza nel posizionamento. Prevede l'utilizzo di stazioni di riferimento (Reference Stations) per stimare i parametri di correzione da applicare alle posizioni stimate dal GPS rover (mobile)
DoD	Department of Defense. Dipartimento di Difesa degli Stati Uniti, ideatore e proprietario del sistema GPS
DOP o Dilution of Precision	Indice di bontà del posizionamento che dipende dalla disposizione geometrica dei satelliti visibili all'orizzonte. Più essi sono bassi e più l'indice è buono. Viceversa il posizionamento è scadente. La DOP è definita attraverso diversi componenti: GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, TDOP
ECDF	Earth Centered, Earth Fixed X,Y,Z. Coordinate cartesiane centrate fisse che definiscono la posizione tridimensionale di un punto rispetto al centro dell'ellissoide di riferimento
Elevation mask angle	La misura dell'angolo minimo di elevazione rispetto all'orizzonte al di sopra della quale devono essere localizzati i satelliti per poter essere utilizzati nel calcolo della posizione.
Efemeridi	Serie di parametri che descrivono accuratamente l'orbita dei satelliti. Essi vengono utilizzati per calcolare la posizione dei satelliti stessi che rappresenta la base per l'esecuzione della triangolazione con cui si effettua la misura di posizione
Fase	Un ciclo completo dell'onda radio portante
GALILEO	Il sistema di navigazione europeo analogo, come principio di funzionamento e struttura, al GPS
GDOP	Geometric DOP. Descrive quanto un'incertezza nella misura della pseudorange e del tempo influenza la bontà della misura di posizione. Dipende dalla posizione dei satelliti rispetto al ricevitore e dalla precisione degli orologi GPS.
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System. Il sistema di navigazione sovietico analogo, come principio di funzionamento e struttura, al GPS

GPS	Global Positioning System. Costellazione di 24 satelliti per radio navigazione utilizzati per determinare in modo accurato la posizione, rispetto a un dato sistema di riferimento (datum), di ricevitori associati a punti, oggetti, veicoli etc.
GPS receiver	Dispositivo ricevitore che, dopo aver captato tramite una antenna i segnali radio satellitari, è in grado di elaborarli al fine di calcolare la posizione in cui si trova. Può funzionare anche in modo differenziale quando riceve segnali da una stazione master
GPS time	Ora GPS definita impiegando gli orologi atomici installati a bordo dei satelliti. È sincronizzata con l'UTC (Universal Time Coordinated) con differenza di alcuni secondi. È alla base del calcolo del ritardo con cui il segnale GPS giunge ai ricevitori e, quindi, del calcolo delle distanze ricevitore-satelliti
HDOP	Horizontal DOP, descrive la bontà della misura di posizione sul piano orizzontale (coordinate X, Y)
Ionosfera	Parte ionizzata dell'atmosfera che si estende da 100 a 1000 km al disopra della superficie terrestre
L1 e L2	Onde radio portanti con frequenza rispettivamente di 1575,42 MHz e 1227,60 MHz e lunghezze d'onda 19 cm e 24 cm. Su di esse sono modulati i codici C/A e P, oltre che il messaggio di navigazione.
LLA	Latitudine, Longitudine e Altezza
Maximum PDOP	Il valore massimo di PDOP accettabile dal ricevitore GPS per determinare la posizione
Misura di fase	Misura della distanza tra satellite e ricevitore che si basa sul calcolo del numero intero di cicli che l'onda percorre per raggiungere il ricevitore stesso e dell'entità dello sfasamento fra fase portante e fase di confronto prodotta dal ricevitore
Navigation Message	Messaggio di navigazione. Demodulato dal ricevitore per conoscere dati sui parametri di sistema (orologio atomico, UTC, effemeridi, correzione errori ionosferici, almanacchi ecc.).
NAVSTAR	Navigation System Time And Ranging. Il nome della costellazione di satelliti GPS (il solo segmento spaziale)
NMEA	National Marine Electronics Association. Associazione che definisce lo standard più usato per la codifica di comunicazione dei dati GPS
P-Code	Precision o Protected –Code. Analogo al C/A code di esclusivo impiego per utenti abilitati dal DoD
PDOP	Position DOP, descrive quanto un'incertezza nella misura delle pseudo-range di almeno tre satelliti influenzi la bontà della posizione. Dipende dalla posizione dei satelliti rispetto al ricevitore (coordinate X,Y,Z)
Precision GPS	Indica la deviazione standard delle posizioni rilevate (fixing) intorno a un punto. Più è elevata la deviazione standard, minore è la precisione. È associata al concetto di accuratezza
PRN	Pseudo-Random Noise. Codice emesso da ogni satellite
Pseudorange	Misura della distanza tra ricevitore e satellite effettuata in base al calcolo del tempo con cui il segnale radio emesso dal satellite stesso raggiunge il ricevitore
RMS	Root Mean Square. Deviazione standard. Comprende dal 63 al 68% delle misure distribuite rispetto al valor medio
RTCM	Radio Technical Commission for Marine Service. Protocollo di comunicazione per la trasmissione dati di correzione differenziale tra una stazione pubblica master e i ricevitori rover

SA	Selected Availability. Disturbo volontario indotto dal DoD sul segnale C/A per ragioni militari. È cessato a partire dal 2001, ma potrebbe essere ancora reintrodotta in caso di emergenze legate alla sicurezza militare
SNR	Signal Noise Ratio. Indica la potenza (espressa in dB) del segnale radio al disotto della quale il satellite viene momentaneamente escluso dalla ricezione.
SV	Space Vehicle. Identifica il numero del satellite GPS
TDOP	Time DOP. Descrive la bontà del posizionamento in base alla precisione degli orologi
Troposfera	Parte non ionizzata (neutra) dell'atmosfera nella quale si manifestano le più comuni variazioni climatiche e che si estende dal suolo fino a 100 km di altezza
UTC	Coordinated Universal Time. È l'ora universale che viene aggiornata dal US Naval Observatory. Definisce l'ora solare rispetto al meridano di Greenwich
UTC offset	Differenza tra ora locale e UTC
VDOP	Vertical DOP. Descrive la bontà del posizionamento verticale (coordinata Z)
WGS-84	World Geodetic System 84. Sistema di riferimento mondiale (datum) utilizzato per definire la posizione in base alle coordinate geografiche (LLA)
RTK	Real-Time Kinematic. Sistema di calcolo e trasmissione del segnale di correzione che consente misure in tempo reale con accuratezza centimetrica
PRange	Pseudorange

Caratteristiche del sistema GPS e dei ricevitori in commercio ai fini di un loro impiego nella guida automatica dei mezzi semoventi agricoli

I. GENERALITÀ

Come ormai abbastanza noto, il GPS, Global Position System, è un sistema che permette di conoscere la posizione di un qualsiasi punto sulla superficie terrestre. Nella figura A.1 e nelle tabelle A.1 e A.2 sono riportate le principali caratteristiche tecniche delle diverse sezioni così come esse sono configurate nel sistema GPS NAVSTAR di origine USA.

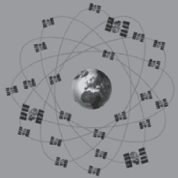


Sezione spaziale		Il segmento SPAZIALE, formato dalla costellazione satellitare GPS orbitante intorno alla Terra.
Sezione di controllo		Il segmento di CONTROLLO, costituito da cinque stazioni GPS permanenti posizionate lungo l'Equatore.
Sezione utenza		Il segmento UTENTE, rappresentato da chiunque sia dotato di un ricevitore GPS.

Fig. A.1 *Distinzione tra i tre segmenti che costituiscono il sistema GPS*

Numero satelliti	24 di cui 18 operativi e 6 di riserva
Distanza da terra	20.200 km
Orologi atomici di riferimento	2 al cesio; 2 al rubidio su ogni satellite. $f_0 = 10.23$ MHz (frequenza fondamentale) errore ± 100 nsec
Periodo orbitale	12 ore – ogni satellite ripassa sullo stesso punto ogni giorno con 4 min di ritardo
Frequenza portante L1	$1575,42 \text{ MHz} = f_0 * 154$ ($\lambda = 0.1903$ m)
Frequenza portante L2	$1227,60 \text{ MHz} = f_0 * 120$ ($\lambda = 0.2442$ m)
Frequenza portante Lc (o L5) di futura introduzione	$1176,45 \text{ MHz} = f_0 * 115$ ($\lambda = 0.2548$ m)
Segnale C/A (Coarse Acquisition)	Modulato come Pseudo Range Noise, segnale di tipo digitale (onda quadra) lungo 1023 bit, a 1,023 MHz sulla L1 – Utilizzo corrente
Frequenza impulso di trasmissione	1 ms
Segnale P (Precision)	Modulato come Pseudo Range Noise a 10,23 MHz sulla L1 e sulla L2, quando criptato (Anti-Spoofing) diventa il segnale Y
Frequenza impulso di trasmissione	7 giorni
Navigation Message	Modulato a 50 Hz sulla L1 e sulla L2, trasmette in 5 subframe: dati orologio per correzione orario, dati delle effemeridi (relativi all'orbita del satellite), dati per il modello di correzione errori ionosferici, dati degli almanacchi (relativi alla configurazione relativa nello spazio tra differenti satelliti), dati UTC (universal coordinated time) e altri parametri di sistema
Frequenza impulso di trasmissione	Un intero set di 25 frames (125 subframes) è trasmesso ogni 12,5 min
PDOP (Position Dilution Of Precision) – HDOP (Horizontal Dilution Of Precision)	Calo di precisione nel posizionamento tridimensionale o orizzontale – dipende dal numero di satelliti tracciati e dalla loro reciproca posizione. DOP 1-3 = molto buona; 4-5 = buona; 6 = accettabile; >6 = sospetta)

Tab. A.1 *Caratteristiche del segmento spaziale*

Ricevitore radio	Si sintonizza sulla frequenza usate dal sistema GPS e decodifica il segnale dalla portante. Nel caso di misure differenziali provvede a ricevere anche i segnali di correzione sulle frequenze trasmesse da satelliti, stazioni a terra di circuiti pubblici o privati, ricevitori master a servizio del rover
Canali	Monofrequenza o multifrequenza (per ora 2); da un minimo di 4 a un massimo di 12 canali
Antenna	Può essere integrata col ricevitore o separata
Orologio	Normalmente un oscillatore al quarzo di buona qualità, viene messo in fase con quelli dei satelliti durante la fase iniziale di acquisizione dati
Batteria	Fondamentale per le operazioni di scouting
Software interno	Elabora i dati dei segnali di pseudorange e Navigation Message. Nel caso di misure con differenza di fase, provvede a risolvere l'ambiguità di fase e a misurare lo sfasamento sui singoli cicli della portante. Possono essere presenti filtri di navigazione (filtro Kalman)

Tab. A.2 *Caratteristiche del sistema utente*

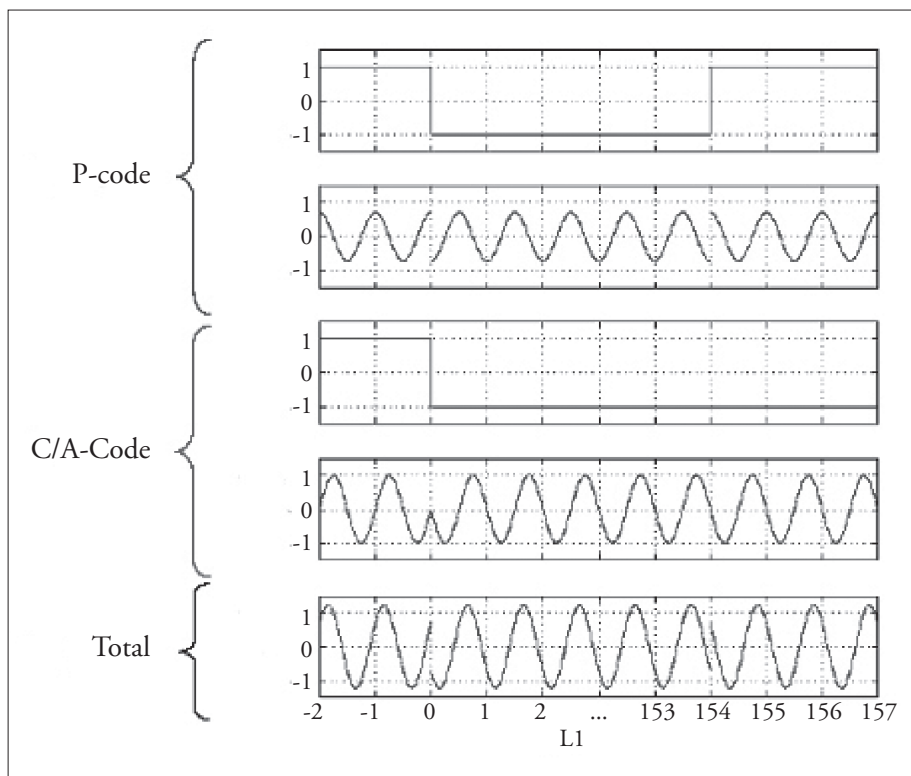


Fig. A.2 Forma dell'onda radio L1 trasmessa dai satelliti GPS. Sulla L2 è trasmesso solo il codice P

Su due frequenze portanti trasmesse dai satelliti (L1 e L2) vengono modulati due codici (pseudorange) C/A e P, di struttura definita e conosciuta. Così la forma tipica delle onde che vengono ricevute dal segmento utente a terra è quella rappresentata nella figura A.2.

Il sistema GLONASS, messo in orbita dalla ex URSS, è analogo nel funzionamento e nelle caratteristiche. Quello europeo che verrà (dovrebbe essere operativo nel 2008) si chiamerà Galileo, ed è stato studiato per l'utilizzo civile (con più satelliti, più potenti, con più bande) ma anch'esso funzionerà secondo i principi del GPS americano (per gli aspetti attinenti al posizionamento standard trasmetterà sulla stessa frequenza L1). Pertanto, quanto nel seguito verrà descritto per il GPS vale, con modifiche non sostanziali, anche per gli altri sistemi già funzionanti o in via di definizione.



Fig. A.3 I satelliti del segmento spaziale GPS girano su orbite definite delle quali si conosce il tracciato (effemeride). I ricevitori sono in grado di ricevere il numero di satelliti che stanno nella loro parte visibile del cielo (almanacco) e di ricostruire le effemeridi

Il principio di funzionamento del sistema di posizionamento globale è basato sul fatto che è possibile creare una triangolazione tra ogni punto della crosta terrestre e dei satelliti (fig. A.3), che trasmettono gratuitamente e in continuo dati sincronizzati (cioè con un precisa base temporale).

Il numero dei ricevitori è illimitato in quanto questi funzionano in modo passivo.

La distanza dai satelliti è misurata sulla base del tempo che un segnale radio – che è emesso dal satellite stesso e viaggia alla velocità della luce – impiega a raggiungere un ricevitore a terra. Per misurare questo tempo sono necessari degli orologi molto precisi. I satelliti contengono degli orologi atomici, mentre i ricevitori sono equipaggiati con orologi al quarzo che vengono sincronizzati, come vedremo nel seguito, con quelli atomici. La distanza è calcolata come tempo per velocità (circa 300.000 km/s). Ovviamente il fatto di conoscere in modo estremamente preciso la posizione dei satelliti è un pre-requisito per il funzionamento del sistema. Perciò i satelliti sono controllati da delle stazioni al suolo che provvedono a inserire nel segnale dei satelliti le informazioni relative alla loro posizione come:

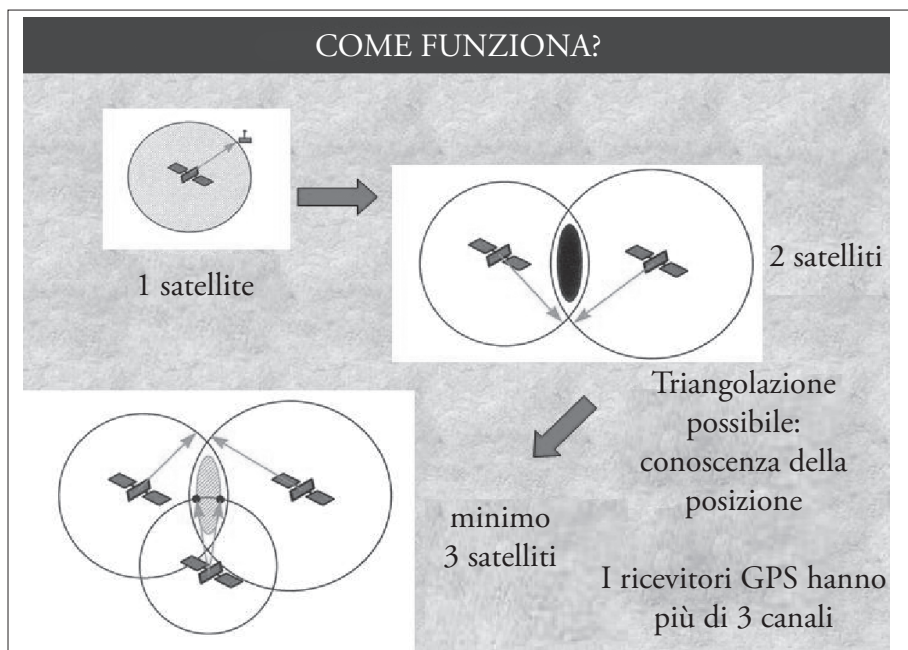


Fig. A.4 Principio della triangolazione sul quale si basa la misura di posizione del ricevitore

- dati delle effemeridi (relativi all'orbita del satellite):
- dati degli almanacchi (relativi alla configurazione relativa nello spazio tra differenti satelliti).

In aggiunta dal satellite vengono trasmessi i dati relativi all'orologio impiegato.

In principio 3 satelliti sono sufficienti a determinare la posizione spaziale di un punto. Tutti i punti che hanno uguale distanza da un satellite formano una sfera. L'intersezione di tre sfere avviene in due soli punti (fig. A.4). Uno di questi punti non può appartenere alla crosta terrestre (è troppo distante) e quindi con tre satelliti si ottiene la possibilità di individuare il punto cercato.

Fin qui sembrerebbe tutto molto semplice e lineare, ma purtroppo in realtà il sistema ha un funzionamento che, a causa di una serie di intrinseche imprecisioni, richiede, se si vogliono raggiungere livelli di accuratezza di posizionamento compatibili con le principali operazioni agricole e, ancor più, con i rilievi topografici, l'utilizzo di tecnologie molto sofisticate e, in molti casi, molto costose.

2. ERRORI INTRINSECI AL FUNZIONAMENTO DEL GPS

Innanzitutto non è vero che con tre satelliti si può procedere a una misura precisa. Un quarto satellite è infatti necessario per mettere in fase il funzionamento dell'orologio contenuto nel ricevitore con quelli dei satelliti, in modo da poter utilizzare un semplice orologio al quarzo invece di un modello più costoso.

Infine un ulteriore satellite è necessario per garantire la possibilità di monitorare l'integrità del sistema (controllo della qualità dei dati e identificazione di eventuali malfunzionamenti). La possibilità di ricevere più di 4 satelliti con una buona geometria – quantificata da una position dilution of precision (PDOP) di meno di 6 e un'elevazione superiore ai 5° – è di circa il 99% (fig. A.5). Questa è, tuttavia, una media su 24 ore, e non una garanzia di disponibilità in un punto particolare in ogni momento sulla crosta terrestre.

Oltre a questi limiti di “accessibilità globale del segnale” e, quindi, di integrità della possibilità di eseguire la misura, le fonti di errore sono relative a:

1. la già citata posizione geometrica dei satelliti (PDOP) (fig. A.5);
2. l'imprecisione delle effemeridi trasmesse dai satelliti che porta a errori fino a 2 m;
3. l'imprecisione degli orologi, che può portare a errori fino a 2 m;
4. il ritardo ionosferico, che può comportare errori di misura fino a 4 m (fig. A.6);
5. il ritardo troposferico, che porta a errori fino a 0.7 m (fig. A.6);
6. la riflessione del segnale contro edifici, montagne, ecc. (definito correntemente come errore multipath) che comporta errori fino a 2 m (fig.

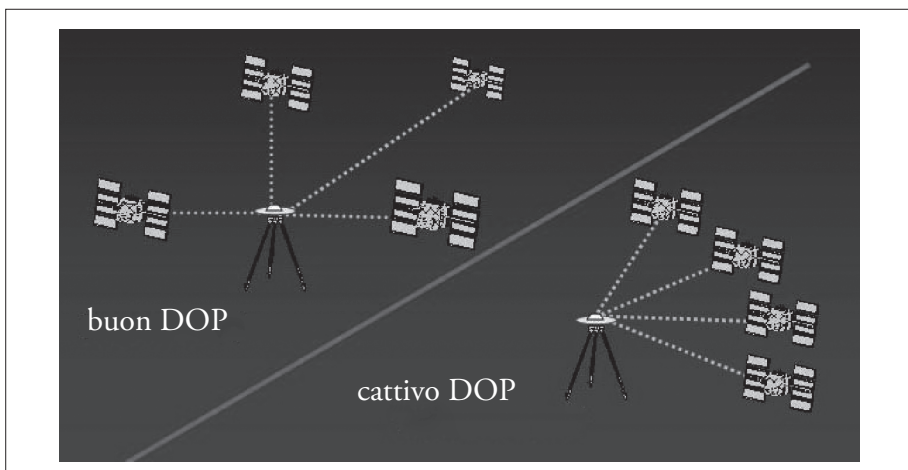


Fig. A.5 Concetto di DOP

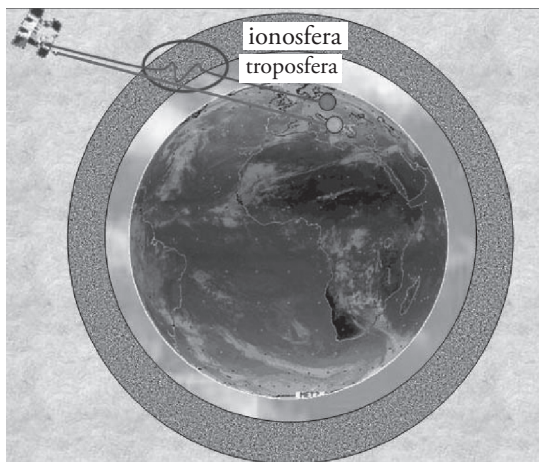


Fig. A.6 *Concetti di errore ionosferico e troposferico*

A.7);

7. la qualità dei componenti del ricevitore che porta a errori fino 1 m.

Più in particolare, nel seguito, vengono fornite alcune precisazione rispetto a questa serie di errori.

Le imprecisioni sulle effemeridi sono dovute ai piccoli errori che vengono trasmessi dai satelliti relativamente alla loro posizione. Infatti, i satelliti trasmettono dati di rotta calcolati a priori e non relativi alla effettiva orbita seguita. Questi errori possono quindi essere corretti in post processing avendo a disposizione i dati relativi alle orbite corrette. In realtà, la messa in orbita di satelliti con funzionamento sempre più raffinato e con sistemi di calcolo della loro rotta sempre più sofisticati sta portando a una compressione di questo tipo di imprecisioni. Ma per ridurre al minimo questi errori servono ancora

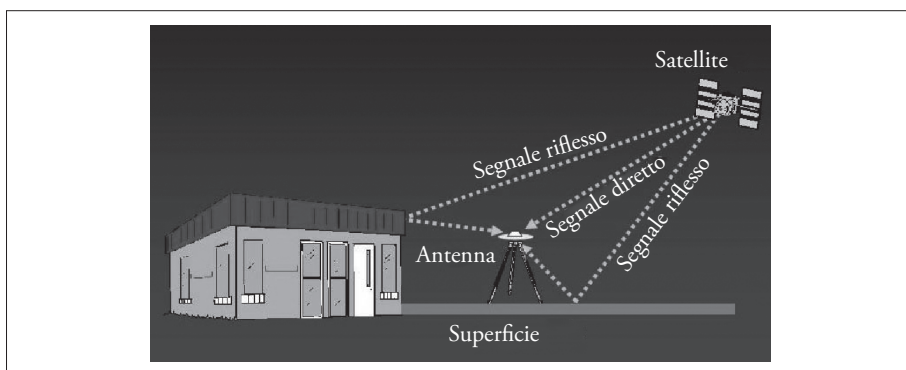


Fig. A.7 *Concetto di errore per riflessione (multipath error)*

tecniche di correzione a terra che si differenziano a seconda dei tipi di misura e dei tipi di ricevitore impiegati.

La precisione degli orologi è fondamentale. Ogni satellite trasmette le caratteristiche di funzionamento del proprio orologio in modo che le stesse possano essere utilizzate da ogni ricevitore per sviluppare un proprio modello di predizione dell'ora esatta del satellite stesso. Tutti gli osservatori del GPS ricevono un identico errore di orologio consentendo quindi, come meglio specificato nel seguito, una efficace correzione nel caso di impiego di tecniche differenziali.

Il ritardo ionosferico è dovuto alla presenza di elettroni liberi nella ionosfera. Qui, i segnali radio non viaggiano alla velocità della luce, come nel vuoto. La velocità del segnale risulta modificata in proporzione al numero di elettroni liberi che incontra. Il comportamento della ionosfera è generalmente abbastanza ben prevedibile nelle aree temperate. Ai poli e all'equatore esso è molto fluttuante. Anche il ciclo solare – che ha una durata di 11 anni – ha un effetto sul fenomeno. Al massimo delle sue emissioni elettromagnetiche il sole provoca un fenomeno di scintillazione che – lungo la linea geo-magnetica equatoriale – interferisce con il passaggio delle onde portanti il segnale GPS. Il fenomeno di alterazione della velocità del segnale è variabile in funzione della lunghezza d'onda. Questo errore locale può essere risolto con l'uso della correzione differenziale (esso può infatti essere considerato unico per ogni singola area locale) e/o di ricevitori in doppia frequenza (L1 e L2). Quando il ritardo ionosferico è risolto attraverso la correzione differenziale bisogna fare attenzione alla lunghezza della baseline (cioè a quanto i ricevitori sono distanti). C'è una regola empirica che dice che la correzione si degrada per qualche cosa come 1 mm ogni 1 km, in quanto localmente cambiano le condizioni dell'atmosfera.

L'errore troposferico comporta un'altra deviazione della velocità da quella della luce nel vuoto. Essa è localmente unica per ogni osservatore GPS. Variazioni di temperatura, pressione e umidità possono contribuire alla variazione della velocità del segnale. Gli errori connessi con questo fenomeno sono meno fluttuanti rispetto a quelli ionosferici e quindi l'uso di opportuni modelli può ridurre di molto questo tipo di ritardo senza ricorrere alla doppia frequenza e alla correzione differenziale.

La riflessione contro ostacoli (multipath error) comporta errori che tendono a essere maggiori in condizioni statiche quando il ricevitore si trova in prossimità di superfici riflettenti molto ampie. Bisogna porre molta attenzione al posizionamento di stazioni di riferimento per evitare errori inaccettabili. La prima precauzione da prendere è quella di utilizzare antenne con angoli

di cut-off adeguati e posizionate in luoghi che minimizzino il problema. Esistono tecniche hardware (l'uso di chock rings, speciali "padelle" che vengono posizionate sotto i ricevitori in modo da eliminare i segnali riflessi) e software che limitano gli effetti di questo fenomeno.

Gli errori dovuti al ricevitore variano, ovviamente, da modello a modello. Inizialmente molti ricevitori commerciali erano di tipo sequenziale, nel senso che uno o due canali dividevano il carico dei segnali tracciati. Essendo che la tecnologia dei chip è migliorata, ora si lavora in parallelo su ricevitori multicanale. I più moderni ricevitori usano tutti una progettazione digitale che permette un basso rumore sul segnale e il progetto di soluzioni di tracciamento della fase.

Cosa significa tutto questo?

Ogni sistema fornisce degli errori ed è importante conoscerli per poter scegliere il ricevitore giusto per fare il lavoro giusto. Ciò in quanto il costo di ogni singolo ricevitore può variare da un minimo di circa 100 euro fino a 15-20.000 euro.

Questo costo dipende da:

- quanto bene sono misurati i segnali di correzione ambientale e la correzione è applicata dagli utilizzatori di GPS mobili (i.e. effemeridi, orologio, ionosfera, troposfera);
- quanto bene è selezionato il sito dell'antenna di riferimento (multipath error);

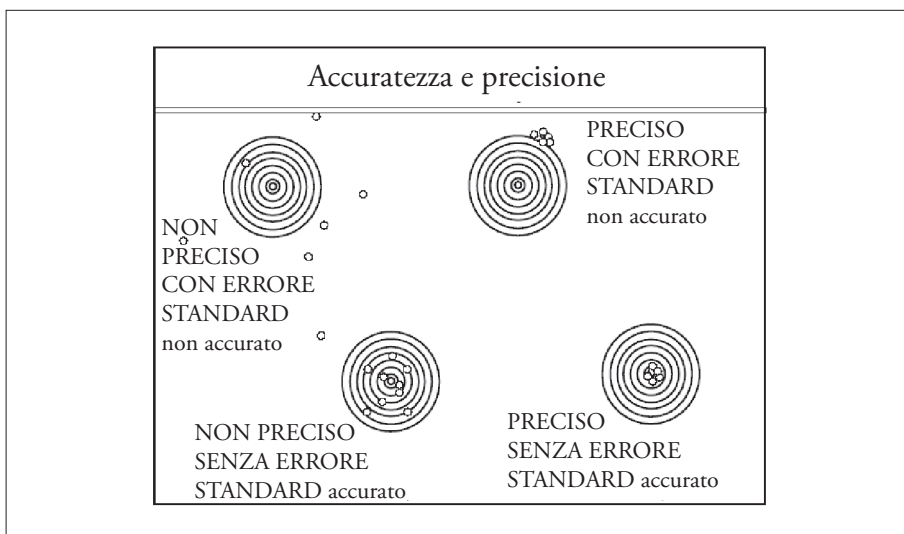


Fig. A.8 Concetti di accuratezza e precisione delle misure

PARAMETRO STATISTICO DI RIFERIMENTO	PROBABILITÀ CHE IL PUNTO RICADA ALL'INTERNO DEL CERCHIO DI MISURA DEFINITO DAL PARAMETRO DI RIFERIMENTO
CEP (circular error probability)	50%
RMS (root mean square) o Sigma o Errore medio	Dal 63 al 68%
R95 (radius 95)	95%
dRMS o 2RMS o 2 Sigma	Dal 95 al 98%

Tab. A.3 *Accuratezza di posizionamento orizzontale*

– quanto più elevata è la qualità del ricevitore (errori dei ricevitori).

In particolare per valutare tecnicamente la bontà di un ricevitore in funzione degli scopi per cui deve essere utilizzato è necessario conoscere le sue prestazioni in termini di accuratezza e di precisione (fig. A.8).

L'accuratezza spaziale rappresenta la discrepanza di posizione geografica di un oggetto rispetto al valore reale di posizione a terra. Viene misurata selezionando una serie di punti campione di cui viene valutata la posizione confrontandola con dati più accurati.

La precisione, invece, indica la dispersione dei valori di posizione di un dato elemento. Viene comunemente valutata mediante stime statistiche (tabb. A.3 e A.4). Quindi, a esempio, una deviazione standard bassa indica che la dispersione dei valori è molto piccola e che la precisione è buona.

Per dare evidenza di quale tipo di lavoro debba essere effettuato per arrivare a questi parametri, nella figura A.8 sono riportati i risultati di prova di un generico ricevitore tra l'altro impiegato su uno dei prototipi descritti nella memoria.

Ai nostri fini, relativi alla guida automatica, l'accuratezza ha a che vedere con la descrizione corretta del fenomeno che si vuole misurare. È importante nei rilievi topografici quando debbono essere effettuate delle misure statiche di punti topografici dati.

La precisione, invece, ha a che vedere con la ripetibilità della misura.

Così, per effettuare una completa ricopertura dei campi con passate effet-

	CEP	RMS	R95	dRMS
CEP	1	1,2	2,1	2,4
RMS	0,83	1	1,7	2
R95	0,48	0,59	1	1,2
dRMS	0,42	0,5	0,83	1

Tab. A.4 *Conversione dei parametri (stima di massima non corretta scientificamente)*

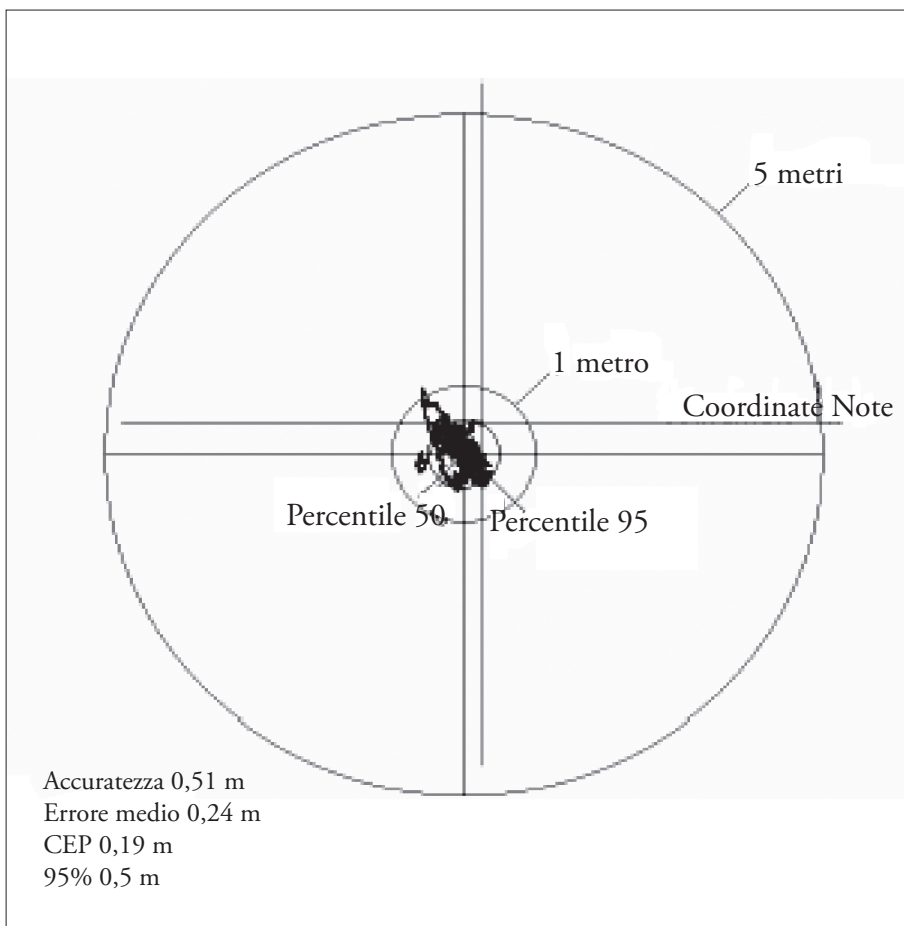


Fig. A.9 Risultati di misure statiche di posizionamento orizzontale di un generico ricevitore. I punti in prossimità del centro del grafico rappresentano i singoli fixing

tuate in fasi successivi con tempi che intercorrono tra un passaggio e l'altro abbastanza brevi (in genere inferiori a i 30 min) è importante una grande precisione, ma non è fondamentale l'accuratezza.

È basilare conoscere queste caratteristiche per poter capire le differenze dei differenti sistemi di navigazione che, in funzione delle prestazioni che si vogliono ottenere, utilizzano ricevitori che funzionano con differente tecnologia. Infatti possiamo avere ricevitori che operano:

- con differente modalità di misura (pseudorange, fase, integrata tra fase e pseudorange);

- in modo singolo o con correzione differenziale;
- per eseguire misure statiche o dinamiche.

3. MODALITÀ DI MISURA DELLA POSIZIONE CON SISTEMI GPS

Accuratezza e precisione sono in primo luogo influenzate dalla modalità di misura che viene impiegata, cioè dalla tecnica che si adotta per risalire alla distanza satellite-ricevitore.

Le misure con cui si perviene al posizionamento GPS possono essere essenzialmente raggruppate in due categorie: misure di *pseudoranges* (pseudodistanze) e misure di FASE sulla portante (“carrier phase”). Si tratta di due modalità di misura completamente diverse con le quali si ottengono due livelli di accuratezza e precisione ben distinti, adatti a impieghi differenti. Per ognuna di queste due soluzioni, poi, può essere o meno previsto l’impiego di una sola o due frequenze di ricezione, la correzione differenziale, l’impiego di particolari filtri software, differenti a seconda dell’applicazione, che hanno lo scopo di eliminare gli errori residui che comunque caratterizzano le misure di posizione.

3.1 Misure di *pseudoranges*

È il metodo concettualmente e praticamente più semplice, ma anche il meno preciso. Il ricevitore durante l’avviamento:

- riceve gli almanacchi,
- incomincia a tracciare i satelliti che superano di un certo numero di gradi l’orizzonte;
- mette in fase il tempo del suo orologio con il tempo dei satelliti (UTC).

Il tutto in un tempo che può varare da pochi secondi, quando il ricevitore si trova in un’area dove ha recentemente lavorato, fino a qualche minuto, qualora si trovi a essere acceso in siti in cui non ha mai operato.

Da questo momento in poi incomincia a generare, sui singoli canali, dei codici (*pseudoranges*) identici a quelli dei satelliti che traccia e a confrontarli con quelli in arrivo dai satelliti stessi. Tuttavia, i codici in arrivo avranno un certo ritardo. Confrontando le *pseudorange* del ricevitore con quelle provenienti dai satelliti verrà ricavato per ogni satellite un certo Δt di ritardo dal quale verrà ricavata, con la nota equazione $S = v * t$, la distanza D ricevitore satellite (fig. A.9). È sufficiente conoscere la posizione di 3 satelliti per effettuare la triangolazione che definisce la posizione P del ricevitore rispetto ai satelliti. È tuttavia

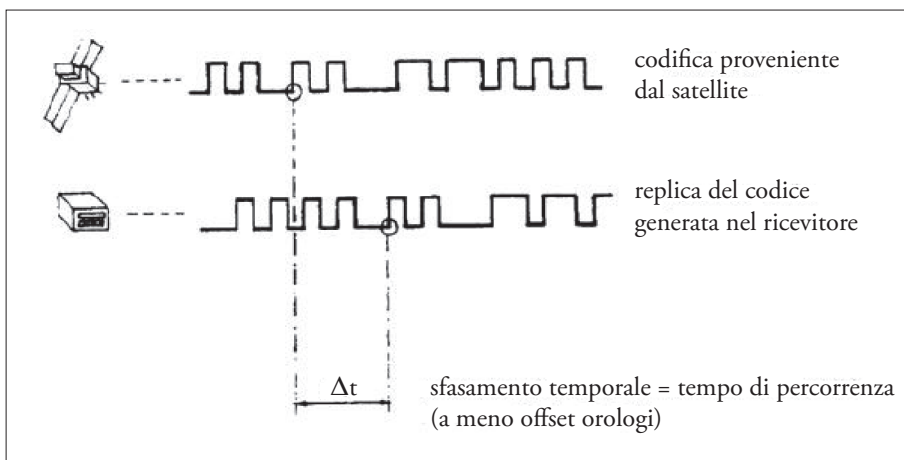


Fig. A.10 Concetto sul quale si basa il calcolo dello sfasamento che intercorre tra l'onda di pseudorange prodotta all'interno del ricevitore e l'identica onda di pseudorange che arriva in ritardo da un generico satellite

necessario conoscere la posizione di un ulteriore quarto satellite per poter correggere in modo preciso eventuali errori di trasmissione dell'orario da parte dei satelliti (il tempo scandito dal singolo satellite risulta diverso dal tempo relativo del singolo ricevitore). Si usa affermare che questo processo avviene epoca per epoca, cioè con la frequenza propria di acquisizione del segnale da parte dell'antenna. Nel caso di misure statiche i dati possono essere mediati per ridurre l'effetto degli errori random. Modelli matematici possono essere utilizzati per tenere conto del ritardo ionosferico e troposferico.

Nei casi più comuni il processo avviene utilizzando il C/A-code, dove C/A sta Coarse Acquisition (acquisizione larga) e rende chiaro l'utilizzo che gli ideatori del sistema avevano assegnato a questa misura. Questo segnale, peraltro, fino al 2000 era anche soggetto a inquinamento con la SA (Selected Availability), segnale random che, per ragioni militari, veniva aggiunto alla pseudorange per ulteriormente diminuire precisione e accuratezza delle misure. Sempre per il campo militare, come visto, è disponibile un secondo segnale del tipo pseudorange, il segnale P che è ancora affetto da attività di protezione (criptatura) da parte dell'apparato militare USA.

Quando si hanno a disposizione segnali in doppia frequenza (per esempio i due codici P sulla L1 e L2), si possono calcolare gli errori ionosferici (in quanto diverso è l'errore che per questo parametro si verifica sulle due frequenze) ed eliminarli. Ciò non è possibile nel campo civile per la pseudorange C/A.

In definitiva, il metodo per pseudorange è caratterizzato da una serie di approssimazioni che lo rendono poco preciso. Le principali incertezze riguardano le effemeridi orbitali dei satelliti e la velocità di propagazione del segnale nell'atmosfera (il comportamento è sensibilmente diverso nella ionosfera e nella troposfera). L'eliminazione degli errori dovuti alle imprecisioni delle effemeridi può avvenire con il post-processing.

Vi è inoltre un limite "intrinseco" di precisione del metodo dovuto alla elevata lunghezza d'onda del segnale modulato su cui si va a operare (rispettivamente 30 e 300 m per P e C/A). A causa di tutte queste incertezze, l'accuratezza nel posizionamento per misura di pseudorange con il codice C/A è dell'ordine dei 20 m sulle coordinate planimetriche e delle decine di metri sulla quota, del tutto insufficiente quindi ai fini topografici e per la guida automatica, ma adatto per alcune applicazioni di agricoltura di precisione e per il road mapping nel traffico autoveicolare terrestre.

Il metodo presenta, peraltro, numerosi vantaggi:

- la posizione viene ottenuta in tempo reale (dopo 2-3 minuti dall'accensione si ha il primo posizionamento, automaticamente visualizzato in coordinate geografiche e di quota, e l'aggiornamento è poi praticamente continuo);
- si opera con un solo ricevitore. Si tratta quindi di una tecnica particolarmente adatta alla navigazione; allo scopo esistono in commercio numerosi tipi di ricevitori con questa sola possibilità di misura, molto più semplici ed economici rispetto ai ricevitori "geodetici", che operano anche per misura di fase.

La praticità ed economicità del metodo per pseudorange fa sì che siano stati studiati perfezionamenti per migliorarne la risoluzione. Con tecniche particolari di cui si discuterà nel seguito (ad es. lo "pseudorange differenziale" oppure la tecnica "phase-smoothed pseudorange", la quale ultima presuppone tuttavia la misura di fase) la precisione di posizionamento può essere di molto migliorata. Per le misure topografiche, tuttavia, continua a preferirsi l'impiego di apparati a misura di fase data l'intrinseca stabilità dei rilievi effettuati con questi dispositivi.

3.2 Misure di fase

È una tecnica di misura concettualmente diversa da quella per pseudorange, anche se nella interpretazione geometrica si riconduce al principio base esposto all'inizio di misurare una distanza in funzione della velocità di trasmissione del segnale.

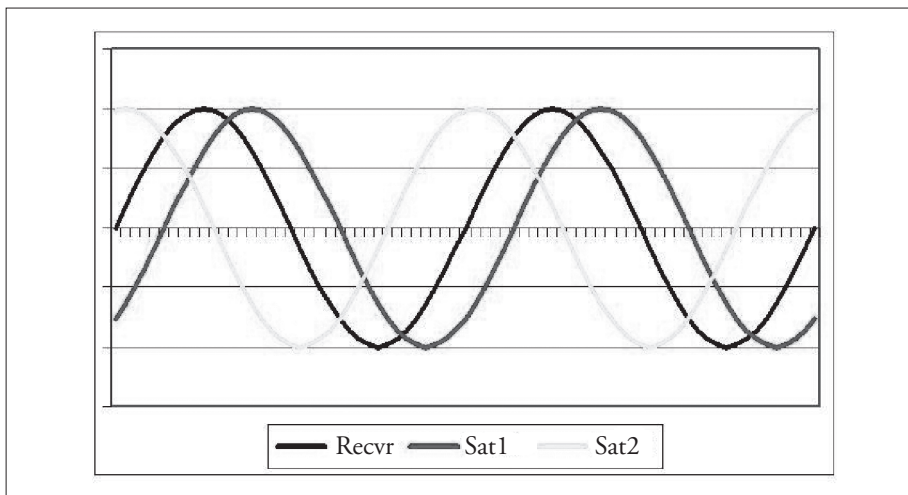


Fig. A.11 Concetto sul quale si basa il calcolo dello sfasamento che intercorre tra l'onda di portante di riferimento prodotta all'interno del ricevitore e l'identica onda portante che arriva in ritardo da un generico satellite

Con questa misura si considera direttamente il comportamento dell'onda radio portante, depurata dal segnale in codice a essa modulato ("sovraimpresso").

La misura consiste nel confrontare la fase della portante ("carrier phase") trasmessa dal satellite con quella di un segnale di pari frequenza generato nel ricevitore (fig. A.11).

Si intuisce subito come la precisione possa essere maggiore rispetto a quella della tecnica per pseudorange: si va a operare su un segnale di lunghezza d'onda molto inferiore (19 o 24 cm rispettivamente per la L1 e la L2 anziché 30 o 300 m per il P-code e per il C/A-code). Infatti la precisione di una misura può essere considerata approssimativamente pari a 1/50 della lunghezza d'onda considerata. Così avendo a disposizione le misure delle portanti si possono raggiungere precisioni centimetriche (tab. A.5).

Tuttavia questo è valido solo se si conosce il corretto numero di cicli interi che sono stati percorsi dall'onda per arrivare al ricevitore. Diversamente dalla misurazione del segnale C/A, la misurazione di questo numero di cicli è ambigua perché il ricevitore non è capace di "contare" direttamente il numero di cicli. Diversi metodi indiretti sono stati sviluppati per fare ciò, metodi che si differenziano a seconda che il ricevitore debba essere impiegato per misure statiche o cinematiche. In genere il problema si risolve utilizzando le tecniche differenziali che verranno descritte nel seguito. Concettualmente, tuttavia, è

	LUNGHEZZA D'ONDA [m]	PRECISIONE INTRINSECA [m]
C/A-code	300	6
P-code	30	0,6
L2	0,24	0,0048
L1	0,19	0,0038

Tab. A.5 *Precisione intrinseca raggiungibile utilizzando i diversi tipi di misura realizzabili da ricevitori via via sempre più raffinati*

possibile risolvere il problema anche utilizzando un singolo ricevitore. Per far questo vengono impiegati sofisticati metodi in grado di essere adottati anche su singoli ricevitori in movimento, cioè quelli che nel nostro caso sono usati per realizzare la guida automatica. Tipicamente, questi metodi di risoluzione dell'ambiguità usano sia il segnale (C/A o P) sia la fase, in un processo a fasi successive (fig. A.12). Inizialmente, una regione di incertezza (o volume di spazio) è definito attorno alla misura basata sul codice. In ogni caso questa regione ha una elevata probabilità di contenere la soluzione corretta e quindi è possibile risolvere il problema della ricerca dell'ambiguità all'interno di questo spazio.

Infine, una combinazione di valori di ambiguità di fase è scelta per ogni misura della portante in modo che la risultante soluzione:

1. sia all'interno dello spazio di ricerca;
2. minimizzi i valori residuali RMS.

Almeno cinque satelliti sono necessari in quanto un satellite ridondante è necessario per calcolare i residui (gli errori probabili). Il movimento dei satelliti assicura che i residui cresceranno per ogni soluzione che non è corretta. Solo la soluzione corretta (vera) continuerà a mantenere bassi valori residui.

Ovviamente più onde di differente lunghezza si hanno a disposizione, più facilmente può essere impostato il sistema di equazioni per determinare l'incognita degli n cicli per ogni satellite. In aggiunta a ciò, l'impiego di ricevitori capaci di lavorare in doppia frequenza offre la possibilità di creare ulteriori onde, sommando o sottraendo i due segnali di base. In particolare, utilizzando la differenza tra la L2 e L1 si arriva a produrre una nuova frequenza che ha una maggiore lunghezza d'onda. Questa, tecnicamente definita come "wide-lane" ha una lunghezza di circa 86 cm ed è in pratica pari al doppio della somma delle due lunghezze L1 e L2. In fase di elaborazione dei dati per la risoluzione dell'ambiguità ciò comporta un notevole vantaggio in quanto:

1. il numero di combinazioni che ricadono all'interno dell'area di ricerca definita con la pseudorange diminuisce con il cubo delle lunghezza d'onda;



Fig. A.12 Concetto sul quale si basa la risoluzione dell'ambiguità di fase

2. più vicina una soluzione falsa è a quella vera, maggiore è il numero di satelliti in movimento che sono richiesti per avere lo stesso ammontare di residui.

Inoltre, per il particolare comportamento delle due onde L1 e L2 nella ionosfera (il guadagno per le due lunghezze d'onda è opposto) si può eliminare quasi completamente l'errore ionosferico senza ricorrere a misure differenziali.

3.3 *Misure con impiego integrato di pseudorange e fase portante*

Ambedue le modalità di misura soffrono tuttavia di alcuni limiti intrinseci. Le misure di pseudorange, infatti, possono essere fortemente influenzate dagli effetti multipath, specie qualora la misura stessa venga eseguita in un ambiente con ampie superfici riflettenti.

Il ricorso alla misura di fase (specie se singola) senza pseudorange può dare adito, invece, a notevoli problemi sia di risoluzione dell'ambiguità sia inizialmente (possono essere necessari anche 20-30 minuti per arrivare a fissarla) sia in caso di perdita del segnale (cycle slips). Nel caso in cui si verifichino queste discontinuità nella misura il risultato finale può essere fortemente influenzato in termini di decremento di accuratezza e precisione. Se la discontinuità si verifica durante misure statiche, gli errori possono essere corretti con il post processing, mentre durante la navigazione ottenere un dato corretto rispetto al quale effettuare un posizionamento accurato e preciso è impossibile.

Per superare questi limiti si ricorre quindi:

- alla integrazione tra misure di pseudorange con quelle di fase (CDC algorithm Carrier-smoothed-code algorithm);
- all'impiego procedure matematiche standardizzate (filtri Kalman) che rendono ancora più consistente la misura nel tempo.

Per quanto riguarda lo smorzamento (lisciatura) delle osservazioni in pseudorange utilizzando misure di fase, questa è una tecnica che può ridurre notevolmente gli effetti multipath sfruttando il fatto che gli errori dovuti al rumore sul segnale di fase sono minori che non quelli che insistono sulla pseudorange. In altri termini, la distanza tra due punti misurata da un ricevitore in movimento in due istanti successivi dovrebbe essere uguale sia che sia misurata con la pseudorange oppure con la fase portante. Ma ciò non accade in realtà in quanto le misure di pseudorange sono molto più instabili che non quelle di fase. Per correggere la misura di pseudorange (smorzarla, lisciarla, cioè renderla stabile come la misura di fase) si adottano tecniche di differen-

ziazione tra misure di fase eseguite in almeno due epoche successive che consentono di pervenire a risultati di differenza di posizione che sono più precisi che non quelli che si otterrebbero utilizzando la pseudorange. È da sottolineare come, per applicare questa tecnica, non è necessario fissare l'ambiguità di fase, in quanto non è richiesta una misura assoluta, ma solo una misura relativa rispetto all'epoca precedente (Ford et al., 2003). In altri termini, non fissando l'ambiguità di fase la misura non dà una indicazione delle distanza vera tra satellite e ricevitore, ma questo non è importante in quanto si vuole solo valutare la differenza tra posizioni successive e confrontarle con le differenze ricavate con misure di pseudorange. Per la misura "assoluta", cioè per il dato di accuratezza, viene mantenuta come base la misura di pseudorange. La misura della variazione di fase integrata con quella di pseudorange è equivalente alla misura di una velocità media invece che a quella di una velocità istantanea e comporta quindi le medesime approssimazioni concettuali. Ovviamente sono richieste almeno due epoche per analizzare le differenze sulla fase, ma la stima delle medesime differenze diventa sempre più consistente man mano che si accumulano dati di epoche successive.

È importante mettere in evidenza i seguenti punti:

1. siccome le misure della fase portante non contengono nessuna informazione assoluta del numero di cicli (non viene risolta l'ambiguità di fase) non si ha nessun miglioramento dell'accuratezza, ma solo quello della precisione;
2. è importante che non ci siano cycle slip (cioè perdite del segnale di fase). A ogni interruzione di segnale il filtro deve infatti ripartire. Se ci sono molte interruzioni non può esserci lisciatura;
3. più il ricevitore è preciso nella misura della pseudorange, meno guadagna con la smorzatura.

Una evoluzione di questo concetto di phase smooting è quella che prevede che il ricevitore fissi un'ambiguità non come numero intero, ma come numero reale (ad esempio, al posto di numerare 110000000 o 110000001 cicli, se ne numerano 110000000,455). È chiaro che questa soluzione ha la sua base concettuale nella elaborazione statistica di serie di dati piuttosto che nella misura istantanea reale.

Per quanto riguarda, invece, le procedure matematiche che ricadono sotto la definizione di filtro Kalman si hanno numerose varianti che, almeno inizialmente, sono state derivate dal settore dell'elaborazione dei segnali elettrici. È subito da mettere in evidenza che impiegando questi filtri il risultato finale che fornirà il ricevitore non sarà più una misura reale di posizione, ma una specie di interpretazione nel tempo della medesima misura reale. Infatti, il

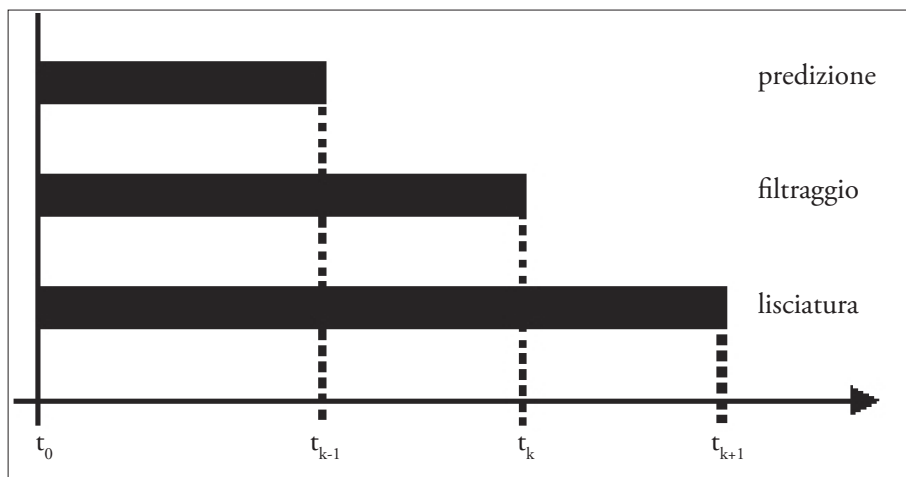


Fig. A.13 Concetti sui quali si basano i cosiddetti filtri Kalman

software Kalman installato nel ricevitore non fornisce il risultato di una misura di posizione nell'istante t , ma la stima pesata della posizione misurata:

- mediata con la previsione derivante da un modello cinematico che viene man mano costruito nel tempo;
- smorzata sulla base di una matrice di errori rilevati durante le epoche precedenti e continuamente aggiornata nel tempo.

I tre concetti su cui si basa un filtro Kalman sono i seguenti:

- predizione;
- filtraggio;
- smorzatura o lisciatura.

Supponiamo di avere un veicolo in movimento per il quale i parametri di interesse sono definiti all'istante t . Il processo di calcolo della posizione del veicolo in tempo reale (che equivale a dire, quale osservazione ho al tempo t_k , oppure che posizione è richiesta al tempo t_k) è definita come filtraggio. Il calcolo delle posizione più avanzate a un tempo susseguente a t_k , basata sulla rilevazione al tempo t_{k-1} , è definita come predizione, mentre la stima di dove il veicolo era (diciamo al tempo t_k) una volta che le misure sono state elaborate (post processing) al tempo t_{k+1} , sono definite come smorzatura o lisciatura.

Assumiamo uno stato iniziale del vettore e un modello cinematico, la predizione dei parametri è prima presentata indipendentemente da ogni altra considerazione. La predizione è unita con le misure degli errori che si prevede che si verifichino sulla base delle misure precedenti (filtro) e sulla base della

previsione futura derivante dal comportamento del modello (smorzatura). In questo modo si possono avere dei ricevitori montati su un'auto che, una volta entrati in galleria continuano a tracciare la rotta e a fornire dati di navigazione pur non ricevendo il segnale dei satelliti. È chiaro che questo porta a un rallentamento della reazione del sistema quando, a esempio, si seguono dei tracciati non rettilinei o si hanno frequenti cambi di velocità.

Il filtro di Kalman è quindi un algoritmo utilizzato per l'elaborazione dei dati misurati costruito sulla base di una media ragionata tra il prossimo valore predetto e il prossimo valore stimato. Questo filtro è spesso utilizzato per ottenere una migliore valutazione di un dato ottenuto dalla lettura di più sensori, ognuno caratterizzato da un rumore di misura avente caratteristiche differenti nel tempo (e quindi nella frequenza).

Per costruire un filtro di Kalman sono necessari i seguenti ingredienti:

- una serie di misure sul sistema da stimare;
- la conoscenza di un modello matematico lineare descrittivo del sistema;
- il modello statistico dei rumori sulle misure.

Il filtro può essere applicato sia per misure di fase, sia per misure di pseudorange, sia, infine, per il caso più complesso di misure di fase integrate con misure di pseudorange. Come accennato, queste metodologie sono sempre più integrate come equipaggiamento standard dei ricevitori utilizzati nella navigazione, anche se un certo utilizzo ne viene fatto per le misure statiche. È inoltre importante sottolineare ancora come questo sia possibile nella navigazione in quanto in molti casi questa non necessita di elevati standard di accuratezza (importante per le misure topografiche) ma di elevati standard di precisione. In tutti i casi, è molto importante conoscere profondamente il comportamento di queste tecniche di elaborazione dei segnali perché ognuna di esse è studiata per fornire prestazioni che si adattano a specifici compiti. In particolare i filtri Kalman in genere operano bene solo entro specifici limiti di velocità che debbono essere rispettati. Così una loro applicazione nel settore agricolo, dove le velocità di avanzamento sono molto più limitate che non nel settore automobilistico e aereo, può portare a notevoli errori di navigazione.

Pertanto, esistono anche ricevitori che sono stati specificatamente studiati per il loro impiego nel settore agricolo e sono quindi ottimizzati in questo senso. Ci si riferisce in particolare al ricevitore NAV2000 che è stato messo a punto dalla NAVCOM, JD per essere utilizzato all'interno del sistema Starfire. Questo ricevitore opera su ambedue le fasi L1 ed L2. Esso è inoltre in grado, grazie a una particolare tecnica matematica di decriptazione, di estrarre il segnale P criptato sulla fase L2. Ha quindi la possibilità di eseguire una doppia misura di posizione sulle due pseudorange principali e di con-

frontarle per risolvere, come vedremo nel seguito, il problema di eliminare l'errore ionosferico. Inoltre, esso utilizza le sue portanti per effettuare una stima flottante dell'ambiguità di fase che si avvicini il più possibile all'unità di ciclo. Questa stima viene utilizzata nel processo di smorzatura delle pseudorange in modo da stabilizzare (lisciare) profondamente i dati delle stesse. La registrazione degli errori che man mano vengono osservati sulle pseudorange, infine, viene utilizzata all'interno di un filtro Kalman per mettere a punto il segnale di controllo della navigazione da trasmettere alla piattaforma (sia essa un trattore, un veicolo navale, un'automobile, ecc.) su cui il ricevitore è installato. Ovviamente, il ricevitore in discussione, opera in modo differenziale, secondo le tecniche di cui si discute nel seguito.

3.4 Misure differenziali

Gran parte degli errori che influiscono sulla misurazione della posizione dei satelliti è completamente eliminabile, o può almeno essere significativamente ridotta, utilizzando le tecniche di misurazione differenziale. Ciò grazie al fatto che esiste una buona correlazione tra gli errori di misura e la posizione

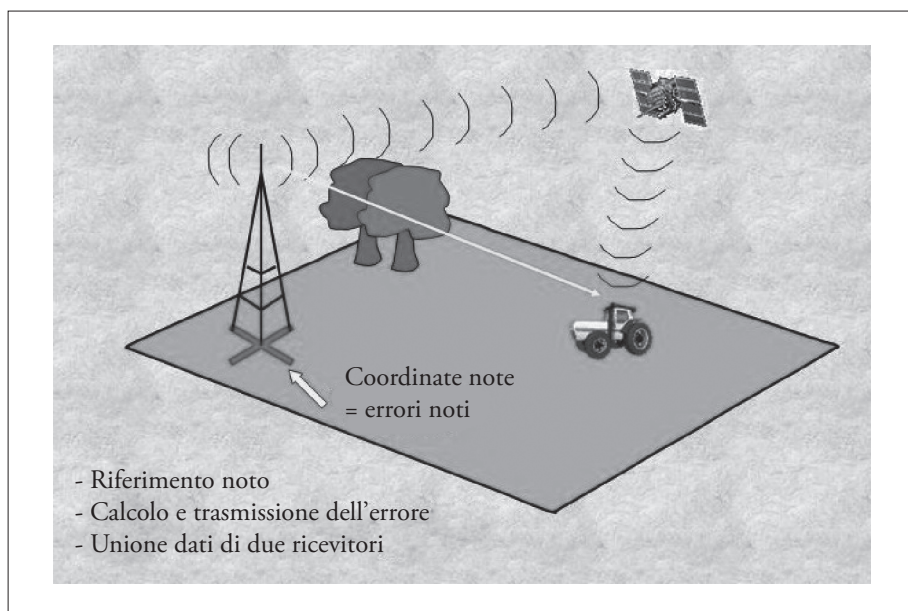


Fig. A.14 Concetto sul quale si basa la correzione differenziale

Fonte di errore	LIMITE TIPICO MASSIMO DI ERRORE PER LE DIVERSE VOCI	
	Senza correzione differenziale [m]	Con correzione differenziale [m]
Orologio	1	
Efemeridi	1	
Troposfera	1	
Ionosfera	10	
Rumore sulla pseudo range	1	1
Rumore componenti interni ricevitore	1	1
Errore di riflessione multipath	0,5	0,5
Totale complessivo mediato tra le diverse voci (RMS)	10	1,5
Errore * PDOP (con PDOP=4 valore standard)	40	6

Tab. A.6 *Confronto fra prestazioni ottenibili tra ricevitori del medesimo standard qualitativo funzionati senza e con correzione differenziale*

spaziale dei ricevitori.

Il concetto base di questa tecnica (fig. A.14) è l'impiego di dati acquisiti contemporaneamente da almeno due ricevitori denominati:

- il primo, master, in genere a punto fisso (ma ciò non è necessariamente indispensabile), che misura gli errori rispetto al punto (conosciuto) in cui è posizionato e li trasmette;
- il secondo, rover (fisso o mobile), che esegue la misura depurandola dagli errori.

L'impiego di queste soluzioni si è notevolmente diffuso nel passato nel settore civile anche a causa del fatto che fino al 2000 il segnale C/A era interessato da un disturbo di origine militare (SA – Selected Availability) che degradava di molto le prestazioni dei ricevitori. Una volta caduta la SA, la tecnologia DGPS non è stata abbandonata, ma si è evoluta verso prestazioni sempre più elevate in termini di affidabilità, accuratezza e precisione. Oggi, sempre nel settore civile, è difficile trovare ricevitori che, almeno come optional, non prevedano un qualche impiego di correzioni differenziali.

Nella tabella A.6 si riportano a esempio le differenti prestazioni raggiungibili con ricevitori con le medesime caratteristiche costruttive ricorrendo o meno alla correzione differenziale. Si è usi affermare che la stazione master debba essere posizionata fissa in un sito di coordinate note a priori. Tuttavia questo non è necessariamente vero. Il master può essere anche posizionato su veicoli in movimento.

Quello che conta è che la correzione sia rappresentata dagli errori che vengono individuati rispetto a quella che, a priori o a posteriori, viene calcolata e definita come posizione o traiettoria nota. In aggiunta a ciò, invece che un singolo ricevitore, possono essere utilizzati più master che calcolano contemporaneamente gli errori che poi vengono mediati prima di essere inviati al rover. In questo ultimo caso, è importante che sia nota la reciproca posizione dei ricevitori master stessi (la posizione relativa di ognuno di essi). Le tecniche di DGPS possono essere utilizzate per applicazioni sia statiche, sia cinematiche e possono utilizzare misure di pseudorange o di fase portante.

Attualmente esistono in tutto il mondo migliaia di “reti di stazioni permanenti”, intendendo con questo termine un’architettura che ha come modulo la singola stazione permanente replicata n volte su un’area più o meno vasta, a seconda degli scopi per cui la rete è nata. Le stazioni possono trovarsi in una condizione “isolata” o essere organizzate in reti nelle quali i dati dei singoli ricevitori vengono concentrati, con una latenza che va dalle 24 ore di tempo al tempo reale, a un centro che smista, archivia e rende disponibili all’utenza questi dati. Le stazioni e i centri di controllo hanno la possibilità di trasmettere in tempo reale messaggi di correzione in codice o in fase con un raggio di azione variabile, compatibilmente con il mezzo trasmissivo impiegato, dalle centinaia di chilometri a 15 km di distanza. Da un punto di vista del rover, secondo questa architettura sono attualmente impiegate tre tipologie di reti di stazioni permanenti:

1. reti per le osservazioni in pseudorange o pseudorange smorzata (lisciata) con la fase. Permettono un’accuratezza di 0,5-10 m dipendente dal tipo di ricevitore, dalla distanza dalla stazione, ecc.;
2. reti per osservazioni di fase con ambiguità non fissata (float). Sono caratterizzate dal fatto che l’algoritmo OTF (On The Flight) risolve l’ambiguità con numeri reali. Operano con ricevitori che dispongono sia della sola L1 oppure della L1/L2 (libero dall’errore ionosferico). La precisione varia da 0,10 a 0,50 m;
3. reti RTK. In questo caso l’ambiguità sono risolte dal rover come interi (quando possibile). Sono impiegabili ricevitori L1/L2. La precisione ottenibile è $< 0,10$ m fino a 20 km dalla stazione.

Un utente che voglia sfruttare questa architettura modulare stabilisce in base alla propria posizione a quale stazione di trasmissione appoggiarsi. Con un posizionamento differenziale di codice sceglierà la stazione più conveniente in termini di costi o di sistema trasmissivo impiegato. Per un posizionamento statico di precisione impiegherà le 2-3 stazioni più vicine avvantaggiandosi di una architettura di rete. Per un posizionamento cinematico,

anch'esso di precisione, sfrutterà la singola stazione più vicina a sé. Oppure provvederà a costruirsi esso stesso una stazione di riferimento impiegando un master proprio a servizio del ricevitore rover.

I limiti di questa architettura, nel posizionamento cinematico di precisione (punto 3), dipendono dal fatto che ogni stazione ha una sua rete d'azione e l'intero territorio può essere servito solo affiancando stazioni l'una all'altra con un'interdistanza di 30-40 km. Infatti, fino a che la distanza che separa le due stazioni non supera i valori indicati, gli errori, principalmente di ritardo ionosferico, troposferico e errori di orbita dei satelliti, hanno più o meno la stessa entità sia sulla stazione base, sia sul rover, e nel processo di differenziazione vengono in gran parte eliminati. Man mano che la distanza master-rover aumenta, per effetto della decorrelazione spaziale, le differenze di cui sopra presenti sul master e sul rover divergono con effetti che nell'RTK possono portare a errori nel fissaggio dell'ambiguità di fase e, comunque, all'aumento dei tempi necessari per risolvere l'ambiguità.

Per coprire queste esigenze è chiaro che necessiterebbe uno sforzo economico nel posizionare sul territorio un numero di stazioni veramente rilevante. Non da ultimo sarebbe necessario infatti sovrapporre i raggi delle diverse stazioni master per garantire l'integrità del sistema nel caso di danni o malfunzionamenti delle singole stazioni.

La più importante rete è comunque la rete EUREF che mette a disposizione in formato rinex i dati della posizione delle proprie stazioni e al momento opera solo per misure statiche.

3.4.1 Applicazioni statiche

Rappresentano probabilmente la prima applicazione commerciale del DGPS in quanto in questo caso non è richiesta la disponibilità continua dei segnali essendo possibile operare in post processing. L'utilizzo convenzionale di queste tecniche DGPS è per le rilevazioni topografiche. Una stazione base è posta in un punto fisso georeferenziato e una seconda è posizionata sul punto da rilevare. Le misure dei dati GPS vengono registrate in ambedue i siti e poi elaborate a punto fisso. In genere, vista la necessità di accuratezza di queste misure, si utilizzano dati di fase. Tuttavia misure di pseudorange possono essere utilizzate per aiutare il processo.

3.4.1.1 Misure con differenze di pseudorange

Sono state usate principalmente agli inizi. Quasi sempre lo scopo era quello di misurare la differenza del vettore di posizione tra i due punti di rilievo.

3.4.1.2 Misure con differenze di fase

Generalmente la risoluzione dell'ambiguità di fase per le misure topografiche statiche si effettua attraverso il metodo della tripla differenziazione. Si tratta di un metodo geometrico che si basa sul fatto che i ricevitori rimangono immobili per un tempo consistente durante la misura (fig. A.15). Esso tiene conto che le orbite dei satelliti sono conosciute ed è quindi possibile calcolare a posteriori il tragitto che gli stessi hanno percorso durante la misura. Utilizzando questo e ricorrendo a tecniche di triangolazione si risolve il ciclo dell'ambiguità di fase in diversi momenti successivi della misura. Esisterà un unico gruppo di soluzioni in grado di soddisfare geometricamente il problema per tutti i punti.

La condizione necessaria è che non ci siano perdite di contatto con i satelliti fra gli istanti t_1 e t_2 .

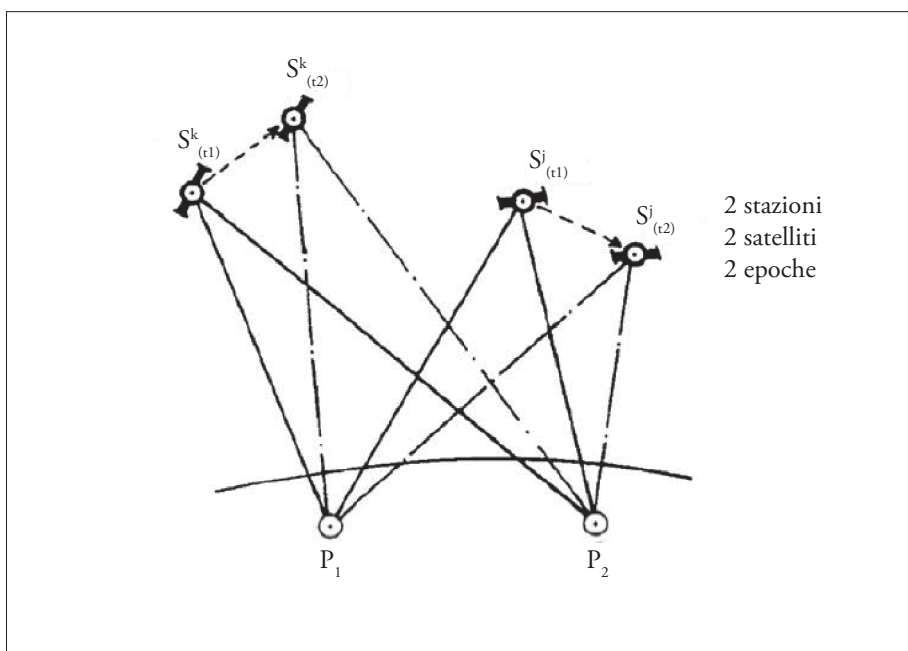


Fig. A.15 Schema concettuale di base per l'esecuzione della correzione differenziale in metodo statico secondo le differenze triple

Gli istanti t_1 e t_2 devono essere abbastanza distanziati, altrimenti si ottengono differenze fra quantità quasi uguali (ad es. $P2K[t_2] - P2K[t_1]$), ovvero termini molto piccoli che determinano una “instabilità numerica” della soluzione. La sessione di misura deve avere quindi una certa durata (qualche decina di minuti) ed è per questo che si parla in questo caso di GPS statico.

3.4.2 Tecniche cinematiche

Le medesime differenze di pseudorange e di fase sono pure usate per eseguire misure con ricevitore rover in movimento (da qui il termine cinematico). Tuttavia è diventato linguaggio comune quello di definire cinematico solo l'impiego di differenze con fase portante con particolare riferimento al termine RTK (Real Time Kinematic GPS processing). Invece, quando si impiegano differenze di pseudorange si usa parlare di Local-area differential GPS o Wide Area differential GPS. Nel seguito, prima verranno descritte queste ultime e successivamente si affronterà il tema relativo all'RTK.

3.4.2.1 GPS differenziale in area locale (Local-area differential GPS)

Si basa sull'impiego di stazioni di correzioni “locali” intendendo con tale termine anche stazioni che distano tra loro decine o poche centinaia di km.

Vi sono diversi livelli di DGPS locale.

Il cosiddetto “poor-man DGPS” calcola e invia un solo dato globale di correzione basato su differenze di pseudorange, ovvero tra le coordinate di posizione calcolata e quella reale. La precisione che se ne ricava è piuttosto bassa, l'errore è dell'ordine delle decine di metri.

Il DGPS classico commerciale calcola le correzioni da applicare alle singole misure di pseudorange dei singoli satelliti e le trasmette secondo lo standard RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Service – USA). In questo settore, prima in USA e Canada poi anche in Centro e Sud America vengono impiegate le reti costiere di radiofari per distribuire via radio il codice RTCM. Questi servizi sono gratuiti ma coprono solamente le coste dei paesi di cui si è detto. In Italia a oggi non esiste ancora questo servizio. Recentemente (fine 2004) la Guardia Costiera Italiana ha affidato alla società Codevintec la costituzione di una rete di stazioni di riferimento GPS. Queste stazioni trasmetteranno gratuitamente la correzione differenziale attraverso i radiofari in HF secondo gli standard RTCM.

In Nord Europa e Canada, specialmente nelle aree urbane, molte emit-

tenti radio private rilasciano a pagamento il segnale RTCM su base locale. In ogni caso la banda inizialmente destinata a questi scopi è stata recentemente utilizzata per altre funzioni.

Una interessante alternativa è quella che prevede la trasmissione via telefonia cellulare.

Comunque, la soluzione attualmente più utilizzata nel settore agricolo in Italia è quella che prevede la trasmissione dei dati via satellite. Si tratta in tal caso di satelliti che vengono impiegati per le trasmissioni televisive (EUTEL-SAT). I servizi vengono forniti da società ormai consolidate e che forniscono i dati di correzione sulla base del pagamento di un canone (Racal, Oministar, ecc.).

Peraltro è molto probabile che tipi particolari di queste reti locali (denominate LAAS – Local Area Augmentation System) sorgeranno e si stabilizzeranno almeno in vicinanza dei principali scali aerei in accoppiamento con i sistemi Wide Area di cui si parlerà nel seguito, in modo da aumentare l'affidabilità dei medesimi in fase di atterraggio e decollo degli aeromobili. Questa, al momento, rappresenta tuttavia solo una mera aspettativa.

3.4.2.2 GPS differenziale su larga area (Wide Area Differential GPS – WADGPS)

Per superare i limiti delle stazioni locali di riferimento e per fornire agli utenti un sistema di correzione differenziale con elevate caratteristiche di integrità, sono stati sviluppati i cosiddetti sistemi di correzione differenziale su larga area altrimenti detti Sistemi SBAS (Satellite Based Augmentation Systems): essi consentono, attraverso l'utilizzo di satelliti geostazionari (GEO-Geostationary Earth Orbit) e una rete di stazioni terrestri permanenti (RIMS-Reference & Integrity Monitor Station), di creare un modello delle diverse cause di errore e un corrispondente “vettore delle correzioni”. Quest'ultimo, trasmesso dai satelliti geostazionari, viene utilizzato in tempo reale dai ricevitori GPS implementati con opzione WAAS/EGNOS per calcolare le correzioni da applicare alle singole misure di “pseudorange” (fig. A.16).

Tra tutti, il sistema WAAS (Wide Area Augmentation System) esemplifica le caratteristiche che sono alla base della impostazione GPS – WADGPS. Esso è stato inizialmente sviluppato dalla Agenzia Aerospaziale americana per il controllo del traffico aereo.

Tuttavia, per il settore agricolo, il sistema STARFIRE, completamente privato e a funzionamento differente da quello WASS EGNOS, è particolarmente importante in quanto è sviluppato e mantenuto da una società posse-

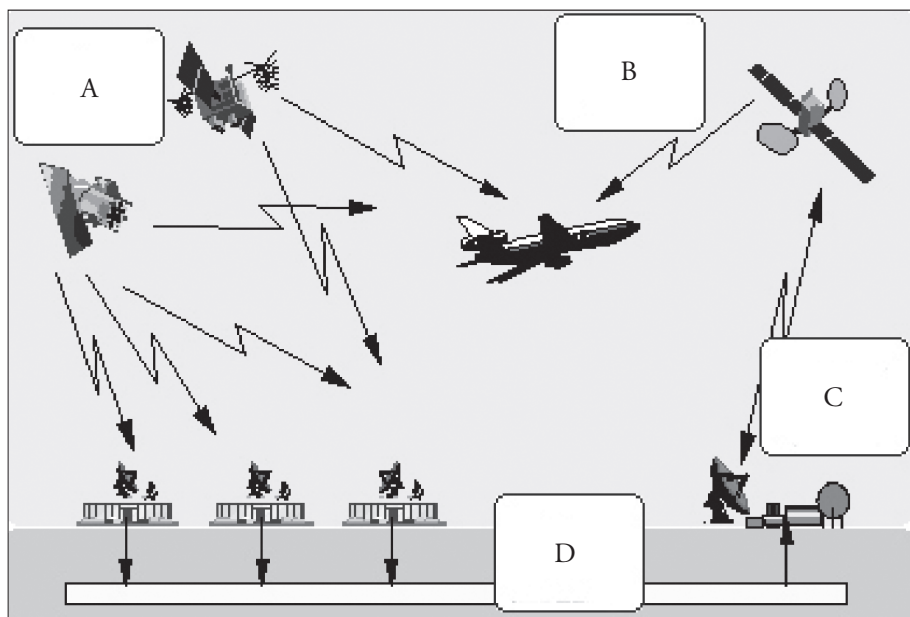


Fig. A.16 Schema concettuale di funzionamento di un sistema WADGPS per il traffico aereo. A. Segnale di navigazione GPS/GLONASS; B. Correzione degli errori di orologio e di effemeridi; C. Calcolo degli errori di orologio e effemeridi; D. Misure di pseudorange non influenzate dagli errori troposferico e ionosferico

duta dal principale costruttore mondiale di macchine agricole (John Deere; Sharpe et al., 2005).

Tipicamente un WADGPS prevede la costituzione di una rete di stazioni di riferimento a terra in numero da 10 a 50 su base continentale. Esse utilizzano ricevitori in doppia frequenza (L1 e L2), anche se la correzione che essi forniscono è in genere limitata alla frequenza L1 (non così, vedremo, per lo STARFIRE). Nelle stazioni di riferimento, infatti i ricevitori in doppia frequenza sono utilizzati per produrre misure del ritardo ionosferico che vengono poi utilizzate per fornire ai ricevitori vere e proprie mappe di ritardo ionosferico differenziate su vasta area locale.

In aggiunta a ciò, la stazione di riferimento è utilizzata per calcolare le correzioni orbitali che, pure, sono inviate ai ricevitori, sia pure con una frequenza di trasmissione del segnale inferiore che non quella relativa ai parametri ionosferici. Così, e a esempio, il sistema WASS provvede a trasmettere ai ricevitori 3 tipi di segnale di errore:

- a elevata frequenza, per quanto riguarda la correzione del codice di pseu-

dorange e degli orologi;

- a media frequenza, per la correzione degli errori ionosferici;
- a lenta frequenza, per la correzione degli errori delle effemeridi.

La trasmissione avviene da parte di un satellite in orbita geostazionaria utilizzando la banda L1. Quindi i ricevitori che operano secondo questa tecnica differenziale hanno generalmente due canali abilitati WASS sui quali ricevono i segnali dei due satelliti geostazionari.

Il formato del pacchetto di correzioni è denominato SBAS (satellite-based augmentation system). Gli utilizzatori del sistema WASS sono poi essi stessi in carico di calcolarsi, mediante uno specifico modello, la correzione degli errori troposferici. Al contrario di quanto visto sopra per i segnali in formato RTCM, in questo caso il ricevitore non deve decriptare il segnale che è gratuito.

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) è stato sviluppato, analogamente al sistema WAAS (Wide Area Augmentation System), per realizzare in ambito europeo un servizio SBAS (Satellite-Based Augmentation System) destinato alla navigazione aerea, marittima e terrestre.

EGNOS è stato ideato e progettato per migliorare i livelli di:

- “Accuracy” orizzontale e verticale, rispettivamente: 1-2m e 3-5m, attraverso la trasmissione di correzioni WADGPS;
- “Integrity” attraverso la ridondanza del sistema e la capacità di informare gli utilizzatori entro 6 s in caso di guasti;
- “Availability” per mezzo della trasmissione di segnali GPS-like attraverso i tre satelliti GEO (INMARSAT AOR-E, IOR e ARTEMIS ESA) costituenti il segmento spaziale geostazionario del sistema.

L'accuratezza raggiunta da questo sistema (<2 m) diventa inferiore poi (fino a 0,5 m RMS su base giornaliera) utilizzando ricevitori sofisticati con smorzamento degli errori di pseudorange attraverso misure di fase portante e applicazione di filtri tipo Kalman. In più, per la navigazione, con tali ricevitori si possono raggiungere, su base oraria, valori di precisione inferiori a 0,5 m e quindi sufficienti a soddisfare le esigenze di un sistema di guida automatica per molte delle operazioni agricole.

Come detto, caso particolare di WADGPS è quello sviluppato dalla NAVCOM, società nata in grembo alla NASA e successivamente acquistata da JD per sviluppare un sistema di posizionamento proprietario da installare sulle proprie macchine per sviluppare l'agricoltura di precisione e la guida automatica.

Esso si basa su stazioni di riferimento (circa 20) diffuse negli USA, in Australia, in Europa e in Sud America. A livello di queste stazioni vengono eseguite misure di precisione di pseudorange (sia C/A che P, attraverso un

algoritmo proprietario di decriptazione) e di fase (per ambedue la L1 e la L2). I dati vengono trasmessi a due stazioni di riferimento (hub) che provvedono a elaborarli in modo da produrre correzioni per i segnali in codice privi di ritardo ionosferico e corretti per quanto riguarda gli errori multipath. Il pacchetto di segnali di correzione così formato (denominato GIPSY e spedito in tempo reale – RTG) viene inoltrato tramite un satellite privato verso i ricevitori utente. A differenza degli altri tipi di sistemi, in questo caso anche i ricevitori rover sono in doppia frequenza (L1 e L2) e provvedono autonomamente a correggere l'errore ionosferico. Non hanno così la necessità di ricevere dati di correzione dell'errore di ritardo ionosferico e, quindi, il pacchetto GIPSY, non comprendendo dati inerenti a questo errore, è molto semplice e può essere utilizzato su base continentale. Due sono i principali vantaggi dell'avere un unico set consolidato di correzioni per l'intera area continentale servita:

1. la larghezza di banda richiesta dalle comunicazioni del satellite geostazionario sono minimizzate. Questo porta a un risparmio non indifferente sui costi di leasing del canale di trasmissione satellitare che sono grossomodo proporzionali alla larghezza di banda stessa;
2. tutti i calcoli sono effettuati in modo centralizzato invece di essere distribuiti sui GPS mobili in funzione di modelli locali. Questo permette di aggiornare l'algoritmo frequentemente senza dover aggiornare il ricevitore.

Quindi tutto è impostato su un ricevitore particolare (NCT 2000D) a doppia frequenza. Esso è in grado di:

- decriptare (quasi completamente) il codice Y entro il codice P;
- utilizzare una tecnica particolare (brevettata) per la quasi completa eliminazione dell'errore multipath che si basa proprio sul fatto di poter accedere alle doppie misure di C/A e P;
- usare una tecnica particolare (anch'essa brevettata) per sincronizzare l'orologio interno con il tempo UTM;
- utilizzare le due frequenze L1 e L2 per smorzare (lisciare) i codici C/A e P;
- fissare un'ambiguità di fase flottante in forma di numero reale;
- avere un modello interno per il calcolo dell'errore troposferico a partire dai dati dei singoli satelliti;
- possedere un filtro Kalman per elaborare una soluzione di navigazione "consistente" da inviare alla piattaforma da controllare (sia essa un trattore, una nave, un altro tipo di veicolo).

In definitiva, il risultato di questo approccio porta ad avvicinare la accuratezza di rilievo di questi ricevitori a quella dei ricevitori che utilizzano la correzione RTK con rete locale di correzione per differenze di fase o con stazione fissa dedicata. La NAVCOM, infatti, sulla sua comunicazione com-

merciale riporta per quali ricevitori un errore orizzontale inferiore ai 10 cm su base giornaliera (RMS). Lo stesso ricevitore può essere impiegato utilizzando il segnale di correzione WASS ottenendo un'accuratezza di 0,5 m (RMS). In altri termini, utilizzando il servizio a pagamento RTG (STARFIRE™) si ha un livello di accuratezza di misura intermedio tra quello proprio della correzione WASS (gratuita) e quello della correzione RTK vera e propria che richiede di appoggiarsi su una rete locale o di utilizzare un secondo ricevitore proprio. Da notare, tuttavia, che i medesimi ricevitori NCT 2000D vengono venduti con l'opzione per utilizzare il segnale SBAS WASS. Mai come in questo caso vale la pena di ricordare il vecchio detto: chi ha orecchie per intendere, intenda!

3.4.2.3 Correzione differenziale RTK

La correzione RTK rappresenta per certi versi la frontiera tecnologica di tutte le misure di posizione basate sul GPS. Infatti, per quanto riguarda le misure topografiche essa rappresenta, qualora non sia richiesta un'accuratezza millimetrica, la naturale evoluzione delle misure OTF (On The Flight) che tendono cioè a superare il limite delle tradizionali misure statiche dove si deve mantenere il ricevitore rover sulla stazione di misura per lungo tempo. Ovviamente, l'avere a disposizione una tecnica e dei ricevitori che consentono di spostarsi frequentemente da un punto di rilievo all'altro mantenendo costante nel tempo uno standard centimetrico di accuratezza e precisione rappresenta un notevole elemento di riduzione dei costi delle missioni topografiche. Peraltro, invece, sul versante della navigazione, a oggi, non esiste possibilità di effettuarla con elevati standard di precisione (con limite inferiore ai 5 cm) se non ricorrendo a una misura differenziale con ricevitori (in fase singola o doppia) in grado di risolvere il problema dell'ambiguità di fase. Come sopra accennato, gli algoritmi RTK prevedono tecniche che in prima battuta definiscono uno spazio di ricerca, generalmente impiegando misure di pseudorange, all'interno del quale procedere poi alla definizione di un valore intero del numero di cicli che mantengano costanti nel tempo gli errori tra un punto e l'altro di misura.

Così, è oggettivamente preferibile adottare questa tecnica di risoluzione impiegando due o più ricevitori operanti secondo la procedura differenziale di cui si sta qui discutendo che non operando con un singolo ricevitore. Infatti utilizzando due ricevitori, in collegamento fra loro, la possibilità di risolvere il problema senza ambiguità aumenta notevolmente in quanto, da una parte, minore risulta l'ampiezza del segmento spaziale di ricerca in cui operare, ciò in quanto la misura attraverso le pseudorange è molto più accurata e precisa

se eseguita con tecniche differenziali, dall'altro, l'avere a disposizione un ricevitore fisso consente di ottenere un segnale più stabile a cui riferire le misure dal ricevitore rover in caso di parità del segnale. Le soluzioni algoritmiche che permettono di operare in questo senso sono ormai numerosissime e si evolvono migliorando le prestazioni quasi di mese in mese.

La trasmissione del segnale dal master (o dalla rete master) al rover avviene poi con i diversi sistemi trasmissivi che più si adattano all'ambiente di misura (via radio, telefono, internet, ecc.) utilizzando lo standard RTCM. Allo scopo, all'interno del medesimo standard, sono destinati una serie di messaggi che sono codificati per il cosiddetto posizionamento di precisione. Su questi canali possono essere trasmessi dati grezzi di misura di fase oppure direttamente le correzioni da applicare. Gli stessi possono avere formato grezzo oppure formato proprietario (in grado di comprimere – zippare – i dati per non sovraccaricare l'onda portante). Ovviamente in quest'ultimo caso è necessario utilizzare ricevitori rover in grado di leggere il formato proprietario.

In agricoltura, e con riferimento al controllo automatico della guida di mezzi in campo, l'impiego di stazioni di riferimento pubbliche o private che trasmettono dati di correzione RTK non ha trovato ancora diffusione. Il problema è quello della degradazione del segnale che è di 1 cm ogni 10 km. Ovvio che avendo a disposizione sistemi in LADGPS e, qual che è ancor più rivoluzionario, WADGPS che, a seconda delle versioni, possono raggiungere accuratizie giornaliere di 0,1-0,4 m è difficile giustificare una costosa tecnica RTK se non si ha a disposizione una soluzione in cui il master è particolarmente vicino al rover.

Qualora non si voglia risolvere il problema della correzione utilizzando una stazione di posizionamento propria in cui si installa un ricevitore master munito di radio e relativa antenna, si può ricorrere a reti locali. Si tratta, come sopra accennato, di singoli, associazioni di professionisti, Enti pubblici più o meno legati al settore della ricerca che, utilizzando in genere ricevitori in doppia frequenza e la trasmissione su portanti in radiofrequenza, distribuiscono il segnale localmente con condizioni di pagamento molto variabili. È un settore nel quale in Italia agiscono numerosi attori ancor oggi caratterizzato da una mancanza di programmazione che rende il panorama molto confuso. La più importante rete è comunque la rete EUREF che mette a disposizione in formato rinex i dati della posizione delle proprie stazioni e al momento opera solo per misure statiche.

Comportamento geometrico e dinamico del mezzo durante la navigazione in campo

La realizzazione di un sistema di guida basato sul GPS non può avere successo se non si tiene conto anche dell'architettura delle macchine che debbono operare in campo e della dinamica dei loro movimenti durante la navigazione sul terreno.

Per quanto riguarda il primo punto, innanzitutto si deve tenere conto che l'antenna per la ricezione dei segnali GPS difficilmente può essere montata in prossimità del punto che dovrebbe essere in realtà misurato, cioè di quello di lavoro effettivo degli utensili che, in molti casi, è in contatto col suolo.

Riguardo al posizionamento dell'antenna l'antenna, infatti, essa deve essere posizionata in modo da evitare che la struttura delle macchine interferisca con la ricezione dei segnali in arrivo dai satelliti. Inoltre, la stessa deve essere

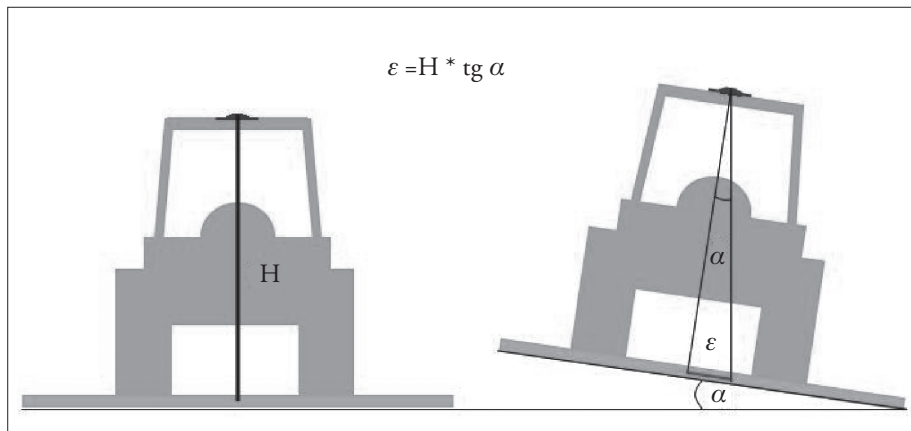


Fig. B.1 *Effetto della pendenza del terreno sulla misura di posizione con antenna montata sopra la cabina del trattore*

collocata in un punto dove non possa subire danni meccanici durante il lavoro. È da tenere pure in conto che, nei casi di cantieri trattore-attrezzo, l'antenna, per questioni di flessibilità operativa (non essere costretti a modificarne la posizione tra un'operazione e l'altra), è preferibile che sia sita direttamente a bordo della motrice e non dell'operatrice.

Così la posizione dove si procede a mettere l'antenna di ricezione è in genere posta al di sopra della cabina del mezzo semovente, ciò anche per minimizzare gli errori di riflessione. In questo modo l'altezza dal suolo del punto di ricezione può diventare anche di 3-4 m. Con questi valori l'individuazione precisa delle coordinate del punto a suolo rispetto al quale calcolare la traiettoria di lavoro su terreni anche con una pendenza modesta non è immediata (fig. B.1).

Le medesime coordinate, infatti, si possono calcolare solo partendo dalla conoscenza del valore di inclinazione del mezzo rispetto alla verticale. Perciò, specie nel caso in cui si debbano ottenere delle precisioni di traiettoria di lavoro con errori subdecimetrici, al sensore principale (ricevitore GPS) deve essere affiancato un secondo dispositivo che misuri l'inclinazione. Questo può essere costituito da un sensore specifico (inclinometro, in alcuni casi due) oppure può essere realizzato utilizzando più antenne GPS montate contemporaneamente sulla stessa macchina.

Nei casi in cui, poi, sia determinante conoscere l'esatta posizione di lavoro degli utensili rispetto ai quali riferire la traiettoria di lavoro, si debbono conoscere, oltre alle dimensioni delle macchine, anche le caratteristiche di rigidità del sistema e le posizioni reciproche che gli stessi via via assumono durante il lavoro rispetto a quella del punto dove è montata l'antenna.

Per quanto riguarda il secondo punto, relativo alla dinamica del comportamento in campo della macchina, restringendo a esempio l'analisi al trattore, questo quando è guidato da un operatore a una determinata velocità V , può essere assimilato a un sistema di controllo chiuso (loop), in cui la chiusura del controllo è esercitata dall'operatore (Stombaugh et al., 1998). Il meccanismo di sterzo, che governa la posizione delle ruote anteriori costituisce il dispositivo hardware di attuazione, mentre l'operatore è il server di controllo. Inconsciamente l'operatore esegue tre operazioni successive:

1. determina la posizione attuale del trattore;
2. compara questa posizione con quella desiderata;
3. prende le azioni correttive per avvicinare le posizioni di cui ai punti 1 e 2.

In questa prospettiva l'operatore si comporta quindi contemporaneamente come sensore, rilevatore dell'errore, controllore e attuatore.

Nel caso di un generico sistema per la guida automatica, i sensori che vanno a costituire il sistema di controllo che deve lavorare al posto dell'operatore

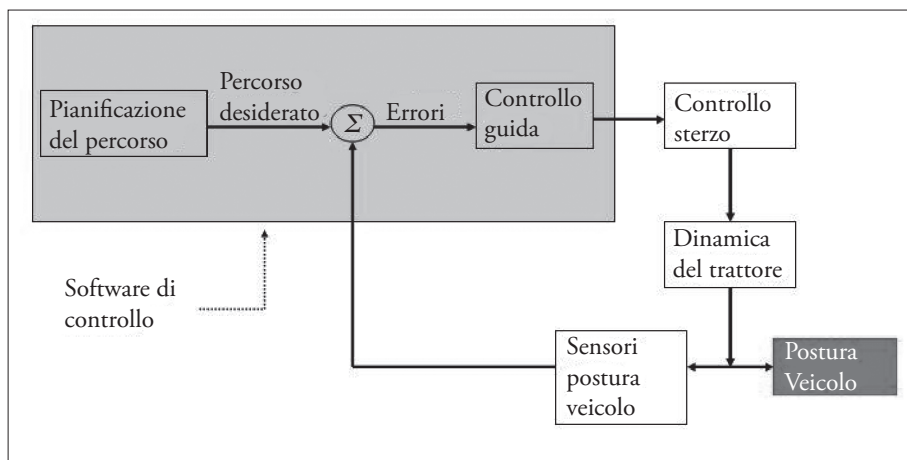


Fig. B.2 Schema di funzionamento di un sistema di controllo della guida del trattore

debbono misurare continuamente quelle variabili associate al processo che permettano al sistema di controllo di prendere le adeguate decisioni.

In sintesi un sistema di guida automatica (fig. B.2) deve pianificare una direzione di avanzamento “desiderata”, controllare la “postura” (posizione + orientamento) del veicolo, confrontarla con la direzione pianificata e agire sullo sterzo diminuire la distanza da quest’ultima.

Per descrivere le principali problematiche che condizionano la formulazione di sistemi di controllo di cui alla figura precedente, in allegato è riportato un approfondimento dei modelli cinematici che sono alla base dei sistemi di controllo della guida dei trattori.

Nel seguito è riportato lo studio su di un modello cinematico semplificato di un trattore in fase di lavoro derivato dagli studi di O’Connor et al. (1996; 1997). Le principali variabili in gioco nel modello sono ricavabili a partire dalla rappresentazione geometrica riportata nello schema della figura B.3.

Le principali condizioni al contorno di tale modello sono le seguenti:

1. il centro istantaneo di rotazione del trattore sia posizionato all’intersezione tra direzione di avanzamento e assale posteriore (punto A);
2. l’antenna sia posizionata nel centro di istantanea rotazione (punto A);
3. si debba raggiungere una traiettoria rettilinea;
4. non vi sia slittamento delle ruote;
5. la velocità di avanzamento sia costante;
6. la sterzata avvenga utilizzando solamente le ruote anteriori.

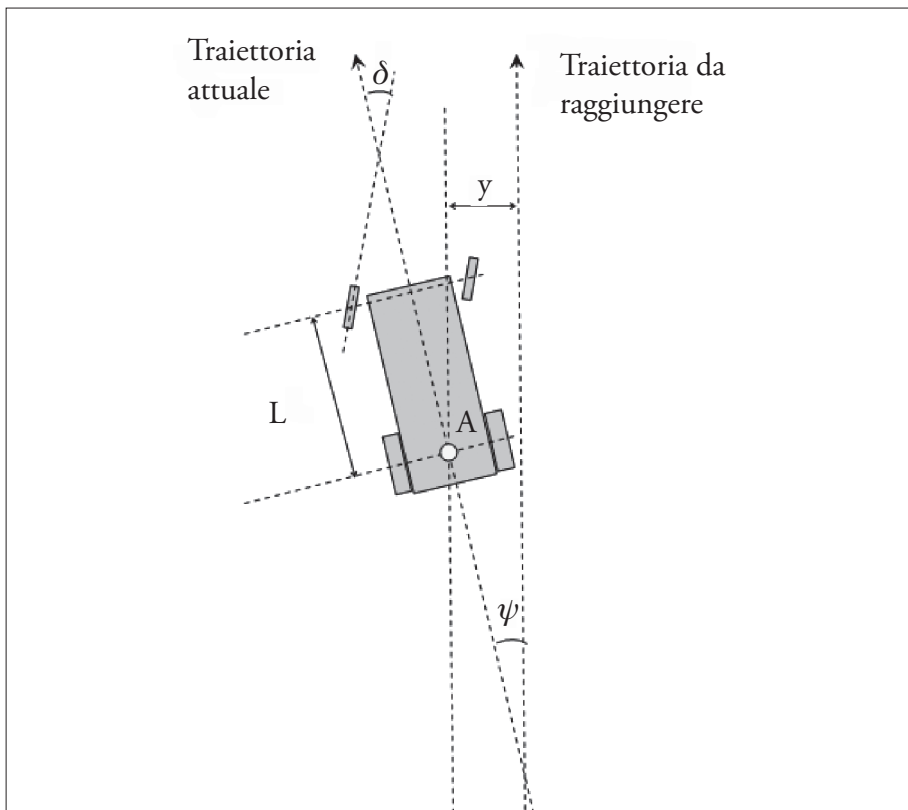


Fig. B.3 *Modello cinematico di guida di trattore agricolo con antenna montata al disopra della cabina (punto A)*

In particolare, sempre con riferimento alla figura, abbiamo:

y [m] = distanza lineare laterale dalla traiettoria rettilinea da raggiungere

ψ [°] = direzione d'avanzamento rispetto alla traiettoria da raggiungere

V [m/s] = velocità nella direzione della traiettoria reale (secondo ψ)

L [m] = passo

δ = angolo di sterzata = input di controllo.

In base a ciò possiamo anche scrivere che:

$$s = s_0 + V \cos(\psi)$$

$$y = y_0 + V \sin(\psi)$$

$$\psi = \psi_0 + (V/L) * \delta$$

dove s = spazio in direzione di x percorso.

Il controllo δ può quindi, in via semplificata, essere posto uguale a:

$$\delta = k_d * \dot{\psi} + k_p * y$$

dove k_d e k_p sono 2 “guadagni” rispettivamente per il valore di angolo di direzione e per il valore di scostamento dalla traiettoria.

Per garantire quindi, il funzionamento del controllo, oltre alla posizione del trattore necessaria per determinare y , è necessario che siano conosciuti la direzione ψ e l'angolo di sterzata δ . Quest'ultimo oltre che il principale dato di output del controllo costituisce anche un dato di input che risulta necessario per determinare l'entità del segnale di attuazione che si deve generare per portare l'angolo di sterzata attuale al valore designato dal controllo.

In termini generali per conoscere il valore ψ della direzione si possono effettuare delle misure impiegando:

1. sensori inerziali (e/o giroscopi);
2. più antenne GPS.

Per la conoscenza di δ , invece, vengono impiegati semplici potenziometri montati sulle ruote direttrici.

Il modello su base temporale che ricavato dalle precedenti relazioni geometriche è caratteristico di un sistema lineare di secondo ordine. In particolare, secondo Tillet, incrementando k_p , la frequenza naturale aumenta, incrementando la velocità di risposta, ma anche riducendo il dumping, cioè l'entità degli scostamenti dalla traiettoria predeterminata che caratterizzano ogni singola onda creata dal modello. Aumentando il guadagno k_d , si ha un aumento del dumping senza aumento della frequenza naturale.

Lo studio del comportamento del semplice modello sopra indicato è facilmente effettuabile implementando lo stesso in un foglio di calcolo. Se si parte da condizioni al contorno non eccessivamente difficili da gestire ma comunque già abbastanza impegnative ($\psi < \pm 15^\circ$ e $y < \pm L$) già con frequenze di controllo di 1 Hz, con le velocità di avanzamento tipiche della maggior parte delle lavorazioni agricole ($V \leq 2,5$ m/s), non si riscontrano particolari instabilità nel comportamento del modello (fig. B.4). In pratica la traiettoria predeterminata viene raggiunta e mantenuta stabilmente dopo circa 20 secondi. Tuttavia per un periodo di tempo di ulteriori 40 secondi si assiste a una certa oscillazione della posizione attuale del trattore rispetto al valore di traiettoria ideale.

Sempre alle medesime condizioni di direzione e scostamento dalla traiettoria iniziale, innalzando a 5 Hz la frequenza del controllo, la traiettoria

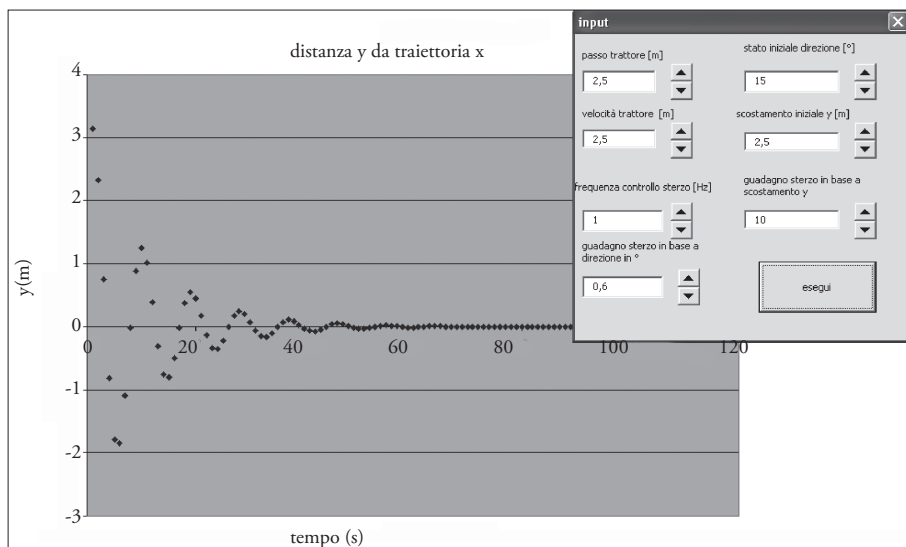


Fig. B.4 Risultati di un simulazione impiegando il modello per antenna montata sopra la cabina con frequenza di funzionamento del controllo a 1 Hz

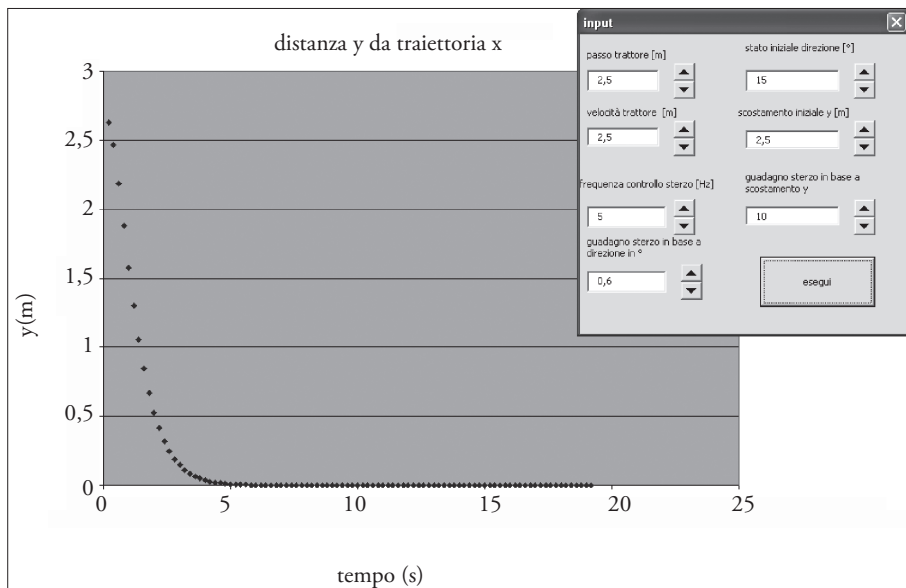


Fig. B.5 Risultati di un simulazione impiegando il modello per antenna montata sopra la cabina con frequenza di funzionamento del controllo a 5 Hz

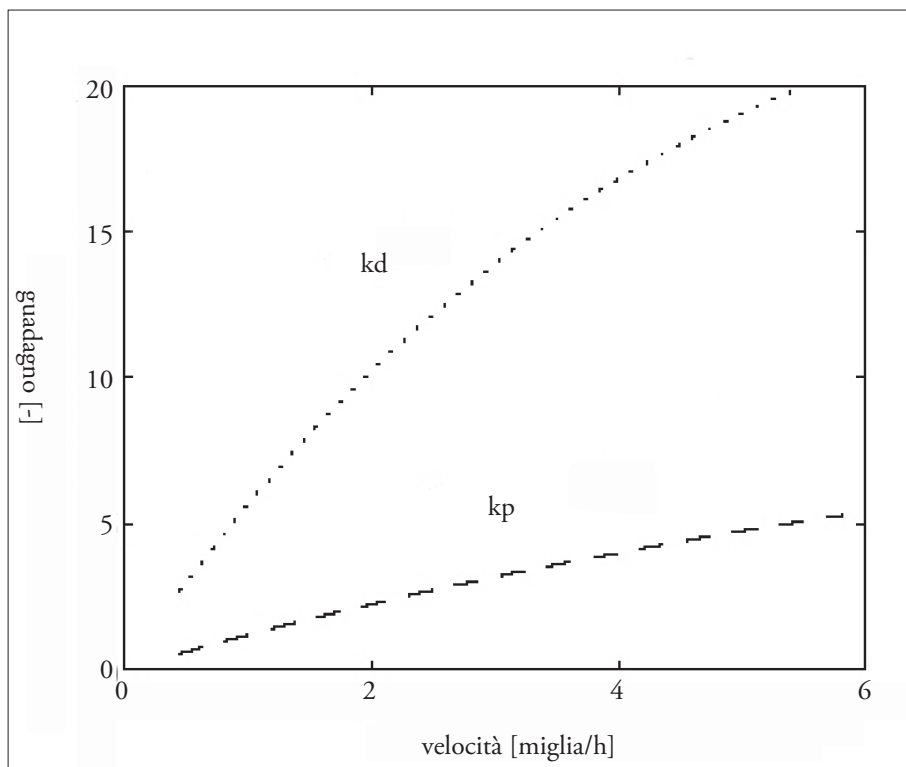


Fig. B.6 Valori di k_p e k_d proposti per il loro modello cinematico al variare della velocità da O'Connor et al. (1997)

preimpostata viene raggiunta in meno di 5 secondi e viene poi mantenuta stabilmente senza oscillazioni.

Un controllo robusto operante a una frequenza abbastanza elevata ($\geq 1\text{Hz}$) è quindi preferibile se si vuole operare con sicurezza a velocità di lavoro tipiche dell'agricoltura (2,5 m/s). Ciò è ancora più importante se si intende operare a velocità differenziate e con attrezzi diversi accoppiati al trattore.

Infatti, sempre secondo Tillett (1991) i controlli che vanno bene alle basse velocità, non funzionano alle alte e viceversa. Così, O'Connor et al. (1997) per il loro modello (implementato in modo leggermente diverso da quello qui proposto) al variare della velocità propongono i guadagni riportati nella figura B.6.

Inoltre, i differenti tipi di attrezzi possono alterare la dinamica del trattore fino a far diventare instabile il controllo (O'Connor et al., 1997). Molti effetti non lineari entrano inoltre in gioco specie quando un attrezzo è trainato:

gli attriti sull'attrezzo possono variare con le condizioni del suolo, differenti densità del suolo possono determinare forze agenti lateralmente e strane interazioni tra attrezzo e trattore possono portare a fenomeni come quello del saltellamento dell'attrezzo a certe velocità. Ovviamente durante questi frangenti il contatto delle ruote anteriori sul suolo ha caratteristiche variabili nel tempo e ciò ha effetto sulla prestazioni di sterzata, anche indipendentemente dal fatto che questa avvenga in modo automatico. Tutti gli attrezzi tendono a ridurre gli effetti di sterzata, sempre a causa del diminuito carico delle ruote anteriori sul terreno. In generale, gli attrezzi portati trasmettono disturbi laterali, mentre quelli trainati non hanno questo effetto. Ogni attrezzo ha comunque effetti specifici.

Quanto sopra rispetto alla necessità di realizzare controlli con una frequenza abbastanza elevata è confermato anche da Choi et al. (1990). Questi Autori hanno studiato l'efficienza di sterzata attraverso un modello semplificato che assume la seguente notazione:

$$\delta_{i+1} = \alpha z + \delta_i$$

dove

1. δ_{i+1} = angolo sterzata al tempo $j + 1$ [rad];
2. α = quota differenziale di sterzata delle ruote anteriori [rad/m] = rapporto tra velocità angolare di sterzata (rad/s) e velocità di avanzamento (m/s). In pratica rappresenta il valore di quanto varia l'angolo di sterzata per ogni metro di avanzamento della macchina;
3. z = spazio percorso nel tempo t tra un controllo e l'altro.

I medesimi autori hanno dimostrato che solo mantenendo lo scostamento laterale delle ruote anteriori dalla traiettoria ideale entro i 5 cm non si hanno deviazioni delle ruote sull'asse posteriore tali da influenzare negativamente il comportamento di attrezzi portati posteriormente.

In base a ciò essi arrivano a definire che, avendo a disposizione uno strumento che fornisce un dato di posizionamento con un errore inferiore a 5 cm è possibile mantenere l'errore di traiettoria sotto i 5 cm solo con z inferiori a 40 cm. Operando a $V = 2$ m/s ciò significa avere una frequenza di controllo di 5 Hz.

In particolare, eseguendo una simulazione con differenti tracciati da seguire (sinusoidali, ad arco e dritti, dritti con discontinuità) l'errore RMS e l'errore massimo hanno mostrato essenzialmente lo stesso andamento al crescere di α (in pratica della velocità con cui si sterzano le ruote).

In ogni caso: l'intervallo z è il maggiore fattore che influenza l'errore di guida.

Quando α viene aumentato senza diminuire z si ha oscillazione della tra-

iettoria calcolata rispetto a quella di progetto. Man mano che la velocità di avanzamento del trattore cresce, z si incrementa e α deve diminuire se si vuole mantenere stabile il sistema. In altri termini, per controllare la sterzata con successo la velocità di avanzamento deve essere determinata in base alla velocità di sterzata e all'intervallo z .

In conclusione: maggiore è la frequenza di funzionamento del controllo, maggiori sono le velocità che si possono raggiungere.

Infine, un'alternativa al posizionamento dell'antenna in corrispondenza del centro di istantanea rotazione (sopra la cabina) è quella di montare la medesima anteriormente al centro stesso, al disopra dell'assale anteriore così come proposto da Tillet (1991) e realizzato, fra gli altri, da Will et al. (1998) (fig. B.7 e fig. B.8 punto B).

Una seconda alternativa prevede addirittura davanti al trattore stesso montata al disopra di un apposito telaio (fig. B.8 punto B).

In questo modo, sempre con riferimento alla figura B.8, si ha la seguente notazione generale:

$$Te = y + a$$

dove Te è uguale all'errore totale e a è la componente di errore dovuta al non allineamento della direzione attuale con la traiettoria scelta. In particolare possiamo scrivere che:

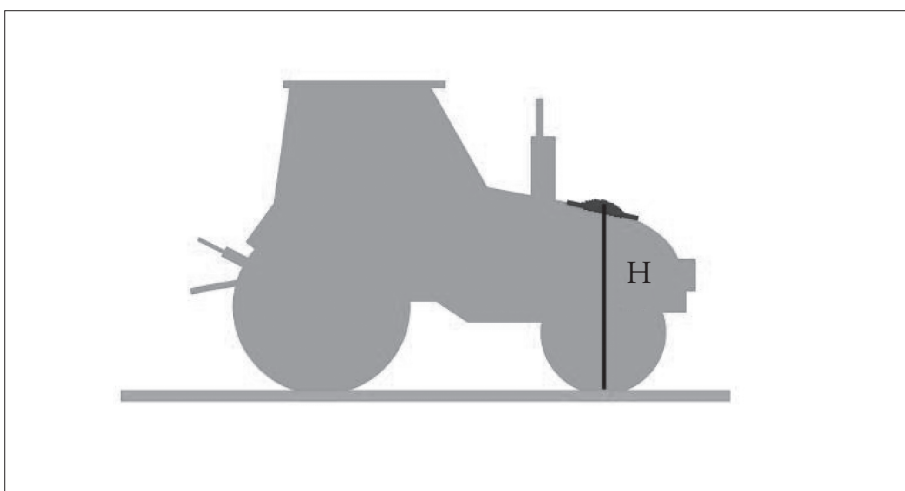


Fig. B.7 Posizionamento dell'antenna GPS al disopra del cofano del trattore

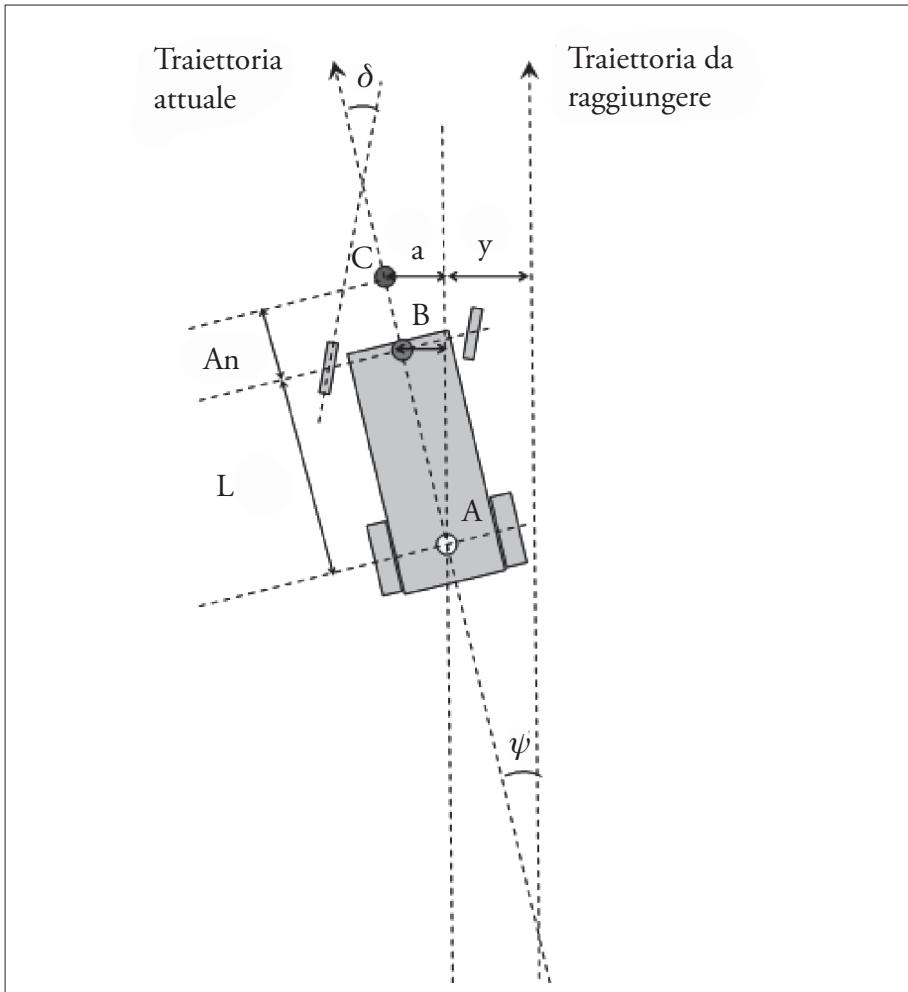


Fig. B.8 *Modello cinematico di guida di trattore agricolo con antenna montata al disopra dell'assale anteriore (punto B) o in posizione anteriore all'assale stesso (punto C)*

$$a = (L + A_n) * \sin \psi$$

intendendo che con $A_n = 0$ l'antenna è posizionata sopra l'assale anteriore (punto B).

Il controllo δ può essere quindi posto uguale a:

$$\delta = k_t * T_e$$

dove k_t è un guadagno complessivo che tiene conto dei precedenti k_d e k_p .

Nella pratica operativa si possono poi avere soluzioni in cui l'antenna è montata fissa sopra l'assale anteriore e il punto A_n è calcolato in modo virtuale proiettando la misura eseguita dall'antenna in avanti sul segmento che congiunge il centro di istantanea rotazione e il punto dove è montata l'antenna stessa. Impostando diversi valori di A_n si consegue il medesimo risultato che, con il modello cinematico prevedente l'antenna sopra la cabina, veniva ottenuto modificando i valori di k_d e k_p , ottenendo analoghi effetti su velocità di risposta e dumping.

L'interesse fondamentale legato all'adozione di questa alternativa modellistica in sostituzione della precedente risiede nel fatto che con questa non è più necessario avere un sensore per la misura di ψ in quanto:

$$a = f(\psi).$$

Quindi un semplice potenziometro montato sulle ruote direttrici è sufficiente (ovviamente accoppiato al ricevitore GPS) a completare il controllo potendosi ricavare il valore di a . La simulazione delle prestazioni del controllo così formulato è stata anch'essa eseguita con un foglio di calcolo e porta a concludere che lo stesso ha un comportamento meno stabile di quello visto precedentemente. Impiegando dati di input identici (direzione + 15°, scostamento iniziale

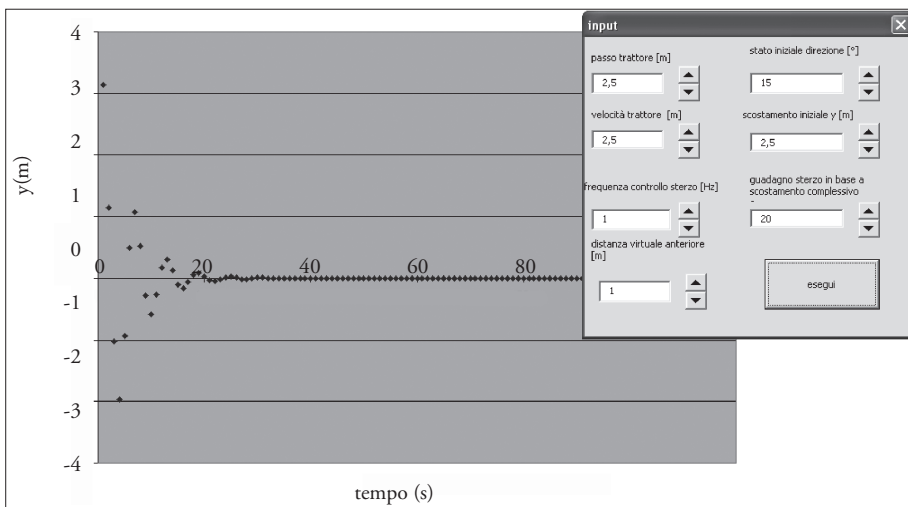


Fig. B.9 Risultati di una simulazione impiegando il modello per antenna montata sopra l'assale anteriore con frequenza di funzionamento del controllo a 1 Hz

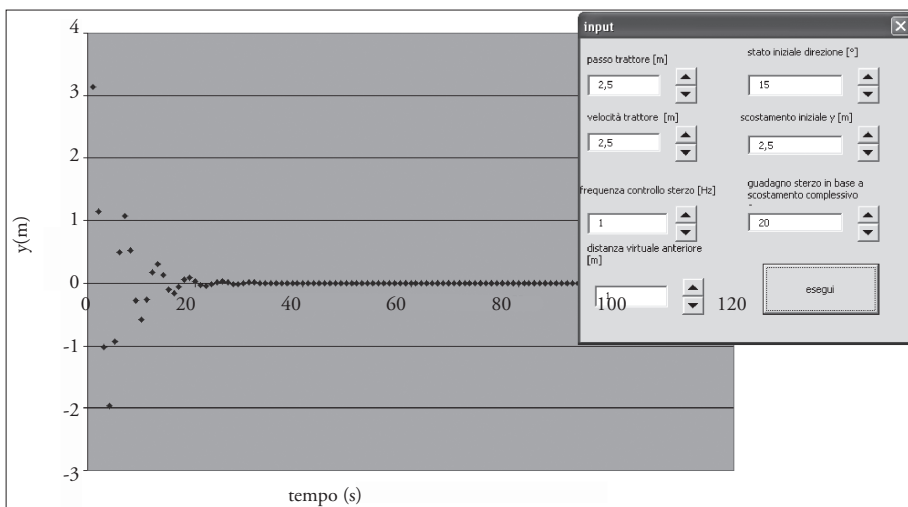


Fig. B.10 Risultati di un simulazione impiegando il modello per antenna montata anteriormente di 1 m rispetto all'assale anteriore con frequenza di funzionamento del controllo a 1 Hz

2,5 m) con una frequenza di funzionamento di 1 Hz non si riesce a mantenere la traiettoria programmata con sufficiente precisione (fig. B.9).

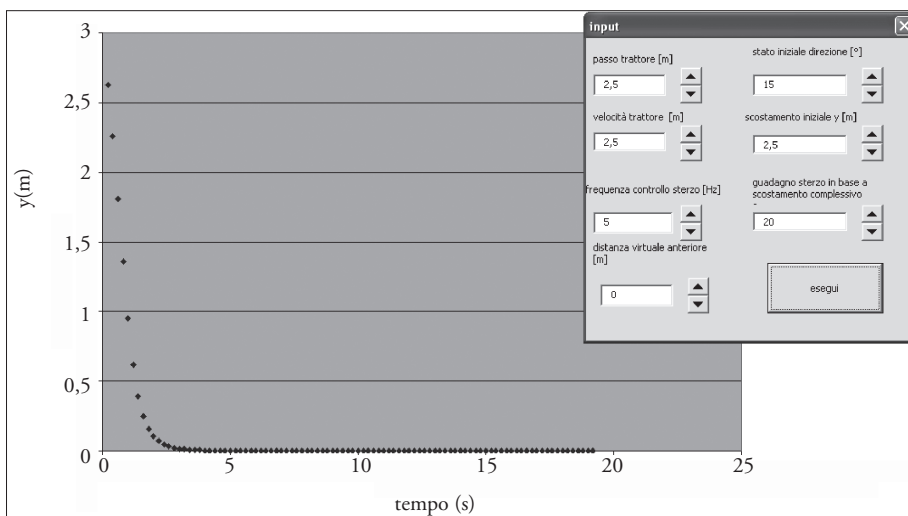


Fig. B.11 Risultati di un simulazione impiegando il modello per antenna montata sopra l'assale anteriore con frequenza di funzionamento del controllo a 5 Hz. Confrontare con fig. B5: le prestazioni appaiono identiche

Solo spostando virtualmente il punto di misura della posizione anteriore rispetto all'assale anteriore si raggiunge una certa stabilità (fig. B.10).

Anche in questo caso, aumentando la frequenza del controllo a 5 Hz tutti i problemi spariscono (fig. B.11).

La soluzione che prevede l'antenna portata al disopra del cofano del trattore presenta il vantaggio di avere la stessa più vicina al suolo. La misura di posizione ottenuta è quindi meno influenzata dalla pendenza e da fenomeni di beccheggio.

La medesima soluzione può tuttavia presentare degli svantaggi quando si opera in ambienti non perfettamente aperti (presenza di edifici o alte alberature in prossimità dei campi). L'antenna, infatti, può risultare parzialmente schermata dalla cabina del trattore e, per tale ragione, non tracciare uno o più satelliti presenti sopra l'orizzonte. Se, oltre a ciò, altri satelliti vengono schermati da edifici e o da alberature presenti, il numero dei segnali tracciati diventa basso influenzando il DOP. In questi casi, solo utilizzando specifici ricevitori con filtri Kalman molto ben sviluppati si possono ottenere precisioni di posizionamento sufficienti a lavorare secondo gli standard richiesti.

Vi è inoltre da sottolineare come approcci più sofisticati di quelli qui presentati prevedono la realizzazione di controlli basati su sistemi di equazioni non lineari che tengono in considerazione anche lo slittamento del mezzo durante il lavoro (Lenain et al., 2004). Al momento attuale non si è tuttavia in grado di verificare se questi approcci che introducono numerose complicazioni modellistiche possano permettere un elevato miglioramento delle prestazioni. Si può tuttavia ricordare come altri gruppi di ricerca che avevano seguito strade analoghe (Stombaugh et al., 1988) si siano poi orientato sull'impiego di modelli semplificati (Ramalingam et al., 2000).

Finito di stampare
nel mese di ottobre 2006
dalla Tipografia ABC
Sesto Fiorentino - Firenze