

ACCURATEZZA DEL POSIZIONAMENTO GPS DA COMUNI DISPOSITIVI MOBILI

POSITIONAL ACCURACY OF GPS-ENABLED MOBILE DEVICES

M. Minghini

Politecnico di Milano, DICA, GEO Laboratory, Como Campus, via Valleggio 11, 22100 Como, Italy - marco.minghini@polimi.it

PAROLE CHIAVE: Accuratezza, dispositivi mobili, GPS, posizionamento, Volunteered Geographic Information

KEY WORDS: Accuracy, mobile devices, GPS, positioning, Volunteered Geographic Information

RIASSUNTO

L'avvento del Web 2.0 insieme ai recenti sviluppi tecnologici ha aperto la strada ad una diffusione senza precedenti di applicazioni basate sulla fruizione di dati spaziali creati da utenti comuni. Dispositivi mobili portatili quali i moderni tablet e smart phone, oggi accessibili ad un pubblico vasto e dotati di ricevitore GPS, consentono facilmente la registrazione di dati geolocalizzati (immagini, video, audio, note testuali, eccetera) che alimentano costantemente le banche dati di un numero esorbitante di progetti. Qual è però l'accuratezza posizionale ottenibile con tali dispositivi? Il presente lavoro cerca di fornire una risposta analizzando, a partire da una serie di misure sul campo, le prestazioni di dispositivi mobili con sistema operativo Android. Confrontando le posizioni misurate in una serie di punti noti da un tablet ed uno smart phone, un'insieme di analisi statistiche permette innanzitutto di quantificare l'accuratezza posizionale delle osservazioni che, pur risultando dipendente dal particolare dispositivo testato, presenta valori mediani generalmente dell'ordine di qualche metro. Opportune elaborazioni permettono quindi di valutare la natura degli errori misurati, studiandone il comportamento e la dipendenza sulle due coordinate registrate. L'analisi conclusiva proposta nel lavoro mostra inoltre come l'informazione di accuratezza, che i dispositivi forniscono in automatico insieme alla posizione, non sia in generale una misura attendibile dell'accuratezza reale. Sebbene limitati nel numero di dispositivi testati e quindi da assumere come preliminari, i risultati ottenuti emergono come significativi e forniscono spunti molteplici per la ricerca futura in questo campo.

ABSTRACT

The rise of Web 2.0 coupled with the recent, non-stop technological advancements have cleared the way for an unprecedented spread of applications exploiting geospatial data created by common people. Portable, GPS-enabled mobile devices like tablets and smart phones, that are currently accessible to a wide audience, allow to easily produce georeferenced data (including images, audios, videos and textual notes) which constantly feed the databases of a number of projects. However, what is the positional accuracy achievable by such devices? This work seeks to provide an answer by investigating the performances of mobile devices equipped with Android operative system starting from a series of field surveys. Comparing the positions recorded by a tablet and a smart phone on a number of points of known location, many statistical analysis allow first to quantify the positional accuracy of the observations, that, despite varying with the specific device under testing, generally present median values of the order of some meters. Specific computations allow then to evaluate the nature of the measured errors and to further study their behavior and dependence on the two coordinates. A final analysis shows also that the accuracy information, which is automatically provided by the mobile devices together with the position recorded, is not generally a reliable measure of the real accuracy. Although achieved on a limited number of tested devices and thus to be assumed as preliminary, the results are significant and can constitute fruitful ground for future research in this field.

1. INTRODUZIONE

Nell'ultima decina di anni le modalità di produzione e fruizione di dati geospaziali hanno conosciuto una tremenda evoluzione. Tali dinamiche, che hanno profondamente modificato la storia stessa della cartografia e dei Sistemi Informativi Geografici (GIS), sono insieme espressione e conseguenza del fenomeno più generale del cosiddetto Web 2.0. Tradizionalmente attribuito a O'Reilly (2005), il termine denota la distanza tra il primo Web o Web 1.0, consistente in una rete statica di "uno a molti" (un sito Web, molti utenti), ad una rete interattiva ed integrata di "molti a molti" (molti siti Web interconnessi, molti utenti). Espressioni tipiche del Web 2.0 includono gli ormai comuni blog, le wiki, i siti Web di social networking e le piattaforme online per la condivisione di media. Tali esempi incarnano alla perfezione quello che a tutti gli effetti si può definire il motore del Web 2.0: la sua natura partecipativa, in cui cioè gli utenti

evolvono da consumatori passivi a creatori attivi di contenuti. A tale proposito il Web 2.0 è stato anche riassunto dalle celebri espressioni "the wisdom of the crowd" (Surowiecki, 2005) e "we, the media" (Gillmor, 2006).

L'esplosione del Web 2.0 ha chiaramente marcato un punto di svolta anche nel campo delle applicazioni Web geografiche o GeoWeb, ribattezzato in analogia GeoWeb 2.0 (Maguire, 2007) e caratterizzato dall'incremento e dall'evoluzione non solo delle applicazioni ma anche del numero di utenti, sia visitatori delle applicazioni di Web Mapping sia creatori di dati geografici. È proprio in questo contesto che una serie di neologismi ha visto la luce, a partire dal concetto di *neogeography*: essa denota la "nuova geografia" in cui l'utente comune, utilizzando strumenti divenuti d'uso quotidiano come il GPS e le API (Application Programming Interfaces) geografiche, è in grado di creare più o meno facilmente le proprie applicazioni di Web Mapping. Ma il risultato più importante del GeoWeb 2.0 è indubbiamente

quello legato al termine *Volunteered Geographic Information* o VGI, coniato da Goodchild (2007) paragonando gli esseri umani ad un vasto insieme di sensori in grado di acquisire preziose informazioni geografiche sino a quel momento mai sfruttate a scopo cartografico. La pratica del VGI è un chiaro esempio del cosiddetto *geocrowdsourcing*, la trasposizione geografica del fenomeno più generale del *crowdsourcing* secondo il quale una certa attività viene eseguita da un insieme indefinito, ed in genere molto ampio, di utenti (Howe, 2006).

A sua volta, un particolare interesse merita la sottoclasse delle attività di VGI nota come *citizen science* (geografica). Essa abbraccia l'insieme delle attività scientifiche nelle quali cittadini volontari partecipano alla raccolta ed analisi dei dati e/o alla disseminazione di un progetto scientifico basato su informazioni geospaziali (Cohn, 2008; Silvertown, 2009). La pratica della *citizen science* si manifesta in una grande varietà di attività, le cui tipologie sono classificate da Haklay (2013). Tra di esse, uno specifico interesse in questo lavoro riveste la cosiddetta *citizen cyberscience* (Grey, 2009) e nel dettaglio il suo sottoinsieme noto come *participatory sensing*. Esso si fonda sull'utilizzo – per la creazione e disseminazione di dati geospaziali – dei moderni dispositivi mobili, che possono contare fino a nove sensori tra cui diversi trasmettitori (rete mobile, Bluetooth e WiFi), ricevitori GPS e FM, fotocamera, bussola, microfono ed accelerometro, oltre a poter essere connessi a sensori esterni.

La motivazione del presente lavoro si inquadra nel contesto di uno dei temi ancora oggi più discussi relativi al VGI, ovvero la sua qualità. In genere, come per qualsiasi dato geospaziale, la qualità è misurabile in termini di una serie di parametri quali l'accuratezza posizionale, la consistenza logica, la completezza, l'accuratezza temporale e l'aggiornamento. Al pari della gran parte della letteratura sulla qualità del VGI, questo studio si concentra sulla valutazione della sola accuratezza posizionale.

La tipologia di VGI considerata è invece quella acquisita dai ricevitori GPS di dispositivi mobili di uso comune, quali tablet e smart phone. Più nel dettaglio, l'obiettivo del lavoro è quello di eseguire una serie di prove sperimentali per effettuare una valutazione statistica dell'accuratezza del posizionamento da dispositivi mobili; si vuole inoltre esaminare l'attendibilità del valore di accuratezza che tali dispositivi restituiscono insieme alla posizione. Il lavoro non è un esercizio fine a se stesso, ma si inserisce a valle dello sviluppo di una serie di sistemi GIS per applicazioni di *citizen science* che hanno coinvolto diversi gruppi di utenti nella raccolta di informazioni puntuali di varia natura utilizzando una specifica app Android (Brovelli et al., 2015; Brovelli et al., in press). Per alcuni di tali progetti (tra i quali ad esempio la segnalazione da parte degli utenti delle buche stradali) l'accuratezza posizionale dei dati raccolti è di estrema importanza e merita quindi quell'analisi approfondita che il presente studio si propone di eseguire.

Con queste premesse, la parte successiva del lavoro è organizzata in questo modo. Nel prossimo capitolo verrà fornita una panoramica sulle tecniche di posizionamento dei dispositivi mobili di uso comune (con particolare riguardo al GPS) analizzandone la letteratura corrispondente. Il capitolo 3 dettaglierà quindi le prove sperimentali eseguite ed i corrispondenti risultati, mentre nel capitolo 4 saranno riassunte le conclusioni e i possibili sviluppi futuri del lavoro.

2. POSIZIONAMENTO DA DISPOSITIVI MOBILI

La diffusione senza precedenti della comunicazione mobile ha aperto la strada allo sviluppo dei cosiddetti Location-Based Services (LBS), cioè i servizi accessibili attraverso la rete dai dispositivi mobili basati sull'utilizzo dell'informazione di posizione dei dispositivi stessi (Wang et al., 2008). La tecnologia

che avrebbe consentito la nascita dei moderni LBS ricevette un decisivo impulso iniziale dall'"E911 mandate" emanato all'inizio del secolo dalla US Federal Communications Commission (FCC), che a scopo di sicurezza stabilì che dal 1° ottobre 2001 tutti gli operatori di telefonia cellulare degli Stati Uniti avrebbero dovuto determinare con un errore da 50 a 300 metri la posizione di ogni telefono da cui fosse sopraggiunta una chiamata di emergenza (FCC, 2001). Tra tutte le tecniche di posizionamento installabili su dispositivi mobili fu scelto il GPS, anche in conseguenza dello *switch-off* del 2000 in seguito al quale ricevitori comuni potevano raggiungere, in condizioni ideali, accuratezze di posizionamento dell'ordine di pochi metri (Porcino, 2001). Nonostante i dubbi iniziali sull'effettiva possibilità di utilizzare il GPS a bordo di dispositivi mobili (per ragioni di dimensioni, costi e consumi), questa soluzione si è ben presto ampiamente diffusa fino a rappresentare oggi il fondamento della nuova generazione di LBS.

I ricevitori GPS tradizionalmente installati sui dispositivi mobili presentano due limiti principali: l'impossibilità di individuare segnali fortemente attenuati ed un elevato *Time To First Fix* (TTFF), il tempo impiegato per calcolare una posizione (od ottenere un *fix*) che può essere anche di parecchi minuti (Zandbergen e Barbeau, 2011). La tecnologia introdotta sui dispositivi mobili per migliorare tali prestazioni è l'Assisted GPS o A-GPS (Richton, 2002). L'"assistenza" al dispositivo mobile nella determinazione della sua posizione è offerta dalla rete cellulare, che è in grado di ridurre lo spazio di ricerca dei segnali in modo che il ricevitore GPS esamini soltanto alcune regioni dello spazio. Il risultato è duplice: il tempo dedicato ad esplorare ogni frazione dello spazio (detto anche *dwell time* e tipicamente molto basso per limitare il tempo totale necessario ad ottenere un *fix*) può essere incrementato, mentre il TTFF è destinato a diminuire. Il prezzo da pagare, che differenzia l'A-GPS dal solo GPS, è la necessità di una connessione di rete. In genere, ogni qualvolta essa sia disponibile, i moderni dispositivi mobili dotati sia di GPS che di A-GPS sono impostati per utilizzare quest'ultimo. Vale la pena in questo contesto chiarire anche la differenza tra A-GPS e Differential GPS o DGPS (Djuknic e Richton, 2001). Anche se entrambi tali tecniche migliorano le prestazioni del GPS, il DGPS fornisce un incremento di accuratezza fino ad oltre il metro (Serr et al., 2006) mentre l'A-GPS incrementa la sola sensibilità del ricevitore. Accuratezze più alte in modalità A-GPS si ottengono mediante una combinazione con la modalità DGPS.

L'accuratezza posizionale in modalità A-GPS dipende quindi dai medesimi fattori che incidono su quella del GPS, quali la geometria dei satelliti, i ritardi ionosferico e troposferico, il noise del ricevitore e gli effetti di multipath. Analisi empiriche sull'accuratezza planimetrica di posizionamento da dispositivi mobili in modalità A-GPS mostrano errori mediani attorno ai 5-8 m (Zandbergen, 2009; Zandbergen e Barbeau, 2011).

Pur non sfruttata nel presente lavoro, è utile citare la possibilità di utilizzo di dispositivi mobili provvisti di GPS per il posizionamento indoor ed in altre circostanze (ad esempio sottoterra o in situazioni di canyon urbano) caratterizzate da una quasi totale ostruzione del cielo. Studi poco recenti dimostrano che l'A-GPS non fornisce alcun risultato migliore del GPS per il posizionamento indoor (Van Diggelen, 2002; Vittorini e Robinson, 2003). Alcuni miglioramenti sono stati ottenuti con l'introduzione di chip set GPS ad alta sensibilità (High-Sensitivity GPS o HSGPS), che utilizzano un numero elevato di correlatori di segnali in modo da aumentare il *dwell time* (Zandbergen e Barbeau, 2011). La conseguenza è la possibilità di ottenere *fix* anche in condizioni di segnale GPS molto scarso, anche se in modalità HSGPS l'accuratezza posizionale e il TTFF sono molto più scarsi di quelli in condizioni ideali (Zandbergen, 2009).

L'ultima tecnica di posizionamento da dispositivi mobili, che vale la pena menzionare nonostante non sia utilizzata nel presente lavoro, è quella basata su WiFi. Questo metodo determina la posizione del dispositivo grazie ai punti di accesso WiFi, i cui segnali percorrono tipicamente diverse centinaia di metri in tutte le direzioni e, sovrapponendosi, creano un sistema di riferimento naturale per stimare posizioni. Poiché i punti di accesso WiFi sono in genere distribuiti per garantire copertura all'interno di edifici, le prestazioni del posizionamento WiFi sono in genere migliori in ambiente indoor (Zandbergen, 2009). Il principio di posizionamento non richiede che il dispositivo sia connesso ad alcuna rete WiFi; al contrario, i segnali WiFi sono semplicemente registrati in base al loro indirizzo MAC univoco, garantendo perciò che anche segnali deboli o criptati siano utilizzabili. Una volta identificati, tali segnali sono processati da appositi software di posizionamento installati sui dispositivi mobili, che calcolano la posizione utilizzando una vasta categoria di algoritmi una cui panoramica è fornita da Gezici (2008). Si tratta in generale di algoritmi che confrontano i segnali WiFi osservati alla posizione incognita con un database di "firme" di segnali (precedentemente registrati) per determinare il miglior *match*. L'accuratezza del posizionamento WiFi è stata tradizionalmente studiata in ambienti indoor ben controllati e con alta densità di punti di accesso. Le prestazioni variano con la densità e distribuzione dei punti di accesso, l'attendibilità del database dei segnali e l'algoritmo di posizionamento utilizzato. In ogni caso, in condizioni ideali si può raggiungere un'accuratezza planimetrica mediana di 1-5 m (Wallbaum, 2007; Cheong et al., 2009). Uno studio pionieristico sulle prestazioni del posizionamento WiFi in ambiente outdoor è stato eseguito dal progetto Place Lab di Intel Corporation (LaMarca et al., 2005) che ha ottenuto accuratèzze mediane di 15-30 m in aree ben calibrate (Cheng et al., 2005). Anche i valori di accuratezza dichiarati dalle principali aziende che forniscono posizionamento WiFi vanno da una decina a poche decine di metri (Zandbergen, 2009), confermando perciò di essere di un ordine di grandezza più scarsi di quelli di GPS e A-GPS.

3. PROVE EMPIRICHE ESEGUITE

L'accuratezza di posizionamento dei dispositivi mobili è stata valutata registrando ripetutamente le posizioni di due dispositivi in corrispondenza di posizioni di riferimento con coordinate note. I dati registrati sono stati quindi sottoposti a procedure statistiche che permettono non solo di valutare l'accuratezza planimetrica e confrontarla con quella dichiarata dai dispositivi, ma anche di indagare nel dettaglio altre proprietà al fine di trarre alcune considerazioni generali sulla qualità del posizionamento da comuni dispositivi mobili. In considerazione della motivazione primaria del presente lavoro esplicitata nel capitolo 1, le analisi empiriche sono state limitate a dispositivi mobili con sistema operativo Android.

3.1 Strumentazione utilizzata e progettazione del rilievo

Le misure sono state eseguite utilizzando due dispositivi diversi sia per natura che per tecnologia implementata. Il primo è l'Asus Eee Pad Transformer, un prodotto a metà strada tra un tablet e un netbook presente sul mercato a partire dal mese di aprile del 2011. È dotato di un System-on-a-chip (SoC) Tegra 2 con una CPU dual-core da 1 GHz, sistema operativo Android 4.0.3 e un ricevitore GPS. Questo strumento non supporta la tecnologia A-GPS. Il secondo dispositivo è uno smart phone Samsung Galaxy S Advance (GT-I9070), sul mercato dal mese di aprile 2012, dotato di sistema operativo Android 4.1 e di una CPU dual-core da 1 GHz all'interno di un SoC ST-Ericsson

NovaThor U8500. Tale strumento garantisce anche il supporto GLONASS integrato al ricevitore GPS e permette l'utilizzo della tecnologia A-GPS. Per brevità, nel prosieguo i due dispositivi saranno semplicemente indicati con le denominazioni "tablet" e "smart phone".

Mentre il posizionamento del tablet è eseguito solo in modalità GPS, lo smart phone è sempre utilizzato in modalità A-GPS sfruttando la connessione di rete. Per eseguire ed archiviare le misure di posizione si è utilizzata l'app Android GPSLogger (<http://code.mendhak.com>). Si tratta di un prodotto open source scaricabile sia come applicazione Android ufficiale dal PlayStore di Google che come applicazione Android APK da <http://sourceforge.net/projects/gfdownload/files>.

L'app fornisce una serie di funzionalità tra cui la registrazione nei formati GPX e KML, la registrazione di velocità, direzione e quota, la condivisione delle posizioni attraverso e-mail e social network e la possibilità di upload dei dati in OpenStreetMap (OSM). Ai fini di questo lavoro, l'applicazione è stata utilizzata semplicemente per registrare le posizioni dei punti (tramite GPS o A-GPS) ed esportarle in un file di testo. Per ogni posizione l'applicazione registra le seguenti variabili: ID, data e ora, latitudine e longitudine (in gradi decimali), quota e accuratezza (in metri). Dopo aver registrato la posizione di un punto, il ricevitore GPS torna sempre in una condizione di avvio "a freddo" (*cold start*) prima di registrare la posizione successiva. Ciò rende le osservazioni indipendenti l'una dall'altra e tutte eseguite nelle medesime condizioni. Un'altra caratteristica utile dell'app è la possibilità di impostare una soglia per l'accuratezza dichiarata, in modo che i *fix* siano ottenuti solo per accuratezze superiori. Ad esempio, impostando una soglia di 20 m, il sistema impedisce di registrare una posizione con un'accuratezza dichiarata peggiore (ad esempio 50 metri). Ciò implica un aumento del TTFF ma garantisce un risultato più accurato. Per effettuare le prove sul campo sono state scelte due aree, in ognuna delle quali si è proceduto dapprima a misurare le coordinate di un certo numero di punti mediante un ricevitore GPS geodetico a doppia frequenza Leica RX1200, dotato di antenna ATX1200GG e utilizzato in modalità RTK (Real Time Kinematic) con correzioni in tempo reale fornite dalla stazione permanente di riferimento di Como. L'accuratezza di tali misure è centimetrica (Leica Geosystems, 2005), quindi almeno due ordini di grandezza superiore a quella prevista per GPS e A-GPS su dispositivi mobili. Le coordinate del rilievo RTK sono state quindi considerate come coordinate di riferimento (verità a terra) senza alcun errore.

La Figura 1 mostra le due aree dei rilievi, in cui i punti di riferimento a terra sono rappresentati in giallo sovrapposti a un'immagine satellitare Google. La prima area corrisponde al cortile del Polo di Como del Politecnico di Milano, situato in via Valleggio 11 e in cui si sono misurati 122 punti, circa equidistanti e che formano un anello chiuso (Figura 1a).

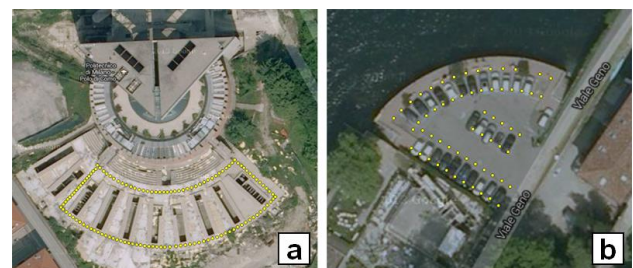


Figura 1. Aree di studio e punti misurati con tablet e smart phone: via Valleggio – 122 punti (a); viale Geno – 62 punti (b).

La sola parziale ostruzione del cielo è dovuta all'edificio dell'università, alto 28.80 m e posto a nord rispetto ai punti misurati. La seconda area è invece un parcheggio ubicato di fronte al lago di Como in viale Geno. In questa seconda area è stato misurato un totale di 62 posizioni corrispondenti agli angoli delle strisce dei parcheggi (Figura 1b). In questo caso una lieve ostruzione del cielo è presente in direzione est/sud-est per effetto della zona collinare della città di Brunate. Le due aree saranno d'ora in poi semplicemente denotate, per brevità, rispettivamente come "area 1" ed "area 2".

3.2 Esecuzione del rilievo: accuratezza dichiarata e TTFF

Le posizioni dei punti a terra presenti nelle due aree sono state misurate per tre volte sia con il tablet che con lo smart phone, registrando un totale di 1104 osservazioni. Le misure sono state eseguite posizionando ciascun dispositivo orizzontalmente a terra sulla posizione prescelta. Pur non influenzando il risultato finale (poiché ci si aspetta un'accuratezza almeno dell'ordine del metro) si è seguita l'indicazione generale di collocare il baricentro del dispositivo esattamente in corrispondenza del punto da misurare. Le dodici sessioni di misura (tre per ogni dispositivo e per ogni area) sono state eseguite nel corso di quattro giornate in condizioni atmosferiche di bel tempo. Per ridurre al minimo le variazioni delle condizioni del rilievo, i punti di ogni singola serie sono stati misurati in modo sequenziale e durante lo stesso giorno. Come accennato nel paragrafo 3.1, l'app GPSLogger consente di impostare una soglia minima di accuratezza dichiarata per ogni fix da ottenere, il che comporta – in principio – un posizionamento più accurato.

In Tabella 1 sono riportate le soglie di accuratezza dichiarata impostate per ciascun dispositivo, per ciascuna sessione di misure e in ogni area. Come si vede, la prima e la seconda sessione di misure eseguite con il tablet sull'area 1 (che coincidono con le prime sessioni dell'intero lavoro) sono state eseguite senza impostare una soglia, mentre la prima sessione di misura con lo smart phone sulla stessa area è stata realizzata impostando una soglia di 50 m. In queste condizioni, il tablet ha registrato alcune posizioni con un'accuratezza dichiarata fino a 350 m, mentre quasi la metà delle posizioni registrate dallo smart phone ha avuto un'accuratezza dichiarata di esattamente 50 m. Tali risultati evidenziano come entrambi i dispositivi siano in grado di restituire posizioni con TTFF molto brevi ma spesso associate a valori elevati di accuratezza dichiarata. Tuttavia, poiché i risultati di queste sessioni di misure sono stati relativamente scarsi (cfr. Tabella 2), per le rimanenti sessioni di misura sono state impostate soglie più stringenti, tutte uguali o inferiori ai 15 m (cfr. Tabella 1).

Sessione di misura	Area 1	Area 2
tablet 1	-	10 m
tablet 1	-	15 m
tablet 1	20 m	15 m
smart phone 1	50 m	10 m
smart phone 2	15 m	10 m
smart phone 3	15 m	15 m

Tabella 1. Soglie di accuratezza dichiarata per ogni sessione di misura, con entrambi i dispositivi e su ciascuna delle due aree.

È necessario fare alcune precisazioni per alcune delle sessioni di misura sull'area 2, in particolare la seconda e terza sessione con il tablet e la seconda sessione con lo smart phone. In questi casi, infatti, i dispositivi non sono stati in grado di ottenere, dopo 5-10 minuti, i fix di alcuni punti (al massimo 3 o 4 per sessione) utilizzando i valori di soglia riportati in Tabella 1. Per tale motivo, solo in corrispondenza di questi punti il valore di

soglia è stato progressivamente aumentato di un fattore pari a 5 m fino all'ottenimento di un fix . Altro fenomeno osservato è che i valori di accuratezza dichiarati da entrambi i dispositivi sembrano essere derivati da un processo di arrotondamento dovuto, probabilmente, alle impostazioni hardware o software dei dispositivi. In particolare, le accuratezze dichiarate dal tablet assumono sempre un valore (in metri) pari a 4, 6, 8, 12, 16, 20 e così via, procedendo per multipli di 4. Viceversa, le accuratezze dichiarate dallo smart phone corrispondono sempre (in metri) a multipli di 5: 5, 10, 15, eccetera.

La sola esecuzione delle misure consente inoltre di esprimere alcune considerazioni sul confronto tra le prestazioni di GPS e A-GPS in termini di TTFF. Nonostante infatti il TTFF sia variabile in funzione della posizione misurata (a parità di dispositivo e soglia di accuratezza dichiarata impostata), in generale per lo smart phone – che lavora in modalità A-GPS – si registrano TTFF minori. Ciò è risultato particolarmente evidente sull'area 1, dove una singola sessione di misura con il tablet ha richiesto circa una volta e mezzo il tempo impiegato dallo smart phone. La differenza è stata invece più esigua per l'area 2, dove i TTFF dello smart phone sono risultati solo leggermente più brevi a quelli del tablet.

3.3 Processamento dei dati e valutazioni statistiche

Le coordinate geografiche derivate dalle misure GPS/A-GPS tramite l'applicazione Android GPSLogger sono state convertite in coordinate cartografiche. Oltre che per una migliore valutazione dei risultati, ciò è giustificato dal fatto che le posizioni reali dei punti a terra, ottenute dal rilievo RTK e con le quali le posizioni registrate dal tablet e dallo smart phone devono essere comparate, sono disponibili in coordinate cartografiche UTM 32N. Per tutte le posizioni registrate dai dispositivi mobili e per tutte le sessioni di misura (con entrambi i dispositivi e su entrambe le aree), le coordinate UTM sono comparate con le posizioni reali dei punti a terra calcolando gli errori nelle direzioni X e Y e la distanza planimetrica. Gli errori ΔX e ΔY nelle direzioni X e Y e la distanza planimetrica d , per la generica posizione i , sono calcolate come segue:

$$\Delta X_i = X_{Ri} - X_{Mi}; \Delta Y_i = Y_{Ri} - Y_{Mi}; d_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2} \quad (1)$$

dove X_{Ri} , Y_{Ri} sono le coordinate UTM X e Y reali alla posizione i , mentre X_{Mi} , Y_{Mi} sono le coordinate UTM X e Y misurate dal dispositivo mobile alla medesima posizione i . Le Tabelle 2 e 3 riportano alcune statistiche generali (media, mediana, deviazione standard, minimo e massimo) calcolate su ΔX , ΔY e d per ogni sessione di misura e, rispettivamente, per le aree 1 e 2.

Sessione di misura	Statistica	ΔX	ΔY	d
tablet 1	media	1.3453	-3.5062	9.9211
	mediana	0.0850	-2.0550	5.6747
	dev. std	7.4976	18.5547	17.7614
	min	-20.9196	-159.4628	0.1162
	max	33.5622	88.8518	161.5329
tablet 2	media	2.9427	-4.5699	32.5077
	mediana	1.7307	2.1503	23.2890
	dev. std	25.5587	41.3849	36.4728
	min	-98.5062	-194.3206	2.0635
	max	168.5832	55.0616	207.9842
tablet 3	media	-2.4270	-3.8513	11.2802
	mediana	-2.5019	-3.7217	10.0199
	dev. std	7.2683	10.8625	7.9638
	min	-27.3752	-42.9043	0.8814

	max	19.2006	33.9694	47.2497
smart phone 1	media	-0.3862	-2.8125	8.7179
	mediana	-0.8103	-2.4518	7.2574
	dev. std	4.5954	9.0340	5.8504
	min	-11.0732	-28.5391	0.6650
	max	18.0986	23.4296	29.3399
smart phone 2	media	1.2498	-0.3827	6.2773
	mediana	0.8739	-0.4260	4.2224
	dev. std	4.2376	8.0786	6.7242
	min	-6.8080	-36.4548	0.4297
	max	20.3557	36.2241	40.7497
smart phone 3	media	-0.6276	0.4010	7.2650
	mediana	-0.7050	0.4199	5.2773
	dev. std	5.3843	8.0713	6.4405
	min	-11.9434	-25.3234	0.4055
	max	21.2025	35.1131	37.9271

Tabella 2. Statistiche sugli errori nelle direzioni X e Y e sulla distanza planimetrica per ogni sessione di misura sull'area 1.

Sessione di misura	Statistica	ΔX	ΔY	d
tablet 1	media	-6.5231	4.7162	15.5607
	mediana	-4.2327	5.7146	13.0998
	dev. std	9.7059	14.9889	11.7716
	min	-43.1240	-43.3430	1.5006
	max	13.6217	51.9428	52.0692
tablet 2	media	-2.5085	-1.3832	11.2365
	mediana	-1.8403	-0.6263	9.0462
	dev. std	6.9625	12.6555	9.4136
	min	-27.4709	-46.7058	1.1412
	max	10.4396	33.5795	54.1856
tablet 3	media	-1.9496	-0.0002	11.9463
	mediana	-1.8513	1.0063	5.8961
	dev. std	11.3252	17.7656	17.3967
	min	-18.8151	-94.5258	0.8133
	max	65.7774	36.7394	115.1599
smart phone 1	media	-2.5511	3.0500	8.5189
	mediana	-1.9345	2.7129	6.4250
	dev. std	6.8236	7.4268	6.6341
	min	-23.0221	-21.9377	0.0850
	max	19.4939	17.2225	26.0120
smart phone 2	media	-1.8881	1.0034	6.0067
	mediana	-1.7579	0.5699	4.9023
	dev. std	4.2782	5.7754	4.4300
	min	-13.9730	-18.2448	0.6135
	max	10.7055	18.9728	21.1537
smart phone 3	media	-2.9852	2.9785	7.4858
	mediana	-2.3890	2.9688	6.0232
	dev. std	6.4718	5.6080	5.8687
	min	-26.0072	-10.2458	1.0357
	max	16.7405	21.3773	33.6655

Tabella 3. Statistiche sugli errori nelle direzioni X e Y e sulla distanza planimetrica per ogni sessione di misura sull'area 2.

I risultati possono essere sintetizzati con alcune considerazioni. La più evidente riguarda la presenza di outlier che, in alcuni casi (si vedano ad esempio la prima e la seconda sessione di misura con il tablet in area 1 e la terza sessione di misura sempre con il tablet in area 2) influenzano fortemente le statistiche ottenute. In tali casi è possibile infatti osservare una distanza planimetrica massima superiore ai 100 m, una deviazione standard significativamente maggiore di 10 m ed una divergenza superiore al metro (sulla singola coordinata) tra la media e la mediana, indicativa della presenza di outlier. Un confronto generale delle statistiche sulla distanza planimetrica conferma, per tut-

te le sessioni di misura, le migliori prestazioni dello smart phone rispetto al tablet. Mentre dal primo si ottengono valori di media, mediana e deviazione standard intorno ai 5 m, con valori massimi non oltre i 40 m, nel secondo le medie, le mediane e le deviazioni standard sono sempre intorno ai 10 m con valori massimi pari ad almeno 50 m. Questo risultato deve essere attribuito non all'utilizzo della tecnologia A-GPS (che come detto non migliora le prestazioni in termini di accuratezza), bensì alla qualità più elevata dell'hardware e software dello smart phone, che, oltre a un sistema operativo più recente rispetto al tablet, è dotato anche di un SoC più avanzato in virtù del supporto GLONASS. I risultati di accuratezza del posizionamento A-GPS dello smart phone mostrano valori di mediana in linea con quelli (5-8 m) riportati in letteratura (Zandbergen, 2009; Zandbergen e Barbeau, 2011).

3.4 Reiezione degli outlier

Come osservato sopra, i risultati ottenuti per alcune sessioni di misura sono fortemente influenzati dalla presenza di outlier, che devono perciò essere individuati e rimossi. La reiezione degli outlier è stata eseguita attraverso una regressione lineare robusta (cfr. Maronna et al., 2006) e, in particolare, applicando il metodo degli stimatori M introdotto da Huber (1964). Diversamente dalla classica stima a minimi quadrati, che attribuisce il medesimo peso a tutte le osservazioni, in questo caso viene utilizzata la soluzione iterativa IRLS (*Iteratively Reweighted Least Squares*). A partire da una stima iniziale ottenuta a minimi quadrati, essa ricalcola iterativamente i coefficienti utilizzando una funzione peso secondo cui le osservazioni sono tanto meno importanti quanto più il loro residuo è elevato. In particolare, tra gli stimatori M disponibili si è scelto di utilizzare quello biquadrato di Tukey, in cui le osservazioni hanno peso decrescente a mano a mano che il loro residuo aumenta, fino ad avere peso nullo per quantità (in valore assoluto) maggiori di una costante k (Fox, 2002). Essa è detta costante di *tuning* poiché il suo valore può essere regolato per generare una minore o maggiore resistenza agli outlier. Tale valore viene tipicamente scelto per ottenere un'efficienza ragionevolmente elevata nel caso normale: nel dettaglio, $k = 4.685\sigma$ (dove σ è la deviazione standard degli errori) consente di ottenere il 95% di efficienza con errori distribuiti normalmente.

Con tali premesse, una regressione lineare robusta con lo stimatore biquadrato di Tukey è stata eseguita in Matlab per confrontare le coordinate X_M e Y_M registrate dal tablet e dallo smart phone (per ogni sessione di misura e per entrambe le aree) con le coordinate X_R e Y_R dei corrispondenti punti a terra:

$$X_M = a_x X_R + b_x; Y_M = a_y Y_R + b_y \quad (2)$$

dove X_R, Y_R sono le coordinate UTM X e Y reali del punto, mentre X_M, Y_M sono le coordinate UTM X e Y registrate dal dispositivo. In ogni regressione lineare robusta un'osservazione i è classificata come outlier se $e_i > 3\sigma_R$, dove e_i è il suo residuo e σ_R è la deviazione standard dei residui della regressione lineare robusta. Un'osservazione dal tablet o dallo smart phone è quindi classificata come outlier se la precedente condizione è soddisfatta per almeno una delle sue coordinate X e Y. Le Tabelle 4 e 5 mostrano, rispettivamente per l'area 1 e l'area 2, il numero di outlier identificati separatamente nelle coordinate X e Y, il numero totale di outlier (cioè il numero di osservazioni rimosse) e la corrispondente percentuale sul numero totale.

I risultati confermano le migliori prestazioni dello smart phone rispetto al tablet. Il primo presenta una percentuale di outlier inferiore al 5% in cinque delle sei sessioni di misura; il secondo

Sessione di misura	N. outlier (X)	N. outlier (Y)	N. outlier (tot)	% outlier
tablet 1	5	11	12	9.84
tablet 2	6	5	8	6.56
tablet 3	3	3	6	4.92
smart phone 1	2	2	4	3.28
smart phone 2	6	5	6	4.92
smart phone 3	5	5	6	4.92

Tabella 4. Numero e percentuale di outlier identificati da una regressione lineare robusta per le sessioni di misura sull'area 1.

Sessione di misura	N. outlier (X)	N. outlier (Y)	N. outlier (tot)	% outlier
tablet 1	1	6	7	11.48
tablet 2	2	3	4	6.56
tablet 3	2	4	5	8.20
smart phone 1	2	2	4	6.56
smart phone 2	0	2	2	3.28
smart phone 3	2	2	3	4.92

Tabella 5. Numero e percentuale di outlier identificati da una regressione lineare robusta per le sessioni di misura sull'area 2.

presenta invece percentuali di outlier più elevate, che nei due casi peggiori (prima sessione di misura in area 1 e prima sessione di misura in area 2) sono attorno al 10%. Inoltre, mentre il numero di outlier individuato nelle coordinate X e Y è pressoché uguale per ogni sessione di misura condotta con lo smart phone, il tablet mostra un comportamento più variabile (si vedano di nuovo la prima sessione di misura in area 1 e la prima sessione di misura in area 2) che può essere ancora una volta attribuito alle componenti hardware e software del dispositivo. Le Tabelle 6 e 7 mostrano invece i valori (ricalcolati dopo la rimozione degli outlier) di media, mediana, deviazione standard, minimo e massimo relativi a ΔX , ΔY e d , per ogni sessione di misura, rispettivamente per area 1 e area 2. Il confronto di questi valori con quelli corrispondenti ottenuti prima della reiezione degli outlier (cfr. Tabelle 2 e 3) induce ad un paio di considerazioni. Innanzitutto, le osservazioni del tablet che inizialmente generavano valori di distanza planimetrica massima superiori a 100 m sono state identificate come outlier e quindi rimosse. La distanza planimetrica massima sulle osservazioni rimanenti si ottiene stavolta nella seconda sessione di misura effettuata con il tablet in area 1 ed è pari a circa 84 m. Il motivo per cui questo valore non è stato identificato come outlier deve essere ricercato nella dispersione elevata che caratterizza le posizioni registrate in questa sessione di misura, che è l'unica per la quale si hanno valori di media e mediana maggiori di 20 m ed una deviazione standard superiore a 10 m. Poiché la mediana non è sensibile agli outlier, i suoi valori sono pressoché identici a quelli calcolati in precedenza (cfr. Tabelle 2 e 3). Tali valori confermano quindi sia la valutazione generale delle accuratezze effettuata in precedenza, sia la coerenza dei risultati quelli della letteratura.

3.5 Regressione lineare a minimi quadrati

Una volta identificati e rimossi gli outlier è utile indagare nuovamente il comportamento generale delle coordinate registrate dai dispositivi mobili (in modalità GPS e A-GPS) confrontandole con le coordinate reali dei punti corrispondenti. Si tratta in sostanza di analizzare gli errori ΔX e ΔY , cioè le differenze tra le coordinate reali dei punti X_R , Y_R e le coordinate X_M , Y_M registrate negli stessi punti dai dispositivi mobili.

Sessione di misura	Statistica	ΔX	ΔY	d
tablet 1	media	0.5393	-2.3592	6.0811
	mediana	-0.0359	-2.0550	5.0537
	dev. std	4.9966	5.0182	4.3290
	min	-11.2800	-17.0908	0.1162
	max	15.7392	11.2895	18.9581
tablet 2	media	1.8599	2.1431	25.0405
	mediana	1.7307	3.9005	22.3292
	dev. std	13.8041	26.8165	16.8887
	min	-38.9708	-74.3172	2.0635
	max	38.6926	55.0616	83.9153
tablet 3	media	-2.4758	-4.4098	10.2124
	mediana	-2.5019	-4.0217	9.5701
	dev. std	6.0748	9.0662	6.3007
	min	-21.3877	-28.7015	0.8814
	max	13.8714	16.8076	32.0430
smart phone 1	media	-0.7363	-3.2475	8.2928
	mediana	-0.8331	-2.5799	7.0217
	dev. std	4.0983	8.4317	5.4510
	min	-11.0732	-28.5391	0.6650
	max	9.8794	17.2306	29.3399
smart phone 2	media	0.5310	-0.2464	6.2773
	mediana	0.6645	-0.4260	4.2224
	dev. std	2.7505	5.2794	6.7242
	min	-6.8080	-13.9090	0.4297
	max	8.4634	13.5010	40.7497
smart phone 3	media	-1.3709	-0.0462	6.0923
	mediana	-0.9061	0.3331	5.1436
	dev. std	4.0763	5.7504	3.7607
	min	-11.9434	-16.4907	0.4055
	max	10.3883	16.7889	19.7429

Tabella 6. Statistiche sugli errori nelle direzioni X e Y e sulla distanza planimetrica per ogni sessione di misura sull'area 1 dopo la reiezione degli outlier.

Sessione di misura	Statistica	ΔX	ΔY	d
tablet 1	media	-5.7568	7.0497	12.4271
	mediana	-4.2997	6.9996	11.1803
	dev. std	8.5570	7.5623	7.5806
	min	-24.2622	-9.1533	1.5006
	max	13.6217	27.0291	35.4711
tablet 2	media	-1.4669	-0.1724	9.1800
	mediana	-1.6558	-0.6128	8.3853
	dev. std	5.2658	8.9596	4.9443
	min	-13.4787	-22.4281	1.1412
	max	10.4396	21.1690	25.0959
tablet 3	media	-3.1020	1.8059	8.0866
	mediana	-1.8336	1.0097	5.5902
	dev. std	6.1803	7.3062	6.1735
	min	-18.8151	-13.5979	0.8133
	max	11.0076	22.4475	24.2382
smart phone 1	media	-2.4945	3.6165	7.4768
	mediana	-1.2753	2.7129	6.4152
	dev. std	5.7721	5.8341	5.4862
	min	-18.7631	-8.6613	0.0850
	max	10.9053	16.6162	23.5682
smart phone 2	media	-2.0958	1.0251	5.5280
	mediana	-1.7579	0.5699	4.7489
	dev. std	4.0192	4.7487	3.6270
	min	-13.9730	-8.0233	0.6135
	max	6.4888	13.0222	16.6774
smart phone 3	media	-2.9219	2.2977	6.6480
	mediana	-2.2463	2.7701	4.9252

	dev. std	5.2874	4.6971	4.3712
	min	-15.6036	-10.2458	1.0357
	max	8.4339	13.8604	18.7430

Tabella 7. Statistiche sugli errori nelle direzioni X e Y e sulla distanza planimetrica per ogni sessione di misura sull'area 2 dopo la reiezione degli outlier.

Un primo test statistico può essere eseguito sui valori medi di ΔX e ΔY per ogni sessione di misura ed in entrambe le aree. Si tratta di un test t di Student che confronta i valori calcolati di ΔX e ΔY (riportati nelle Tabelle 6 e 7) con un valor medio atteso pari a 0, che indicherebbe cioè una perfetta corrispondenza in media tra le coordinate X_M, Y_M e X_R, Y_R . Gli esiti dei test, eseguiti con un livello di significatività del 5% su ΔX e ΔY per ogni sessione di misura, sono mostrati nelle Tabelle 8 e 9 rispettivamente per l'area 1 e l'area 2. È riportato il simbolo ✓ se il test è superato, ovvero se i valori medi calcolati non sono significativamente diversi da 0; il simbolo X indica invece che il test non è superato. Si osserva come, mentre i test sono superati la metà esatta delle volte per le sessioni di misura sull'area 1, essi non vengano in generale superati per quelle sull'area 2. Gli esiti dei test sono all'incirca in linea con i valori medi di ΔX e ΔY riportati nelle Tabelle 6 e 7, ovvero i test risultano superati solo quando il corrispondente valore medio è vicino a 0. Un'eccezione è rappresentata dalla seconda sessione di misura con il tablet sull'area 1, per cui il test è superato sia su ΔX che su ΔY nonostante i loro valori medi (pari rispettivamente a 1.8599 e 2.1431) siano piuttosto diversi da 0. Come già sottolineato nel paragrafo 3.4, il motivo è che questa sessione di misura presenta una dispersione molto elevata delle posizioni registrate dal tablet, che a sua volta influenza il risultato dei test.

Sessione di misura	Esito X	Esito Y
tablet 1	✓	X
tablet 1	✓	✓
tablet 1	X	X
smart phone 1	✓	X
smart phone 2	X	✓
smart phone 3	X	✓

Tabella 8. Esiti dei test sugli errori medi per le coordinate X e Y per ogni sessione di misura sull'area 1.

Sessione di misura	Esito X	Esito Y
tablet 1	X	X
tablet 1	X	✓
tablet 1	X	✓
smart phone 1	X	X
smart phone 2	X	✓
smart phone 3	X	X

Tabella 9. Esiti dei test sugli errori medi per le coordinate X e Y per ogni sessione di misura sull'area 2.

I risultati in generale negativi dei test rivelano la presenza di fattori di disturbo. Per meglio analizzarne la natura, si è definito un modello lineare per mettere in relazione gli errori ΔX e ΔY alle coordinate reali X_R, Y_R dei corrispondenti punti a terra:

$$\Delta X = a_x X_R + b_x; \Delta Y = a_y Y_R + b_y \quad (3)$$

I parametri a e b (a cui è stato aggiunto il pedice X o Y per indicare la coordinata a cui si riferiscono) determinano, nel complesso, l'adattamento delle posizioni registrate dai dispositivi mobili a quelle "vere". Come evidenzia il modello, a_x e a_y descrivono la dipendenza dell'errore dalla posizione (essi multi-

plicano infatti le coordinate reali X_R e Y_R), mentre b_x e b_y rappresentano un bias che influenza l'errore in modo costante nella singola sessione di misura. I parametri sono stimati stavolta mediante una tradizionale regressione lineare a minimi quadrati eseguita in Matlab. Una perfetta corrispondenza lineare tra le coppie di coordinate misurate (per cui cioè $\Delta X = 0$ e $\Delta Y = 0$) restituirebbe valori stimati di a_x, a_y, b_x, b_y tutti pari a 0. In generale ciò chiaramente non succede, come risulta dai test precedenti sui valori medi di ΔX e ΔY che, nella maggioranza dei casi, hanno evidenziato la presenza di disturbi significativi. Per valutare se le stime di a_x, a_y, b_x e b_y restituite dalla regressione lineare sulle coordinate X e Y per ciascuna sessione di misura possano essere considerate statisticamente uguali ai loro valori attesi (tutti pari a 0), è stato eseguito un test F di Fisher sui parametri dei minimi quadrati. Gli esiti di tali test, eseguiti nuovamente con un livello di significatività del 5% sulle coordinate X e Y per ogni sessione di misura, sono riportati nelle Tabelle 10 e 11 rispettivamente per l'area 1 e l'area 2, utilizzando nuovamente i simboli ✓ e X.

Sessione di misura	Esito X	Esito Y
tablet 1	X	X
tablet 2	✓	✓
tablet 3	X	X
smart phone 1	X	X
smart phone 2	X	✓
smart phone 3	X	✓

Tabella 10. Esiti dei test sui parametri dei minimi quadrati sulle coordinate X e Y per ogni sessione di misura sull'area 1.

Sessione di misura	Esito X	Esito Y
tablet 1	X	X
tablet 2	✓	✓
tablet 3	X	✓
smart phone 1	X	X
smart phone 2	X	X
smart phone 3	X	X

Tabella 11. Esiti dei test sui parametri dei minimi quadrati sulle coordinate X e Y per ogni sessione di misura sull'area 2.

Come ci si attendeva, i test vengono superati in pochissimi casi. Esiti positivi si registrano, in particolare, su entrambe le coordinate X e Y per la seconda sessione di misura con il tablet sull'area 1 e la seconda sessione di misura con il tablet sull'area 2. Il test è inoltre superato sulla sola coordinata Y per la seconda e la terza sessione di misura con lo smart phone sull'area 1 e per la terza sessione di misura con il tablet sull'area 2. Si possono fare un paio di considerazioni. Innanzitutto, molti test non sono superati ma i valori empirici di F sono appena più alti dei corrispondenti valori teorici, tanto che un leggero incremento del livello di significatività del test li vedrebbe superati. Inoltre, la ragione per cui il test è superato per la seconda sessione di misura con il tablet sull'area 1 è nuovamente l'elevata dispersione delle coordinate registrate anche dopo la reiezione degli outlier (cfr. Tabella 6).

Per indagare ulteriormente le ragioni che rendono ΔX e ΔY statisticamente diversi da 0, si possono eseguire test separati sui singoli parametri dei minimi quadrati a_x, a_y, b_x e b_y . Ciò permette di valutare se la generale assenza di un adattamento lineare sia dovuto principalmente ai valori di uno tra i due parametri del modello. Si tratta in questo caso di test t di Student che confrontano la stima a minimi quadrati del parametro di interesse con il suo valore atteso (pari a 0 per tutti e quattro i parametri). Gli esiti dei test, eseguiti nuovamente con un livello di significatività del 5% sulle coordinate X e Y per ciascuna

sessione di misura, sono riportati nelle Tabelle 12 e 13 rispettivamente per l'area 1 e l'area 2.

Sessione di misura	a_X	a_Y	b_X	b_Y
tablet 1	X	X	✓	✓
tablet 2	✓	✓	✓	✓
tablet 3	✓	X	✓	X
smart phone 1	✓	✓	X	X
smart phone 2	✓	✓	✓	✓
smart phone 3	X	X	✓	✓

Tabella 12. Esiti dei test sui singoli parametri per le coordinate X e Y per ogni sessione di misura sull'area 1.

Sessione di misura	a_X	a_Y	b_X	b_Y
tablet 1	✓	X	✓	✓
tablet 2	✓	✓	✓	✓
tablet 3	✓	✓	✓	✓
smart phone 1	✓	✓	X	✓
smart phone 2	✓	X	✓	✓
smart phone 3	✓	✓	X	✓

Tabella 13. Esiti dei test sui singoli parametri per le coordinate X e Y per ogni sessione di misura sull'area 2.

Gli esiti di tali test devono essere valutati insieme a quelli dei precedenti test F (cfr. Tabelle 10 e 11). Si vede innanzitutto come nei pochi casi in cui il test F viene superato anche i due test t corrispondenti (cioè eseguiti sui singoli parametri, per la stessa coordinata e la stessa sessione di misura) sono superati. Questo ovvio risultato indica che, quando i parametri a e b sono tali per cui, considerati insieme, l'errore generato è statisticamente uguale a 0, chiaramente lo stesso risultato si ottiene se essi sono considerati separatamente. Il secondo caso è quello in cui il test F non sia superato ed uno solo dei due test t corrispondenti lo sia. Un esempio si ha per la terza sessione di misura con il tablet sull'area 1 per entrambe le coordinate X e Y, in cui i test t sono superati per il parametro a ma non per b ; esito opposto si verifica ad esempio per la prima sessione di misura con lo smart phone sull'area 2 per la coordinata Y, in cui il test è superato solo su b . Tali risultati indicano che, per queste sessioni di misura, uno solo dei due disturbi (ovvero una dipendenza locale dalla posizione di misura o un bias generale) è responsabile dell'errore. Un caso più semplice è invece quello in cui né il test F né i corrispondenti test t siano superati, esiti ad esempio della prima sessione di misura con il tablet sull'area 1 per la coordinata X. Ciò significa che, anche se considerati singolarmente, entrambi i disturbi contribuiscono in modo significativo a generare l'errore. L'ultimo caso, apparentemente strano ma che si verifica esattamente un terzo delle volte, è quello in cui il test F non sia superato ma entrambi i corrispondenti test t lo siano. Un esempio si verifica per la prima sessione di misura con il tablet sull'area 1 per la coordinata Y. Tale risultato indica che gli effetti dei disturbi sono tali per cui, se considerati insieme, l'errore risultante è significativamente diverso da 0, mentre se considerati singolarmente (cioè indipendentemente l'uno dall'altro) entrambi gli effetti non sono significativi. La maggior parte di tali casi sono proprio quelli per cui i test F con livello di significatività del 5% sono "vicini" ad essere superati (si veda sopra). In ogni caso, qualunque sia l'esito dei test precedenti, è doverosa una considerazione finale sull'estrema semplicità della relazione lineare che è stata ipotizzata per modellare l'errore di misura dei dispositivi mobili. Questo modello non tiene chiaramente in considerazione molti fattori che influenzano le singole osservazioni in ogni sessione di misura, come la geometria dei satelliti e gli effetti di multipath. Pur essendo comunque una semplice analisi preliminare, essa per-

mette di intuire la complessità della modellazione ed interpretazione delle misure di posizione da dispositivi mobili.

3.6 Dipendenza tra il comportamento degli errori in X e Y

È possibile eseguire un'ulteriore analisi per capire se esista una relazione statistica tra gli errori ΔX e ΔY sulle coordinate X e Y registrate dai dispositivi mobili. Tale analisi, che valuta se il comportamento degli errori nelle due direzioni sia legato e come, può essere utile ad esempio per determinare se, e come, ad un errore elevato in una direzione corrisponda un errore elevato anche nell'altra, oppure se le entità degli errori siano indipendenti. Un'indicazione qualitativa di una possibile dipendenza tra ΔX e ΔY può essere derivata visivamente da un semplice scatterplot delle osservazioni. La Figura 2 mostra a esempio lo scatterplot di ΔX e ΔY per la prima sessione di misura con il tablet sull'area 1. La dispersione visibilmente elevata dei punti sottolinea in questo caso l'assenza di una correlazione evidente, ovvero valori sia piccoli che elevati di ΔX corrispondono a valori sia piccoli che elevati anche di ΔY .

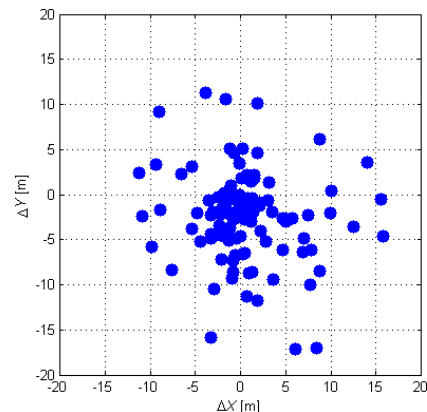


Figura 2. Scatterplot dei valori di ΔX e ΔY per la prima sessione di misura con il tablet sull'area 1.

Da un punto di vista quantitativo, un primo test utile può essere eseguito per valutare se esista indipendenza tra ΔX e ΔY . Un tipico test usato a tale scopo è il test del chi quadro di Pearson, la cui ipotesi è che le variabili da cui i campioni sono estratti siano indipendenti. Questo test è pensato per analizzare dati categorizzati, cioè i campioni devono essere preliminarmente suddivisi in categorie per costruire la tabella di distribuzione delle frequenze congiunte. Il numero di categorie in cui suddividere i campioni deve essere scelto attentamente come compromesso che soddisfi le condizioni opposte di: a) avere un numero di classi sufficientemente elevato per rendere il test attendibile; e b) avere un numero di classi sufficientemente piccolo per evitare il caso di frequenze congiunte nulle. Con questa premessa, poiché i valori di ΔX e ΔY variano generalmente in un intervallo di circa 40 metri attorno a 0 – con la sola eccezione della seconda sessione di misura con il tablet sull'area 1 (cfr. Tabella 6), è ragionevole raggrupparli in quattro classi equispaziate. In altre parole, se i valori di un campione variano da -20 a 20 m, la prima classe raggruppa i valori tra -20 e -10 m, la seconda raggruppa i valori tra -10 m e 0, e così via. Gli esiti dei test, eseguiti per ogni sessione di misura con un livello di significatività del 5%, sono riportati nelle Tabelle 14 e 15 rispettivamente per l'area 1 e l'area 2. Essi mostrano come, per circa la metà delle sessioni di misura, i valori di ΔX e ΔY risultino indipendenti. Poiché ciò accade con la medesima proporzione su entrambe le aree di test, è da escludersi una dipendenza dalla specifica area.

Sessione di misura	Esito
tablet 1	✓
tablet 2	X
tablet 3	✓
smart phone 1	✓
smart phone 2	X
smart phone 3	✓

Tabella 14. Esiti dei test di indipendenza per ogni sessione di misura sull'area 1.

Sessione di misura	Esito
tablet 1	X
tablet 2	✓
tablet 3	X
smart phone 1	X
smart phone 2	✓
smart phone 3	✓

Tabella 15. Esiti dei test di indipendenza per ogni sessione di misura sull'area 2.

Per indagare ulteriormente la relazione tra ΔX e ΔY sono stati eseguiti altri due test: quello del coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman e quello sul coefficiente di correlazione lineare (test di Pearson). Entrambi questi coefficienti esprimono il grado di correlazione monotona tra due variabili e il loro range di valori va da -1 a +1: -1 identifica una correlazione monotona negativa (cioè a valori piccoli di una variabile corrispondono valori elevati dell'altra, e a valori elevati di una variabile corrispondono valori piccoli dell'altra); +1 identifica una correlazione monotona positiva (cioè a valori piccoli di una variabile corrispondono valori piccoli dell'altra, e a valori elevati di una variabile corrispondono valori elevati dell'altra); 0 identifica infine l'assenza di correlazione monotona. Quest'ultima non è necessariamente un'indicazione di indipendenza poiché, in principio, potrebbe esistere una correlazione non monotona (se ad esempio i punti fossero distribuiti lungo una circonferenza). La differenza tra i coefficienti è che, mentre quello di Spearman (indicato come ρ_S) identifica una qualsiasi relazione monotona tra le variabili, il coefficiente di Pearson ρ misura solo il grado di correlazione lineare tra di esse.

I valori di ρ_S e gli esiti dei corrispondenti test per ciascuna sessione di misura sono riportati nelle Tabelle 16 e 17, rispettivamente per l'area 1 e l'area 2. I valori di ρ e gli esiti dei corrispondenti test, sempre riferiti all'area 1 e all'area 2, sono invece riportati nelle Tabelle 18 e 19. L'ipotesi per tutti i test è che non esista alcuna correlazione tra ΔX e ΔY . I risultati dei test, che indicano un quasi totale accordo tra i valori di ρ_S e ρ , mostrano alcuni risultati significativi e parzialmente inattesi. Innanzitutto si osserva un accordo con il precedente test di indipendenza di Pearson, ovvero le sessioni di misura per le quali ΔX e ΔY non risultano indipendenti sono esattamente le stesse che forniscono i valori assoluti più alti di ρ_S e ρ . In ogni caso, si possono trarre conclusioni diverse per le sessioni di misura sull'area 1 e sull'area 2. I risultati sull'area 1 (cfr. Tabelle 16 e 18) sottolineano la presenza di una correlazione significativa tra ΔX e ΔY unicamente per la seconda sessione di misura con lo smart phone, in cui sia ρ_S che ρ sono vicini a 0.5. I test sono inoltre non superati per la terza sessione di misura con lo smart phone, ma la correlazione non è particolarmente significativa in quanto i valori di ρ_S e ρ sono entrambi piccoli.

Risultati opposti si verificano invece per le sessioni di misura sull'area 2 (cfr. Tabelle 17 e 19). In questo caso, l'ipotesi di assenza di correlazione non è quasi mai soddisfatta. I valori di ρ_S e ρ , inoltre, che sono tutti negativi e in valore assoluto compresi nuovamente tra 0 e 0.5, suggeriscono l'occorrenza sistematica

Sessione di misura	ρ_S	Esito
tablet 1	-0.1039	✓
tablet 2	0.0930	✓
tablet 3	0.0791	✓
smart phone 1	0.0055	✓
smart phone 2	0.4817	X
smart phone 3	-0.2022	X

Tabella 16. Coefficienti di correlazione di Spearman ed esiti dei test per ogni sessione di misura sull'area 1.

Sessione di misura	ρ_S	Esito
tablet 1	-0.4186	X
tablet 2	-0.2059	✓
tablet 3	-0.5014	X
smart phone 1	-0.5169	X
smart phone 2	-0.2908	X
smart phone 3	-0.3184	X

Tabella 17. Coefficienti di correlazione di Spearman ed esiti dei test per ogni sessione di misura sull'area 2.

Sessione di misura	ρ	Esito
tablet 1	-0.1513	✓
tablet 2	0.0884	✓
tablet 3	0.0331	✓
smart phone 1	0.0159	✓
smart phone 2	0.4604	X
smart phone 3	-0.2108	X

Tabella 18. Coefficienti di correlazione di Pearson ed esiti dei test per ogni sessione di misura sull'area 1.

Sessione di misura	ρ	Esito
tablet 1	-0.4083	X
tablet 2	-0.2655	X
tablet 3	-0.4585	X
smart phone 1	-0.5052	X
smart phone 2	-0.3291	X
smart phone 3	-0.2224	✓

Tabella 19. Coefficienti di correlazione di Pearson ed esiti dei test per ogni sessione di misura sull'area 2.

di una correlazione negativa tra ΔX e ΔY che non si è invece evidenziata nell'area 1. La Figura 3 mostra ad esempio lo scatterplot per la prima sessione di misura con lo smart phone, che indica chiaramente come la nuvola di punti si estenda da nord-ovest a sud-est. Si possono chiaramente osservare due fenomeni: a) la presenza di una nuvola densa di punti attorno all'origine, che è comune a tutti gli scatterplot e corrisponde alle osservazioni con errori piccoli su entrambe le coordinate X e Y ; b) la presenza di molti punti nel quadrante $\Delta X < 0$, $\Delta Y > 0$. Tale trend, osservabile anche per le altre sessioni di misura sull'area 2, indica che vi è un'alta probabilità che, nelle misure della singola posizione, la coordinata X registrata dai dispositivi mobili sia sovrastimata (cioè $\Delta X < 0$) e la corrispondente coordinata Y sia sottostimata (cioè $\Delta Y > 0$). Poiché tale fenomeno si verifica per le sessioni di misura sia con il tablet che con lo smart phone, e siccome non si verifica nell'area 1, appare sensato attribuirlo ad alcuni particolari fenomeni (incogniti) presenti nell'area 2. Ulteriori misure (da eseguire auspicabilmente anche con dispositivi diversi) potrebbero fornire una comprensione maggiore di questo effetto.

3.7 Attendibilità del valore di accuratezza dichiarato

Va infine eseguita un'analisi per valutare l'attendibilità del valore di accuratezza che viene fornito dai dispositivi mobili insie-

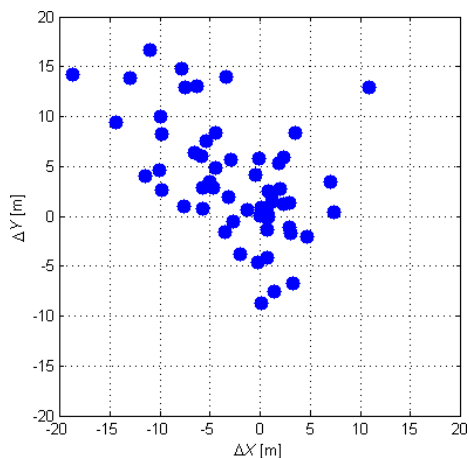


Figura 3. Scatterplot dei valori di ΔX e ΔY per la prima sessione di misura con lo smart phone sull'area 2.

me alla posizione. La documentazione ufficiale di Android definisce tale valore come il raggio di confidenza del 68%, ovvero vi è una probabilità del 68% che la posizione reale del punto misurato cada all'interno di un cerchio centrato sulla posizione registrata e di raggio pari all'accuratezza dichiarata (<http://developer.android.com/reference/android/location/Location.html>). Tale valore, espresso in metri e riferito alla sola accuratezza planimetrica, è generato invocando la funzione Android *getAccuracy*. Dal punto di vista statistico, nell'ipotesi che gli errori sulle posizioni seguano una distribuzione normale, la confidenza del 68% corrisponde a quella di una deviazione standard. Si tratta dunque di un valore rappresentativo dell'incertezza nella stima dell'accuratezza planimetrica ed è stato utilizzato come indice di riferimento in alcuni studi esistenti in letteratura (ad esempio Aguilar et al., 2007).

Il primo step dell'analisi consiste perciò nel valutare se la regola probabilistica definita dalla documentazione di Android sia verificata in corrispondenza delle misure eseguite. Ciò richiede un semplice confronto tra il valore di accuratezza dichiarato e la corrispondente distanza planimetrica (cioè l'errore reale). Un confronto qualitativo si può ottenere da un plot che rappresenta, per tutte le misure di una stessa sessione, sia il valore di accuratezza dichiarato che il corrispondente errore planimetrico. Un esempio è dato dalla Figura 4 relativa alla terza sessione di misura con il tablet sull'area 2.

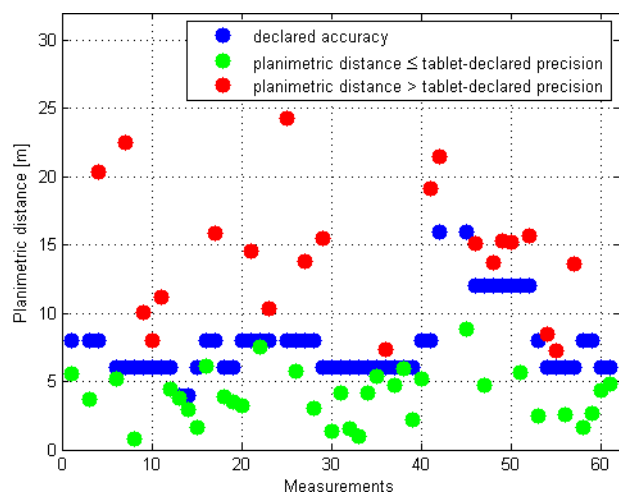


Figura 4. Confronto visivo tra il valore di accuratezza dichiarato ed il corrispondente errore planimetrico per la terza sessione di misura con il tablet sull'area 2.

Come accennato nel paragrafo 3.2, a causa di un processo di arrotondamento i valori di accuratezza dichiarati (rappresentati da punti blu in Figura 4) assumono soltanto uno tra un insieme predefinito di possibili valori. Per maggiore chiarezza, gli errori planimetrici sono invece rappresentati da punti verdi se minori della corrispondente accuratezza dichiarata, e da punti rossi se maggiori. La Tabella 20 mostra, per le sessioni di misura su entrambe le aree, le percentuali di posizioni registrate per le quali l'errore planimetrico è minore dell'accuratezza dichiarata.

Sessione di misura	% area 1	% area 2
tablet 1	80	30
tablet 2	66	42
tablet 3	49	61
smart phone 1	100	74
smart phone 2	96	92
smart phone 3	87	76

Tabella 20. Percentuale del numero di posizioni per ciascuna sessione di misura sulle aree 1 e 2 per cui l'errore planimetrico sulla posizione registrata è minore dell'accuratezza dichiarata.

I risultati sottolineano come la percentuale sia fortemente dipendente dalla specifica sessione di misura. È comunque possibile, nonostante ciò, esprimere qualche conclusione generale. Innanzitutto il valor medio di tutte le percentuali (per entrambe le aree) risulta pari al 71%, che sembra denotare un pressoché perfetto accordo con la regola probabilistica definita dalla documentazione di Android. Così in realtà non è se i risultati vengono analizzati separatamente per il tablet e lo smart phone, le cui percentuali medie sono rispettivamente del 55% e dell'88%. Tali risultati consentono di concludere che: a) il valore di accuratezza dichiarato dai dispositivi mobili è poco attendibile; b) lo smart phone mostra prestazioni migliori rispetto al tablet. Quest'ultima conclusione, che conferma quella del paragrafo 3.3, va nuovamente attribuita ai migliori e più recenti prodotti hardware e software (in particolare per ciò che concerne il SoC) dello smart phone rispetto al tablet.

Per indagare ulteriormente sulla relazione esistente tra l'accuratezza dichiarata e il corrispondente errore planimetrico, si può infine eseguire un test sul coefficiente ρ di Pearson. Le Tabelle 21 e 22 mostrano i valori di ρ e gli esiti dei corrispondenti test, rispettivamente per le sessioni di misura sull'area 1 e 2. I test, la cui ipotesi è che non esista correlazione tra l'accuratezza dichiarata e il corrispondente errore planimetrico, sono stati svolti come di consueto con un livello di significatività del 5%. I risultati sono piuttosto chiari. Con la sola eccezione della terza sessione di misura col tablet sull'area 2, i valori assoluti di ρ sono sempre piccoli ed i test corrispondenti generalmente non sono superati. Ciò conferma un'assenza di correlazione tra il valore di accuratezza dichiarato dai dispositivi mobili e l'errore planimetrico. Ciò è confermato anche qualitativamente dagli scatterplot delle variabili, un esempio dei quali (riferito alla seconda sessione di misura col tablet sull'area 1) è mostrato in Figura 5. L'assenza di correlazione si registra anche per le sessioni di misura con lo smart phone, nonostante la sua maggiore accuratezza planimetrica (cfr. paragrafo 3.3) e la sua verifica della condizione probabilistica sull'accuratezza dichiarata (si veda sopra). Si può quindi concludere, pur con la limitazione di aver considerato solamente dodici sessioni totali di misura (corrispondenti circa ad un migliaio di posizioni registrate), che il valore di accuratezza dichiarato dai dispositivi mobili è generalmente un'informazione inattendibile, in quanto solo raramente fornisce una misura dell'accuratezza reale. Tale valore appare anzi fortemente dipendente dallo specifico dispositivo utilizzato.

Sessione di misura	ρ	Esito
tablet 1	0.1642	✓
tablet 2	0.0060	✓
tablet 3	0.1043	✓
smart phone 1	0.2330	X
smart phone 2	0.1929	X
smart phone 3	0.1527	✓

Tabella 21. Coefficienti di correlazione di Pearson ed esiti dei corrispondenti test per ogni sessione di misura sull'area 1.

Sessione di misura	ρ	Esito
tablet 1	0.1112	✓
tablet 2	-0.0909	✓
tablet 3	0.4202	X
smart phone 1	0.2541	✓
smart phone 2	0.1807	✓
smart phone 3	0.1499	✓

Tabella 22. Coefficienti di correlazione di Pearson ed esiti dei corrispondenti test per ogni sessione di misura sull'area 2.

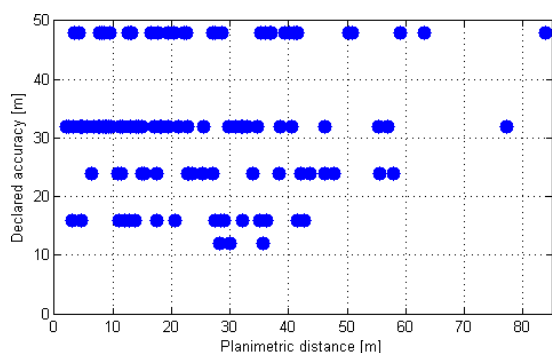


Figura 5. Scatterplot dell'accuratezza dichiarata e del corrispondente errore planimetrico per la seconda sessione di misura col tablet sull'area 1.

4. CONCLUSIONI

Negli ultimi anni le modalità di acquisizione, memorizzazione e fruizione di dati geospaziali hanno subito modifiche storiche. Gli incessanti sviluppi tecnologici legati all'evoluzione del Web nella sua versione 2.0 hanno ormai reso all'ordine del giorno le applicazioni basate, in modo più o meno diretto, su dati geografici raccolti da utenti comuni. Pratiche quali il *Volunteered Geographic Information* (o VGI), il *geocrowdsourcing* e la *citizen science* sono entrate in pianta stabile – oltre che nel gergo – anche nella dimensione moderna della cartografia e dei GIS. Cruciale, in questo panorama completamente rinnovato, è naturalmente l'aspetto legato alla qualità del dato.

Il presente lavoro si è inserito in questo contesto generale con l'obiettivo di indagare uno specifico aspetto della qualità dei dati raccolti dagli utenti – quello dell'accuratezza posizionale – prendendo in esame i più comuni strumenti oggi utilizzati per generare dati geospaziali: i ricevitori mobili come smart phone e tablet. Dotati di un gran numero di sensori tra cui un ricevitore GPS in grado di registrarne la posizione, al giorno d'oggi essi sono tradizionalmente utilizzati per una grande varietà di applicazioni. Qual è dunque l'accuratezza del posizionamento ottenibile da tali dispositivi?

Questo studio ha cercato di rispondere al quesito sulla base di molteplici osservazioni ed analisi, eseguite su una serie numerosa di misure sperimentali che hanno confrontato le posizioni registrate da un tablet ed uno smart phone con quelle – assunte come la verità a terra – misurate da un ricevitore geodetico. Le misure di campo sono state sottoposte ad una lunga serie di

elaborazioni statistiche finalizzate a studiare: gli errori posizionali commessi dai due strumenti; la presenza di outlier nei dati registrati; il comportamento statistico degli errori di misura, inclusa la loro dipendenza nelle due direzioni; e l'attendibilità del valore di accuratezza che viene fornito dai dispositivi insieme alla posizione. Il risultato più significativo riguarda la sostanziale dipendenza delle prestazioni dal particolare dispositivo testato: nel caso di studio lo smart phone, prodotto più recente e tecnologicamente avanzato del tablet, ha fornito risultati decisamente migliori. Nonostante ciò, sono stati comunque confermati i risultati di esperimenti precedenti disponibili in letteratura, secondo i quali l'accuratezza mediana del posizionamento da dispositivi mobili è generalmente dell'ordine di qualche metro. Ai fini più pratici legati all'utilizzo dell'informazione posizionale restituita da dispositivi mobili (per esempio in attività di *citizen science*), un risultato importante del lavoro è consistito nella verifica della sostanziale inattendibilità del valore di accuratezza che i dispositivi mobili restituiscono insieme alla posizione. Le misure eseguite hanno mostrato infatti come, in generale, i valori di accuratezza forniti non siano legati all'effettivo errore commesso e dipendano anzi fortemente dallo specifico dispositivo utilizzato.

Come sottolineato nel corso del lavoro, la valutazione eseguita si è basata su un campione totale di circa un migliaio di osservazioni raccolte in sole due aree diverse. I risultati ottenuti, benché in gran parte significativi, necessitano quindi di ulteriori misure (da eseguirsi auspicabilmente in aree e con dispositivi diversi) per confermarne la correttezza. Particolare attenzione dovrà essere rivolta anche a dispositivi dal funzionamento diverso, ad esempio quelli con sistema operativo iOS che, in base ad una precisa scelta, non sono stati considerati nel presente lavoro.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Aguilar, D., Barbeau, S., Labrador, M., Perez, A., Perez, R. and Winters, P., 2007. Quantifying the position accuracy of real-time multi-modal transportation behavior data collected using GPS-enabled mobile phones. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1992, pp. 54-60.
- Brovelli, M. A., Minghini, M. and Zamboni, G., 2015. Public Participation GIS: a FOSS architecture enabling field-data collection. *International Journal of Digital Earth*, 8(5), pp. 345-363. doi: 10.1080/17538947.2014.887150.
- Brovelli, M. A., Minghini, M. and Zamboni, G., in press. Participation in GIS: from mobile applications to collaborative virtual globes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.04.002.
- Cheng, Y.-C., Chawathe, Y., LaMarca, A. and Krumm, J., 2005. Accuracy characterization for metropolitan-scale Wi-Fi localization. In: *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services*, 6-8 June 2005, Seattle, WA (USA), ACM, pp. 233-245.
- Cheong, J. W., Li, B., Dempster, A. G. and Rizos, C., 2009. GPS/WiFi real-time positioning device: an initial outcome. In G. Gartner, W. Cartwright and M. P. Peterson, eds, *Location Based Services and TeleCartography II*. Dordrecht, Springer, pp. 439-456.
- Cohn, J. P., 2008. Citizen science: Can volunteers do real research?. *BioScience*, 58(3), pp. 192-197.

- Djuknic, G. M. and Richton, R. E., 2001. Geolocation and assisted GPS. *Computer*, 34(2), pp. 123-125.
- Federal Communications Commission, 2001. *Fact sheet: FCC Wireless 911 requirements*. US Government Printing Office.
- Fox, J., 2002. *An R and S-Plus companion to applied regression*. Thousand Oaks, CA, Sage.
- Gezici, S., 2008. A survey on wireless position estimation. *Wireless Personal Communications*, 44(3), pp. 263-282.
- Gillmor, D., 2006. *We the media: Grassroots journalism by the people, for the people*. Sebastopol, CA, O'Reilly Media.
- Goodchild, M. F., 2007. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), pp. 211-221.
- Grey, F., 2009. Viewpoint: The age of citizen cyberscience. CERN Courier <http://cerncourier.com/cws/article/cern/38718> (13 June 2015).
- Haklay, M., 2013. Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation. In: D. Sui, S. Elwood and M. Goodchild, eds, *Crowdsourcing Geographic Knowledge*. Dordrecht, Springer, pp. 105-122.
- Howe, J., 2006. Crowdsourcing: A Definition. http://crowdsourcing.typepad.com/cs/2006/06/crowdsourcing_a.html (13 June 2015).
- Huber, P. J., 1964. Robust estimation of a location parameter. *The Annals of Mathematical Statistics*, 35(1), pp. 73-101.
- LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J., Smith, I., Scott, J., Sohn, T., Howard, J., Hughes, J., Potter, F., Tabert, J., Powlledge, P., Borriello, G. and N, S. B., 2005. Place lab: Device positioning using radio beacons in the wild. In: *Pervasive computing*. Dordrecht, Springer, pp. 116-133.
- Leica Geosystems, 2005. *Leica GPS1200 Series: Technical Data*. Heerbrugg, Switzerland: Leica Geosystems.
- Maguire, D. J., 2007. GeoWeb 2.0 and volunteered GI. In: *Workshop on Volunteered Geographic Information*, 13-14 December 2007, Santa Barbara, CA (USA), pp. 104-106.
- Maronna, R. A., Martin, R. D. and Yohai, V. J., 2006. *Robust statistics*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.
- O'Reilly, T., 2005. What is Web 2.0: Design patterns and business models for the next generation of software <http://oreilly.com/pub/a/web2/archive/what-is-web-20.html> (21 April 2015).
- Porcino, D., 2001. Location of third generation mobile devices: A comparison between terrestrial and satellite positioning systems. In: *Proceedings of the IEEE 53rd Vehicular Technology Conference (VTS)*, 6-9 May 2001, Rhodes (Greece), Vol. 4, pp. 2970-2974.
- Richton, B., Vannucci, G. and Wilkus, S., 2002. Assisted GPS for Wireless Phone Location—Technology and Standards. In: *Symposium on Next Generation Wireless Networks*, 26 May 2000, Newark, NJ (USA). Berlin Heidelberg, Springer, pp. 129-155.
- Serr, K., Windholz, T. and Weber, K., 2006. Comparing GPS receivers: A field study. *URISA Journal*, 18(2), pp. 19-24.
- Silvertown, J., 2009. A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), pp. 467-471.
- Surowiecki, J., 2005. *The wisdom of crowds*. New York, NY, Random House.
- Van Diggelen, F., 2002. Indoor GPS theory & implementation. In: *Proceedings of the 2002 IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 15-18 April 2002, Palm Springs, CA (USA), IEEE, pp. 240-247.
- Vittorini, L. D. and Robinson, B., 2003. Optimizing indoor GPS performance. *GPS World*, 14, 40.
- Wallbaum, M., 2007. A priori error estimates for wireless local area network positioning systems. *Pervasive and Mobile Computing*, 3(5), pp. 560-580.
- Wang, S., Min, J. and Yi, B. K., 2008. Location based services for mobiles: Technologies and standards. In: *Proceedings of the IEEE international conference on communication (ICC)*, 19-23 May 2008, Beijing (China), pp. 35-38.
- Zandbergen, P. A., 2009. Accuracy of iPhone locations: A comparison of assisted GPS, WiFi and cellular positioning. *Transactions in GIS*, 13(s1), pp. 5-25.
- Zandbergen, P. A. and Barbeau, S. J., 2011. Positional accuracy of assisted GPS data from high-sensitivity GPS-enabled mobile phones. *Journal of Navigation*, 64(03), pp. 381-399.