

# UNA METODOLOGIA AUTOMATICA PER L'IDENTIFICAZIONE E LA CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI TRATTI STRADALI OMOGENEI CON STRUMENTI GIS

*D. Rogano<sup>1</sup>, G. Guido<sup>1</sup> e A. Vitale<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Università della Calabria– Dipartimento di Ingegneria Civile

## 1 – Introduzione

I motivi principali per cui risulta importante identificare correttamente la successione di elementi geometrici tradizionali di un tracciato planimetrico, quali rettilinei e curve, sono molteplici; primo fra tutti è sicuramente l'aumento del rischio di incidenti stradali in curva. I tratti di strada curvilinei sono infatti luoghi dove il rischio di incidente aumenta come risultato dello sbandamento del veicolo o per la scarsa visibilità del conducente. Ogni anno, globalmente, il numero di decessi a causa di incidenti sulla strada è di circa 1,3 milioni. Soltanto nel 2014, sono stati registrati 26.010 decessi nell'Unione Europea e 3.385 decessi in Italia causati da incidenti stradali (AIPCR Italia, 2014).

Secondo la sintesi dell'Associazione Mondiale della Strada, il tasso di incidenti in curva è da 1,5 a 4 volte superiore rispetto a quello su rettilineo. Oltre ai rischi per la sicurezza, le curve rappresentano inoltre un elemento di moderazione del traffico, perché gli automobilisti rallentano quando si avvicinano alla curva. Essi sono costretti a prestare maggiore attenzione nelle aree con una maggiore frequenza di curve rispetto ad aree con prevalenza di rettilinei, che rappresentano un rischio per la perdita di concentrazione del guidatore.

Il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, in allegato al D.M. previsto dall'art.8 del Decreto Legislativo n.35 del 2011, ha emanato le “*Linee Guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali*”. Tali Linee Guida stabiliscono i criteri e le modalità per effettuare le ispezioni di sicurezza sulle infrastrutture esistenti e per l'attuazione del processo per la classificazione della sicurezza della rete stradale.

In particolare, è prevista una fase di identificazione dei tratti stradali omogenei, che deve essere effettuata dagli enti proprietari delle strade.

### 1.1 – Obiettivo

L'obiettivo principale dello studio è stato quello di sviluppare un algoritmo in grado di identificare automaticamente i tratti di strada omogenei per geometria (rettilinei e curve) a partire da una rete stradale vettoriale in ambiente GIS. L'algoritmo è stato sviluppato in *python* e può essere eseguito su diversi applicativi Desktop GIS (ESRI ArcGIS, GRASS GIS, QuantumGIS, etc.), modificando opportunamente le librerie per la visualizzazione dei layer generati dall'algoritmo per ogni applicativo.

È stato inoltre individuato un set di parametri ottimali a seguito della calibrazione dell'algoritmo, in modo tale da individuare il maggior numero di tratti omogenei e di estrarre le informazioni geometriche per ogni tratto individuato in maniera automatica.

Con il termine curva all'interno dell'articolo si fa riferimento a diverse categorie di curve, da quelle circolari a quelle a raggio variabile, progettate in modo da garantire una variazione di accelerazione centrifuga non compensata contenuta entro valori accettabili. Per la caratterizzazione geometrica dei tratti curvilinei, ai fini della sicurezza stradale, per ogni elemento identificato l'algoritmo individua il raggio minimo.

## 2 – Stato dell'arte

La classificazione dei tratti di strada risulta necessaria ai fini delle analisi di sicurezza che studiano la correlazione tra la geometria dell'infrastruttura e i rischi di incidentalità.

Hu e Yang hanno rilevato che i segmenti rettilinei connessi a curve con raggio ridotto rappresentano zone di rischio su strade in condizioni di basso volume di traffico (Hu and Yang, 2011), in particolare per il ribaltamento dei veicoli, che si verifica soprattutto in combinazione di curve verticali e orizzontali

a raggio ridotto.

Discetti et al. hanno osservato che la velocità dell'85-esimo percentile nelle curve orizzontali è correlata al raggio e allo sviluppo della curva. Per aumentare la sicurezza delle curve orizzontali, un segnale di limite di velocità può essere posizionato in prossimità dell'inizio della curva, e il valore di velocità può essere determinato dal raggio e dallo sviluppo della curva, oltre che da un insieme di altri fattori (Discetti et al., 2011).

Esistono diversi approcci per l'identificazione dei tratti di strada omogenei da diverse fonti. Le immagini satellitari ad alta risoluzione sono una delle fonti più utilizzate per l'estrazione delle geometrie relative alle infrastrutture stradali. Sono state utilizzate diverse tecniche di elaborazione delle immagini da parte di diversi ricercatori per il rilievo della geometria della carreggiata da immagini satellitari (Dial et al., 2001, Zhao et al., 2002, Anil and Natarajan, 2010, Dong et al., 2007, Easa et al., 2007). In particolare, presso la Ryerson University è stata condotta un'indagine approfondita sull'identificazione delle curve orizzontali da immagini satellitari IKONOS (Dong et al., 2007, Easa et al., 2007). La ricerca ha dimostrato la fattibilità di estrarre le caratteristiche geometriche delle curve circolari semplici e a raggio variabile utilizzando un algoritmo di elaborazione delle immagini satellitari ad alta risoluzione.

D'altra parte però, gli svantaggi nell'utilizzo delle immagini satellitari sono evidenti: la precisione si basa soprattutto sulla risoluzione delle immagini e l'onere computazionale degli algoritmi è piuttosto elevato. La georeferenziazione del dato dopo l'estrazione è un altro problema relativo all'elaborazione da immagini satellitari.

Anche i dati GPS sono stati utilizzati per l'estrazione dei dati geometrici relativi alle infrastrutture stradali (Breyer, 2000, Souleyrette et al., 2002, Borgenreif et al., 2012, Hans et al., 2012). In questi approcci, attraverso un veicolo equipaggiato con un acquisitore GPS, sono state registrate le coordinate geografiche di punti ad intervalli temporali regolari. Le curve orizzontali sono state poi identificate e sono stati calcolati i raggi di curvatura attraverso l'uso del GIS sulla base dei punti battuti dal GPS. Alcuni ricercatori, con l'utilizzo della tecnologia laser-scanner, hanno ricostruito la geometria tridimensionale delle curve (Kim et al., 2008). Anche se questi metodi possono raggiungere buoni livelli di precisione, sono necessari notevoli sforzi per la raccolta dei dati. Inoltre, se applicati ad un numero elevato di strade, questi metodi richiedono tempi e costi enormi per l'utilizzo delle tecnologie necessarie al rilievo dei dati.

Le mappe digitali sono un'altra fonte alternativa di dati. Alcuni ricercatori inglesi e irlandesi sono riusciti ad estrarre le geometrie delle autostrade da mappe digitali in ambiente AutoCAD (Hashim e Bird, 2004, Watters e O'Mahony, 2007). La limitata disponibilità di mappe digitali ha comunque vincolato l'utilizzo dei dati per lo studio. Altri ricercatori hanno iniziato ad estrarre i dati di geometria delle curve utilizzando gli shapefile ArcGIS delle autostrade (Price, 2010). Lo strumento "Curve Calculator" di ArcGIS fornisce funzioni simili per il calcolo delle informazioni geometriche degli shapefile (ArcGIS Desktop 10.2.3, 2013).

I metodi di queste applicazioni richiedono l'identificazione manuale e la costruzione dei punti di tangenza sulle linee; tale operazione richiede un grosso carico di lavoro e un basso rendimento del metodo stesso.

Un approccio semiautomatico è stato individuato presso la North Carolina State University. Questo metodo consente di estrarre le informazioni geometriche delle carreggiate a partire da un database geografico e inserisce le coordinate delle curve in un file di testo (Rasdorf et al., 2012). Il metodo è specificatamente progettato per una mappa stradale in ambiente GIS che ha un particolare sistema di riferimento definito dai metri, ed è inoltre richiesta la creazione manuale del layer delle curve a partire dalle coordinate create dallo strumento.

### 3 – Metodologia

L'algoritmo utilizzato per il presente studio è stato sviluppato in *Python* e implementato sul software GIS *QuantumGIS* per la calibrazione e la validazione.

La fonte dei dati utilizzata per l'applicazione della metodologia è il database "DBPrior10k", realizzato nell'ambito dell'intesa Stato, Regioni, Enti Locali sui Sistemi Informativi Geografici (IntesaGIS). Gli strati utilizzati sono quelli relativi alla viabilità stradale, rappresentanti gli assi delle strade di tipo

Autostrada, Strade Statali, Provinciali e Comunali. Gli elementi lineari sono organizzati secondo la struttura della segmentazione dinamica e questo garantisce la continuità da intersezione a intersezione degli elementi (CISIS – DBPrior10k), che rappresenta un requisito fondamentale per il corretto funzionamento dell’algoritmo.

In particolare, a partire dai dati vettoriali rappresentativi degli assi stradali, la metodologia consente la identificazione dei tratti omogenei (rettifili e curve) e la caratterizzazione geometrica di tutti gli elementi identificati. La prima fase consente di classificare ogni tratto di strada come elemento rettilineo o curvilineo, la seconda associa ad ogni elemento il raggio di curvatura minimo e lo sviluppo.

Per la validazione dell’algoritmo nella fase di riconoscimento degli elementi stradali e nella fase di caratterizzazione geometrica è stato utilizzato il database della rete stradale realizzato da ANAS S.p.A nell’ambito della realizzazione del catasto informatizzato, in qualità di gestore della rete stradale e autostradale italiana di interesse nazionale.

### 3.1 – Preparazione dei dati

Prima di procedere all’applicazione della metodologia, è necessario pretrattare opportunamente i dati. Può infatti accadere che per alcuni tratti, i segmenti definiti dai vertici della polilinea non siano contigui e potrebbero causare l’interruzione anticipata dell’algoritmo. È opportuno dunque garantire la contiguità di tutti i segmenti dei tratti di strada esaminati, semplicemente attivando le opzioni di *snapping* per i vertici disponibili nei principali software GIS, in modo tale da agganciare automaticamente tutti i segmenti non connessi.

QuantumGIS consente l’attivazione selettiva della modalità di snapping al vertice, al segmento oppure a entrambi gli elementi, con la possibilità di impostare un livello di tolleranza personalizzato e l’ancoraggio automatico delle intersezioni.

### 3.1 – L’algoritmo di identificazione e di caratterizzazione geometrica dei tratti

L’algoritmo per la classificazione e la geometrizzazione dei tratti di strada omogenei è schematizzato in figura (fig. 1).

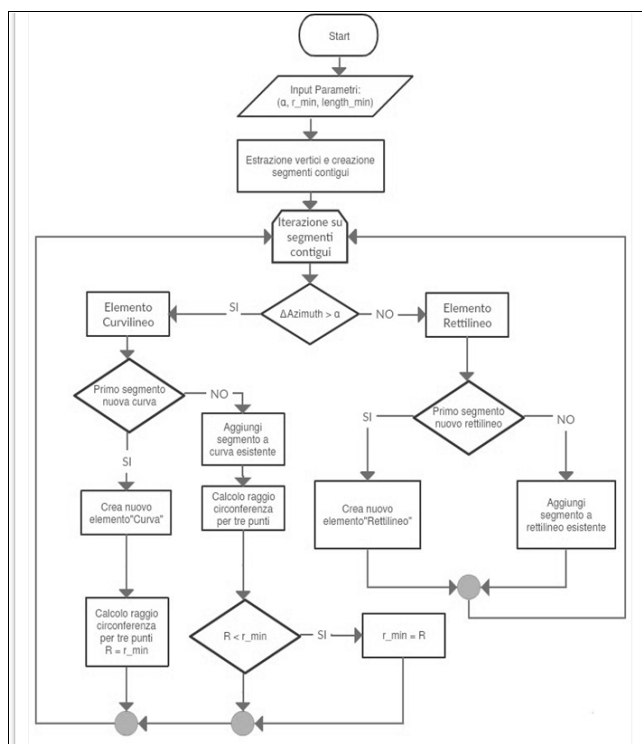


Fig. 1- Fase di classificazione dell’algoritmo

Una curva è tipicamente costituita da un segmento di una circonferenza di un determinato raggio collegata ad un segmento rettilineo attraverso curve di transizione (almeno per le strade di concezione

moderna). Nella cartografia digitale, i tratti di strada sono rappresentati attraverso il formato vettoriale, in particolare come polilinee.

La prima fase di identificazione degli elementi stradali consiste nell'estrazione dei vertici di ogni polilinea e nella classificazione dei segmenti che congiungono le coppie di vertici contigui. Per ogni segmento viene successivamente calcolato l'*azimut*, ovvero l'angolo di direzione rispetto al nord geografico espresso in gradi; la variazione di *azimut* ( $\Delta\text{azimut}$ ) per ogni coppia di segmenti consecutivi rappresenta un parametro fondamentale per l'individuazione dei tratti omogenei.

L'algoritmo consente l'inserimento di tre parametri per la calibrazione della procedura e relativi alla sensibilità di identificazione dei tratti omogenei, alla lunghezza minima di un singolo tratto e al raggio di curvatura massimo da considerare per ogni tratto curvilineo.

La sensibilità di identificazione dei tratti curvilinei dipende dal parametro  $\alpha$ , che rappresenta il valore soglia della variazione di direzione dei tratti. Per ogni coppia di segmenti l'algoritmo esegue la differenza tra l'*azimut* del primo segmento e quello del segmento successivo; nel caso in cui la differenza sia superiore al valore minimo di soglia  $\alpha$ , si segnala la misura  $\Delta\text{azimut}$  come oggetto di una variazione significativa (tratto curvilineo), altrimenti si rileva come variazione di direzione trascurabile (tratto rettilineo). La sensibilità dell'algoritmo è determinata dalla scelta del valore della soglia  $\alpha$ : maggiore è la soglia, minore è la sensibilità.

Il secondo parametro richiesto dall'algoritmo è la lunghezza minima  $\lambda$  e si riferisce alla lunghezza minima in metri che ogni segmento deve avere per l'identificazione. Da un punto di vista pratico, se in una combinazione identificata come curva-rettilineo-curva il tratto rettilineo non superasse un determinato valore di lunghezza, la sequenza potrebbe essere un unico tratto con curvatura a raggio variabile.

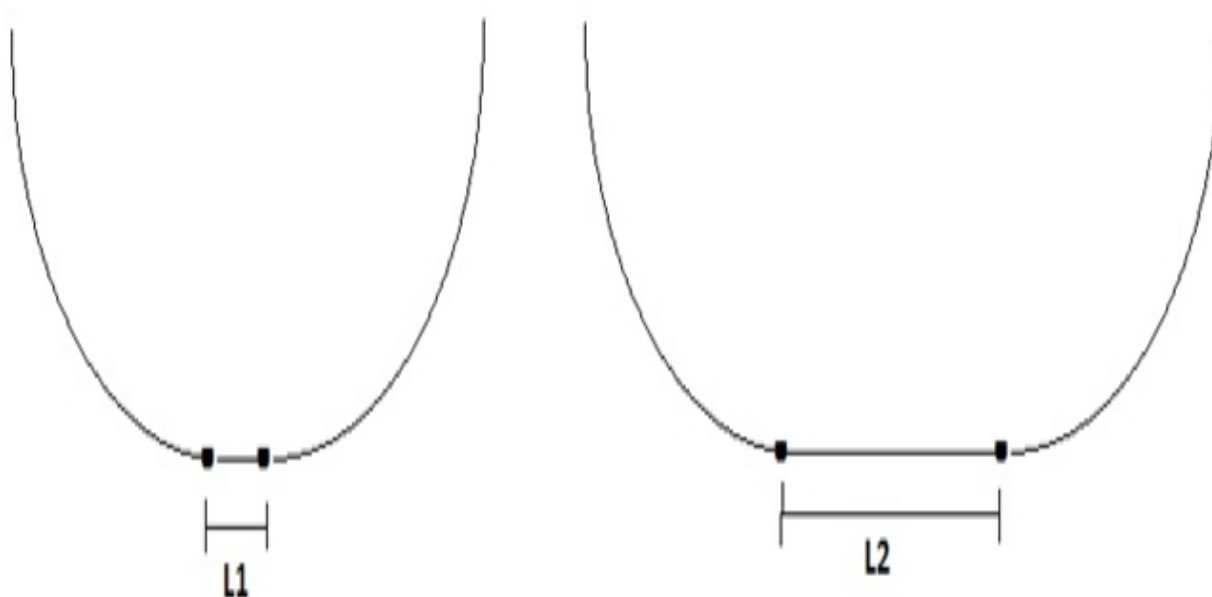
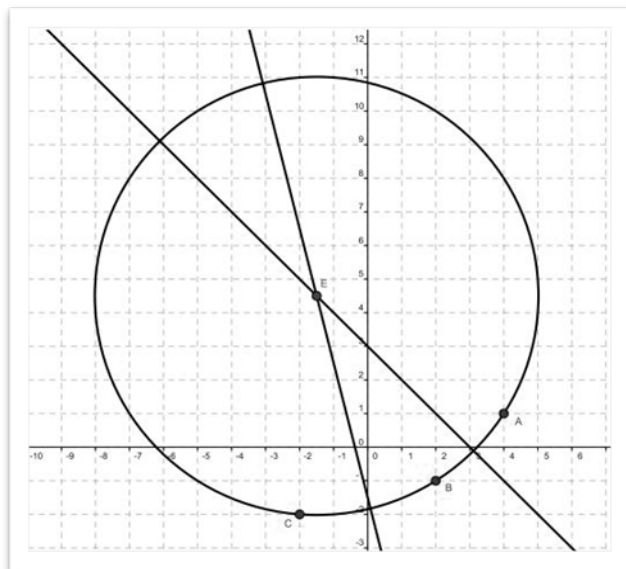


Fig. 2 - Lunghezza minima tratti

Il terzo parametro che è possibile impostare riguarda il valore di raggio massimo, oltre il quale la procedura considera il tratto in esame come rettilineo; nel caso in esame, il parametro è stato posto pari a 1000 metri, considerato che nella classificazione effettuata da ANAS tale valore rappresenta la soglia massima utilizzata.

Durante la fase di esecuzione dell'algoritmo, ad ogni iterazione si estraggono ordinatamente tre punti consecutivi (che identificano la coppia di segmenti), nel caso in cui il tratto computato risulti curvilineo ( $\Delta\text{azimut} > \alpha$ , i punti non sono allineati) l'algoritmo individua la circonferenza passante per i tre punti e ne calcola le coordinate del centro e il raggio (fig. 3).



**Fig. 3** – Circonferenza passante per tre punti consecutivi non allineati della geometria

Se la curva individuata è costituita da più di tre punti, la procedura aggiorna ad ogni iterazione le coordinate del centro e il raggio con il minimo valore individuato, tenendo traccia di tutti i valori di raggio calcolati, in modo da individuare curvatures a raggio variabile e associare ad ogni tratto curvilineo il valore di raggio minore.

Utilizzando tre punti consecutivi A, B, C di coordinate  $[(x)_A, (y)_A)$ ,  $[(x)_B, (y)_B)$ ,  $[(x)_C, (y)_C)$ , il centro  $(x_{Circle}, y_{Circle})$  e il raggio  $(R)$  della circonferenza passante per i tre punti è calcolato dalle equazioni eq. 1, eq. 2 ed eq. 3, facendo riferimento all'equazione dell'unica circonferenza passante per tre punti non allineati.

$$x_{Circle} = \frac{(x_C^2 + y_C^2) - (x_A^2 + y_A^2) + \left\{ \frac{(x_B^2 + y_B^2) - x_C^2 - y_C^2}{(x_B^2 + y_B^2)} \right\} * (y_A - y_C)}{2 * \left\{ (x_C - x_A) + \frac{(x_A - x_B)}{(y_B - y_A)} * (y_C - y_A) \right\}}$$

**Eq. 1** – Coordinata x del centro di una circonferenza passante per tre punti

$$y_{Circle} = \frac{(x_B^2 + y_B^2) - (x_A^2 + y_A^2) + 2 * x_{Circle} * (x_A - x_B)}{2 * (y_B - y_A)}$$

**Eq. 2** – Coordinata y del centro di una circonferenza passante per tre punti

$$R = \sqrt{(x_A - x_{Circle})^2 + (y_A - y_{Circle})^2}$$

**Eq. 3** – Equazione del raggio di una circonferenza passante per tre punti

Lo sviluppo del tratto identificato è automaticamente calcolato dal GIS sulla base dell'attributo *length* della geometria e pari alla somma della lunghezza di tutti gli elementi appartenenti al tratto.

L'algoritmo consente inoltre di individuare i tratti curvilinei consecutivi con curvatura inversa, confrontando opportunamente il segno del valore **Azimuth** (fig. 4).

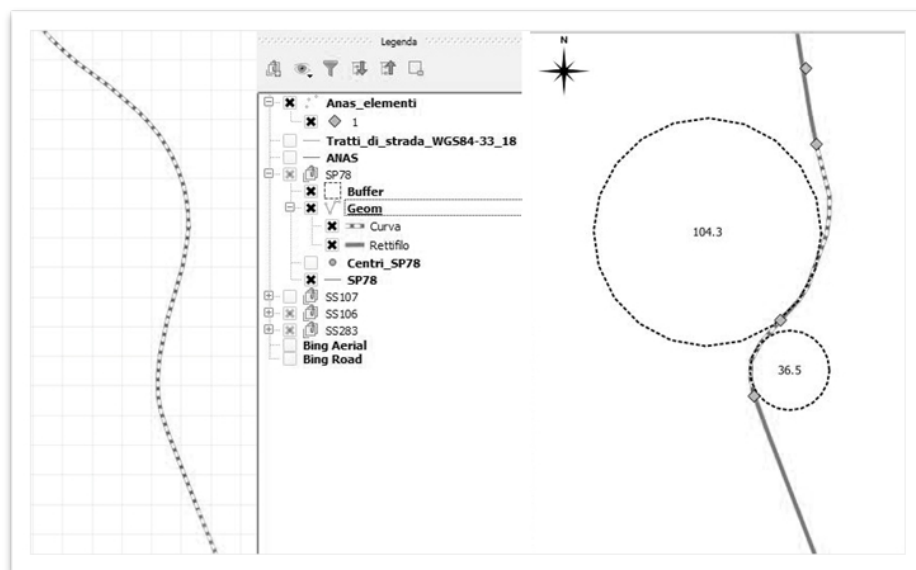


Fig. 4 - Curve inverse individuate dall'algoritmo

#### 4 – Applicazione del metodo

I dati vettoriali rappresentativi della rete stradale utilizzati per la calibrazione e la validazione dell'algoritmo provengono dalla base di dati del catasto informatizzato realizzato da ANAS S.p.a. quale gestore della rete stradale e autostradale nazionale. Sono stati selezionati 4 tratti in un'area test della regione Calabria per un totale di 25,574 Km e un numero di tratti identificati (curvi e rettilinei) dall'Ente gestore nella fase di rilievo delle infrastrutture pari a 128 (fig. 5).

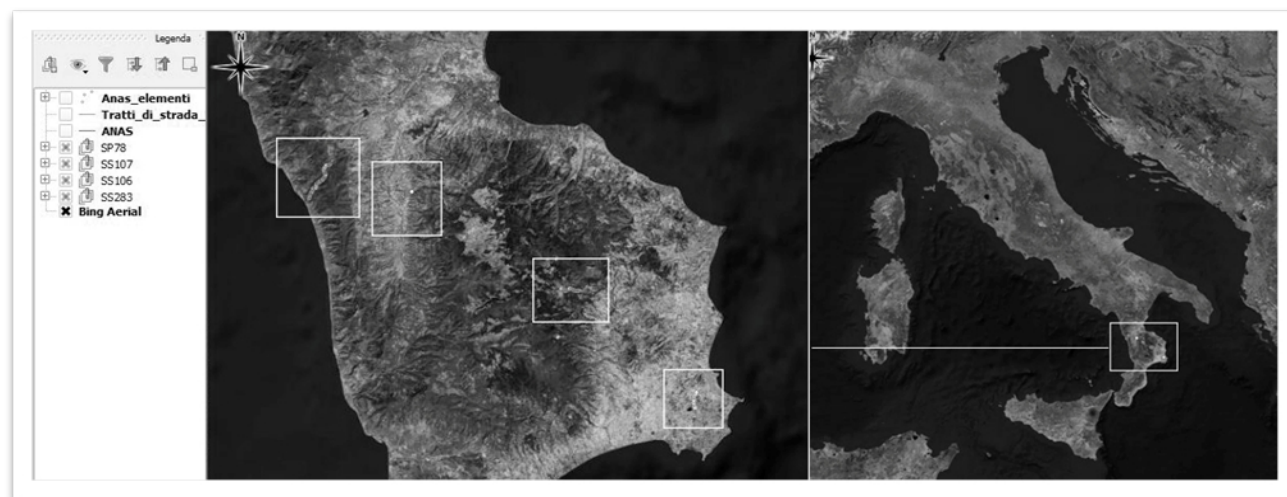


Fig. 5 - Area di studio

La stima dei parametri per l'ottimizzazione dell'algoritmo nella fase di identificazione dei tratti omogenei per geometria ha richiesto 81 simulazioni sul software GIS per ogni tratto esaminato. Il numero di simulazioni necessarie alla calibrazione è il risultato di tutte le combinazioni di parametri utilizzati, facendo variare il parametro  $\alpha$  relativo alla soglia di variazione di azimuth da 1 a 5 con passo 0,5 gradi sessagesimali (9 valori) e il parametro  $\lambda$  relativo alla lunghezza minima di ogni tratto da 10 a 50 con passo 5 metri (9 valori).

Per ogni combinazione di parametri è stato misurato il numero di tratti individuati dall'algoritmo, in modo da valutare per ogni simulazione la capacità di identificazione dell'algoritmo misurata come numero di elementi individuati rispetto al numero di elementi classificati dall'Ente gestore espresso in percentuale. Il set di parametri associato alla percentuale maggiore è stata selezionato come combinazione ottimale per ogni tratto esaminato. Nella tabella (tab. 1) sono riportati per ogni tratto i parametri corrispondenti alla percentuale di identificazione degli elementi curvilinei e rettilinei più elevata.

| Tratto esaminato | Parametro $\alpha$ [°] | Parametro $\lambda$ [m] | Elementi database ANAS | Elementi individuati dall'algoritmo | Percentuale di identificazione |
|------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| SP78             | 4,5                    | 10                      | 30                     | 25                                  | 83,3 %                         |
| SS107            | 2.5                    | 30                      | 16                     | 12                                  | 75 %                           |
| SS106            | 2.5                    | 35                      | 14                     | 14                                  | 100 %                          |
| SS283            | 2.5                    | 30                      | 68                     | 64                                  | 94.12 %                        |

**Tab. 1** – Identificazione dei tratti omogenei per geometria

Per tutti i tratti individuati dalla procedura automatica, è stata effettuata una stima dell'errore quadratico medio (Root Mean Square Error, RMSE) misurato fra i punti riportati sul database ANAS (inizio e fine tratto) e i punti individuati dall'algoritmo per ogni geometria estratta. Tale indicatore assume l'unità di misura della grandezza stimata, nel caso in esame è espressa in metri ed è rappresentativa dell'errore di posizionamento dell'algoritmo dei punti di inizio e fine di ogni geometria.

L'RMSE non rappresenta tuttavia una stima assoluta dell'errore, in quanto dipendente dal range di variazione delle misure effettuate; è stato pertanto calcolato per ogni tratto l'errore quadratico medio percentuale (Root Mean Square Error Percentage, RMSEP), un indice assoluto dell'affidabilità della stima effettuata, in quanto per ogni misura l'errore viene pesato in base allo sviluppo della geometria. Il calcolo è stato effettuato facendo riferimento alla relazione (eq. 4):

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{S_i}\right)^2}{n}}$$

**Eq. 4** – Equazione dell'errore quadratico medio percentuale

con:

$X_i$  = Somma degli scostamenti in metri tra i punti di inizio e fine geometria del database ANAS e i punti individuati dall'algoritmo all'i-esimo elemento,

$S_i$  = Sviluppo della geometria i-esima,

$n$  = Numero di elementi geometrici nel tratto esaminato.

| Tratto esaminato | Numerosità campione | RMSE Punto inizio geometria [m] | RMSE Punto fine geometria [m] | RMSEP [%] |
|------------------|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------|
| SP78             | 30                  | 2.8                             | 3.0                           | 0.45      |
| SS107            | 16                  | 2.5                             | 2.2                           | 0.23      |
| SS106            | 14                  | 3.3                             | 3.2                           | 0.30      |
| SS283            | 68                  | 2.5                             | 2.5                           | 0.44      |

**Tab. 2** – Analisi dell'errore

Dall'analisi statistica svolta in merito al numero di tratti correttamente individuati è emerso che l'algoritmo è stato in grado di identificare la maggior parte delle geometrie sui tratti esaminati.

Anche i risultati ottenuti in termini di errore quadratico medio e relativi allo scostamento dei punti di inizio e fine geometria sono sufficientemente attendibili, con un valore massimo di RMSE pari a 3,3 metri. Inoltre dalla stima dell'errore attraverso un indice assoluto che tiene conto dell'errore di individuazione dei punti in rapporto allo sviluppo della geometria, è emerso che l'algoritmo fornisce buoni risultati, con valori di RMSEP inferiori allo 0,5 % (tab. 2).

## 5 – Conclusioni

In questa ricerca è stato sviluppato un algoritmo per il riconoscimento automatico e per la caratterizzazione geometrica dei tratti di strada omogenei a partire dalla cartografia stradale in formato vettoriale. La procedura proposta consente l'identificazione dei punti iniziali e finali dei tratti omogenei, nonché dei centri e dei raggi delle circonferenze che meglio approssimano i tratti curvilinei, grandezze utilizzate per la stima del raggio di curvatura.

È opportuno evidenziare che una buona calibrazione dell'algoritmo è un passaggio cruciale per

L'ottimizzazione della procedura di classificazione della rete stradale. Risulta inoltre fondamentale disporre di una base di dati vettoriali costruita secondo specifici standard, quali la struttura a grafo, vincoli di connessione e segmentazione dinamica dei tratti.

L'algoritmo di identificazione e geometrizzazione dei tratti di strada si propone come base per la procedura automatica di classificazione della sicurezza della rete stradale prevista ai sensi dell'art. 8 del D.L. n.35/2011 emanato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. In particolare, calibrando opportunamente l'algoritmo, è possibile automatizzare la fase di identificazione dei tratti di strada omogenei prevista dalle linee guida con la possibilità di effettuare analisi quantitative di sicurezza stradale correlando ad esempio i dati di incidentalità pregressa alla geometria del tracciato.

### Riferimenti bibliografici

Anil, P. N., and S. Natarajan. «Automatic Road Extraction from High Resolution Imagery Based on Statistical Region Merging and Skeletonization». *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, No. 3, 2010, pp. 165–171.

Cafio, S., G. La Cava, and A. Montella, 2011, «Safety Inspections as Supporting Tool for Safety Management of Low-Volume Roads». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2203, pp. 116–125, Transportation Research Board of the National Academies, 2011, Washington, D.C.

Dial, G., L. Gibson, and R. Poulsen, 2001, «IKONOS Satellite Imagery and Its Use in Automated Road Extraction». *Automatic Extraction of ManMade Objects from Aerial and Space Images (III)* (E. P. Baltsavias, A. Gruen, and L. Van Gool, eds.), A. A. Balkema, Lisse, Netherlands.

Discetti, P., G. Dell'Acqua, and R. Lamberti, 2011, «Models of Operating Speeds for Low-Volume Roads», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2203, pp. 219–225, Transportation Research Board of the National Academies, 2011, Washington, D.C.

Discetti, P., and R. Lamberti, 2011, «Traffic Sign Sight Distance for LowVolume Roads». In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2203, pp. 64–70, Transportation Research Board of the National Academies, 2011, Washington, D.C.

Dong, H., S. M. Easa, and J. Li. «Approximate Extraction of Spiralled Horizontal Curves from Satellite Imagery». *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 133, No. 1, 2007, pp. 36–40.

Easa, S. M., H. Dong, and J. Li. «Use of Satellite Imagery for Establishing Road horizontal Alignments». *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 133, No. 1, 2007, pp. 29–35.

Findley, D.J, Zegeer, C.V., Sundstrom, C.A., Hummer, Rasdorf, W., Fowler, T.J., 2012, «Finding and Measuring Horizontal Curves in a Large Highway Network: A GIS Approach». *Public works Management & Policy*. Vol. 17-2, pp 189-211, 2012.

Hu, J., and Y. Yang, 2011, «Safety of Driving Behavior on Low-Volume Roads in China: A Case Study of Qinghai–Tibet Highway». In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2203, pp. 100–105. Transportation Research Board of the National Academies, 2011, Washington, D.C.

Keaton, T., and J. Brokish, 2003, «Evolving Roads in IKONOS Multispectral Imagery». *Proc., International Conference on Image Processing*, 2003, pp. 1001–1004.

Zhao, H., J. Kumagai, M. Nakagawa, and R. Shibasaki, 2002, «Semiautomatic Road Extraction from High-Resolution Satellite Image». *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 34 (Part 3B)*, pp. 406–411.