

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA  
TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA**

**RILIEVO FOTOGRAMMETRICO**

IMBOCCO GALLERIA CAPRAZOPPA LATO FINALE

REPORT DI RILIEVO FOTOGRAMMETRICO CON APR

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I V 0 I 0 0 D 6 9 R H G E 0 0 0 1 0 0 2 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	N. Carretta <i>Nicola Carretta</i>	Nov. 2021	E. Poggi <i>E. Poggi</i>	Nov. 2021	G. Fadda <i>G. Fadda</i>	Nov. 2021	M. Comedini Nov. 2021



File: IV0100D69RHGE0001002A

n. Elab.:3

## SOMMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>APPARATO STRUMENTALE</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>5</b>
3.1	FOTOGRAMMETRIA DIGITALE.....	5
3.2	GEOMECCANICA DIGITALE.....	7
<b>4</b>	<b>FASI OPERATIVE</b> .....	<b>9</b>
4.1	RILIEVO, PROCESSING ED ESTRAZIONE DATI .....	9

## FIGURE

Figura 2.1	APR DJI Phantom 4 RTK .....	4
Figura 3.1.	Rappresentazione schematica del principio su cui si basa la tecnica fotogrammetrica. A - Indeterminazione della posizione del punto A lungo il raggio ottico r1. B - Se si dispone di due immagini a diverso centro di presa contenenti lo stesso oggetto, i suoi punti sono definiti univocamente dalla intersezione dei raggi omologhi r1 e r2. ....	5
Figura 3.2.	Esempio di differenti modalità di acquisizione dati: A - dataset acquisito con volo programmato. B - dataset acquisito con volo manuale. C dataset acquisito da terra. ....	6
Figura 3.3.	A - Esempio di una porzione di nuvola di punti. B – esempio di una porzione di mesh a maglia triangolare nelle sue molteplici modalità di visualizzazione (wireframe, mesh e terna cromatica RGB).....	7
Figura 3.4.	Esempio di normale ad una superficie e ad un vertice. ....	7
Figura 3.5.	Esempio di distribuzione statistica delle orientazioni delle normali in una nuvola di punti e relativa scala cromatica variabile da 0° a 360°. B – Stereoplot dei dati estratti. ....	8
Figura 3.6.	A- Estratto di una nuvola di punti rappresentata con dato colorimetrico RGB e B - come dato di orientazione delle normali in scala di falsi colori. C – Processo di estrazione dei piani dalla nuvola a falsi colori.....	8
Figura 4.1.	Ortofoto nadirale da rilievo fotogrammetrico in cui sono mostrate le aree su cui è stata condotta l'analisi geomeccanica (poligoni blu).....	9

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE – ANDORA</b> Imbocco galleria Caprazoppa lato Finale Rilievo fotogrammetrico						
PROGETTO DEFINITIVO REPORT DI RILIEVO FOTOGRAMMETRICO CON APR	<table border="1"> <tr> <td>COMMESSA IV01</td> <td>LOTTO 00</td> <td>CODIFICA D 69 RH</td> <td>DOCUMENTO GE 00 01 002</td> <td>REV. A</td> <td>FOGLIO 3 di 10</td> </tr> </table>	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 69 RH	DOCUMENTO GE 00 01 002	REV. A	FOGLIO 3 di 10
COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 69 RH	DOCUMENTO GE 00 01 002	REV. A	FOGLIO 3 di 10		

## 1 INTRODUZIONE

Nell’ambito del Progetto Definitivo del raddoppio della tratta “Finale Ligure - Andora” (linea “Genova - Ventimiglia”), sono stati effettuati una serie di voli aerofotogrammetrici con APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto) in corrispondenza della parete rocciosa ove è previsto l’imbocco lato Finale della Galleria Caprazoppa.

I modelli vettoriali a nuvola di punti densa e wireframe (mesh), generati con tecnica fotogrammetrica a corto raggio (CRP – Close Range Photogrammetry), permettono di identificare nel dettaglio le geometrie e le relative ubicazioni spaziali delle discontinuità, e di ottenere una valutazione attendibile sia delle volumetrie sia degli assetti geostrutturali degli elementi di interesse della parete rocciosa.

In questo documento sono trattati gli aspetti:

- strumentazione utilizzata.
- Metodologia di rilievo.
- Metodologia per l’elaborazione dei dati fotogrammetrici.

Dal rilievo fotogrammetrico eseguito sono state ottenute le ortofoto nadirale e di parete (elaborati IV0I00D69HZGE0001001A e IV0I00D69HZGE0001002A) che rappresentano, in uno spazio metrico coerente, l’ammasso roccioso in continuità di affioramento, nelle sue effettive condizioni geometriche e di fratturazione. È stato possibile inoltre, effettuare una analisi geomeccanica digitale in parete di cui l’elaborato IV0I00D69HZGE0001003A rappresenta il risultato riassuntivo.

## 2 APPARATO STRUMENTALE

Il rilievo dell'area di studio è stato effettuato per mezzo del sistema APR DJI Phantom 4 RTK (Figura 2.1), che è equipaggiato come segue:

- sistema Inerziale triassiale (IMU) ad alta frequenza (accelerometri e magnetometro) per definire l'assetto del velivolo.
- Sistema satellitare singola frequenza (GNSS) a bordo del velivolo per la determinazione delle traiettorie di volo e dei valori approssimati dei centri di presa fotogrammetrici.
- Sistema GNSS RTK multifrequenza, multisistema ad alta precisione.
- Camera fotografica dotata di sistema inerziale indipendente, a focale fissa e alta risoluzione, sensore CMOS 1" e risoluzione massima 5472 x 3648 pixel.
- Sistema di sincronizzazione dati fotocamera/GNSS/IMU.



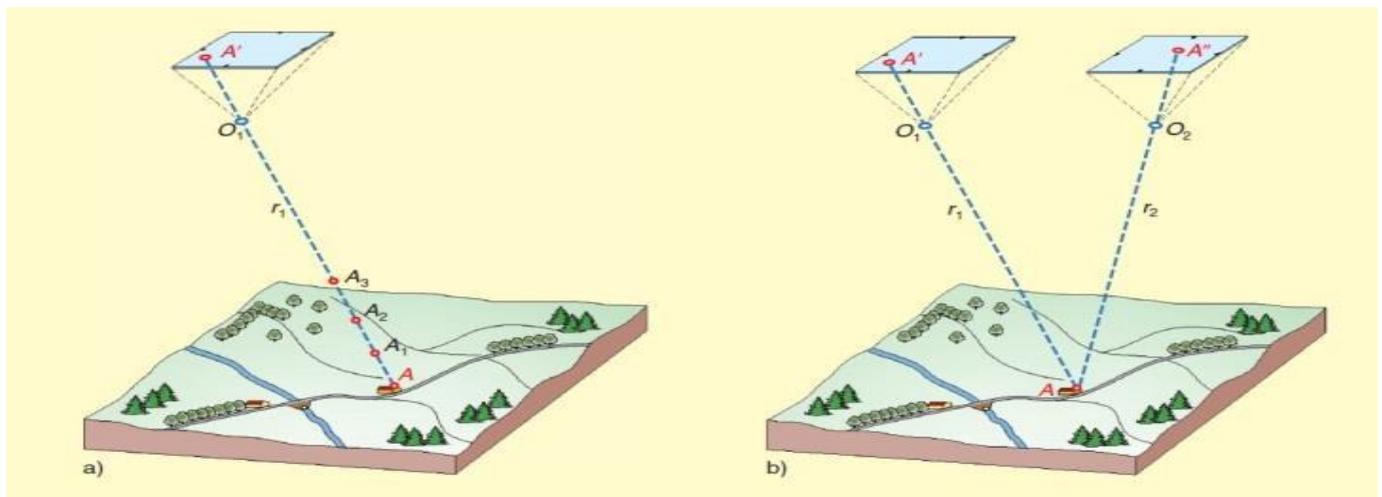
**Figura 2.1 APR DJI Phantom 4 RTK**

### 3 METODOLOGIA

Al fine di ottenere il modello 3D su cui operare le analisi geomeccaniche sono stati eseguiti 10 voli fotogrammetrici mediante APR.

#### 3.1 Fotogrammetria digitale

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo volta a parametrizzare metricamente nelle 3 dimensioni un oggetto fisico, o parte della superficie terrestre, partendo dall'analisi e dall'elaborazione di fotogrammi opportunamente acquisiti. Tali fotogrammi (che rappresentano su uno spazio bidimensionale un ambiente a tre dimensioni) contengono intrinsecamente, al loro interno, informazioni geometriche legate ai parametri costruttivi delle camere con cui sono acquisiti: esiste quindi un oggetto reale fisico e la sua rappresentazione fotografica, e pertanto (da un punto di vista geometrico) questi vengono definiti rispettivamente punto oggetto e punto immagine (in Figura 3.1a questi punti sono rispettivamente **A** e **A'**). Il vettore che unisce punto oggetto **A** e punto immagine **A'** è chiamato raggio ottico  $r_1$  e passa per il centro focale della camera fotografica (in Figura 3.1a, indicato con **O**). Una volta rese note le relazioni che legano punto oggetto **A** e punto immagine **A'**, come appare in Figura 3.1 risulta impossibile determinarne l'ubicazione univoca nello spazio tridimensionale avendo a disposizione un solo fotogramma (in questo caso dal punto di vista matematico il problema si configura come un sistema di equazioni indeterminato). Ma avendo a disposizione due o più fotogrammi (Figura 3.1b) risulta invece possibile individuare l'ubicazione dell'oggetto nello spazio (il sistema è determinato).



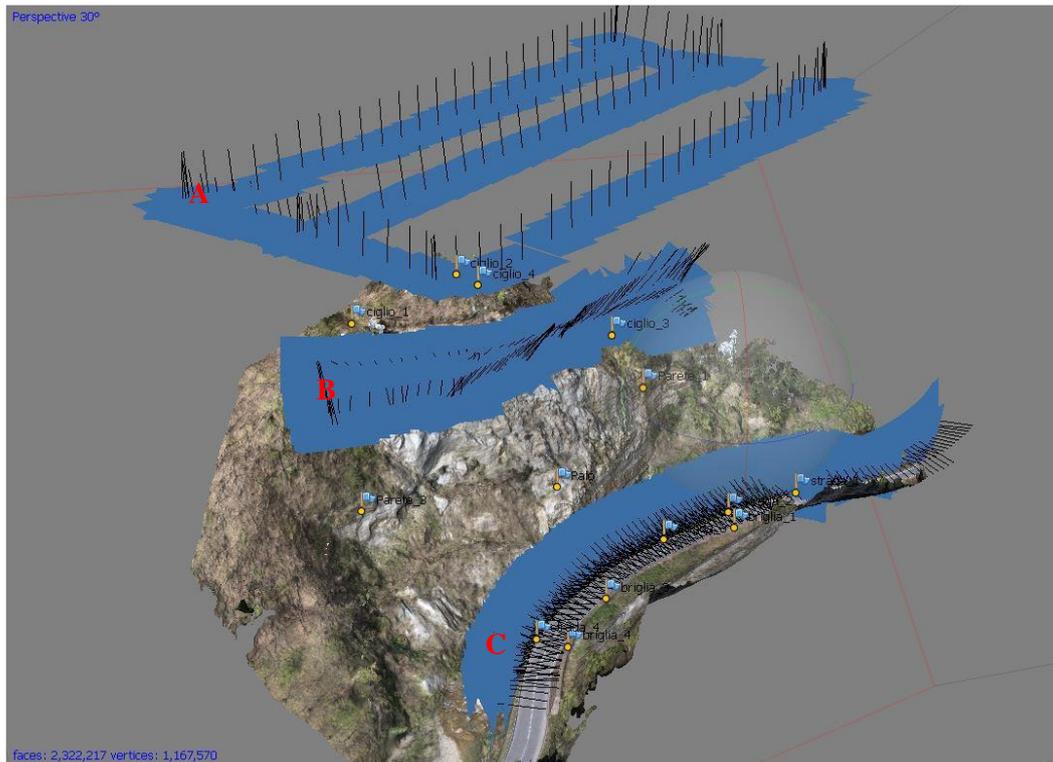
**Figura 3.1. Rappresentazione schematica del principio su cui si basa la tecnica fotogrammetrica. A - Indeterminazione della posizione del punto A lungo il raggio ottico  $r_1$ . B - Se si dispone di due immagini a diverso centro di presa contenenti lo stesso oggetto, i suoi punti sono definiti univocamente dalla intersezione dei raggi omologhi  $r_1$  e  $r_2$ .**

Partendo dal principio di fotogrammetria classica tale tecnica attualmente si avvale di software e algoritmi dedicati ed è caratterizzata dal seguente workflow:

- acquisizione di dataset fotogrammetrici dell'oggetto di interesse,
- georeferenziazione del dataset,
- elaborazione,
- esportazione prodotti.

**Acquisizione dati:** per dataset fotogrammetrico si intende l'insieme dei fotogrammi ritraenti l'oggetto di interesse acquisiti da differenti centri di presa disposti preferibilmente in serie progressiva e con una sovrapposizione

reciproca (overlap) variabile dal 60% all'80%. Questa operazione può essere esplicita mediante una pianificazione dei voli durante una fase preparatoria o mediante volo manuale (Figura 3.2): nel caso di aree caratterizzate da una prevalente estensione piana il volo programmato fornisce risultati più affidabili e soddisfacenti, mentre nel caso di aree di interesse quali pareti rocciose a prevalente sviluppo verticale il volo manuale con camera inclinata garantisce un maggior controllo e precisione nella resa tridimensionale dell'oggetto di interesse.

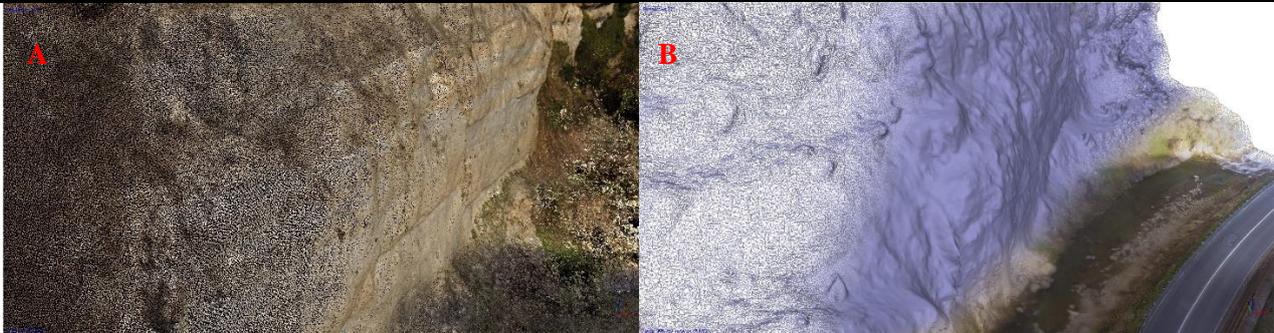


**Figura 3.2. Esempio di differenti modalità di acquisizione dati: A - dataset acquisito con volo programmato. B - dataset acquisito con volo manuale. C dataset acquisito da terra.**

**Georeferenziazione:** la georeferenziazione del dataset fotogrammetrico acquisito sia grazie ai metadati (Exif) che ogni singolo fotogramma contiene (i metadati vengono scritti nel file immagine al momento della sua creazione grazie alla comunicazione tra il dispositivo di acquisizione e il sistema GNSS presente a bordo dell'APR), sia grazie a un successivo rilievo a terra di specifici punti di controllo denominati Ground Control Point (GCP).

**Elaborazione:** i fotogrammi acquisiti vengono elaborati mediante software dedicato Metashape di Agisoft che sfrutta algoritmi di tipo Structure From Motion (SFM), Bundle Adjustment e Aerial Triangulation.

**Esportazione prodotti:** i prodotti dell'elaborazione sono le nuvole di punti dense, la mesh e le ortofoto dell'oggetto di interesse. La nuvola di punti (Figura 3.3A) in questo caso viene definita densa per l'elevato numero di dati in coordinate X Y Z che descrivono l'oggetto; infatti, la distanza media tra i punti della nuvola generalmente non eccede i 2÷3 cm. Si definisce Mesh (Figura 3.3B) la superficie a maglia triangolare derivante dal campionamento e dall'interpolazione mediante appositi algoritmi della nuvola di punti.



**Figura 3.3. A - Esempio di una porzione di nuvola di punti. B – esempio di una porzione di mesh a maglia triangolare nelle sue molteplici modalità di visualizzazione (wireframe, mesh e terna cromatica RGB).**

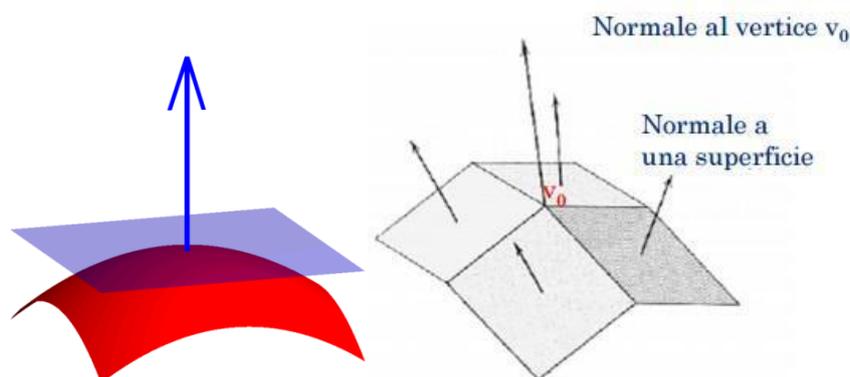
Per Ortofoto si intende la proiezione fotografica dell’oggetto di interesse in scala metrica osservato da un preciso piano di vista, che nel caso di una ortofoto nadirale è il piano parallelo alla superficie terrestre, mentre nel caso di una ortofoto di parete il piano di vista risulta essere verticale e parallelo alla parete stessa.

### 3.2 Geomeccanica digitale

I dati geomeccanici sono stati estratti direttamente dalla nuvola densa mediante il tool VirtualCompass del software CloudCompare.

L’analisi consente di ottenere un dataset geomeccanico statisticamente significativo del pattern di distribuzione delle famiglie di discontinuità, in quanto le misure sono state effettuate sull’intera estensione delle pareti rilevate, meno affette dalla componente soggettiva dell’operatore o dai limiti di estensione delle misure manuali.

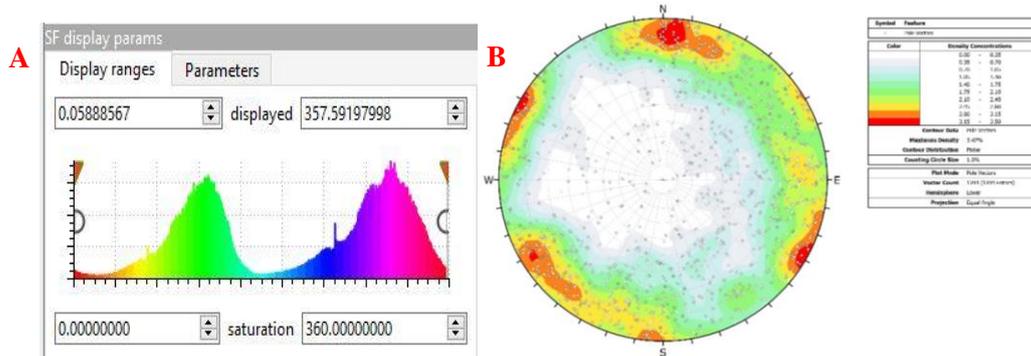
Il dato di input utilizzato per eseguire l’analisi è la nuvola densa di punti che, nella sua struttura di archiviazione delle informazioni geometriche, oltre a registrare la terna geometrica X Y Z e la terna cromatica R G B dei singoli punti rappresentativi dell’oggetto di interesse, registra anche le rispettive normali in coordinate. La normale di un punto è definita come il vettore perpendicolare al piano tangente per quel punto (Figura 3.4). Essa è una grandezza vettoriale che determina l’orientamento di una qualsiasi entità geometrica nello spazio. Questo vettore è di fondamentale importanza nella ricostruzione di superfici tridimensionali e in definitiva definisce l’orientazione delle entità geometriche a cui appartiene nello spazio.



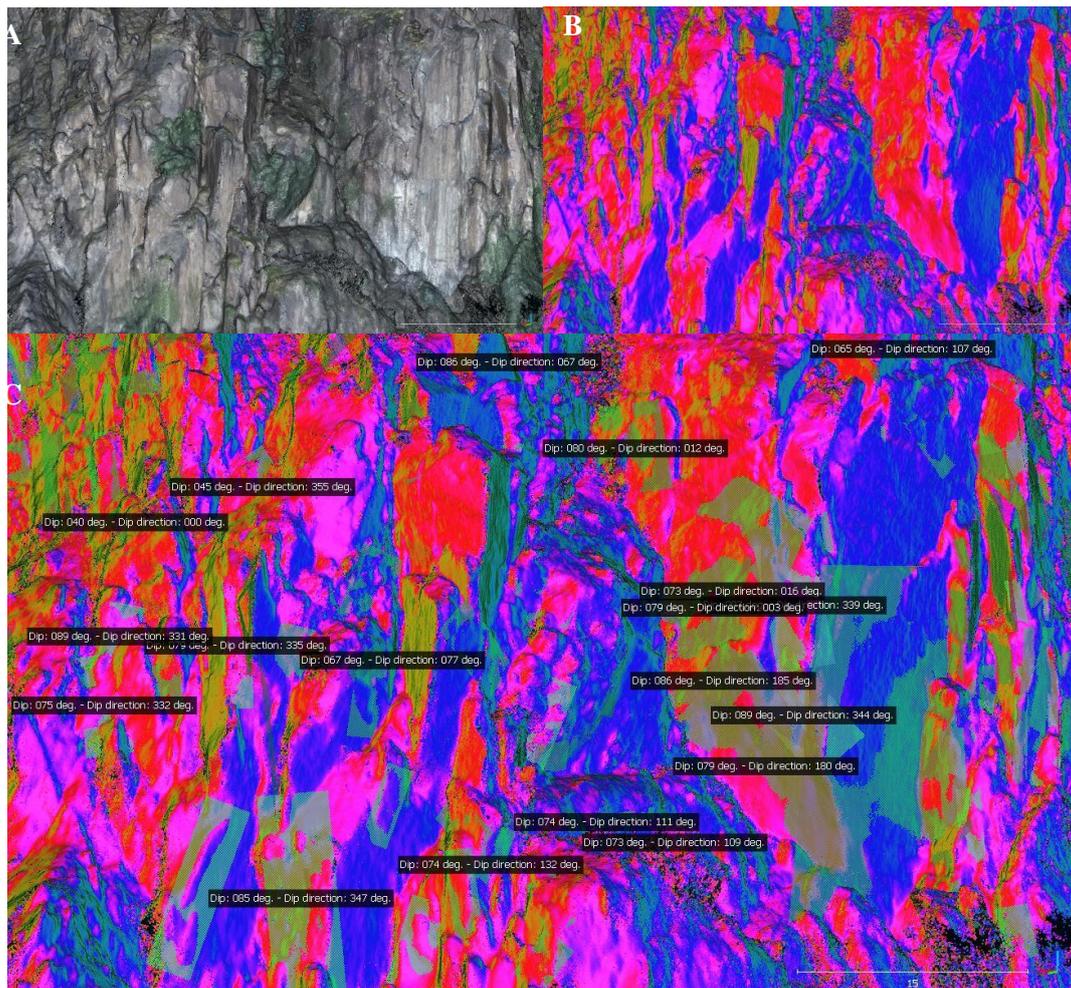
**Figura 3.4. Esempio di normale ad una superficie e ad un vertice.**

Tramite il software CloudCompare (Figura 3.5 e Figura 3.6), sono state parametrizzate le normali dei punti secondo una scala colore indicativa dell’orientazione (direzione di immersione, DipDir) variabile da 0° a 360° al fine di rendere individuabili le porzioni di nuvola con orientazione simile che definiscono le famiglie dei piani di

discontinuità (Figura 3.5 A). Per iterazioni successive ed interpolazioni delle porzioni di nuvola di punti individuate e discriminate dall'attributo di DipDir (memorizzato come campo scalare nei metadati della nuvola), viene creato un nuovo dataset di primitive geometriche (piani) e di relativi metadati (Dip/DipDir) associati a questi ultimi. I dati così ottenuti possono successivamente essere rappresentati sottoforma di stereoplot ( B).



**Figura 3.5. Esempio di distribuzione statistica delle orientazioni delle normali in una nuvola di punti e relativa scala cromatica variabile da 0° a 360°. B – Stereoplot dei dati estratti.**



**Figura 3.6. A - Estratto di una nuvola di punti rappresentata con dato colorimetrico RGB e B - come dato di orientazione delle normali in scala di falsi colori. C – Processo di estrazione dei piani dalla nuvola a falsi colori**

## 4 FASI OPERATIVE

### 4.1 Rilievo, processing ed estrazione dati

Sono stati effettuati 10 voli fotogrammetrici con camera obliqua e nadirale focalizzati sulle aree rocciose esposte, verticali e/o aggettanti.

Sono stati elaborati due differenti dataset denominati P1 e P2:

- P1 per la parete a ridosso dell'imbocco ferroviario attuale, caratterizzata da una morfologia arcuata.
- P2 per la zona costituita dalle pareti più esterne all'imbocco e adiacenti alla zona denominata P1.

In Figura 4.1 i poligoni blu individuano su ortofoto nadirale, le estensioni dei due dataset su cui è stata effettuata l'analisi geomeccanica.



**Figura 4.1. Ortofoto nadirale da rilievo fotogrammetrico in cui sono mostrate le aree su cui è stata condotta l'analisi geomeccanica (poligoni blu).**

I prodotti estratti sono costituiti da nuvole dense tridimensionali di punti, in particolare:

- **(P1)** – Parete a ridosso dell'imbocco ferroviario attuale: 26.528.436 punti
- **(P2)** – Parete esterna e adiacente a P1: 36.323.329 punti

Data la complessità dello scenario operativo e l'articolata estensione delle aree di interesse prettamente a sviluppo verticale, i voli con camera obliqua sono stati eseguiti manualmente, senza l'ausilio del piano di volo programmato.

È stata mantenuta una distanza costante dalla parete di circa 10 m, questo implica un GSD (Ground Sample Distance) sub-centimetrico che si traduce in una densità di punti estremamente elevata dell'ordine dei  $10^3$  punti/m<sup>2</sup>.

Il processo di georeferenziazione è stato reso possibile grazie al dato di posizionamento del sensore GNSS RTK presente a bordo dell'APR il quale garantisce un posizionamento dei dati di base (singoli fotogrammi) con una accuratezza dell'ordine del centimetro.



**RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA  
TRATTA FINALE LIGURE – ANDORA**

Imbocco galleria Caprazoppa lato Finale

Rilievo fotogrammetrico

PROGETTO DEFINITIVO

REPORT DI RILIEVO FOTOGRAMMETRICO CON APR

COMMESSA  
IV01

LOTTO  
00

CODIFICA  
D 69 RH

DOCUMENTO  
GE 00 01 002

REV.  
A

FOGLIO  
10 di 10

In questo modo oltre a incrementare la robustezza geometrica del dato e la coerenza di orientazione è stato possibile attribuire al dato anche la quota geoidica.

Successivamente alla fase di esportazione delle nuvole di punti è stata eseguita l'estrazione dei dati geomeccanici giacitureali mediante l'apposito tool (VirtualCompass) del software CloudCompare.

I dati così estratti sono esportati per successive elaborazioni geomeccaniche specifiche mediante il software DIPS 8.0 di RocScience per le quali si rimanda al capitolo "Geomeccanica digitale" della relazione geologica (doc. IV0I00D69RGGE0001001A).

I prodotti descritti in questa relazione e derivanti dalle precedenti fasi di rilievo, elaborazione e post elaborazione sono costituiti da:

- 2 Nuvole di punti (1 per la parete denominata P1 ed 1 per la parete denominata P2)
- 3 Ortofoto, due delle quali di parete (1 per la parete denominata P1e 1 per la parete denominata P2) e una nadirale. Tavole - IV0I00D69HZGE0001001A e IV0I00D69HZGE0001002A
- 2 Stereoplot con reticolo equi-angolare, ognuno rappresentativo dei poli dell'intera parete. Tavola - IV0I00D69HZGE0001003A.