



**Consorzio per il coordinamento delle ricerche  
inerenti al sistema lagunare di Venezia**  
Palazzo X Savi San Polo 19 30125 Venezia  
Tel. +39.041.2402511  
e-mail: [direzione@corila.it](mailto:direzione@corila.it)  
pec: [corila@pec.it](mailto:corila@pec.it)  
Sito web: [www.corila.it](http://www.corila.it)

Progetto	<b>Attività di monitoraggio del Gabbiano reale, <i>Larus michahellis</i>, nel centro storico di Venezia: conoscere per gestire la specie.</b> Contratto VERITAS-CORILA n. 4800043492 del 09.02.2024 CIG: B0538A8CCE
Documento	 <p><b>Sperimentazione dell'uso del telerilevamento a supporto del monitoraggio della specie in ambiente urbano</b></p>
Rapporto	<b>Relazione finale</b> <b>Periodo di riferimento: da marzo 2024 a febbraio 2025</b>
Emissione	<b>31 marzo 2025</b>
Redazione	Matteo Zucchetta, CNR-ISP Francesca Coccon, CORILA

# Sommario

<b>Introduzione</b> .....	<b>4</b>
<b>Materiali e Metodi</b> .....	<b>6</b>
Area di studio e tipi di immagini utilizzate .....	6
Fonti di acquisizione delle immagini .....	7
Analisi dei dati .....	11
<i>Pre-processamento delle immagini</i> .....	11
<i>Ricerca delle coppie riproduttive fedeli al sito di nidificazione per l'individuazione dei Gabbiani reali nelle immagini satellitari</i> .....	12
<i>Ricerca dei siti occupati stabilmente dai gabbiani attraverso l'ispezione visiva delle immagini da remoto</i> 14	
<i>Automatizzazione del rilevamento di gabbiani in immagini remote</i> .....	15
<i>Pre-processamento</i> .....	15
<i>Addestramento algoritmo e valutazione delle performances</i> .....	16
<b>Risultati</b> .....	<b>16</b>
Confronto Immagini .....	16
<i>Risoluzione</i> .....	16
Principali habitat di nidificazione dei Gabbiani reali nel centro storico di Venezia .....	19
<i>Campanili</i> .....	19
<i>Tetti urbani</i> .....	20
<i>Lastrici solari e terrazze</i> .....	27
<i>Chiese</i> 29	
Osservazioni da remoto.....	31
<i>Google Earth</i> .....	31
<i>Altre immagini aeree</i> .....	34
<i>Immagini satellitari</i> .....	37
Identificazione automatica della presenza di Gabbiano reale in immagini acquisite in remoto .....	40
<b>Discussione</b> .....	<b>45</b>
<b>Bibliografia citata</b> .....	<b>47</b>

**Hanno lavorato al progetto:**

Francesca Coccon, Lucio Panzarin (CORILA) per l'attività di monitoraggio sul campo.

Francesca Coccon (CORILA) per l'attività di analisi dei dati e l'elaborazione dei testi

Matteo Zucchetta (CNR-ISP) per l'attività di analisi dei dati, elaborazione dei testi e sviluppo e addestramento del modello di *object detection*

Supervisione e coordinamento scientifico: Francesca Coccon

Tutte le figure, salvo dove diversamente esplicitato, sono di proprietà degli autori e di CORILA.

**Citazione raccomandata:**

Zucchetta M., Coccon F., 2025. Relazione finale, periodo di riferimento: da marzo a novembre 2024. Attività di monitoraggio del gabbiano reale, *Larus michahellis*, nel centro storico di Venezia: conoscere per gestire la specie. Sperimentazione dell'uso del telerilevamento a supporto del monitoraggio della specie in ambiente urbano. Contratto Veritas-CORILA. Prodotto da CORILA.

## Introduzione

Questo lavoro si inserisce nell'ambito del progetto “*Monitoraggio della popolazione urbana del Gabbiano reale a Venezia*”, avviato nel centro storico della città a marzo 2017, e portato avanti grazie alla collaborazione tra Veritas - l'azienda municipalizzata responsabile della raccolta e gestione dei rifiuti nel territorio della città metropolitana di Venezia - e CORILA, in qualità di responsabile scientifico del progetto, con il patrocinio del Comune di Venezia.

In questo contesto, nel 2024 è stata attivata una collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze Polari (CNR-ISP), volta a valutare la possibilità di utilizzo del telerilevamento, noto anche come “remote sensing”, a supporto delle attività di monitoraggio della specie in ambiente urbano.

Negli ultimi decenni, il telerilevamento, o “*remote sensing*”, ha rivoluzionato il monitoraggio della fauna selvatica, offrendo un'alternativa efficace ai metodi tradizionali di censimento. Infatti, l'impiego di immagini satellitari ad altissima risoluzione (Very High Resolution, VHR), droni e tecniche di intelligenza artificiale ha migliorato significativamente la capacità di rilevare, identificare e quantificare le popolazioni animali su larga scala e in ambienti difficilmente accessibili (Attard et al., 2024a). Tale tecnica consente di analizzare la fauna selvatica in modo non invasivo, riducendo il disturbo nei confronti degli individui e migliorando la raccolta di dati spaziali e temporali, offrendo così un'importante integrazione di informazioni rispetto ai monitoraggi tradizionali.

Le immagini satellitari e aeree utilizzate per il monitoraggio della fauna selvatica possono essere suddivise in diverse categorie in base ai sensori impiegati:

- le immagini ottiche ad altissima risoluzione, come quelle fornite dai satelliti WorldView e Pléiades, garantiscono un'elevata risoluzione spaziale e facilità di utilizzo dell'immagine (grazie ad una intuitiva interpretazione ad occhio nudo), permettendo di distinguere dettagli molto fini. Tuttavia, la loro utilità e fruibilità è limitata dalla copertura nuvolosa e dalla limitata frequenza di acquisizione (Fretwell et al., 2019);
- i sensori radar ad apertura sintetica (SAR), superano queste limitazioni e possono essere impiegati, ad esempio, per individuare uccelli su superfici riflettenti come l'acqua. Tuttavia, si rilevano delle difficoltà nella distinzione delle specie (Attard et al., 2024a);
- i sensori termici consentono di rilevare la presenza degli uccelli anche in condizioni di scarsa illuminazione o quando il loro colore si confonde con l'ambiente circostante (Edney and Wood, 2021). Questi tipi di sensori possono essere montati a bordo di velivoli senza pilota (UAV - unmanned aerial vehicle), di aerei o di piattaforme satellitari. Ovviamente queste tipologie di velivoli operano a varie altezze, da poche decine di metri a centinaia di km rispetto alla superficie terrestre, con una notevole differenza di copertura, risoluzione spaziale e tempo potenziale di rivisita, con una relazione inversa tra area coperta e risoluzione dei dati registrati.

Il remote sensing è stato applicato con successo al monitoraggio di diverse categorie di fauna. Tra i mammiferi marini, numerosi studi hanno dimostrato l'efficacia delle immagini satellitari VHR nel censimento di balene, foche e trichechi, con risultati comparabili ai conteggi aerei e terrestri (Cubaynes et al., 2019; Fretwell et al., 2019; Fudala and Bialik, 2022; Hamilton et al., 2014; LaRue et al., 2011). Per quanto riguarda gli uccelli marini e terrestri, il telerilevamento è stato impiegato per identificare, in ambiente naturale, colonie di albatross, pinguini e gabbiani, con una precisione che varia in base alla risoluzione delle immagini e alle caratteristiche ambientali (Bowler et al., 2019; Brothers et al., 2022; Fretwell et al., 2017, 2023). Ad esempio, nel caso specifico del Gabbiano comune (*Chroicocephalus ridibundus*), il remote sensing ha consentito di identificare le aree di nidificazione, monitorare la densità delle popolazioni e analizzare i cambiamenti nell'uso dell'habitat nel tempo in alcune barene della Laguna di Venezia (Valle et al., 2024).

Ovviamente, gli approcci usati per monitorare le colonie o conteggiare i singoli individui possono essere molto diversi fra loro dal momento che, in alcuni casi, tracce associate alla presenza delle colonie,

possono essere visibili anche in immagini con risoluzione spaziale relativamente bassa, dove, cioè, la dimensione dei pixel che compongono l'immagine è molto più grande rispetto alle dimensioni degli oggetti da visualizzare. Questo garantisce la possibilità di usare immagini acquisite in maniera sistematica (regolare nel tempo) su larga scala. A titolo di esempio, per il pinguino imperatore, l'uso di immagini Sentinel 2 del programma Copernicus ha permesso di esplorare l'intero continente Antartico scoprendo la presenza di nuove colonie mai descritte in precedenza e consentendo di analizzarne l'evoluzione della distribuzione nel tempo (Fretwell and Trathan, 2021; LaRue et al., 2024).

L'intelligenza artificiale e il machine learning hanno assunto un ruolo fondamentale nell'analisi delle immagini remote, migliorando l'accuratezza nel rilevamento e nel conteggio della fauna. Algoritmi avanzati, come le reti neurali convoluzionali (CNN), sono stati utilizzati con successo per identificare individui di diverse specie in immagini satellitari e aeree (Uguz, 2023). Oltre alla classificazione e al conteggio automatico, il machine learning viene impiegato anche per analizzare immagini raccolte da altre fonti, come fototrappole o telecamere di sorveglianza, fornendo dati complementari alle osservazioni satellitari e permettendo un'analisi più dettagliata del comportamento degli uccelli. L'uso combinato di immagini VHR e algoritmi di deep learning, che rappresenta il settore del machine learning attualmente più popolare, ha dimostrato di ridurre significativamente i margini di errore nei censimenti di specie coloniali, come gli albatross e i gabbiani, migliorando l'efficacia dei metodi di monitoraggio da remoto (Bowler et al., 2020).

L'impiego del remote sensing per il monitoraggio degli uccelli si basa su metodi di rilevamento diretti e indiretti. Il rilevamento diretto prevede l'identificazione degli individui nelle immagini ad alta risoluzione, mentre il rilevamento indiretto utilizza indicatori ambientali, come la presenza di guano o la conformazione dei siti di nidificazione, per stimare la popolazione (Edney and Wood, 2021).

Il monitoraggio tramite telerilevamento in contesti urbani presenta delle sfide specifiche, date le dimensioni relativamente ridotte del target delle osservazioni remote (in questo caso i gabbiani reali) e l'ambiente occupato, ricco di elementi visivi che rendono meno evidente la presenza della specie di interesse.

In questi casi, le immagini satellitari possono essere integrate con dati raccolti da droni per ottenere una visione più dettagliata della distribuzione della specie e del loro impatto sull'ambiente circostante. Le immagini multispettrali, inoltre, permettono di valutare la qualità dell'habitat e monitorare i cambiamenti nell'uso del suolo nel tempo, fornendo informazioni preziose per la gestione delle popolazioni oggetto di studio (Attard et al., 2024a).

La combinazione di immagini satellitari, droni e intelligenza artificiale apre nuove prospettive per la ricerca, la conservazione e la gestione delle popolazioni di uccelli nelle città, permettendo di monitorare in modo più preciso e su larga scala le dinamiche delle colonie urbane e il loro impatto sugli ecosistemi antropizzati, creando i presupposti per sviluppare strategie di gestione innovative e più efficaci.

Uno dei principali fattori che limita l'utilizzo del remote sensing per il monitoraggio della fauna selvatica è il costo e la disponibilità delle immagini. Infatti, le immagini ad altissima risoluzione offerte da fornitori commerciali come Maxar e Airbus possono risultare molto costose, con prezzi che variano da 5 a 50 USD per km<sup>2</sup>, rendendole spesso inaccessibili per studi su larga scala (Attard et al., 2024a). Tuttavia, esistono alternative più economiche, come le immagini fornite da Google Earth, che sono state utilizzate con successo per il monitoraggio degli uccelli acquatici, inclusi gli aironi, dimostrando una buona accuratezza rispetto ai censimenti terrestri (Valle et al., 2021). L'uso di droni rappresenta un'altra soluzione efficace, poiché permette di acquisire immagini ad alta risoluzione con costi ridotti rispetto alle campagne satellitari, sebbene la loro applicazione su aree molto estese possa essere limitata da vincoli logistici e normativi (Attard et al., 2024a).

In generale, l'uso di remote sensing sta diventando sempre più popolare per il monitoraggio della biodiversità e il monitoraggio dell'avifauna in ambiente urbano rappresenta uno degli elementi di maggior interesse (Finizio et al., 2024), anche alla luce del fatto che gli uccelli, assieme alle piante,

rientrano tra gli elementi della biodiversità maggiormente studiati in ambiente urbano (Rega-Brodsky et al., 2022).

In quest'ottica, l'obiettivo dello studio qui presentato è quello di testare le capacità del telerilevamento nel supportare il monitoraggio della popolazione urbana di Gabbiano reale nel contesto specifico del centro storico di Venezia, sfruttando l'opportunità offerta dal programma di monitoraggio previsto nel corso del 2024.

In particolare, il presente lavoro si propone di:

- verificare la possibilità di osservare la presenza della specie target in immagini acquisite da remoto;
- identificare gli ambienti e le strutture morfologiche e architettoniche che rappresentano habitat particolarmente idonei ad essere utilizzati dalla specie come siti di nidificazione;
- confrontare la visibilità dei gabbiani in diversi tipi di immagini ad altissima risoluzione;
- testare la possibilità di sviluppare un sistema di identificazione automatica della presenza dei gabbiani reali in immagini telerilevate.

Lo sviluppo di un algoritmo di elaborazione delle immagini per il rilevamento automatizzato della specie consentirebbe di ridurre lo sforzo di campionamento e i costi ad esso associati, con la possibilità di estendere il metodo anche ad altre aree (urbane e naturali) occupate dalla specie.

## Materiali e Metodi

### Area di studio e tipi di immagini utilizzate

Per questo studio, sono state prese in considerazione immagini ottiche provenienti da sensori montati sia su aeromobili, sia su piattaforme satellitari. In particolare, sono state utilizzate immagini multispettrali, acquisite, cioè, da sensori che registrano il segnale contemporaneamente su più bande spettrali specifiche. Le immagini multispettrali sono acquisite tramite spettrometri specializzati: degli strumenti che misurano l'intensità della luce riflessa o emessa da un oggetto in diverse bande dello spettro visibile e infrarosso. Questi sensori registrano sequenzialmente le bande spettrali mentre si spostano sopra l'area di interesse, generando così immagini multidimensionali (due dimensioni spaziali e una dimensione spettrale). Tali caratteristiche permettono di identificare con precisione le caratteristiche chimico-fisiche degli oggetti e delle superfici osservate. Nel caso delle immagini ad altissima risoluzione, viene spesso usata una risoluzione diversa per le diverse bande. In genere, vengono acquisite varie bande spettrali, che poi saranno sfruttate per definire i canali colore nell'immagine finale, ad una risoluzione relativamente bassa (circa 1 o 2 m), mentre una banda particolare, chiamata pancromatica, che copre un ampio intervallo dello spettro visibile e talvolta parte dell'infrarosso vicino, combina tutte queste lunghezze d'onda in un'unica immagine in scala di grigi. In alcuni sensori i dati di questa banda sono acquisiti ad un'elevata risoluzione spaziale.

Le immagini ottiche telerilevate possono essere distribuite con diversi gradi di pre-processamento. I livelli standard di processamento delle immagini includono:

- Livello 1 (L1): dati grezzi. Solitamente non usati.
- Livello 1B (L1B): dati a cui è stata applicata una correzione radiometrica (calibrazione per esprimere il segnale grezzo come riflettanza) e geometrica (per tener conto dell'altezza e posizione dell'acquisizione), ma privi di correzione atmosferica (rimozione degli effetti di dispersione e assorbimento da parte dell'atmosfera).
- Livello 1C (L1C): dati con correzione radiometrica e geometrica, ma non corretti atmosfericamente.
- Livello 2 (L2): dati completamente corretti, radiometricamente, geometricamente e atmosfericamente, pronti per analisi scientifiche.

La tecnica di Pan-sharpening viene applicata utilizzando la banda pancromatica, che - come detto - è una singola banda a elevata risoluzione spaziale, che raccoglie informazioni su un ampio intervallo dello spettro visibile. Questa banda pancromatica viene combinata con le bande multispettrali a risoluzione spaziale inferiore per migliorare il dettaglio spaziale delle immagini. Questa tecnica è utilizzata per visualizzare l'immagine RGB (Red Green Blue) alla risoluzione della banda pancromatica.

## Fonti di acquisizione delle immagini

Le immagini ottiche a risoluzione molto alta (Very High Resolution – VHR imagery), utilizzabili per il rilevamento da remoto, sono generalmente acquisite da piattaforme commerciali. Il costo e le condizioni di vendita variano tra i fornitori e i prezzi vanno indicativamente dai 5 ai 20 \$ al km<sup>2</sup> per immagini di archivio già acquisite, a prezzi che possono superare i 50\$/km<sup>2</sup> per il *tasking*, ovvero l'acquisizione di nuove immagini, specificamente programmata. Gli ordini prevedono, inoltre, l'acquisto di un'estensione minima per ciascuna scena che varia tra i 25 e i 100km<sup>2</sup>, il che comporta un ulteriore aggravio dei costi.

A differenza di altri programmi di osservazioni remote a risoluzione più bassa, nessuna delle piattaforme in grado di acquisire immagini ad altissima risoluzione è programmata per l'acquisizione sistematica su larga scala. Di conseguenza, i cataloghi delle diverse aziende che offrono immagini VHR non sono necessariamente ricchi di scene per una data area di studio. Per questo motivo, nelle fasi iniziali di questo studio, è stata condotta una ricognizione dei cataloghi dei principali produttori allo scopo di individuare una serie di scene di potenziale interesse per l'area del centro storico di Venezia, da selezionare per le successive analisi.

È stato deciso di concentrarsi preferibilmente, ma non esclusivamente, sulle scene disponibili per la stagione riproduttiva, essendo il periodo in cui i gabbiani sono maggiormente territoriali e tendono a passare molto tempo al nido. Ciò comporta una probabilità più elevata di rintracciare gli individui sui tetti urbani sulle immagini acquisite in questo periodo rispetto al resto dell'anno, in cui gli animali sono più mobili e dispersi nel territorio.

A Venezia, i siti di nidificazione iniziano a essere colonizzati dai gabbiani a febbraio. La cova delle uova, che generalmente dura 28-30 giorni, si verifica tra la fine di marzo e l'inizio di aprile, mentre l'involo dei giovani avviene tipicamente nei mesi di giugno-luglio, dopo 35-40 giorni dalla schiusa. Sulla base di questo criterio, abbiamo cercato di selezionare immagini acquisite nel periodo compreso tra febbraio e aprile, quando entrambi i genitori sono presenti al nido, alternandosi quando uno dei due è alla ricerca di cibo. Un altro criterio di preselezione delle immagini è stato quello di scegliere un periodo coperto dalle attività di monitoraggio, per consentire un confronto con le osservazioni raccolte sul campo e con il materiale fotografico, eventualmente disponibile.

Per garantire l'accessibilità alle immagini acquisite da sensori diversi, in diversi periodi dell'anno e in diverse condizioni di visibilità, è stata redatta una proposta di progetto presentata al programma *Third Party Mission* dell'ESA (European Spatial Agency – l'Agenzia Spaziale Europea). La proposta progettuale è stata accettata da ESA, che ha finanziato l'accesso a 100 km<sup>2</sup> di prodotti di archivio standard livello 2A di WorldView e di 25 km<sup>2</sup> di Pléiades 0.5m Color or bundle (primary or ortho). Altre immagini satellitari o aeree sono state ricavate dal catalogo di Google Earth o acquistate nell'ambito di questa attività di ricerca. Data la natura sperimentale di questo studio e la complessità del processo di analisi manuale delle immagini, sono state analizzate porzioni relativamente piccole delle scene acquistate.

Di seguito sono elencate le immagini ad alta risoluzione selezionate ai fini dello studio e le relative fonti di acquisizione:

- Scene acquisite da Google Earth, [earth.google.com/web/](http://earth.google.com/web/)
- Immagini aeree acquisite da VEXCEL, acquistate nell'ambito di questo studio
- Immagini satellitari JILIN ad alta risoluzione, acquistate nell'ambito di questo studio

- Immagini satellitari MAXAR WorldView-3 ad alta risoluzione, acquisite tramite il programma Third Party Missions (TPM) dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA)
- Immagini satellitari AIRBUS Pléiades ad alta risoluzione, acquisite tramite il programma Third Party Missions (TPM) dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA)

I prodotti possono essere ordinati in diversi formati e con diverse opzioni di pre-processamento. In tutti i casi, si è optato per immagini di livello 2A, che non richiedono, quindi, di essere processati per l'effetto dell'atmosfera.

Una scelta chiave è quella di valutare se sia più opportuno ottenere i prodotti multispettrali già interpolati alla massima risoluzione, attraverso la procedura di *pan-sharpening*, o in alternativa riceverli come pacchetto contenente due file separati: uno con l'informazione multi-spettrale e uno con la banda pancromatica ad alta risoluzione. Nel secondo caso, qualora si vogliano visualizzare o analizzare le immagini a piena risoluzione in modalità RGB, sarà necessario procedere autonomamente alla processazione dell'immagine.

L'azienda produttrice Maxar offre, inoltre, la possibilità di processare le immagini utilizzando la tecnologia proprietaria HD (*High-Definition*), che è un metodo avanzato di super-risoluzione delle immagini satellitari, sviluppato per migliorare artificialmente la qualità e il livello di dettaglio delle immagini VHR. L'algoritmo HD di Maxar utilizza un approccio basato su intelligenza artificiale e tecniche di super-risoluzione per aumentare il numero di dettagli visibili nelle immagini satellitari. L'algoritmo elabora le immagini a risoluzione nativa e le migliora fino a un'apparente risoluzione di 15 cm, senza che ci sia un reale aumento della risoluzione geometrica del sensore. Ovviamente, l'efficacia dell'algoritmo dipende dall'effettiva risoluzione iniziale (dal GSD - *Ground Sample Distance*), che indica la distanza sul terreno tra i centri di due pixel consecutivi, e da altri parametri, come l'angolo di acquisizione dell'immagine.

Nel caso specifico di questo studio, il primo ordine di prodotti WorldView di Maxar è stato effettuato richiedendo prodotti interpolati alla massima risoluzione con la tecnologia HD. È stato deciso di procedere con un ordine parziale per poter analizzare le caratteristiche delle immagini, che possono essere visualizzate in anteprima solamente a bassa risoluzione. Dopo l'ispezione delle immagini, tuttavia, si è optato per procedere con la richiesta dei dati non processati per poter analizzare le immagini grezze e confrontare la rilevabilità degli oggetti presenti nella stessa immagine, processata in maniera diversa. Tale confronto è stato, ad ogni modo, possibile per la sola immagine 104001003E301B00 del 10/06/2018 di Maxar. Le altre immagini acquistate nell'ambito di questo studio erano disponibili esclusivamente come già processate alla massima risoluzione. L'elenco completo delle immagini analizzate è riportato in Tabella 1. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si riporta una visione d'insieme per ciascuna immagine, al fine di evidenziare le diverse coperture spaziali e condizioni meteorologiche e di illuminazione registrate.

Tabella 1. Elenco delle immagini analizzate in questo studio e loro principali caratteristiche.

ID	Bande	Satellitare/ areea	Resolution	Data di acquisizione	Off nadir angle	Sun elevation	Estensione	Fornitore/prodotto	Modalità di acquisizione
104001003E301B00	PAN-SHARPENED 4 BANDS	S	0.15 m Interpolato	10/06/2018	14.1°	66.1°	25km2	Maxar WorldView 3	ESA TPM
104005005DDBF100	PAN-SHARPENED 4 BANDS	S	0.4m	24/03/2024	33.7°	42.3°	25km2	Maxar WorldView 3	ESA TPM
104001008E697000	BUNDLE (PAN + MS) 8- bands	S	0.3m; 1.2m	03/12/2023	2.4°	21.7°	25km2	Maxar WorldView 3	ESA TPM
104001003E301B00	BUNDLE (PAN + MS) 8- bands	S	0.3m; 1.2m	10/06/2018	14.1°	66.1°	25km2	Maxar WorldView 3	ESA TPM
DS_PHR1A_202203271014278_FR1_PX_E012N45_0414_0503	BUNDLE (PAN + MS) 4- bands	S	0.5m; 2m	27/03/2022	2.75°	157.66°	25km2	Airbus Pléiades	ESA TPM
Jilin	4 bands	S	0.75 m	19/09/2022	-	-	5.03km2	Jilin	acquistata
Vexcel	4 bands	A	0.13 m	4/03/2023	-	-	1km2	Vexcel	acquistata
Vexcel	4 bands	A	0.13 m	27/03/2022	-	-	1km2	Vexcel	acquistata
GEE	RGB	A	~0.10m	Diverse date	-	-	-	Google Earth	-

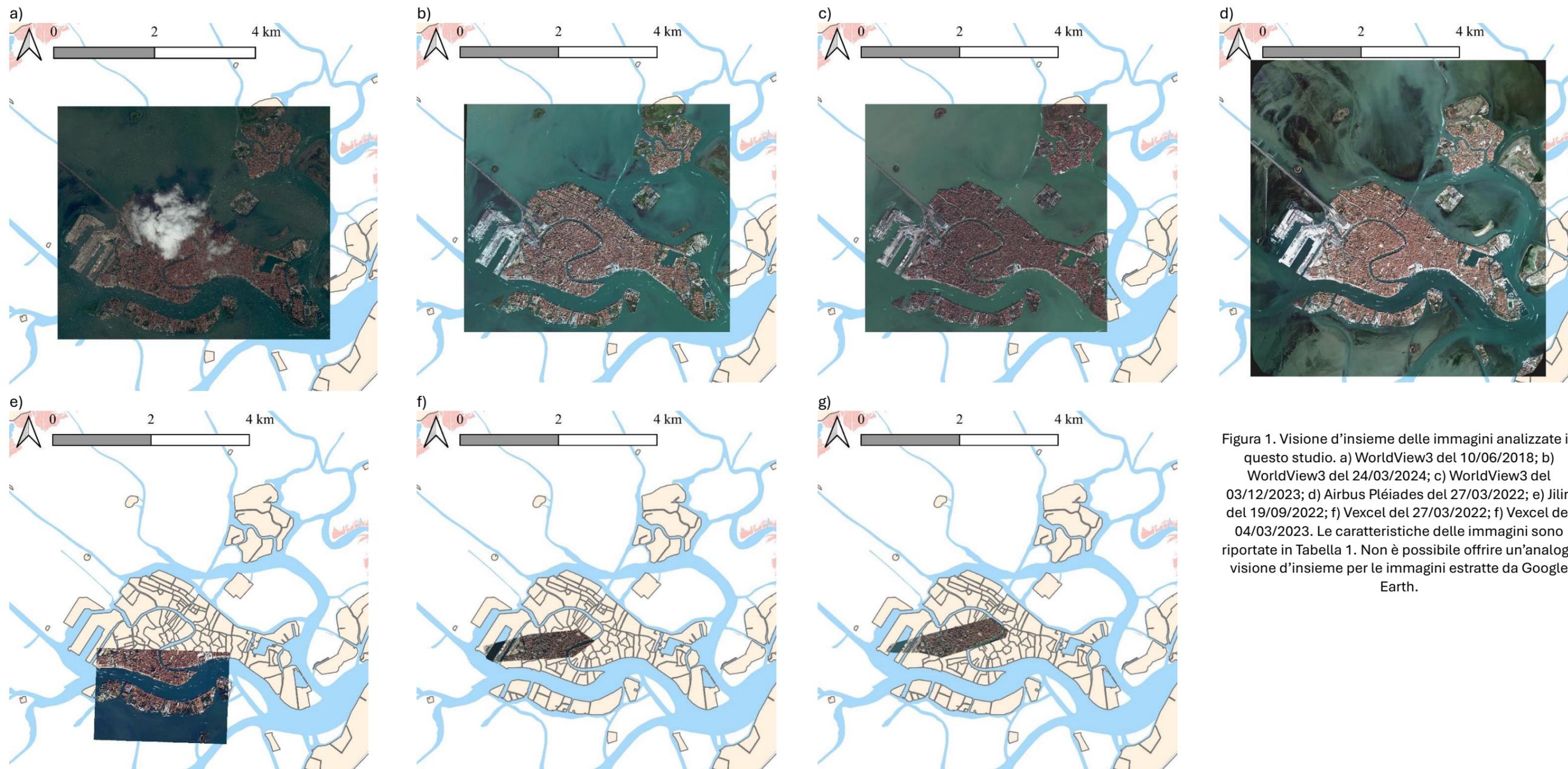


Figura 1. Visione d'insieme delle immagini analizzate in questo studio. a) WorldView3 del 10/06/2018; b) WorldView3 del 24/03/2024; c) WorldView3 del 03/12/2023; d) Airbus Pléiades del 27/03/2022; e) Jilin del 19/09/2022; f) Vexcel del 27/03/2022; g) Vexcel del 04/03/2023. Le caratteristiche delle immagini sono riportate in Tabella 1. Non è possibile offrire un'analogia visione d'insieme per le immagini estratte da Google Earth.

## Analisi dei dati

### *Pre-processamento delle immagini*

Come sopra riportato, le immagini analizzate nell'ambito di questo studio sono tutte di Livello 2 (L2); non hanno richiesto, quindi, particolari fasi di processamento. Le sole immagini non già interpolate alla risoluzione della banda con maggior dettaglio, sono state elaborate applicando il metodo di *pansharpening* – Bowery, disponibile in ENVI® (ENVI® è un marchio registrato di NV5 Global, Inc.).

L'algoritmo di Bowery (o metodo di Bowery) si basa sul principio di fusione tra immagini multispettrali a bassa risoluzione spaziale e una banda pancromatica ad alta risoluzione spaziale, cercando di preservare accuratamente le caratteristiche spettrali originali. I passaggi fondamentali sono:

1. Ridimensionamento - Le bande multispettrali (a risoluzione inferiore) vengono inizialmente portate alla stessa risoluzione spaziale della banda pancromatica tramite interpolazione;
2. Calcolo delle differenze - Si calcola la differenza (o il rapporto) tra la banda pancromatica e una versione sintetica della pancromatica, generata combinando linearmente le bande multispettrali;
3. Fusione delle bande - La differenza (o rapporto) così calcolata viene aggiunta (o moltiplicata, nel caso di rapporto) ad ogni banda multispettrale ridimensionata, migliorandone il dettaglio spaziale, ma conservando le caratteristiche cromatiche originali.

L'algoritmo selezionato è quello che garantisce il miglior rendimento dei dettagli spaziali a piccola scala, anche se ciò può comportare una lieve riduzione della fedeltà spettrale.

In **Errore**. **L'origine riferimento non è stata trovata**. è mostrato l'effetto dell'applicazione del *pansharpening* per una zona di dettaglio dell'immagine satellitare AIRBUS Pléiades.

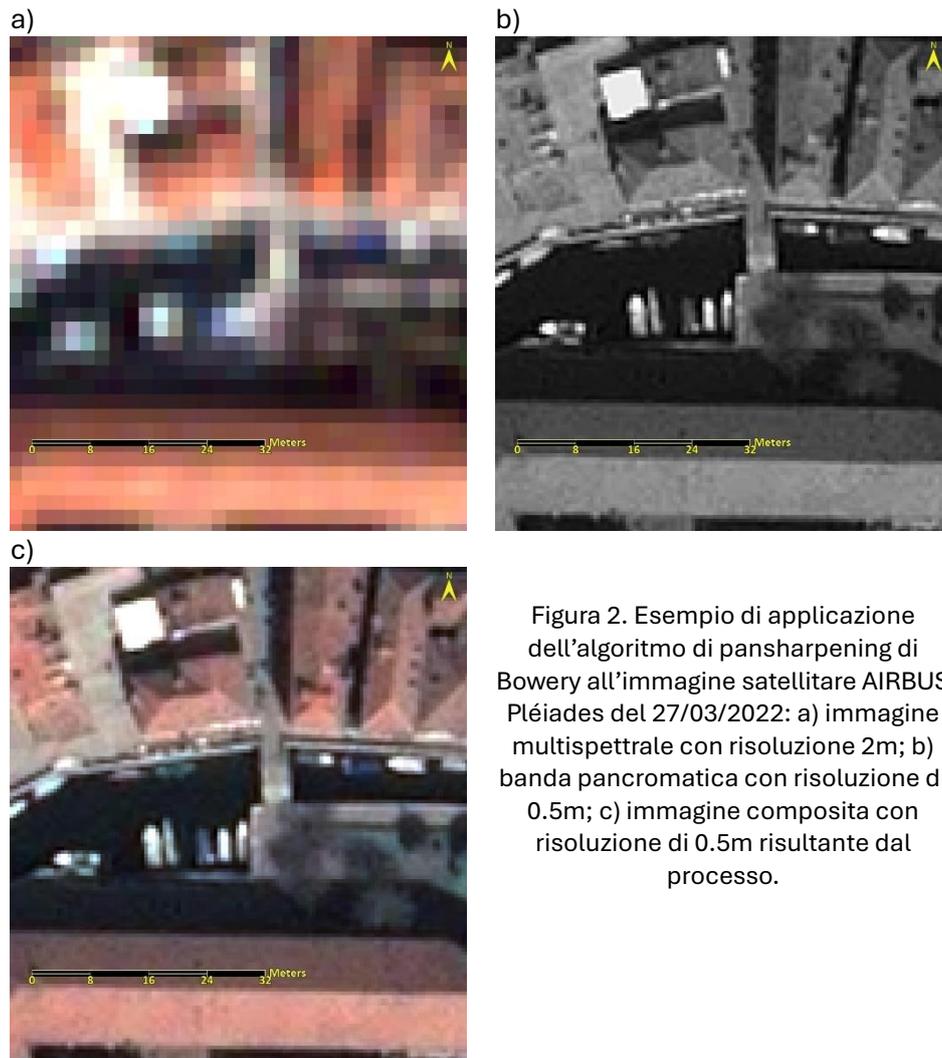


Figura 2. Esempio di applicazione dell' algoritmo di pansharpening di Bowery all'immagine satellitare AIRBUS Pléiades del 27/03/2022: a) immagine multispettrale con risoluzione 2m; b) banda pancromatica con risoluzione di 0.5m; c) immagine composta con risoluzione di 0.5m risultante dal processo.

### *Ricerca delle coppie riproduttive fedeli al sito di nidificazione per l'individuazione dei Gabbiani reali nelle immagini satellitari*

Per la selezione delle aree urbane su cui concentrare la ricerca dei gabbiani reali all'interno delle immagini remote sopra descritte, si è deciso di focalizzarsi sulle "coppie ricorrenti", ovvero quelle coppie che hanno nidificato stabilmente nello stesso sito nel corso degli anni. Questa scelta ha permesso di restringere notevolmente il campo di azione, facilitando il processo di analisi manuale delle immagini, di per sé piuttosto complesso.

Per identificare le coppie ricorrenti si è ricorsi inizialmente alle osservazioni fatte sul campo nel corso degli anni e all'esperienza maturata dai censitori, che hanno permesso di individuare un primo set di punti. Sono state quindi calcolate in ambiente GIS le distanze tra le coordinate dei punti delle coppie osservate a marzo e giugno 2024, nonché tra giugno 2024 e le stagioni riproduttive degli anni passati (giugno 2021 e giugno 2018). A questo scopo è stato utilizzato lo strumento "Distance matrix" di QGIS (QGIS Development Team, 2025) che ha permesso di ottenere una matrice contenente la distanza in metri tra le coppie di punti confrontate (giugno 2024-2021; giugno 2024-2018; marzo-giugno 2024). A questo punto, è stato applicato un filtro sulla matrice di dati, selezionando solo le distanze  $\leq 40$  m. Questo criterio ha restituito un totale di 25 punti (Figura 3), rappresentativi delle coppie stabili che, nel corso degli anni, hanno nidificato nello stesso sito o in aree ad esso vicine, mostrando fedeltà al sito

riproduttivo. Su questi punti è stata avviata l'analisi visiva manuale delle immagini telerilevate per verificare la rilevabilità dei gabbiani reali.



Figura 3. Coppie che hanno mostrato fedeltà al sito riproduttivo nel corso degli anni, su cui è stata condotta l'ispezione delle immagini satellitari per l'individuazione dei gabbiani reali. La figura mostra i punti (n=25) con distanze relative, da un anno all'altro,  $\leq 40$  m. Il label dei punti è il codice numerico univoco usato per l'associazione dei punti alle fotografie disponibili dei nidificanti urbani (si veda Figura 4).

È stata fatta, inoltre, una ricerca nel catalogo fotografico raccolto dai censitori dall'inizio del monitoraggio ad oggi, che ha consentito di associare ai punti delle coppie ricorrenti le fotografie disponibili ad esse relative, utili per agevolare il processo di ricerca dei gabbiani nelle immagini remote (Figura 4).



Figura 4. Esempi di associazione delle fotografie disponibili alle coppie ricorrenti per agevolare il processo di ispezione delle immagini satellitari.

### *Ricerca dei siti occupati stabilmente dai gabbiani attraverso l'ispezione visiva delle immagini da remoto*

Come detto, la valutazione della possibilità di rilevare o meno la presenza dei gabbiani reali nelle immagini satellitari e aeree è stata svolta principalmente attraverso un'ispezione visiva delle scene, concentrandosi sui siti di nidificazione stabilmente occupati dalla specie.

La risoluzione spaziale dei prodotti ottici disponibili è generalmente troppo bassa per distinguere in maniera inequivocabile singoli individui, coppie o nidi, che occupano al massimo uno o pochi pixel. Per

questo motivo, l'ipotesi di partenza era che i gabbiani risultassero visibili come piccole aree composte da pixel chiari, emergenti soprattutto in base al contrasto rispetto allo sfondo, come del resto già evidenziato per altre specie in ambienti naturali (Attard et al., 2024).

In particolare, ai fini della ricerca dei soggetti target, oltre a visualizzare l'area attorno a ciascun sito di nidificazione ricorrente, cambiando le combinazioni di bande e ottimizzando il contrasto delle immagini tramite tecniche di stretching degli istogrammi (ovvero regolando la distribuzione dei valori di luminosità per migliorare la visibilità dei dettagli), sono state analizzate le aree di interesse sia per valutarne la visibilità a diverse risoluzioni spaziali, sia per esaminarne l'aspetto in differenti periodi dell'anno.

### *Automatizzazione del rilevamento di gabbiani in immagini remote*

Riguardo alla possibilità di automatizzare la procedura di identificazione della presenza dei gabbiani reali nelle immagini remote, è stato messo a punto un modello di *object detection* (Chollet, 2021), mirato a rilevare la presenza di individui posati o in volo. Dal momento che per effettuare una calibrazione soddisfacente di questo tipo di strumenti è necessario disporre di un dataset di ampie dimensioni, l'esercizio qui proposto deve essere considerato un esperimento, utile a valutare le potenzialità dell'approccio.

La procedura è stata sviluppata utilizzando le immagini selezionate estratte da Google Earth, ipotizzando che i dati a maggior risoluzione spaziale offrissero più osservazioni per l'allestimento del dataset a cui applicare la procedura di automatizzazione.

### *Pre-processamento*

Per poter utilizzare le immagini presenti in Google Earth allo scopo sopra descritto, è stata seguita la seguente procedura:

- a) dopo un'esplorazione del catalogo disponibile, è stata selezionata la scena del 25/03/2021, data l'elevata risoluzione e qualità dell'immagine;
- b) è stato fissato il livello di zoom (*Elevation* a 520 m), dopo diverse prove fatte per riuscire ad esportare le immagini alla massima risoluzione spaziale;
- c) sono state esportate alla massima risoluzione possibile diverse schermate parzialmente sovrapposte in modo da coprire l'intera superficie urbana, per un totale di 55 scene di dimensione pari a 8192x5502 pixel;
- d) le immagini sono state georeferenziate in QGIS (QGIS Development Team, 2025).

È stata quindi definita una griglia regolare costituita da 2511 celle, tutte delle stesse dimensioni, pari a 61.68 x 61.68 m (Figura 5a). A questo punto, le immagini georeferenziate sono state suddivise in patch sovrapponibili alla griglia, ottenendo 2511 immagini di 1028x1028 pixel, ad una risoluzione di 0.06m/px. L'insieme di immagini così ottenute è stato ispezionato in Label Studio (Tkachenko et al., 2022) per Python (Rossum and Drake, 2010), al fine di etichettare tutti i gabbiani visibili nelle scene (Figura 5 b).

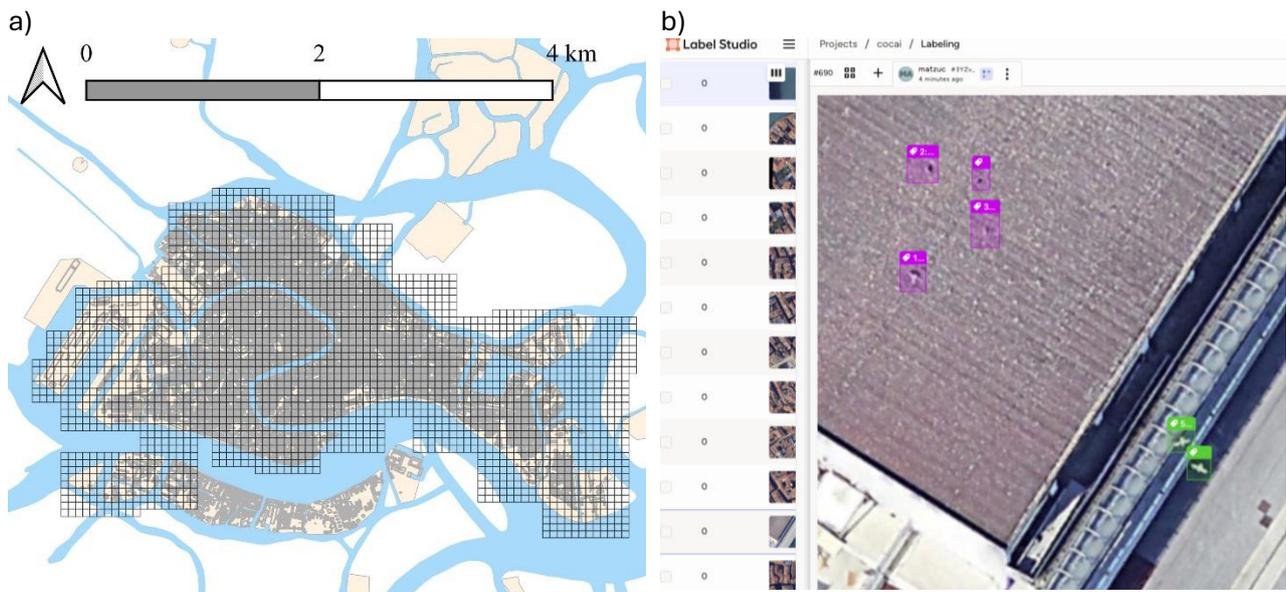


Figura 5. Griglia utilizzata per la suddivisione delle immagini in patch di piccole dimensioni (a); screenshot del software Label Studio con etichette posizionate per identificare i gabbiani posati e in volo (b).

## Addestramento algoritmo e valutazione delle performances

Il dataset di immagini etichettate, così sviluppato, è stato suddiviso in tre sottoinsiemi finalizzati alla: calibrazione del modello (*train*), validazione durante le iterazioni di training dell'algoritmo (*val*); e corroborazione finale dei risultati (*test*) nella proporzione 80:10:10.

È stato calibrato un modello YOLO (*You Only Look Once*) nella versione 11 (Khanam and Hussain, 2024), attuale iterazione della famiglia di modelli per l'*object detection* e considerato lo stato dell'arte in diversi ambiti di applicazione. In particolare, è stata adottata l'implementazione con architettura di dimensioni medie (yolo11m), composta da 20,1 milioni di parametri partendo dai pesi pre-addestrati per il dataset COCO. L'addestramento è stato condotto per 200 epoche (*epoch*; ciclo completo di aggiornamento dei pesi durante il processo di apprendimento di un modello).

La validazione del modello è stata condotta monitorando gli indicatori standard per l'*object detection*: mAP@50 (*mean Average Precision* con soglia di IoU – *Intersection over Union*- pari a 0.5), *precision*, *recall* e *F1-score*. Il valore di mAP@50 fornisce una misura sintetica della capacità del modello di localizzare e classificare correttamente gli oggetti, mentre *precision* e *recall* descrivono, rispettivamente, la precisione (quanti degli oggetti identificati dal modello sono effettivamente presenti) e la sensibilità (quanti degli oggetti effettivamente presenti sono stati trovati). Il punteggio F1 rappresenta il loro compromesso armonico. Questi indicatori sono stati monitorati durante la fase di addestramento per valutare la convergenza e guidare la selezione del miglior modello.

## Risultati

### Confronto Immagini

#### Risoluzione

In Figura 6 è riportato il confronto tra immagini acquisite da diversi sensori, o processate in maniera diversa, che riprendono la stessa scena: un'area specifica del centro storico di Venezia, nella

fattispecie il Campo dei Carmini e una parte del rio di Santa Margherita. È evidente come le immagini a risoluzione più bassa (75cm, satellite Jilin; Figura 6 a) non siano in grado di cogliere i dettagli geometrici più fini presenti nella scena, mentre già dalle immagini a 50cm (Airbus Plèiades; Figura 6 b) è possibile percepire le strutture architettoniche che caratterizzano il paesaggio urbano.

Ovviamente, all'incrementare della risoluzione spaziale, aumenta anche la capacità di individuare visivamente gli oggetti più piccoli all'interno della scena. Ad esempio, solamente con le immagini a risoluzione di 15 cm si riescono a vedere i pali di ormeggio delle barche. Ciò nonostante, elementi ad elevato contrasto di colore e luminosità, come le balaustre del ponte o i muri di sponda dei rii, entrambi in pietra d'Istria, risultano ben visibili anche a risoluzioni più basse, sebbene il loro spessore sia di dimensioni inferiori rispetto a quello dei pixel.

Data l'elevata quantità di informazioni presenti nelle immagini di Google Earth, essendo a più alta risoluzione, si è deciso di partire da queste per esplorare la possibilità di rilevare la presenza di gabbiani nelle zone di nidificazione ricorrenti e rintracciare i siti in cui è possibile identificare gli individui. Tali siti sono stati utilizzati per indirizzare la ricerca anche nelle altre tipologie di immagini analizzate (altre immagini aeree e immagini satellitari).

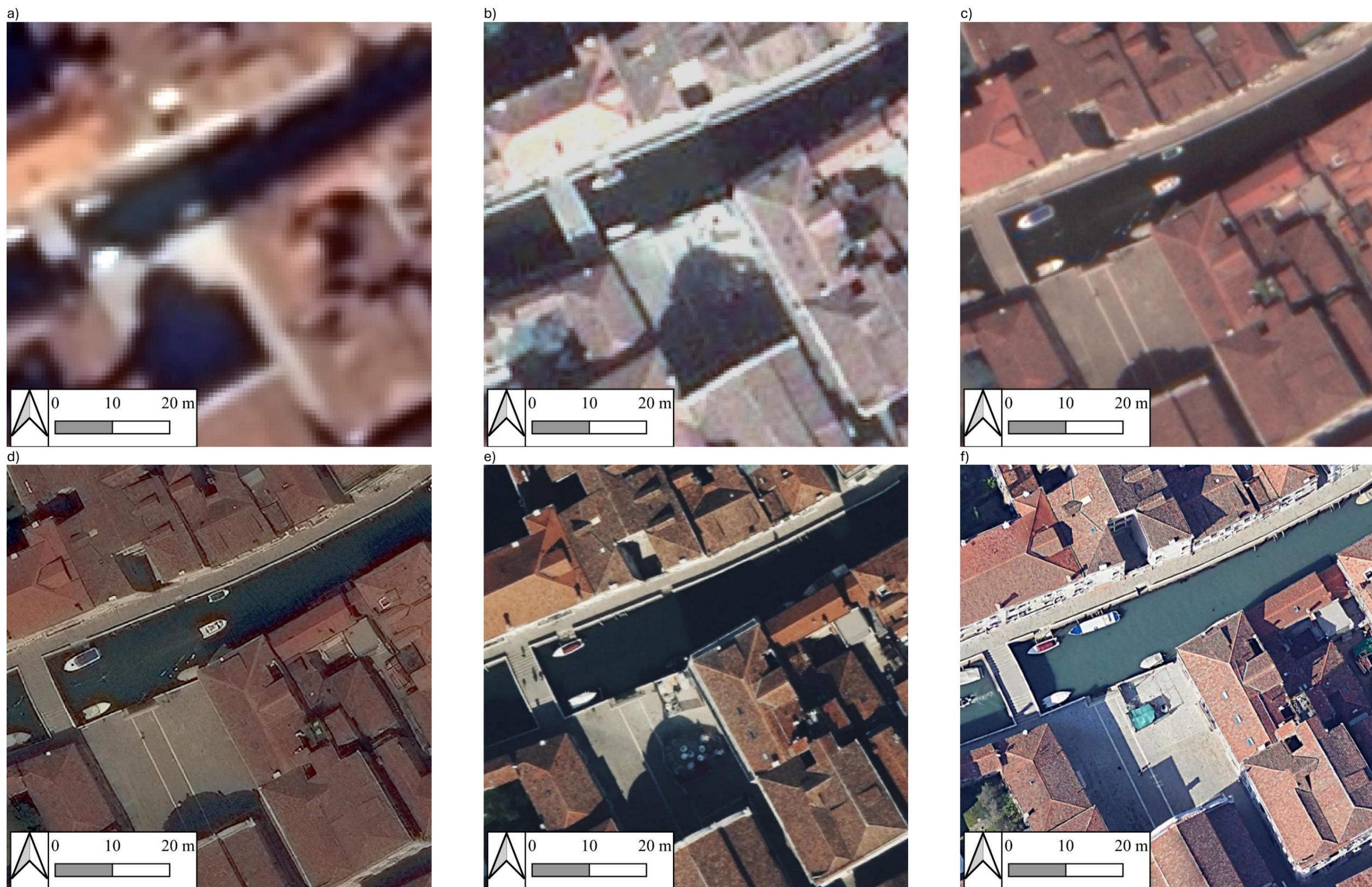


Figura 6. Esempio di una scena raffigurante il Campo dei Carmini e una parte del rio di Santa Margherita, ripresa a diversa risoluzione e con piattaforme diverse: a) Jilin a 75cm; b) Pléiades a 50cm; c) WorldView 3 del 24/03/2024 a 40cm; d) WorldView del 10/06/2018 a 15cm; e) Vexcel del 27/03/2022 13cm; f) Google Earth del 25/03/2021 ad elevata risoluzione.

## Principali habitat di nidificazione dei Gabbiani reali nel centro storico di Venezia

Sulla base della geolocalizzazione delle coppie ricorrenti, delle osservazioni sul campo e del materiale fotografico raccolto relativo ai gabbiani reali nidificanti urbani ed in particolare alle coppie, ai nidi e ai pulli contattati durante i rilievi visivi nel corso degli anni di monitoraggio (dal marzo 2017 in avanti), è stato possibile identificare i principali habitat di nidificazione della specie in ambiente urbano.

Complessivamente sono state individuate quattro principali tipologie di ambienti urbani, o parti di essi, utilizzati dai gabbiani per la nidificazione. Gli habitat urbani identificati vengono di seguito elencati e descritti.

### *Campanili*

Nel corso del monitoraggio sono stati rilevati diversi casi di nidificazione nei campanili di Venezia, in particolare nei campanili della:

- Chiesa dei Carmini (2018);
- Basilica dei Frari (2024);
- Chiesa di San Francesco della Vigna (2018);
- Chiesa di San Piero di Castello (2018);
- Chiesa di San Simeone Grande (2018, 2024);
- Chiesa di San Bartolomeo (2021-2024);
- Chiesa di San Sebastiano (2018-2024);
- Chiesa di San Trovaso (2018-2021);
- Chiesa di San Zulian (2018);
- Chiesa di San Salvador (2018);
- Chiesa di San Silvestro (2018-2021);
- Chiesa di Gesuiti (2018);
- Chiesa di San Giuseppe di Castello (2021);
- Chiesa di San Moisè (2021);
- Chiesa di San Barnaba (2021).

Di questi, i gabbiani utilizzano in genere le cornici decorative alla base della cella campanaria, ovvero quelle fasce che separano i vari piani o sezioni del campanile, per deporre il nido (Figura 7).



Figura 7. Casi di nidificazione sui campanili. In alto due vedute del Campanile di San Francesco della Vigna con due pulli (foto del 12/06/2028). In basso a sinistra una veduta del campanile dei Carmini in cui si nota un adulto assieme a due piccoli (foto del 28.05.2018); in basso a destra una veduta del campanile di San Piero di Castello in cui si notano due piccoli (foto del 29.05.2018). Foto L. Panzarin.

### *Tetti urbani*

Del tetto degli edifici vengono utilizzati come siti di nidificazione diversi elementi e aree specifiche, in particolare:

- l'area compresa tra la base del camino o "piede del comignolo" (ovvero la parte del camino che emerge dal tetto su cui spesso si trova una scossalina, un elemento in metallo o piombo che sigilla il punto di intersezione tra il camino e il tetto e che serve per impedire infiltrazioni d'acqua) e la falda del tetto, ovvero la superficie inclinata che accoglie il camino (Figura 8).

Attività di monitoraggio del Gabbiano reale, *Larus michahellis*, nel centro storico di Venezia: conoscere per gestire la specie -  
Sperimentazione dell'uso del telerilevamento a supporto del monitoraggio della specie in ambiente urbano



Figura 8. Diversi casi di nidificazione nell'area compresa tra la base del camino e la falda del tetto (Foto L. Panzarin, F. Coccon).

- il cornicione e/o la grondaia (Figura 9). Il cornicione è quell'elemento architettonico decorativo di raccordo tra il tetto e la parete degli edifici, comunemente costruito in muratura o in pietra, che serve a proteggere parzialmente le facciate dalle intemperie. La grondaia, realizzata tipicamente in metallo, è installata lungo il bordo del tetto e serve per raccogliere e convogliare l'acqua piovana lontano dalle pareti dell'edificio. La grondaia può essere integrata o nascosta nel cornicione, mantenendo in questo modo funzionalità e bellezza. I gabbiani sono soliti riempire la parte concava di queste strutture con del materiale vegetale per rendere il nido più confortevole e isolare quanto più possibile le uova dal materiale lapideo o metallico.



Figura 9. Casi di nidificazione nei cornicioni e grondaie di alcuni edifici nel centro storico di Venezia (Foto L. Panzarin, F. Coccon).

- i camini (Figura 10) ed in particolare:
  - o la lastra di marmo o in pietra d'Istria posta in cima alla struttura del camino ("piattaforma"), che ha una funzione sia decorativa che pratica, ovvero di proteggere dalla pioggia e favorire la dispersione dei fumi;
  - o la porzione di tetto compresa tra due camini ravvicinati;

- i "camini a torretta" o "camini a piramide rovesciata", tipici dell'architettura veneziana e composti da gradoni sovrapposti, spesso realizzati in mattoni rivestiti in intonaco e con piattaforme in pietra d'Istria per proteggere i bordi. Questi camini sono spesso utilizzati dai gabbiani per la nidificazione in quanto la struttura a gradoni riduce le turbolenze del vento e protegge dalla pioggia, garantendo un luogo sicuro e riparato per la cova delle uova e la successiva crescita dei piccoli.



Figura 10. Diverse tipologie di camini, utilizzati dai gabbiani per la nidificazione (Foto L. Panzarin, F. Coccon).

- l'area compresa tra le antenne paraboliche e la parete dell'edificio (Figura 11), che risulta riparata da vento, pioggia e intemperie ed è quindi particolarmente attrattiva per i gabbiani come sito di nidificazione.



Figura 11. Casi di nidificazione nell'area compresa tra le antenne paraboliche e la parete dell'edificio (Foto L. Panzarin).

- l'area di intersezione tra due falde del tetto con orientamento diverso, definita "linea di compluvio", ovvero sia dove si incontrano due falde inclinate che convogliano l'acqua piovana verso un punto comune, solitamente verso una grondaia o un pluviale. In questa linea concava i gabbiani portano in genere del materiale, tipicamente di origine vegetale, per la costruzione del nido che accoglierà le uova. Spesso il nido viene costruito a ridosso di strutture fisse, come ad esempio i condizionatori d'aria, che creano una sorta di nicchia, utile non solo a riparare gli animali dalle intemperie, ma anche a mantenere il nido in posizione, evitando il rotolamento o la lisciviazione delle uova in caso di forte vento o pioggia (Figura 12). Il nido può essere costruito anche in prossimità del nodo di intersezione tra tetti diversi (Figura 13), ovvero a livello dei colmi dei due tetti, o anche dove il colmo si raccorda con una delle falde inclinate (Figura 14).



Figura 12. Caso di nidificazione nella “linea di compluvio”, ovvero sia l’area di intersezione tra due falde del tetto con orientamento diverso (Foto L. Panzarin, F. Coccon).



Figura 13. Caso di nidificazione in prossimità del nodo di intersezione tra tetti diversi (Foto L. Panzarin, F. Coccon).



Figura 14. Caso di nidificazione nell'area dove il colmo si raccorda con una delle falde inclinate in prossimità del nodo di intersezione tra tetti diversi (Foto L. Panzarin, F. Coccon).

L'area antistante gli abbaini o la porzione di tetto compresa tra l'abbaino e la falda del tetto, così come la porzione del tetto sottostante le altane è invece sfruttata dai piccoli, una volta nati, per ripararsi dalle condizioni climatiche avverse e proteggersi da eventuali pericoli, specialmente quando i genitori sono assenti (Figura 15).





Figura 15. Tipologie di ambienti sfruttate dai pulli per ripararsi dalle condizioni climatiche avverse e proteggersi da eventuali pericoli in assenza dei genitori (Foto L. Panzarin, F. Coccon).

### *Lastrici solari e terrazze*

In questi ambienti, il nido viene costruito generalmente negli angoli più remoti, meno accessibili o poco frequentati, spesso al di sotto o in prossimità di strutture fisse, come i tubi del condizionamento d'aria o i basamenti delle antenne per la telefonia mobile, che fungono da riparo sia per gli individui in cova che per i piccoli (Figura 16).

Trattandosi di superfici piane e quindi "comode", tali ambienti sono spesso utilizzati dai gabbiani anche come posatoi e siti di alimentazione in cui consumare le proprie prede (Figura 17). Non è raro che, nelle terrazze, i gabbiani utilizzino i vasi per le piante per nidificare (Figura 18).



Attività di monitoraggio del Gabbiano reale, *Larus michahellis*, nel centro storico di Venezia: conoscere per gestire la specie -  
Sperimentazione dell'uso del telerilevamento a supporto del monitoraggio della specie in ambiente urbano

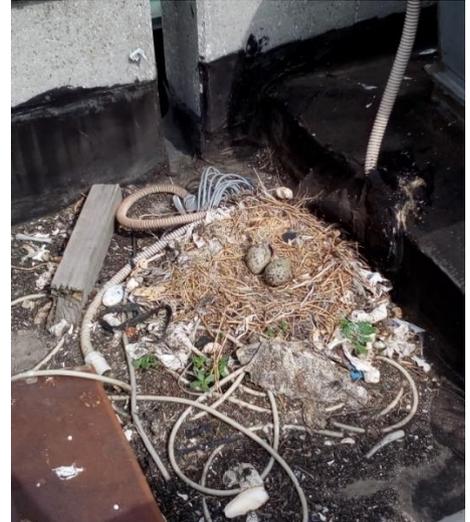


Figura 16. Diversi casi di nidificazione in lastrici solari o terrazze di edifici presenti in centro storico di Venezia (Foto L. Panzarin, F. Coccon).

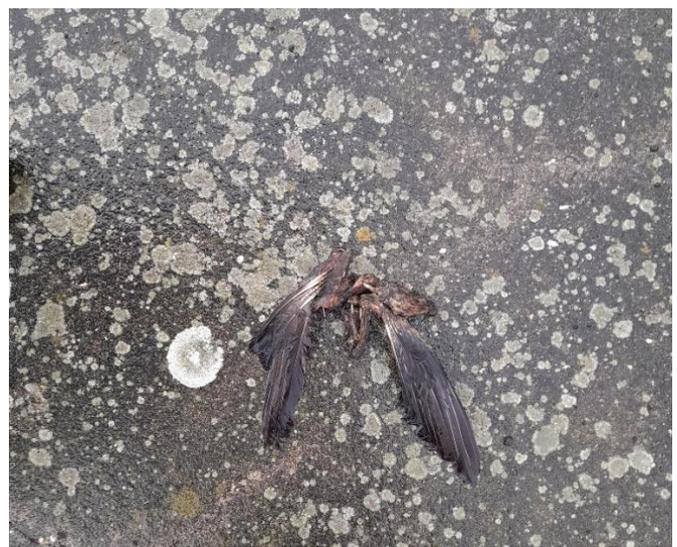


Figura 17. Resti dei pasti consumati dai gabbiani reali in alcuni dei lastrici solari utilizzati per l'attività di monitoraggio (Foto F. Coccon).



Figura 18. Uova di Gabbiano reale deposte su una fioriera di una terrazza condominiale in un edificio del centro storico di Venezia.

## Chiese

È stato osservato un caso di nidificazione di successo, che ha portato alla nascita di due piccoli, nel timpano della Chiesa di San Vidal, in Campo Santo Stefano, e un caso di nidificazione nella loggia di una delle guglie presenti nella facciata della Basilica dei Frari. In questo caso, tuttavia, la nidificazione non ha avuto esito positivo e l'individuo ha perso la covata (Figura 19).



Figura 19. A sinistra, caso di nidificazione di successo presso il timpano della Chiesa di San Vidal, registrato durante il rilievo visivo effettuato in data 27.05.2024. A destra, caso di nidificazione nella loggia di una delle guglie della facciata della Basilica dei Frari, registrato in data 04.06.2024. Il tentativo di nidificazione in questo caso è fallito.

Sulla base degli elementi urbani attrattivi per i gabbiani reali per la nidificazione, sopra descritti, sono state individuate una serie di variabili proxy della colonizzazione degli edifici da parte della specie. In particolare:

- la disponibilità di una superficie piana costituisce una “*conditio sine qua non*”. Nei casi in cui vi sia una posizione idonea per la nidificazione, ma la superficie risulti inclinata, i gabbiani tenderanno a renderla più piana e accogliente possibile portandovi del materiale per il nido (Figura 20);
- presenza di vegetazione sulle superfici (tetti, camini, cornicioni): questa condizione genera una condizione ottimale per i gabbiani nidificanti in quanto rende il sito più confortevole e aiuta a contrastare il rotolamento/lisciviazione delle uova in caso di pioggia o forte vento (Figura 21);
- presenza di un supporto fisso perpendicolare alla falda del tetto (ad esempio un'antenna o un condizionatore d'aria), che costituisce un riparo sia per l'animale in cova che per i piccoli, una volta nati (Figura 12);
- linea concava, ad esempio data dall'intersezione delle falde del tetto con inclinazioni diverse, a costituire una sorta di nicchia accogliente per il nido (Figura 13).



Figura 20. Esempio di superficie inclinata appianata grazie alla crescita della vegetazione e che il gabbiano ha cercato di rendere ancora più confortevole e sicura contro il rotolamento delle uova portandovi del materiale per il nido.





Figura 21. Elementi urbani vegetati, particolarmente attrattivi per i gabbiani nidificanti.

## Osservazioni da remoto

Di seguito è riportata una rassegna degli elementi emersi dall'analisi di ciascuna piattaforma selezionata per l'acquisizione delle immagini remote, al fine di descriverne le potenzialità e i limiti.

### *Google Earth*

Le immagini disponibili in Google Earth non risultano pienamente sfruttabili per un approccio sistematico di remote sensing, a causa di alcune limitazioni significative, che possono essere così riassunte:

- la disponibilità temporale delle immagini non è prevedibile e spesso la fonte dei dati non è chiaramente identificabile. Anche utilizzando lo strumento timeline integrato, non è sempre possibile risalire con precisione alla data effettiva di acquisizione di ciascuna immagine;
- manca una corrispondenza chiara tra date e specifiche porzioni del territorio;
- mancano informazioni dettagliate su come le immagini siano state distribuite o aggregate. Non è noto, ad esempio, come le immagini siano state processate, soprattutto per quanto riguarda il *blending* (fusione) delle immagini sovrapposte, in particolare nelle aree prossime ai corpi idrici;
- non è possibile esportare i dati alla loro risoluzione spaziale originale e ciò ostacola un'analisi quantitativa sistematica dell'intero dataset delle scene disponibili.

Nonostante le limitazioni descritte, il grado di dettaglio offerto da alcune immagini (in particolare quelle aeree) può essere estremamente elevato. Per questo motivo, come già detto, si è deciso di utilizzare le immagini di Google Earth per valutare la rilevabilità dei gabbiani reali nelle aree di interesse. Questo primo passaggio è risultato fondamentale per valutare il riconoscimento degli individui utilizzando immagini dotate del maggior dettaglio possibile. Se è difficile, infatti, rintracciare i gabbiani nelle immagini aeree ad alta risoluzione, è piuttosto improbabile riuscire ad individuarli in immagini a risoluzione inferiore.

Lo strumento "immagini storiche" di Google Earth Pro consente di selezionare diverse date e visualizzare immagini riferite a vari periodi. Per quanto riguarda il centro storico di Venezia, le immagini a più alta risoluzione possibili sono datate: 28/06/2016, 02/04/2018, 25/03/2021, 11/10/2022 e

10/04/2022. Si tratta di immagini aeree (con risoluzione stimata inferiore ai 10 cm), prive di informazioni sul fornitore dei dati.

In queste immagini sono facilmente riconoscibili numerosi individui in volo (Figura 22). I soggetti in volo risultano spesso ben distinguibili per varie ragioni:

- presentano un elevato contrasto con lo sfondo, che risulta spesso in ombra, soprattutto se illuminati direttamente dal sole;
- con le ali spiegate occupano una superficie maggiore, diventando target più facilmente visibili;
- la loro forma è distintiva e difficilmente confondibile con altri oggetti;
- talvolta, l'ombra proiettata ne facilita ulteriormente l'identificazione.

a)



b)



c)



d)

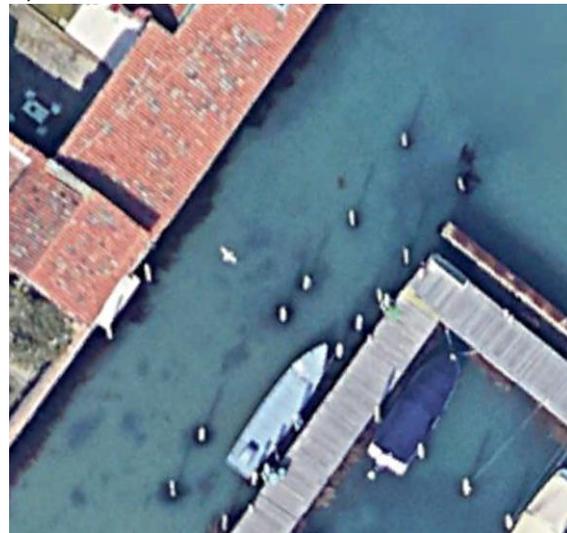


Figura 22. Esempi di individui in volo visibili nel catalogo di Google Earth: a) Campo Santa Margherita 25/03/2021; b) tetto della Basilica dei Frari 25/03/2021; c) Campo delle Beccarie 11/10/2022; d) Sacca de la Misericordia 25/03/2021

Nelle immagini ad alta risoluzione di Google Earth, i gabbiani possono essere identificati anche quando si trovano posati al suolo (Figura 23 d), in acqua (Figura 23 b), o sui tetti (Figura 23 c), soprattutto se lo sfondo appare sufficientemente omogeneo. È possibile individuare, inoltre, individui a terra, non in posizione di riposo, anche in condizioni di illuminazione non ottimali (Figura 23 a).

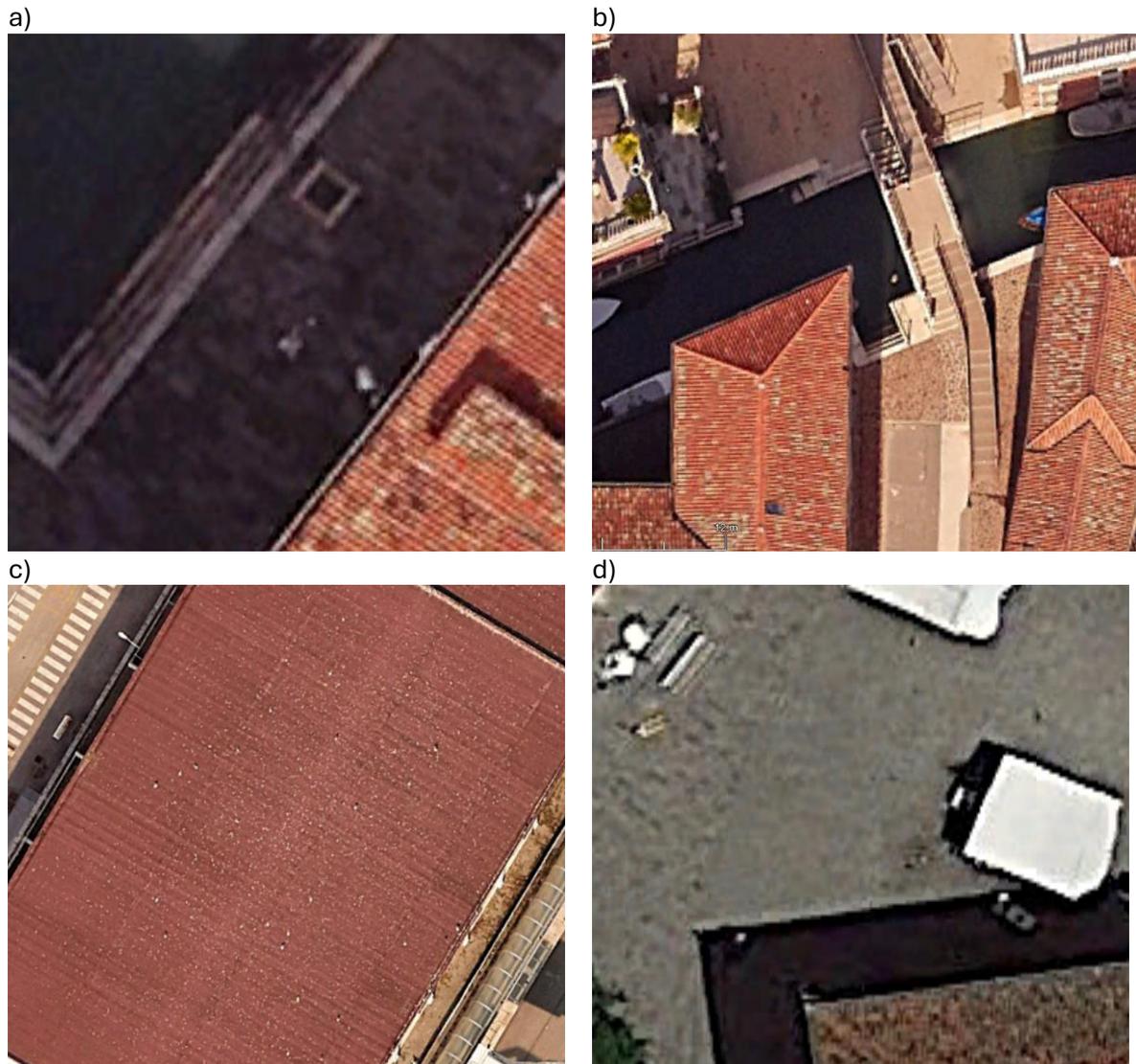


Figura 23. Esempi di individui posati visibili: a) Fondamenta delle Prigioni, dietro al mercato del pesce di Rialto 11/10/2022; b) individuo posato in acqua – Rio del Malpaga in prossimità del ponte di Ognissanti; c) individui posati sul tetto di un terminal della Marittima 11/10/2022; d) individuo posato a terra in Campo Santa Margherita 28/6/2016.

L'ispezione visiva dei siti di nidificazione utilizzati in maniera ricorrente (cfr. par. Ricerca delle coppie riproduttive fedeli al sito di nidificazione per l'individuazione dei Gabbiani reali nelle immagini satellitari) ha permesso di rintracciare individui posati sui tetti in prossimità delle zone di nidificazione (Figura 24), sia su superfici dall'aspetto relativamente omogeneo (Figura 24 d), sia su superfici dall'aspetto maggiormente variegato, caratterizzate da un pattern visivo a mosaico, determinato dalla colorazione variabile delle tegole (si veda, ad esempio, Figura 24 c). Non è stato possibile, tuttavia, identificare direttamente le coppie riproduttive, anche a causa dei numerosi ostacoli, rappresentati da strutture tridimensionali o da elementi come vegetazione, camini o antenne, che ostacolano la visibilità dei target nelle immagini.

In generale, la presenza di gabbiani in posizione di riposo, eretta o accovacciata, può risultare relativamente incerta, dato che il pattern visivo può essere confuso con altre tipologie di elementi presenti nelle scene. In questi casi, l'ombra proiettata è spesso un elemento chiave per confermare

l'identificazione, come nel caso della Figura 24 c, dove sono distinguibili due individui su un tetto grazie all'ombra che ne rivela il volume.

Risulta, inoltre, fondamentale confrontare scene della stessa porzione di territorio acquisite in diverse date: l'osservazione alternata della stessa area in immagini diverse consente, infatti, di confermare o meno la presenza di individui sulla superficie analizzata.



Figura 24. Esempi di individui posati visibili in prossimità dei siti di nidificazione ricorrenti: a) area in prossimità della Fondamenta dei Dai 25/03/2021; b) area in prossimità della Calle del Traghetto de Santa Lucia 04/10/2022; c) Convento di S. Alvise 25/03/2021; d) Palazzo Malcanton Marcorà 10/11/2022.

### *Altre immagini aeree*

Le immagini aeree Vexcel acquistate, presentano una risoluzione spaziale leggermente inferiore rispetto alle immagini di migliore qualità disponibili per il centro storico di Venezia in Google Earth. Tuttavia, la risoluzione rimane molto elevata, con pixel di circa 13 cm. In generale, si conferma la possibilità di individuare la presenza dei gabbiani in diversi contesti urbani anche utilizzando questa tipologia di immagini.

Per questo studio erano disponibili solo due scene, acquisite a marzo 2022 e marzo 2023, raffiguranti una porzione limitata del territorio urbano. L'analisi visiva ha confermato le considerazioni effettuate in precedenza, con i soggetti identificabili abbastanza facilmente nelle immagini disponibili (Figura 25).

Anche nelle immagini Vexcel è possibile osservare individui in posizione di riposo, posati a terra o sui tetti in tegole, in acqua o su superfici visivamente omogenee (Figura 26). È stato anche possibile identificare la presenza di individui in prossimità di siti di nidificazione, in particolare nei siti dove la presenza dei gabbiani era già stata rilevata nelle immagini di Google Earth (Figura 27). Da notare che sulla stessa porzione del tetto del Palazzo Malcanton Marcorà è stata registrata la presenza di un individuo in entrambe le immagini Vexcel disponibili (del 27/03/2022 e del 03/03/2023), confermando l'utilizzo ricorrente del sito.

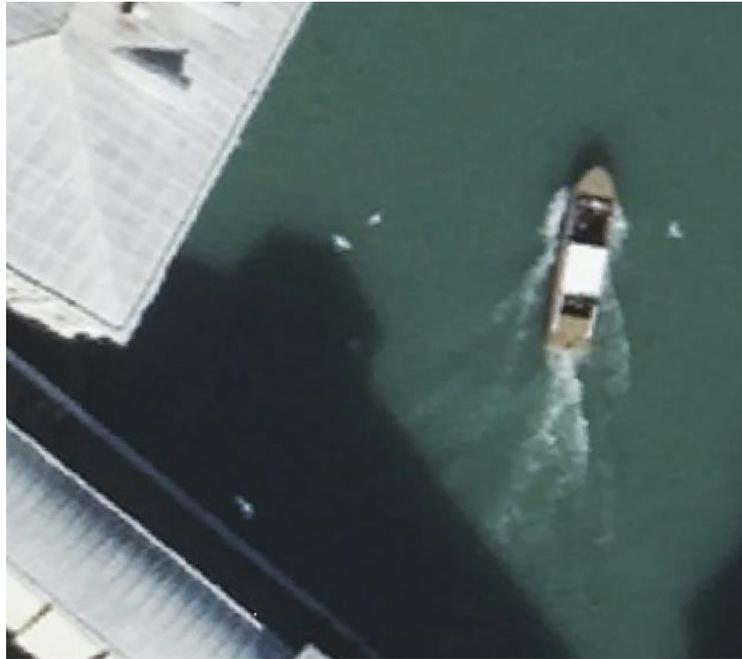


Figura 25. Individui in volo visibili su immagini aeree Vexcel in Canal Grande presso il Ponte di Rialto (04/03/2023).

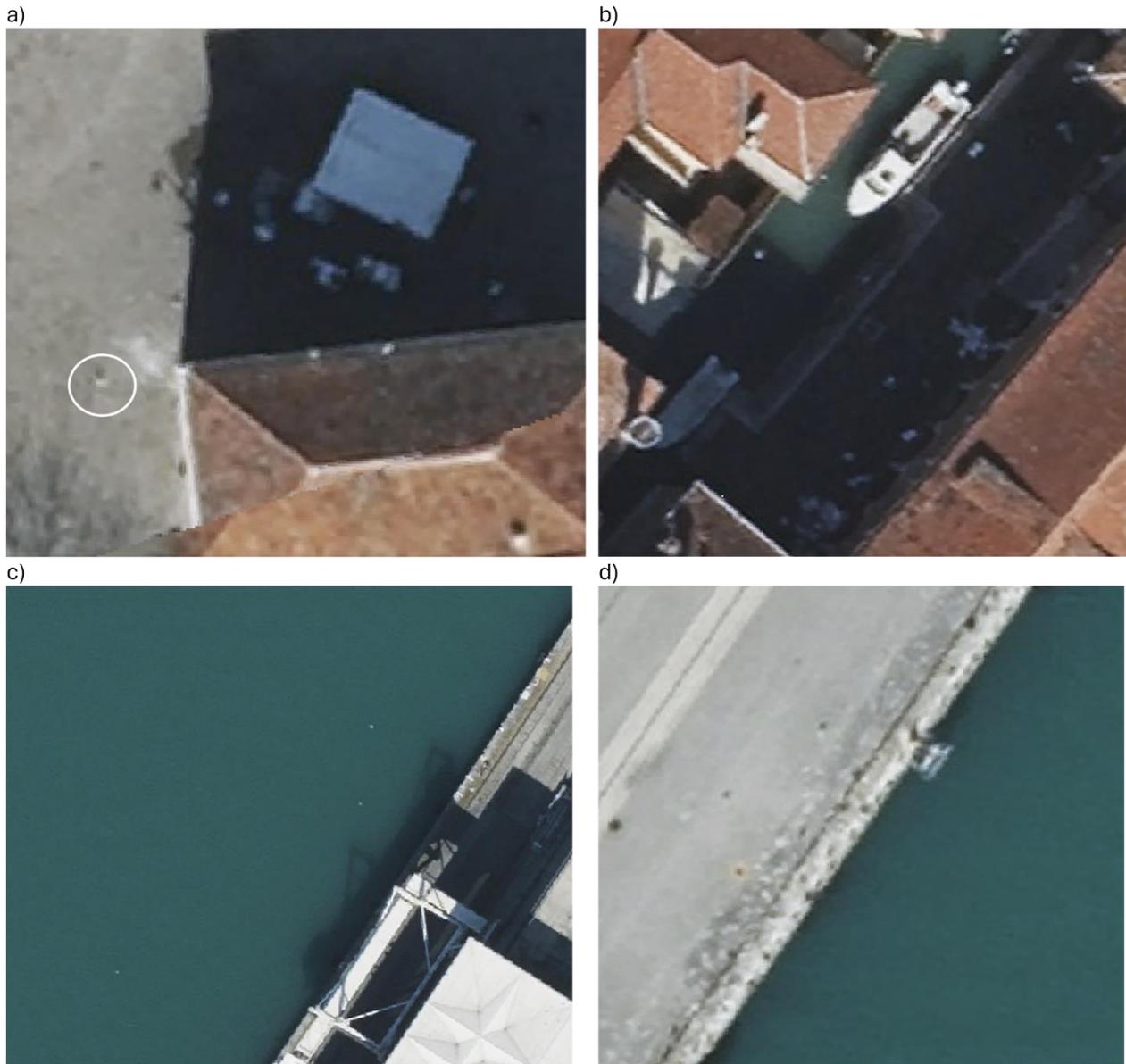


Figura 26. Esempi di individui posati visibili: a) individui in Campo Santa Margherita (posati a terra e sul tetto) - Vexcel 04/3/2023; b) Fondamenta delle Prigioni, dietro il mercato del pesce di Rialto - Vexcel 04/3/2023; c) individui posati in acqua sul Bacino della Stazione Marittima - Vexcel 04/3/2023; d) individui posati sulla banchina della Stazione Marittima - Vexcel 04/3/2023.

a)

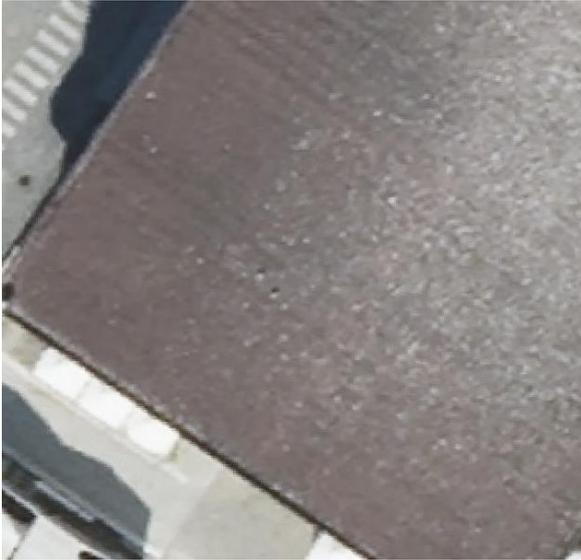


Figura 27. Esempi di individui posati, visibili in prossimità dei siti di nidificazione ricorrenti: a) individui posati sul tetto di un terminal della stazione Marittima – Vexcel 04/3/2023; b) tetto del Palazzo Malcanton Marcorà – Vexcel – 04/03/2023; c) tetto del Palazzo Malcanton Marcorà – Vexcel – 27/03/2022.

b)



c)



### *Immagini satellitari*

Ai fini di questo studio, sono stati presi in considerazione e analizzati nel dettaglio diversi tipi di immagini satellitari. In generale, appare evidente l'abbassamento della risoluzione spaziale rispetto alle immagini aeree, con un valore minimo di 30 cm per pixel, con l'eccezione della scena processata da Maxar tramite tecnologia di super risoluzione HD, che ha permesso di interpolare la scena WorldView 3 del 18 giugno 2018 ad una risoluzione di 15 cm, paragonabile a quella delle immagini aeree precedentemente descritte. La medesima scena è stata analizzata anche alla risoluzione nativa di 30 cm, sia come immagine RGB (ottenuta attraverso la tecnica del *pan-sharpening*), sia attraverso l'ispezione della banda pancromatica. Nonostante l'elevata risoluzione, non è stato possibile identificare con ragionevole certezza la presenza di gabbiani. Lo stesso esito si è avuto con immagini acquisite a una risoluzione inferiore, come WorldView 3 a 40 cm, Pléiades a 50cm o Jilin a 75 cm. Tuttavia, in altre scene catturate dal satellite WorldView 3 di Maxar a 30 cm è stato possibile rilevare la presenza dei target posati in acqua, a terra o su tetti (Figura 28).

Alcuni dei soggetti rilevati in queste scene si trovavano in siti già individuati grazie alle altre tipologie di immagini analizzate (ad esempio si veda la Figura 28 e). Altri si trovavano in siti dove la presenza della specie non era stata rilevata nelle immagini precedentemente analizzate, ad esempio sul tetto della stazione ferroviaria di Santa Lucia (Figura 28 a).

Tali risultati suggeriscono che la soglia di risoluzione spaziale utile per l'identificazione dei gabbiani nelle immagini satellitari si colloca attorno ai 30–40 cm. Ciò nonostante, il fatto che gli individui siano visibili solo in alcune immagini e non in altre mette in evidenza come la qualità dell'immagine e le condizioni di visibilità al momento dell'acquisizione influenzino in modo determinante la possibilità o meno di rintracciare i soggetti e quindi l'efficacia e applicabilità di utilizzo di questo metodo.

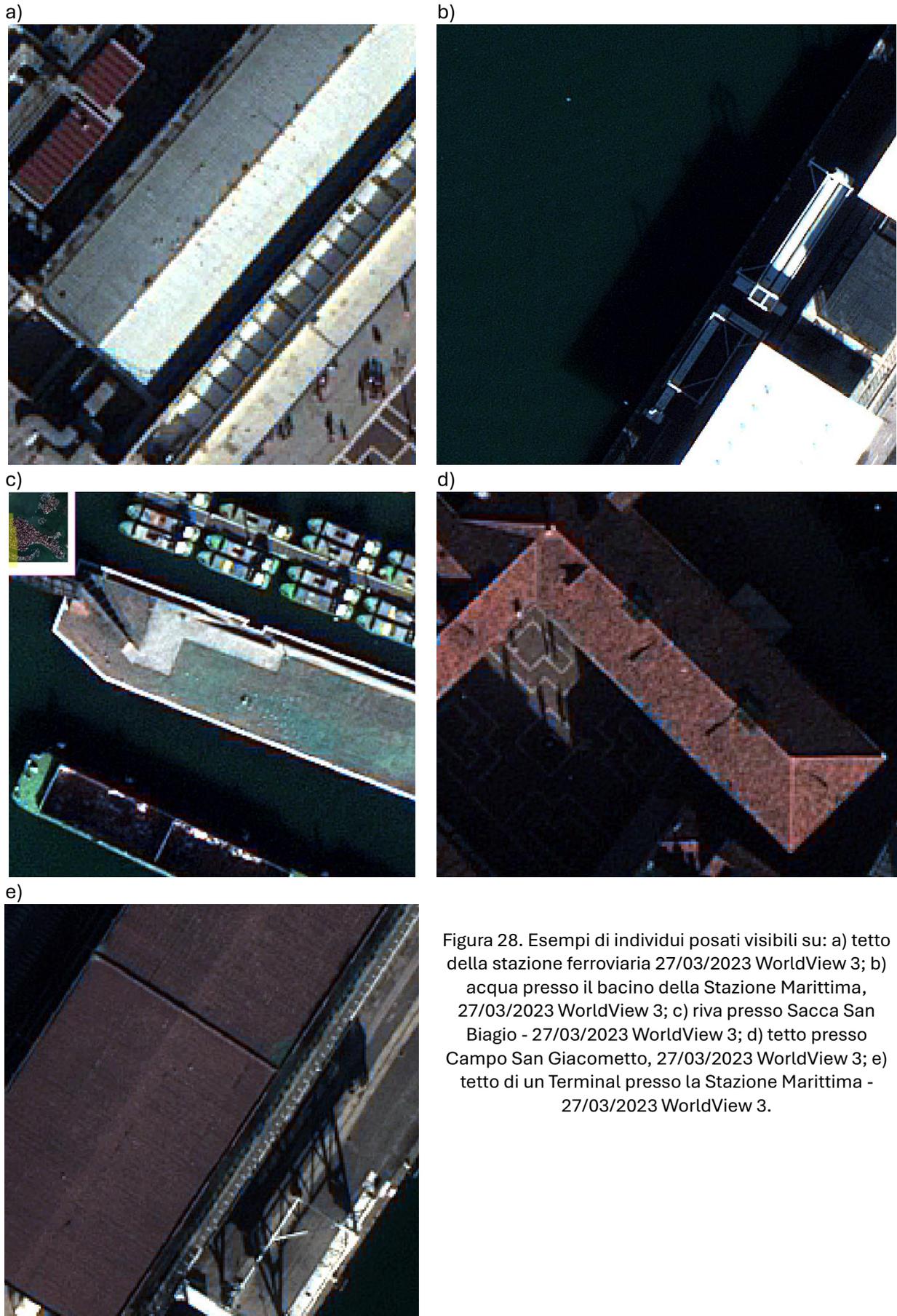


Figura 28. Esempi di individui posati visibili su: a) tetto della stazione ferroviaria 27/03/2023 WorldView 3; b) acqua presso il bacino della Stazione Marittima, 27/03/2023 WorldView 3; c) riva presso Sacca San Biagio - 27/03/2023 WorldView 3; d) tetto presso Campo San Giacometto, 27/03/2023 WorldView 3; e) tetto di un Terminal presso la Stazione Marittima - 27/03/2023 WorldView 3.

## Identificazione automatica della presenza di Gabbiano reale in immagini acquisite in remoto

Lo sviluppo del dataset etichettato per l'addestramento del modello di *object detection* ha identificato 71 immagini della griglia di riferimento in cui è stato possibile registrare la presenza di gabbiani reali posati o in volo (Figura 29 a). Di queste immagini, 37 contengono osservazioni di gabbiani posati e 37 di gabbiani in volo. Il numero di singoli gabbiani etichettati è di 90 individui posati e 43 in volo.

Il dataset, quindi, è estremamente ridotto per la messa a punto di un robusto algoritmo di *object detection*. Tuttavia, l'addestramento ha restituito un modello con buone performances sulla media delle precisioni delle due classi di oggetti (mAP50 = 0.874), che lascia intravedere interessanti possibilità di sviluppo future.

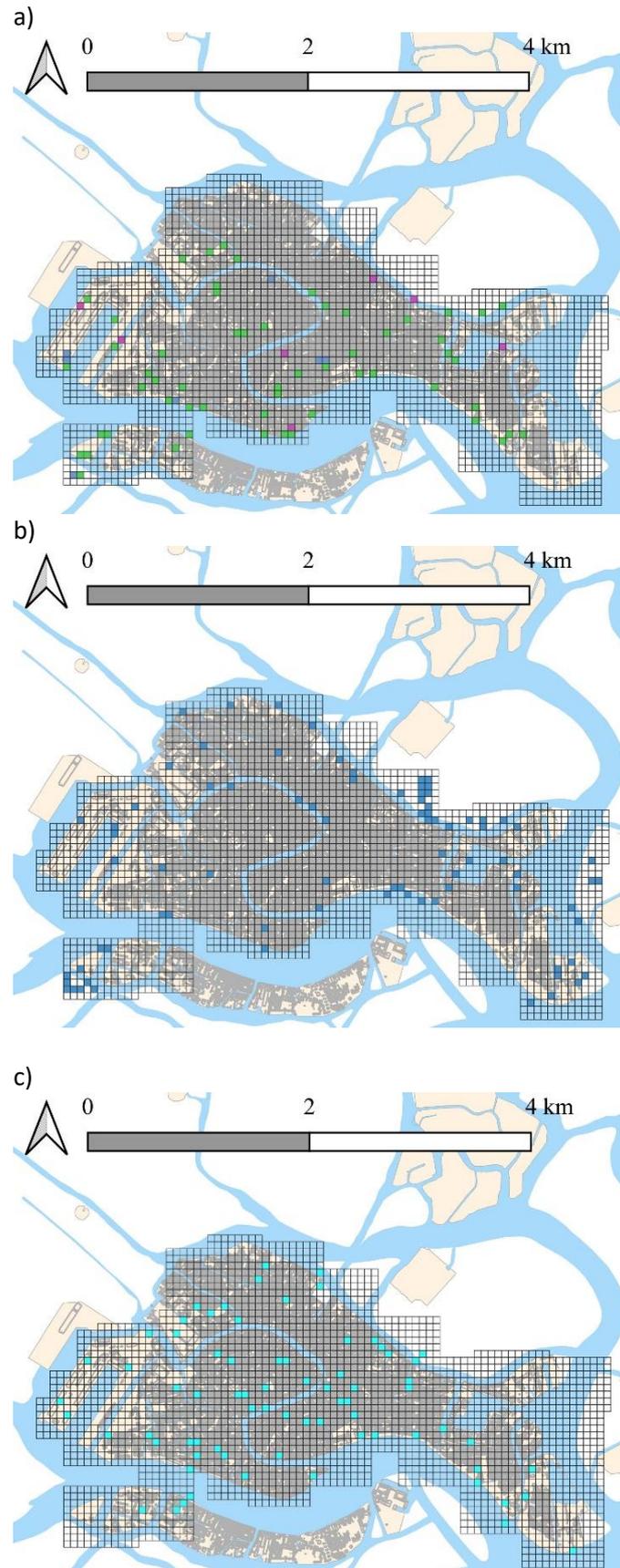


Figura 29. Immagini utilizzate per l'addestramento del modello di *object detection* divise in training (verdi), validation (rosa) and test (azzurro)(a); immagini in cui è stata osservata la presenza di individui posati (b) e in volo (c) nelle predizioni effettuate sull'intera griglia di immagini, considerando un livello di confidenza pari a 0.55.

Quando si utilizza il modello in maniera predittiva, ciascun oggetto identificato è associato a un valore di confidenza che indica quanto il modello è sicuro della propria previsione. Per poter indicare in maniera discreta se l'oggetto che si sta cercando di individuare nelle immagini sia presente o meno, bisogna stabilire una soglia di confidenza, per classificare le stime come presenze o assenze.

La relazione tra la confidenza e la *precision* mostra come la proporzione di oggetti identificati effettivamente presenti, aumenti all'aumentare della confidenza per entrambe le classi, raggiungendo un plateau per un valore di confidenza di oltre 0.6 (Figura 30 a), mentre all'aumentare della confidenza la capacità di individuare tutti gli oggetti effettivamente presenti diminuisce rapidamente all'aumentare della soglia (Figura 30 b). Lo F1-score, che combina in modo armonico *precision* e *recall*, suggerisce che la soglia ottimale per massimizzare contemporaneamente precisione e sensibilità sia attorno a 0.57 (Figura 30 c).

La classe dei gabbiani posati (linea azzurra nei grafici in Figura 30) mostra sempre valori più bassi e con maggiori oscillazioni, indicando la maggior difficoltà del modello a riconoscere individui posati rispetto a quelli in volo, tendenza già evidenziata dalle analisi di ispezione visuale manuale delle immagini. Il livello di confidenza nella definizione della presenza di un target influisce sul numero di target (gabbiani) effettivamente identificati e sul numero di immagini in cui sono state fatte le osservazioni (Figura 31). Abbassando la soglia di confidenza si osserva una diminuzione della precisione, perché aumenta il numero di falsi positivi (oggetti identificati erroneamente come gabbiani), ma al contempo aumenta la *recall* (proporzione di elementi effettivamente presenti, individuati dal modello), poiché il modello individua una percentuale più alta degli individui effettivamente presenti.

Con un livello di confidenza bilanciato (ad es. 0.57) si individua un numero di gabbiani posati che corrisponde all'incirca a quello del dataset usato per l'addestramento dell'algoritmo, ma con un numero stimato di gabbiani in volo più elevato rispetto a quelli effettivamente presenti (Figura 31 b). Tali considerazioni risultano di fondamentale importanza nel momento in cui il modello di *object detection* dovesse essere applicato in maniera predittiva per effettuare delle stime di popolazione, ambito che va oltre agli obiettivi di questo studio. Una applicazione più rilevante, invece, è quella di utilizzare le predizioni dell'algoritmo per esplorare in maniera rapida ampie scene riprese dall'alto. Infatti, anche se il modello include una certa porzione di falsi positivi, potrebbe risultare ugualmente utile avere a disposizione una prima valutazione di massima su cui concentrare gli sforzi dell'ispezione visiva. Questo approccio, in particolare, potrebbe trovare applicazione per esplorare la presenza di individui posati o in volo in zone urbane non incluse nei piani di monitoraggio, ad esempio le isole lagunari o la terraferma. In Figura 32 sono riportati alcuni esempi di individui identificati dall'algoritmo. Questi esempi includono osservazioni classificate precedentemente grazie all'analisi visiva delle immagini e conseguentemente incluse nel dataset di addestramento, ma includono anche osservazioni di gabbiani, correttamente rilevate dal modello, contenute in immagini non utilizzate per la calibrazione dello stesso. La figura contiene anche esempi di osservazioni erratamente classificate.

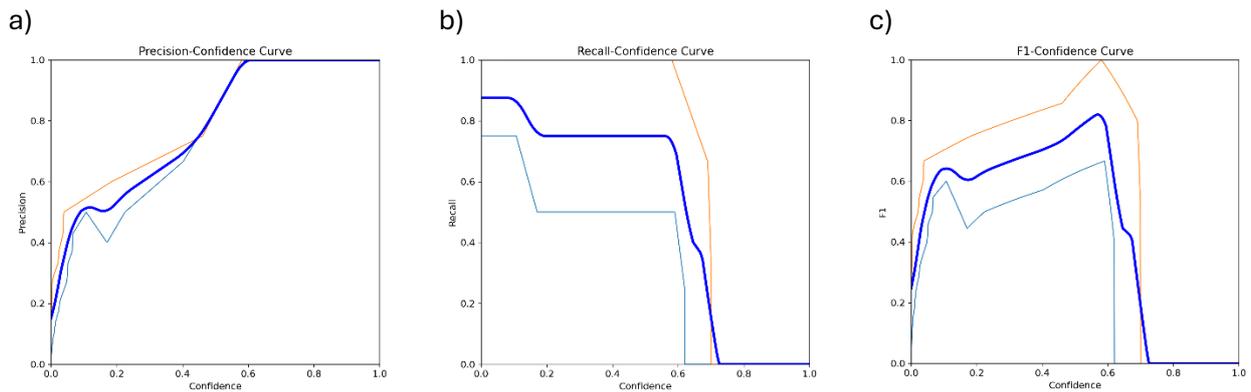


Figura 30. Curve di Precision–Confidence (a); Recall–Confidence (b) e F1–Confidence (c). In arancio i valori relative ai gabbiani in volo e in azzurro quelli posati, in blu i valori medi.

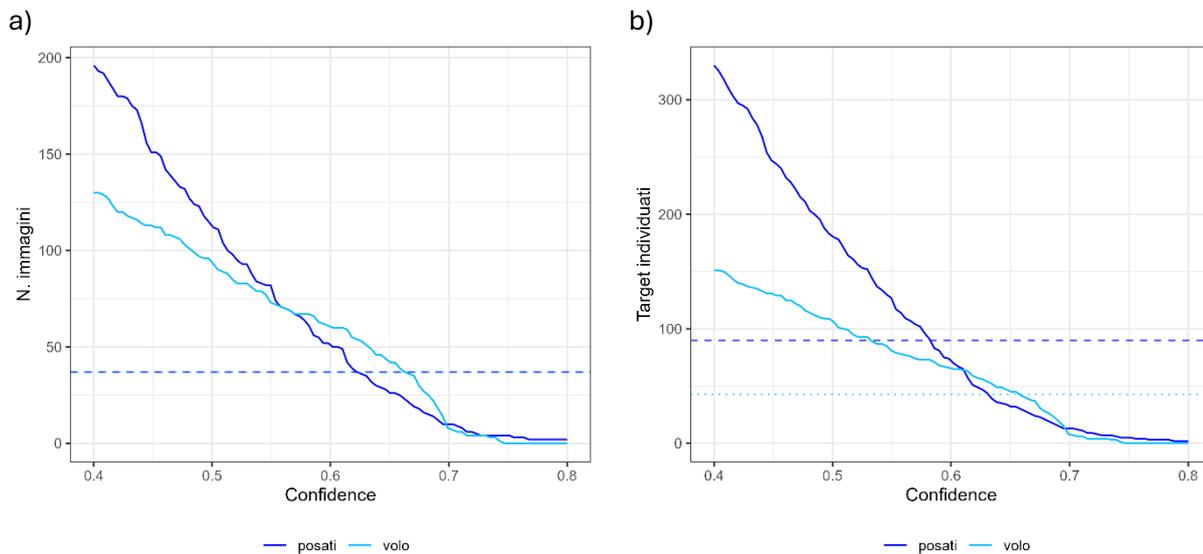


Figura 31. Numero di immagini in cui l' algoritmo suggerisce la presenza di gabbiani (a) e numero di target individuati (b) al variare del livello di confidenza. Le linee tratteggiate e punteggiate rappresentano i numeri di immagini e gabbiani inclusi del dataset di addestramento.

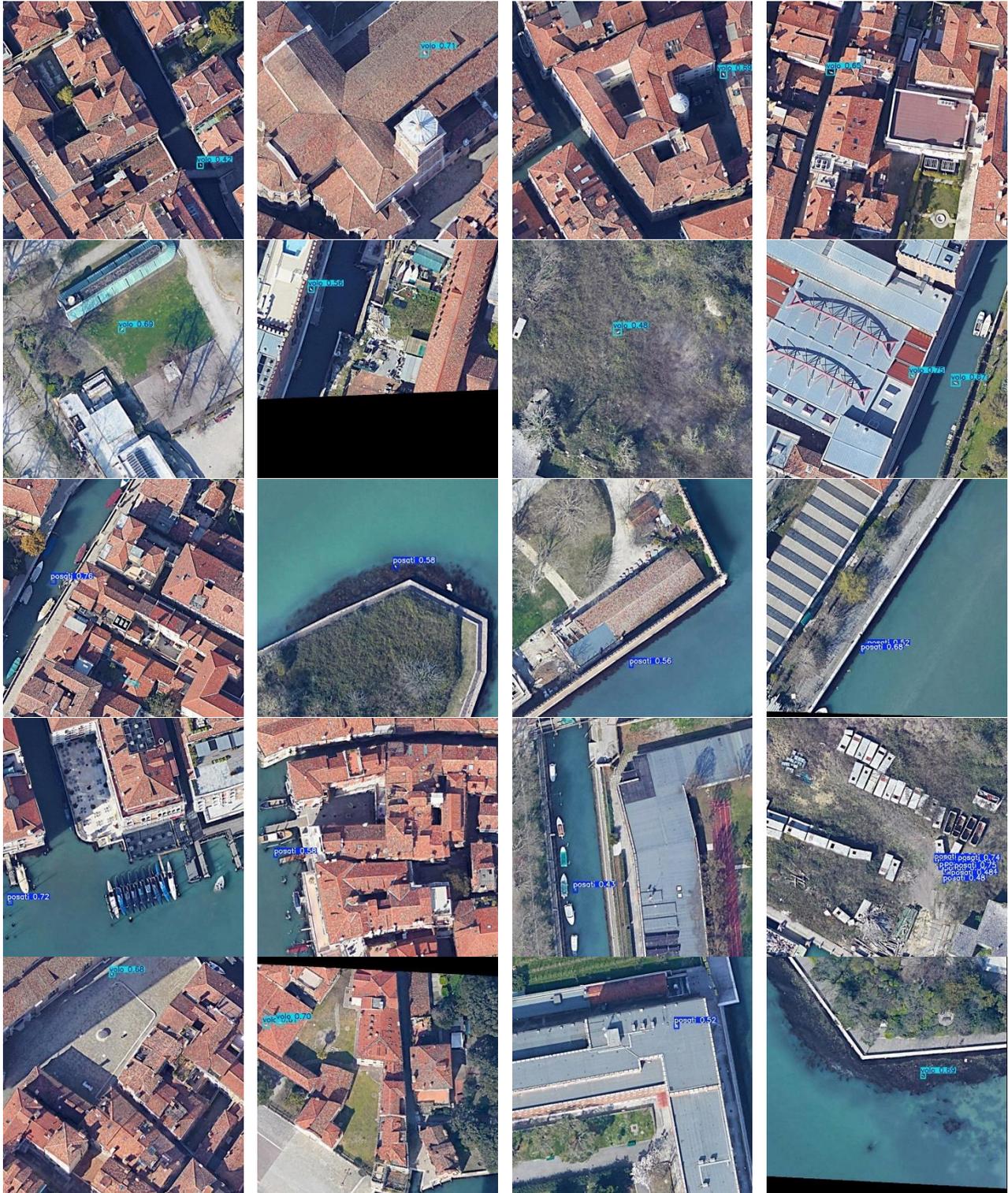


Figura 32. Pannello di esempi estratti dalle predizioni del modello di *object detection*: ogni immagine rappresenta una cella della griglia in cui è stata suddivisa l'area di studio. La prima riga contiene predizioni corrette della presenza di gabbiani in volo, già inclusi nel dataset di calibrazione; la seconda predizioni corrette della presenza di gabbiani in volo, non inclusi nel dataset di calibrazione; la terza riga contiene predizioni corrette della presenza di gabbiani posati, già inclusi nel dataset di calibrazione; la quarta predizioni corrette della presenza di gabbiani posati, non inclusi nel dataset di calibrazione; la quinta contiene esempi di predizioni errate.

## Discussione

L'analisi condotta ha permesso di valutare l'efficacia dell'uso delle immagini satellitari ad altissima risoluzione (VHR) per il rilevamento del Gabbiano reale (*Larus michahellis*) in ambiente urbano. In particolare, è stato testato se e in quali condizioni fosse possibile identificare visivamente individui e siti di nidificazione in immagini remote acquisite da sensori differenti, con diverse risoluzioni spaziali e in momenti diversi dell'anno.

I risultati indicano che i gabbiani sono effettivamente visibili nelle immagini esaminate. Gli individui adulti, in particolare quando si trovano su superfici piane e prive di ombre marcate (come tetti, terrazze o coperture industriali), possono essere distinti con buona affidabilità, soprattutto se le immagini sono state acquisite in condizioni di illuminazione favorevoli e con un GSD (distanza reale al suolo tra i centri di due pixel adiacenti) inferiore ai 40 cm. Tuttavia, la visibilità degli individui non è uniforme né scontata. Essa è influenzata da numerosi fattori, tra cui la qualità dell'immagine (in termini di risoluzione spaziale e radiometrica), l'angolo di acquisizione, la presenza di ombre o disturbi visivi e le caratteristiche del contesto urbano. Ad esempio, superfici eterogenee, colori simili al piumaggio o texture complesse (come pattern determinati dalla distribuzione delle tegole, o presenza di vegetazione) possono rendere più difficile la distinzione dei gabbiani dallo sfondo.

Un ulteriore elemento di complessità riguarda l'individuazione dei siti riproduttivi che, come confermato dal catalogo degli habitat di nidificazione, sono spesso collocati in posizioni poco visibili, talvolta parzialmente coperte da elementi architettonici (camini, antenne, parapetti) o inseriti in contesti dove la distinzione tra oggetto e sfondo è particolarmente difficile. In diversi casi, tali siti risultano completamente invisibili nelle immagini remote, anche quando si ha la certezza della loro presenza grazie al monitoraggio sul campo. È il caso, per esempio, delle zone antistanti e laterali agli abbaini o la piattaforma di marmo dei camini, dove il contrasto tra la sagoma del gabbiano e la lastra lapidea è praticamente nullo, essendo entrambi bianchi. Ciò evidenzia i limiti dell'impiego delle immagini remote ed implica che, pur potendo ottenere una certa rilevabilità degli adulti posati o in volo, la rilevabilità diretta dei siti di riproduzione richiede condizioni particolarmente favorevoli o approcci indiretti, ad esempio esaminando la distribuzione del guano.

Nonostante le limitazioni e le difficoltà descritte, i risultati ottenuti sono sufficientemente promettenti da suggerire non solo un potenziale utilizzo di osservazioni remote a supporto dell'attività di monitoraggio sul campo, ma anche la possibilità di automatizzare il rilevamento dei target (gabbiani) nelle immagini remote. Infatti, a partire da un numero limitato di esempi annotati manualmente, è stato possibile addestrare un modello di *object detection* in grado di riconoscere la presenza di individui con una buona coerenza rispetto alle osservazioni visive. Il modello non può essere considerato sufficientemente affidabile da essere considerato operativo, tuttavia, questo risultato è particolarmente interessante, in quanto dimostra che la rilevabilità visiva può essere convertita in rilevabilità algoritmica.

In prospettiva, appare evidente la necessità di creare un archivio strutturato di immagini VHR per l'ambiente urbano oggetto di studio. Tale archivio dovrebbe includere dati provenienti da diverse fonti (satelliti, droni, immagini aeree), in diversi periodi dell'anno, con differenti condizioni di illuminazione e angoli di acquisizione. La disponibilità di un dataset più esteso e variegato permetterebbe di addestrare modelli di riconoscimento più robusti, in grado di operare su una gamma più ampia di situazioni reali e di restituire un numero inferiore di riconoscimenti errati ("falsi positivi").

Tali considerazioni, alla luce delle rapide evoluzioni tecnologiche in atto, ma anche della persistente limitazione nella disponibilità di immagini ad altissima risoluzione, che attualmente non vengono acquisite in modo sistematico e continuo su larga scala. Ciò impone ancora una selezione mirata e opportunistica delle scene, con inevitabili vincoli spaziali e temporali. Tuttavia, la situazione è in evoluzione: da un lato, l'offerta di immagini VHR è in costante crescita, sia in termini quantitativi (numero di satelliti e costellazioni attive), che qualitativi (miglioramento della risoluzione spaziale e

radiometrica). Dall'altro, alle piattaforme consolidate, come i satelliti WorldView e Pléiades, si stanno facendo strada sul mercato nuovi attori, tra cui Albedo, un satellite ottico commerciale che promette una risoluzione nativa di 15 cm e che inizierà a distribuire dati nel corso del 2025. Inoltre, anche le tecnologie di analisi stanno evolvendo rapidamente: algoritmi di machine learning sempre più efficienti, tecniche di super-risoluzione e la diffusione di software open source rendono oggi accessibili elaborazioni complesse, anche per utenze non specializzate.

Un secondo ambito di sviluppo della ricerca riguarda la mappatura delle caratteristiche ambientali e degli elementi urbani che rendono un sito potenzialmente idoneo alla colonizzazione o all'uso da parte dei gabbiani reali, caratterizzati e descritti nel presente studio, e lo sviluppo di mappe previsionali della distribuzione delle coppie riproduttive in ambiente urbano, sulla base della vocazionalità degli edifici o di parti di essi, ad essere utilizzati dalla specie per la nidificazione. Tale strumento potrebbe essere utile per indirizzare eventuali misure gestionali volte a limitare l'accessibilità della specie, in un'ottica di prevenzione del fenomeno.

L'esperienza qui maturata dimostra che, anche con risorse contenute, è possibile utilizzare il remote sensing per affiancare efficacemente i censimenti diretti, colmando i buchi nella serie temporale di dati negli anni in cui il monitoraggio non viene implementato e fornendo informazioni spazialmente estese, aggiornabili nel tempo e facilmente confrontabili. Un ulteriore vantaggio risiede nella possibilità di estendere l'area di studio oltre i confini urbani immediati, includendo porzioni più ampie di territorio potenzialmente interessate dalla presenza della specie, senza aumentare proporzionalmente lo sforzo di campionamento sul campo.

In sintesi, i risultati di questo studio pilota confermano che il rilevamento dei gabbiani reali in ambiente urbano mediante immagini VHR è tecnicamente fattibile, scientificamente solido e operativamente utile. Le sfide restano numerose – dalla qualità dei dati alla necessità di dataset estesi per l'addestramento del modello, dalla variabilità spaziale alla difficoltà di rilevare i siti di nidificazione – ma le opportunità offerte dalle tecnologie attuali e future sono tali da giustificare pienamente ulteriori sforzi in questa direzione. L'integrazione tra telerilevamento, intelligenza artificiale e conoscenze ecologiche rappresenta una delle frontiere più promettenti per il monitoraggio della biodiversità in contesti complessi come quello urbano.

## Bibliografia citata

- Attard, M.R.G., Phillips, R.A., Bowler, E., Clarke, P.J., Cubaynes, H., Johnston, D.W., Fretwell, P.T., 2024. Review of Satellite Remote Sensing and Unoccupied Aircraft Systems for Counting Wildlife on Land. *Remote Sensing* 16, 627. <https://doi.org/10.3390/rs16040627>
- Bowler, E., Fretwell, P.T., French, G., Mackiewicz, M., 2019. Using Deep Learning To Count Albatrosses From Space, in: *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Presented at the *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 10099–10102. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898079>
- Bowler, E., Fretwell, P.T., French, G., Mackiewicz, M., 2020. Using Deep Learning to Count Albatrosses from Space: Assessing Results in Light of Ground Truth Uncertainty. *Remote Sensing* 12, 2026. <https://doi.org/10.3390/rs12122026>
- Brothers, N., Bone, C., Wellbelove, A., 2022. Albatross population monitoring using satellite imagery, a case study: Short-tailed Albatross *Phoebastria albatrus* at the Senkaku Islands. *Marine Ornithology* 50, 7–12. <https://doi.org/doi.org/10.5038/2074-1235.50.1.1453>
- Chollet, F., 2021. *Deep learning with Python, Second edition*. ed. Manning Publications, Shelter Island.
- Cubaynes, H.C., Hannah C. Cubaynes, Fretwell, P.T., Bamford, C.C.G., Gerrish, L., Jackson, J.A., 2019. Whales from space: Four mysticete species described using new VHR satellite imagery. *Marine Mammal Science* 35, 466–491. <https://doi.org/10.1111/mms.12544>
- Edney, A.J., Wood, M.J., 2021. Applications of digital imaging and analysis in seabird monitoring and research. *Ibis* 163, 317–337. <https://doi.org/10.1111/ibi.12871>
- Finizio, M., Pontieri, F., Bottaro, C., Di Febbraro, M., Innangi, M., Sona, G., Carranza, M.L., 2024. Remote Sensing for Urban Biodiversity: A Review and Meta-Analysis. *Remote Sensing* 16, 4483. <https://doi.org/10.3390/rs16234483>
- Fretwell, P.T., Cubaynes, H.C., Shpak, O.V., 2023. Satellite image survey of beluga whales in the southern Kara Sea. *Marine Mammal Science* 34(4), 1204-1214. <https://doi.org/10.1111/mms.13044>
- Fretwell, P.T., Jackson, J.A., Ulloa Encina, M.J., Häussermann, V., Perez Alvarez, M.J., Olavarría, C., Gutstein, C.S., 2019. Using remote sensing to detect whale strandings in remote areas: The case of sei whales mass mortality in Chilean Patagonia. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222498>
- Fretwell, P.T., Scofield, P., Phillips, R.A., 2017. Using super-high resolution satellite imagery to census threatened albatrosses. *Ibis* 159, 481–490. <https://doi.org/10.1111/ibi.12482>
- Fretwell, P.T., Trathan, P.N., 2021. Discovery of new colonies by Sentinel2 reveals good and bad news for emperor penguins. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 7, 139–153. <https://doi.org/10.1002/rse2.176>
- Fudala, K., Bialik, R.J., 2022. Seals from outer space - Population census of southern elephant seals using VHR satellite imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 28, 100836. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100836>
- Hamilton, C.D., Lydersen, C., Ims, R.A., Kovacs, K.M., 2014. Haul-out behaviour of the world's northernmost population of harbour seals (*Phoca vitulina*) throughout the year. *PLOS ONE* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086055>
- Khanam, R., Hussain, M., 2024. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725>

- LaRue, M., Iles, D., Labrousse, S., Fretwell, P., Ortega, D., Devane, E., Horstmann, I., Viollat, L., Foster-Dyer, R., Le Bohec, C., Zitterbart, D., Houstin, A., Richter, S., Winterl, A., Wienecke, B., Salas, L., Nixon, M., Barbraud, C., Kooyman, G., Ponganis, P., Ainley, D., Trathan, P., Jenouvrier, S., 2024. Advances in remote sensing of emperor penguins: first multi-year time series documenting trends in the global population. *Proc. R. Soc. B.* 291, 20232067. <https://doi.org/10.1098/rspb.2023.2067>
- LaRue, M.A., Rotella, J.J., Garrott, R.A., Siniff, D.B., Ainley, D.G., Stauffer, G.E., Porter, C., Morin, P., 2011. Satellite imagery can be used to detect variation in abundance of Weddell seals ( *Leptonychotes weddellii* ) in Erebus Bay, Antarctica. *Polar Biology* 34, 1727–1737. <https://doi.org/10.1007/s00300-011-1023-0>
- QGIS Development Team, 2025. QGIS Geographic Information System.
- Rega-Brodsky, C.C., Aronson, M.F.J., Piana, M.R., Carpenter, E.-S., Hahs, A.K., Herrera-Montes, A., Knapp, S., Kotze, D.J., Lepczyk, C.A., Moretti, M., Salisbury, A.B., Williams, N.S.G., Jung, K., Katti, M., MacGregor-Fors, I., MacIvor, J.S., La Sorte, F.A., Sheel, V., Threfall, C.G., Nilon, C.H., 2022. Urban biodiversity: State of the science and future directions. *Urban Ecosyst* 25, 1083–1096. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01207-w>
- Rossum, G. van, Drake, F.L., 2010. The Python language reference, Release 3.0.1 [Repr.]. ed, Python documentation manual / Guido van Rossum; Fred L. Drake [ed.]. Python Software Foundation, Hampton, NH.
- Tkachenko, Malyuk, M, Holmanyuk, A, Liubimov, N, 2022. Label Studio: Data labeling software.
- Uguz, S., 2023. Deep learning-based software for detecting population density of Antarctic birds. *CSJM* 31, 200–216. <https://doi.org/10.56415/csjm.v31.11>
- Valle, R.G., Baaloudj, A., Scarton, F., 2021. A new method for surveying Purple Heron *Ardea purpurea* colonies using Google Earth. *Bird Study*.
- Valle, R., Corregidor-Castro, A., Scarton, F., 2024. Finding colonies of Black-headed Gulls *Chroicocephalus ridibundus* using Google Earth. *Marine Ornithology*.