

Progetto AMIANTO

Relazione finale

Versione 1.6



 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Versione	Data	Commenti
1.0	21/06/21	E. Zini: stesura iniziale
1.1	20/07/21	D. Bellingeri: capitolo 6
1.2	21/07/21	E. Zini: revisione
1.3	28/07/21	D. Bellingeri: capitolo 7
1.4	30/07/21	E. Zini: revisione, capitolo 1 e capitolo 9
1.5	01/08/21	D. Bellingeri: revisione, capitolo 8
1.6	02/08/21	E. Zini: revisione

SOMMARIO

1	Riassunto esecutivo	4
2	Introduzione	8
2.1	La mappatura PRAL del 2007.....	8
2.2	L'aggiornamento della mappatura PRAL al 2012	9
2.3	Lo scenario ARPA 2014 di eliminazione delle coperture in cemento-amianto in Lombardia...11	
2.4	Le altre mappature del cemento-amianto realizzate in Lombardia.....	12
3	Obiettivi	14
4	Aggiornamento e integrazione delle mappature esistenti	15
4.1	Metodologia	15
4.2	Validazione dei risultati	19
4.2.1	Metodologia di validazione	19
4.2.2	Risultati della validazione	23
4.2.3	Sintesi dei risultati della validazione	28
5	Estensione della mappatura	29
5.1	Introduzione	29
5.2	Aree oggetto delle riprese	29
5.3	Caratteristiche dei sensori.....	30
5.4	Caratteristiche dell'aeromobile.....	31
5.5	Piano di volo	32
5.6	Correzione radiometrica del dato	34
5.7	Correzione geometrica	35
5.8	Classificazione.....	37
5.9	Vettorizzazione delle mappe classificate	39
5.10	Validazione dei risultati	40
5.10.1	Metodologia di validazione	40
6	Analisi dei risultati	48
6.1	Fase 1: aggiornamento mappature esistenti.....	48
6.1.1	Analisi dei cambiamenti nell'area PRAL	48
6.1.2	Analisi dei cambiamenti complessivi nelle diverse aree disponibili.....	51
6.1.3	Focus sui cambiamenti 2015-2018: classi di uso del suolo DUSAF e aree dismesse	53
6.1.4	Aggiornamento delle stime a scala regionale	55

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

6.1.5	Scenario futuro delle coperture residue a scala regionale	57
6.1.6	Confronto con dati MUD	59
6.2	Fase 2: estensione della mappatura.....	61
6.2.1	Sintesi delle mappature 2020 nei diversi areali	63
6.2.2	Statistiche dimensionali sui poligoni mappati.....	73
6.2.3	Confronti fra superfici stimate al 2018 e mappate nel 2020 su areali specifici.....	74
6.2.4	Aggiornamento al 2020 delle stime a scala regionale.....	78
7	Test di nuove metodiche su un'area pilota	81
7.1	Rassegna dei dati di osservazione della terra e contributi nella mappatura delle coperture ..	82
7.1.1	Dati acquisiti da piattaforma aerea e sensori iperspettrali.....	83
7.1.2	Dati acquisiti da piattaforma aerea e sensori multispettrali.....	84
7.1.3	Dati acquisiti da piattaforma satellitare	91
7.1.4	Sperimentazione dei dati WorldView-3 su un'area test	95
8	Formato dei dati	104
9	Possibili sviluppi futuri.....	105
10	Riferimenti normativi	106
11	Riferimenti bibliografici	107
12	Allegato 1. Elenco delle strisciate	108
13	Allegato 2. Stazioni GNSS di riferimento	113
14	Allegato 3. Elenco dei punti di verifica della qualità geometrica	114

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

1 Riassunto esecutivo

ARPA Lombardia, nel quadro delle competenze sviluppate a partire dal 2003 nelle tecnologie di Osservazione della Terra da aereo e da satellite per il monitoraggio dell'ambiente, si occupa del tema della mappatura delle coperture in cemento-amianto. Nel 2007 ha realizzato nell'ambito del PRAL (Piano Regionale Amianto della Lombardia) una mappatura su una superficie di oltre 2000 Km² che è stata utilizzata per stimare in circa 2,8 Milioni m³ il quantitativo di coperture in cemento-amianto presenti a quella data in Lombardia. Ha successivamente realizzato un aggiornamento della mappatura al 2012 che ha consentito di stimare al 27% il tasso delle coperture rimosse dal 2007 al 2012. Nel 2014, attraverso un'integrazione tra i dati precedenti e i dati del MUD (Modello Unico Dichiarazione) sui quantitativi di cemento-amianto rimossi annualmente in Lombardia, ha sviluppato uno scenario di rimozione delle coperture in cemento-amianto che proiettava al 2025 la data nella quale teoricamente tutte le coperture presenti in Lombardia dovrebbero essere rimosse.

Nel luglio 2018 il Consiglio Regionale ha approvato uno stanziamento € 400.000 per la "realizzazione, da parte di ARPA, di una mappatura delle coperture in cemento-amianto presenti nel territorio regionale" destinato alla "progettazione e valutazione delle metodiche ed eventuali test pilota, allo svolgimento e alla successiva effettuazione di un test esteso sugli esiti del test pilota, comprensivo delle risorse umane necessarie allo svolgimento". ARPA ha utilizzato il suddetto finanziamento per realizzare nel periodo 2019-2021 il progetto AMIANTO le cui principali attività sono state:

- 1) Aggiornamento delle mappature delle coperture in cemento-amianto esistenti sul territorio regionale realizzate da ARPA Lombardia e da altri enti tra il 2000 e il 2015 per una superficie totale di circa 2.400 Km² (vedi Figura 1). Gli aggiornamenti sono stati realizzati mediante le ortoimmagini AGEA disponibili gratuitamente dalla Regione nelle date 2007, 2012, 2015 e 2018.

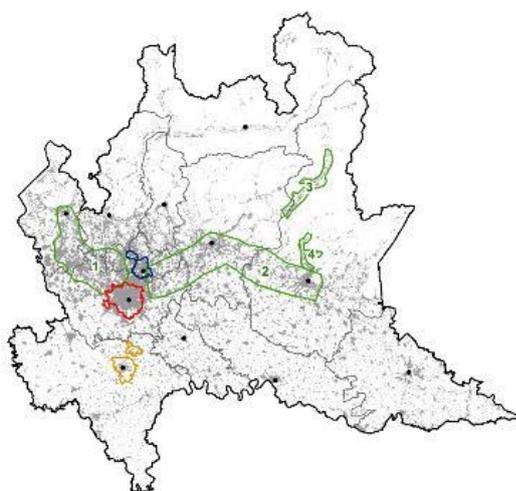


Figura 1. Quadro d'unione delle mappature delle coperture in cemento-amianto realizzate in Lombardia e da altri enti a partire dal 2000 mediante rilievi aerei con scanner iperspettrale. Le quattro aree con contorni verdi si riferiscono alla mappatura del Piano Regionale Amianto della Lombardia (PRAL) del 2007, l'area in rosso alla mappatura del Comune di Milano del 2000, le aree in blu e in giallo rispettivamente alle mappature dei comuni del monzese e del pavese eseguite rispettivamente nel 2013 e nel 2015.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

- 2) Realizzazione ex-novo della mappatura delle coperture in cemento-amianto sui capoluoghi di Provincia che non erano stati ancora mappati in precedenza e su alcune aree extra-urbane con presenza significativa di coperture in cemento-amianto per una superficie totale di circa 1.300 Km² (vedi Figura 2).

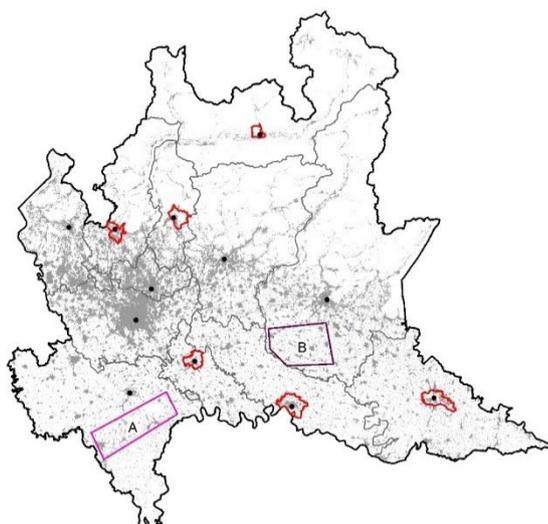


Figura 2. Quadro d'unione delle aree mappate ex-novo nel progetto AMIANTO. I poligoni rossi sono i Comuni capoluoghi di Provincia: Como, Lecco, Sondrio, Lodi, Cremona e Mantova. Gli altri Comuni capoluoghi di Provincia sono già stati mappati in precedenza (vedi Figura 1Figura 8). I poligoni A e B rappresentano due aree extra-urbane, la prima nell'Oltrepò Pavese, la seconda nella bassa pianura bresciana, caratterizzate da bassa densità di urbanizzazione ma elevata presenza di aziende agricole e di capannoni industriali con tetti in cemento-amianto.

L'insieme delle mappature di cui ai punti 1) e 2) raggiunge una superficie totale di circa 3.700 Km² pari al 16% dell'intera superficie regionale e al 34% della superficie di pianura. La popolazione presente in queste aree è di 5,3 milioni di abitanti, pari al 52% della popolazione regionale.

Dalle mappe di cui al punto 1) aggiornate alle date 2007, 2012, 2015 e 2018 è stato possibile, tramite una estrapolazione statistica (vedi paragrafo 6.1.4), stimare i quantitativi di coperture in cemento-amianto presenti su tutto il territorio regionale nelle date suddette (vedi Tabella 1).

	2007	2012	2015	2018
Superficie (Km ²)	86,6	63,6	52,3	40,6
Volume (Milioni m ³)	2,9	2,1	1,7	1,4

Tabella 1. Stime ottenute per estrapolazione statistica dei quantitativi di coperture in cemento-amianto, espressi in Km² e in Milioni m³, presenti sul territorio regionale negli anni 2007, 2012, 2015 e 2018.

Complessivamente, dal 2007 al 2018, si stima siano stati rimossi in Lombardia 1,5 Milioni m³ di coperture in cemento-amianto, pari al 52%. Si noti che la attuale maggiore disponibilità di dati provenienti dalle diverse mappature disponibili ha permesso di rideterminare la stima del quantitativo

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

del 2007 valutata allora in 2,8 Milioni m³ e ora in 2,9 Milioni m³. Le stime suddette hanno consentito di aggiornare lo scenario di previsione sviluppato nel 2012 che prevedeva la totale rimozione delle coperture entro il 2025. Lo scenario attuale, basato sull'ipotesi che il trend di rimozione dei prossimi anni sia lo stesso del periodo 2015-2018, proietta la rimozione totale a non prima del 2029.

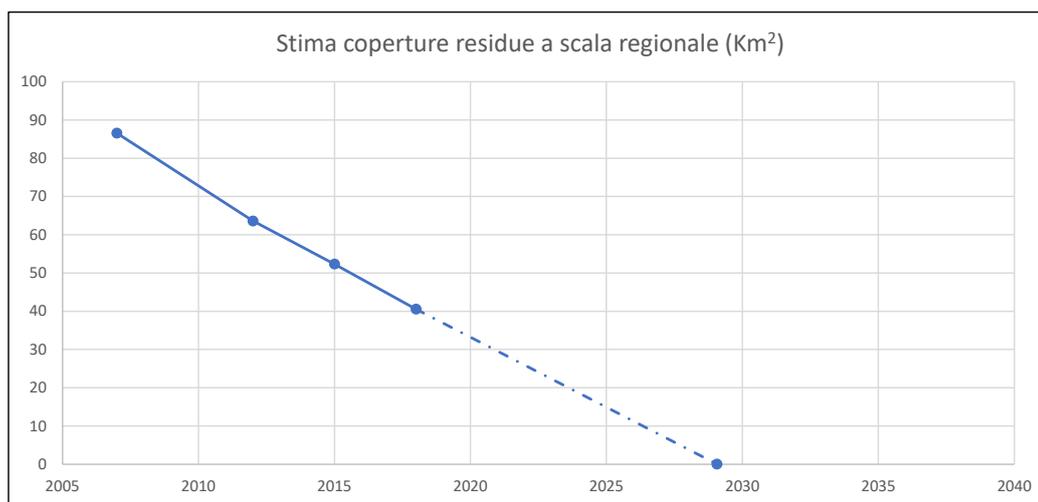


Figura 3. Scenario di rimozione delle coperture in cemento-amianto a livello regionale. Lo scenario si basa sull'ipotesi che il trend di rimozione dei prossimi anni sia lo stesso del periodo 2015-2018 e proietta la rimozione totale a non prima del 2029.

L'aggiornamento delle mappature storiche ha anche permesso di stimare alcune diverse tipologie di trasformazione subite dalle coperture in cemento-amianto. In particolare, quattro casi: 1) Invariato, cioè nessuna rimozione del cemento-amianto; 2) Variato, cioè rimozione del cemento-amianto; 3) Variato + fotovoltaico, cioè rimozione del cemento-amianto e contestuale installazione di pannelli fotovoltaici; 4) Variato per demolizione dell'edificio (vedi Figura 4). Nelle aree mappate nell'ambito del PRAL per una superficie totale di circa 2000 Km², la rimozione del cemento-amianto nel periodo dal 2007 al 2018 è stata del 52,9% di cui il 9,5% è stato rimosso con contestuale installazione di pannelli solari; il 4,3% è stato rimosso contestualmente alla demolizione degli edifici.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

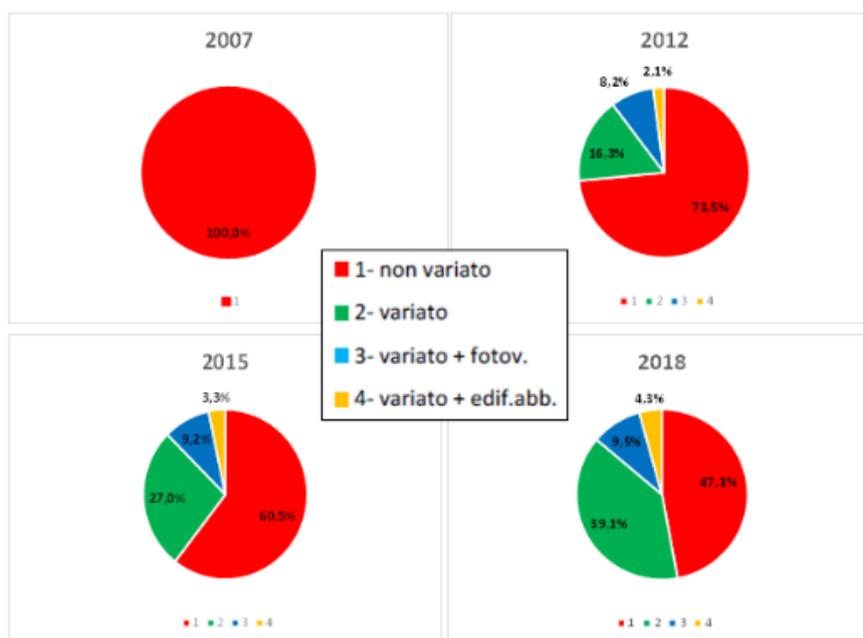


Figura 4. Statistiche delle tipologie di trasformazione subite dalle coperture in cemento-amianto delle aree mappate nell'ambito del PRAL per una superficie totale di circa 2000 Km².

Le nuove mappature prodotte dal progetto AMIANTO sono risultate avere una accuratezza del 95,3%. Sul totale degli oltre 1296 Km² oggetto della nuova mappatura attraverso il rilievo aereo iperspettrale del 2020, che interessano territori molto diversificati, sono state mappate oltre 10900 nuove coperture in cemento amianto, per una superficie totale di oltre 5,3 Km². La nuova mappatura ha inoltre permesso di ridefinire ulteriormente le stime delle coperture residue a scala regionale e gli scenari di riduzione futura delle coperture (vedi paragrafo 6.2.4).

I dati saranno resi disponibili attraverso il sito web di ARPA Lombardia e il Geoportale della Regione a tutti gli stakeholder. I Comuni e le ATS potranno disporre di informazioni cartografiche dettagliate sulla presenza di coperture in cemento-amianto che consentiranno loro di effettuare controlli mirati sul territorio.

La metodologia adottata nel progetto AMIANTO si è dimostrata altamente affidabile e accurata e potrà essere adottata nuovamente in futuro per aggiornare le mappature prodotte dal progetto AMIANTO e per mappare i territori non ancora rilevati. Si può ipotizzare che la maggior parte delle coperture in cemento-amianto sia presente nelle aree di pianura antropizzate per una superficie totale di circa 10.000 Km². Considerando che di questa superficie, attraverso il progetto AMIANTO, è già stata mappata una superficie di 3.700 Km², resterebbero da mappare ancora 6.300 Km². Una futura riedizione del progetto potrebbe articolarsi nuovamente in due fasi: Fase 1) aggiornamento delle coperture prodotte dall'attuale progetto AMIANTO sulla base delle ortoimmagini AGEA che la Regione acquisisce periodicamente; Fase 2) esecuzione di nuovi rilievi aerei iperspettrali per mappare le superfici rimanenti. Il costo complessivo delle Fasi 1) e 2) è stimato in circa 1,3 milioni €.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

2 Introduzione

2.1 La mappatura PRAL del 2007

Il Piano Regionale Amianto Lombardia (PRAL), previsto dalla Legge Regionale N° 17 del 29 Settembre 2003 e approvato con D.G.R. VIII/1526 del 22 Dicembre 2005, stabiliva che ARPA avrebbe realizzato la mappatura delle coperture in cemento-amianto su una porzione del territorio regionale mediante riprese aeree con scanner iperspettrale MIVIS¹. Le riprese aeree furono eseguite nell'estate 2007 su quattro aree: 1) il bacino dell'Olona con chiusura a nord di Milano, 2) il corridoio autostradale A4 nella tratta Milano-Bergamo-Brescia (con l'esclusione della città di Milano perché già era già stata mappata dal Comune di Milano nel 2000), 3) la Valcamonica e 4) la Val Trompia, per una superficie totale di 2062 Km² (vedi Figura 5).

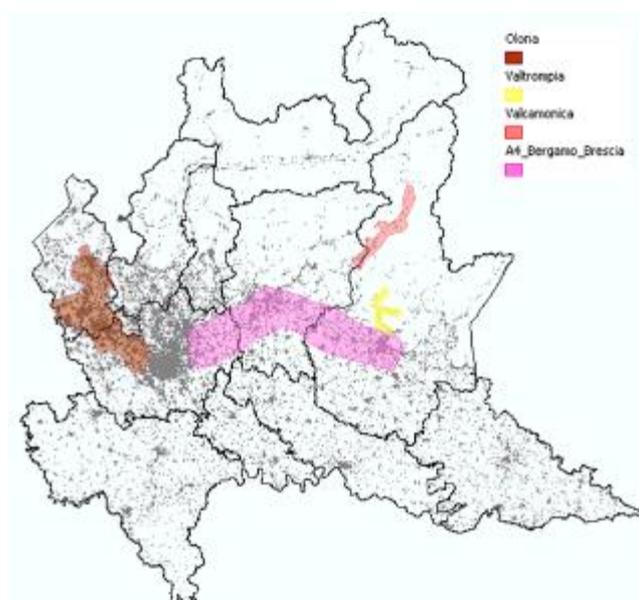


Figura 5. Le quattro aree rilevate nell'ambito del PRAL nel 2007 con lo scanner iperspettrale aviotrasportato MIVIS. La superficie totale è di 2062 Km².

Queste aree furono scelte, in accordo con la Regione, perché erano caratterizzate da una elevata antropizzazione, ed in particolare da insediamenti industriali di vecchia data, cioè antecedenti al 1992, anno in cui la Legge N°257/1992 vietò l'utilizzo di nuove coperture in cemento-amianto. Nel 2008 ARPA Lombardia fornì alla Regione i risultati del lavoro che consistevano in:

- 1) una mappatura dettagliata in formato vettoriale, compatibile con la Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000, delle coperture in cemento-amianto presenti nelle quattro aree investigate ed una stima accurata, per ciascuno dei 321 comuni compresi (integralmente o parzialmente) nelle quattro aree, delle superfici e dei volumi delle coperture in cemento-amianto;

¹ MIVIS: Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer
File: Relazione Finale Progetto AMIANTO Ver.1.6.Docx

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

2) stime, ottenute per estrapolazione, delle superfici e dei volumi delle coperture in cemento-amianto presenti in ciascuna provincia lombarda.

Secondo queste ultime stime, il volume complessivo del cemento-amianto presente in Lombardia nel 2007 ammontava ad oltre 2.800.000 m³. Tale quantitativo divenne il valore di riferimento per tutte le successive valutazioni sul fabbisogno di impianti di smaltimento di cemento-amianto in Lombardia.

2.2 L'aggiornamento della mappatura PRAL al 2012

Nel 2012, nel corso di una serie di incontri tra le Direzioni Generali competenti in materia di amianto ed ARPA Lombardia che portarono alla formulazione della Legge Regionale 31 Luglio 2012 N° 14, "Modifiche e integrazioni alla Legge Regionale 29 Settembre 2003 N° 17 (Norme per il risanamento dell'ambiente, bonifica e smaltimento dell'amianto)", ARPA Lombardia propose di farsi carico dell'aggiornamento della mappatura del 2007 sfruttando le ortoimmagini AGEA² 2012 che la Regione aveva già pianificato di acquistare. La proposta, il cui vantaggio era di garantire un risultato qualitativamente elevato senza richiedere oneri aggiuntivi, fu recepita dalla Regione con la D.G.R. IX/3913 6 Agosto 2012, "Attività inerenti la messa a sistema delle fonti di informazione sulla presenza di amianto in Lombardia finalizzata al monitoraggio della relativa bonifica" che al punto 6 stabiliva di "aggiornare e integrare le informazioni derivanti dalla mappatura incaricando ARPA di rivalutare le quantità presenti utilizzando le immagini aerofotografiche derivanti dal nuovo volo AGEA 2012". L'aggiornamento della mappatura è stato realizzato a video tramite fotointerpretazione comparativa tra le ortoimmagini del 2007 e quelle del 2012. Sono stati controllati oltre 26.000 poligoni. Per ciascun poligono si è valutato se la copertura in cemento-amianto aveva subito delle trasformazioni tra il 2007 e il 2012 e di quale tipo. Sono stati presi in considerazione i seguenti casi:

Tipologia di trasformazione subita dalle coperture in cemento-amianto dal 2007 al 2012
1 - Non variato
2 - Variato
3 - Variato con installazione di pannelli fotovoltaici
4 - Variato a seguito di demolizione dell'edificio

Tabella 2. Legenda delle classi utilizzate per l'aggiornamento dal 2007 al 2012 della mappatura delle coperture in cemento-amianto.

La classe "2-Variato" comprende sia i casi di rimozione delle coperture in cemento-amianto che quelli di incapsulamento e sovracopertura. I risultati dell'analisi delle variazioni dal 2007 al 2012 delle

² AGEA: Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura. Le ortoimmagini in oggetto sono acquisite da AGEA per controllare le dichiarazioni degli agricoltori che richiedono sussidi nell'ambito della PAC e/o del Piano di Sviluppo Rurale. Le immagini vengono messe a disposizione delle Regioni.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

coperture in cemento-amianto nelle aree rilevate sono rappresentati in Tabella 3 e nel diagramma a torta di Figura 6.

Tipologia di trasformazione subita dalle coperture in cemento-amianto dal 2007 al 2012	Superficie (m ²)	Volume (m ³)
1 – Non variato	16.784.652	559.488
2 – Variato	3.834.090	127.803
3 – Variato con installazione di pannelli fotovoltaici	1.958.566	65.286
4 – Variato a seguito di demolizione dell'edificio	468.771	15.626
Totale	23.046.079	768.203

Tabella 3. Risultati dell'analisi delle variazioni dal 2007 al 2012 delle coperture in cemento-amianto nelle aree rilevate.

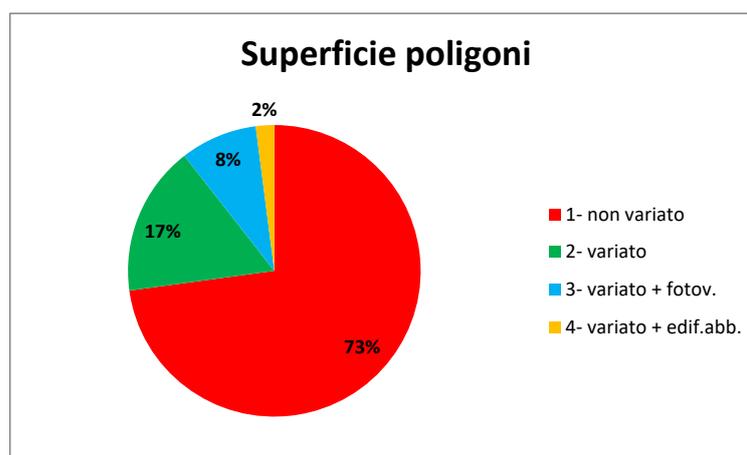


Figura 6. Risultati dell'analisi delle variazioni dal 2007 al 2012 delle coperture in cemento-amianto nelle aree rilevate.

Nelle quattro aree rilevate, la superficie delle coperture in cemento-amianto che hanno subito una variazione è pari al 27% della superficie totale (pari a 2062 Km²). Il 17% delle coperture in cemento-amianto ha subito una variazione riguardante la rimozione o la messa in sicurezza *in situ* del cemento-amianto tramite incapsulamento o sovracopertura. Da una analisi dei dati forniti dalle ATS è emerso che la superficie delle coperture che hanno subito il trattamento di incapsulamento o sovracopertura rispetto al totale delle superfici che sono state sottoposte a bonifica è inferiore all'1%. La percentuale di superfici incapsulate o sovracoperte sul totale delle superfici che nel 2007 risultavano in cemento-amianto è inferiore allo 0,27%. Le superfici che hanno subito la rimozione del cemento-amianto e la contestuale installazione di pannelli fotovoltaici è pari all'8%. Nel 2% dei casi, gli edifici con tetti in cemento-amianto sono stati demoliti.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

2.3 Lo scenario ARPA 2014 di eliminazione delle coperture in cemento-amianto in Lombardia

Incrociando i dati delle mappature 2007 e 2012 con i dati MUD³ di produzione annuale di rifiuti della categoria “Materiali da costruzione contenenti amianto” ARPA ha stimato per ogni anno, dal 2007 al 2012, il quantitativo di cemento-amianto non ancora rimosso dai tetti. Partendo da questi dati ARPA ha formulato nel 2014 lo scenario illustrato nella Figura 7, basato sull’ipotesi che il tasso di rimozione delle coperture fosse costante nel futuro e pari a quello che si è avuto nel periodo 2007-2012. Se ne deduce che l’obiettivo di eliminazione totale delle coperture di cemento-amianto in Lombardia sarebbe raggiungibile attorno al 2025, cioè 10 anni più tardi rispetto all’obiettivo del 2015 prefissato dal PRAL. Si ritiene però che la cessazione degli incentivi sul Conto Energia e la crisi economica abbiano determinato una riduzione del tasso di rimozione. La conseguenza di ciò sarebbe un ulteriore allontanamento, oltre il 2025, dell’obiettivo di eliminazione totale del cemento-amianto in Lombardia. Bisogna sottolineare che lo scenario riguarda esclusivamente la eliminazione del cemento-amianto presente sui tetti. Per quanto riguarda invece la eliminazione dell’amianto contenuto all’interno degli edifici, non sono disponibili in ARPA informazioni che consentano di formulare uno scenario specifico.

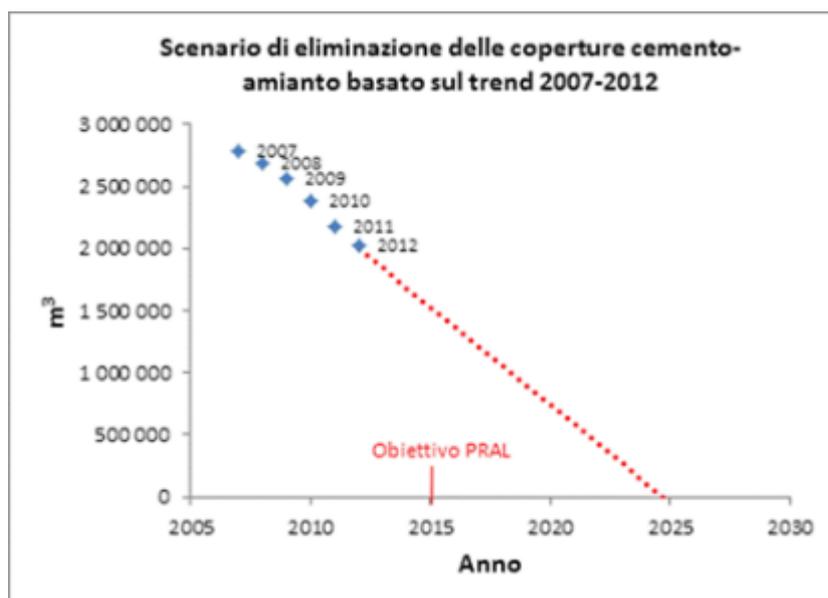


Figura 7. Scenario formulato da ARPA nel 2014 di eliminazione totale delle coperture in cemento-amianto in Lombardia basato sull’ipotesi che il tasso di rimozione delle coperture sia costante nel futuro fosse pari a quello che si è avuto nel periodo 2007-2012. Le stime delle coperture in cemento-amianto presenti negli anni dal 2008 al 2011 sono state estrapolate dai dati MUD.

³ MUD: Modello Unico Dichiarazione

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

2.4 Le altre mappature del cemento-amianto realizzate in Lombardia

In Lombardia sono state realizzate altre mappature delle coperture in cemento-amianto oltre a quella prodotta nel 2007 da ARPA nell'ambito del PRAL. Queste mappature possono essere classificate in due tipologie, come descritto nella Tabella 4.

Tipologia mappatura	Caratteristiche
1) Rilievo aereo con scanner iperspettrale MIVIS	<ul style="list-style-type: none"> • L'accuratezza nella discriminazione del cemento-amianto è documentata e risulta superiore al 90%. • Omogeneità della metodologia di elaborazione dei dati. • Esecuzione su aree vaste.
2) Rilievo da drone con camera digitale	<ul style="list-style-type: none"> • L'accuratezza nella discriminazione del cemento-amianto non è documentata. • La metodologia di elaborazione dei dati varia per ciascun rilievo. • Le aree di ripresa sono limitate.

Tabella 4. Tipologie di mappatura delle coperture in cemento-amianto realizzate in Lombardia.

Le mappature del primo tipo, realizzate con un rilievo aereo dotato di scanner iperspettrale MIVIS, sono rappresentate nella Figura 8 e descritte in dettaglio nella Tabella 5.

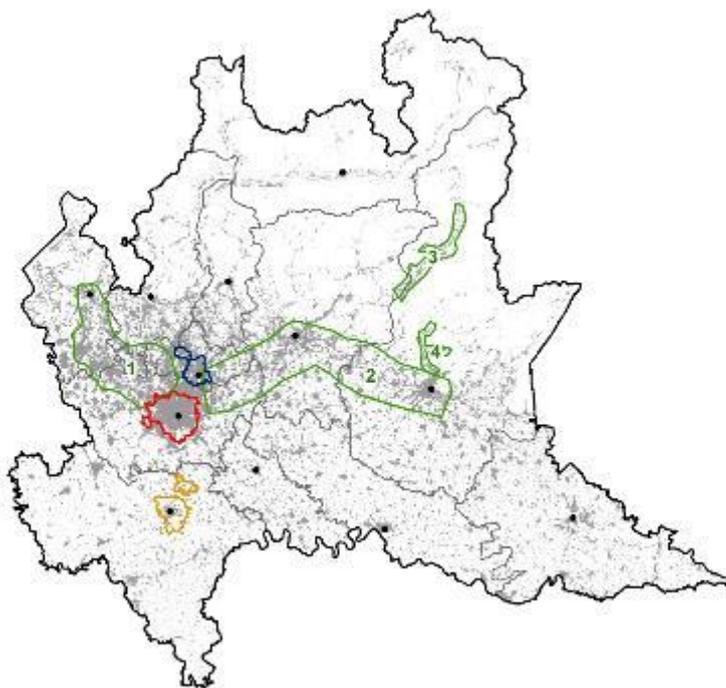


Figura 8. Quadro d'unione delle mappature delle coperture in cemento-amianto realizzate in Lombardia mediante rilievi aerei con lo scanner iperspettrale MIVIS. Le quattro aree con contorni verdi si riferiscono alla mappatura del PRAL del 2007, l'area in rosso alla mappatura del Comune di Milano del 2000, le aree in blu e in giallo rispettivamente alle mappature dei comuni del monzese e del pavese eseguite rispettivamente nel 2013 e nel 2015.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Mappatura	Area	Soggetto esecutore	Anno rilievo	Superficie (Km ²)	Popolazione	Popolazione (% su Regione)
PRAL	1) Bacino dell'Olonza con chiusura a nord di Milano, 2) Corridoio autostradale MI-BG-BS, 3) Val Camonica, 4) Val Trompia.	ARPA Lombardia	2007 (aggiornato al 2012)	2.062,00	2.954.608	29,16%
Milano	Comune di Milano.	Comune di Milano	2000	181,76	1.408.456	13,90%
Monzese	Comuni di: Monza, Biassono, Lissone, Muggiò, Seregno.	Comune di Monza	2013	65,56	256.742	2,53%
Pavese	Comuni di: Pavia, Bornasco, Ceranova, Travacò Siccomario, Zeccone.	A.S.M. Pavia S.p.A.	2015	103,35	87.884	0,87%
Totale				2.412,67	4.707.689	46,46%

Tabella 5. Elenco delle mappature eseguite in Lombardia con rilievi aerei dotati di scanner iperspettrale MIVIS. I dati di popolazione si riferiscono alla popolazione domiciliata al 2013.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

3 Obiettivi

Gli obiettivi del progetto AMIANTO sono:

- 3) Valorizzare le mappature delle coperture in cemento-amianto già realizzate sul territorio regionale in tempi diversi da ARPA Lombardia e da altri soggetti attraverso la loro integrazione e l'aggiornamento al 2018.
- 4) Estendere la mappatura di cui al punto 1) a tutti i capoluoghi di Provincia ed anche ad alcune aree extra-urbane con presenza significativa di coperture in cemento-amianto sperimentando le migliori tecnologie di telerilevamento ad oggi disponibili e mettendo a punto una metodologia di riferimento utilizzabile in future mappature. L'insieme di queste aree e di quelle di cui al punto 1) raggiunge una superficie di circa 3.700 Km² pari al 16% dell'intera superficie regionale e al 34% della superficie di pianura. La popolazione presente in queste aree è di 5,3 milioni di abitanti (popolazione domiciliata al 2013), pari al 52% della popolazione regionale.
- 5) Supportare le decisioni della Regione in materia di politiche sull'amianto producendo stime aggiornate dei quantitativi di cemento-amianto residui e dei tassi di rimozione e sviluppando una nuova proiezione della data entro la quale potrebbero essere rimosse tutte le coperture in cemento-amianto ancora presenti in Lombardia.
- 6) Rendere disponibili le mappature di cui ai punti 1) e 2) a tutti i soggetti interessati attraverso le piattaforme informative di ARPA Lombardia e/o Regione.
- 7) Fornire indicazioni metodologiche e stime economiche per una eventuale successiva estensione della mappatura all'intero territorio regionale.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

4 Aggiornamento e integrazione delle mappature esistenti

4.1 Metodologia

La mappatura del PRAL è stata integrata con le altre tre mappature descritte nel paragrafo 2.4 per una superficie totale di circa 2.400 Km². Il numero totale di coperture (ovvero di poligoni) contenute nelle quattro mappature è stimato in circa 30000 (trentamila).

Prima di procedere con l'aggiornamento delle quattro mappature, la geometria dei poligoni delle coperture in cemento-amianto di ciascuna delle quattro mappature è stata resa compatibile con il DB Topografico della Regione. Significa che ciascun poligono identificante una copertura in cemento-amianto è stato sostituito con il corrispondente poligono delimitante l'edificio presente nel DB Topografico. Si sono presentati i seguenti casi:

Caso	Azione
1. Il poligono della copertura in cemento-amianto corrisponde , al netto di possibili spostamenti laterali causati dalla parallasse e di imprecisioni nella digitalizzazione, al poligono dell'edificio presente nel DB Topografico.	Si sostituisce il vecchio poligono con il poligono del DB Topografico.
2. Il poligono della copertura in cemento-amianto non corrisponde , anche al netto di possibili spostamenti laterali causati dalla parallasse e di imprecisioni nella digitalizzazione, al poligono dell'edificio presente nel DB Topografico.	Si sostituisce il vecchio poligono con un nuovo poligono digitalizzato ad hoc utilizzando il più possibile la geometria catturata dal DB Topografico. Per la digitalizzazione delle parti del poligono che non sono presenti nel DB Topografico ci si basa sulla ortoimmagine AGEA nella data più prossima a quella di realizzazione della mappatura. Per la mappatura PRAL, si utilizzerà l'ortoimmagine AGEA 2012.
3. Il DB Topografico non è disponibile per il Comune in lavorazione oppure nel DB Topografico non è presente il poligono in lavorazione.	Il poligono viene digitalizzato sull'ortoimmagine AGEA nella data più prossima a quella di realizzazione della mappatura.

Tabella 6. Criteri adottati per la correzione della geometria dei poligoni delle coperture in cemento-amianto.

I dati ausiliari utilizzati per l'aggiornamento delle mappature sono descritti nella Tabella 7.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Dati	Descrizione
1. Ortoimmagini.	Ortoimmagini acquisite negli anni 1999, 2007, 2012, 2015 e 2018. Le ortoimmagini AGEA sono state utilizzate nell'aggiornamento delle quattro mappe descritte al paragrafo 2.4 per individuare gli eventuali cambiamenti subiti dalle coperture in cemento-amianto. L'ortoimmagine AGEA 2018 è stata utilizzata per digitalizzare i perimetri delle coperture in cemento-amianto nella fase di estensione della mappatura nei Comuni in cui non era disponibile il DB Topografico.
2. DB Topografico.	Il DB Topografico della Regione, disponibile per oltre il 95% dei Comuni, contiene su diversi layer vettoriali, informazioni topografiche compatibili con la scala 1:10000 o inferiore. Il layer contenente le "Unità volumetriche" degli edifici è disponibile per circa l'80% dei Comuni. Per i Comuni nei quali non era disponibile il DB Topografico (in particolare del layer "Unità volumetriche"), ci si è basati sull'ortoimmagine AGEA 2018.

Tabella 7. Elenco dei dati ausiliari utilizzati per l'aggiornamento delle mappature.

Lo scopo dell'aggiornamento delle mappature è stato quello di identificare tutte le principali tipologie di trasformazione che possono subire le coperture in cemento-amianto, come descritto nella legenda in Tabella 8.

Tipologia di trasformazione
1 - Non variato
2 - Variato (<i>comprende sia la rimozione del cemento-amianto che la sovracopertura o incapsulamento</i>)
3 - Variato con installazione di pannelli fotovoltaici
4 - Variato a seguito di demolizione dell'edificio

Tabella 8. Legenda delle classi utilizzate per l'aggiornamento delle mappature del cemento-amianto.

Queste trasformazioni possono essere facilmente identificate attraverso la fotointerpretazione comparata di due ortoimmagini AGEA, la prima precedente alla trasformazione, la seconda successiva come si evince dagli esempi riportati in Tabella 9.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Tipologia di trasformazione	Esempio	
2 - Variato	 <p data-bbox="655 645 1305 741">La copertura in cemento-amianto presente nel 2007 è stata rimossa. nel 2012 la nuova copertura appare più chiara e omogenea.</p>	
3 - Variato con installazione di pannelli fotovoltaici	 <p data-bbox="655 1061 1294 1126">Impianto zootecnico. I nuovi tetti sono stati integralmente ricoperti con pannelli fotovoltaici.</p>	
4 - Variato a seguito di demolizione dell'edificio	 <p data-bbox="655 1420 986 1444">Il capannone è stato demolito.</p>	

Tabella 9. Esempi di tipologie di trasformazione.

Nei casi in cui i cambiamenti osservati si riferivano solo a parte del poligono originario, tale poligono veniva suddiviso nelle rispettive porzioni su cui si osservava e non si osservava il cambio di copertura. Le mappature sono state aggiornate sulla base delle ortoimmagini disponibili nelle date 2012, 2015 e 2018 secondo lo schema illustrato nella Tabella 10.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Mappatura	Anno del rilievo aereo con MIVIS	Ortoimmagini AGEA 2012	Ortoimmagini AGEA 2015	Ortoimmagini AGEA 2018
Milano	1999	Aggiornata	Aggiornata	Aggiornata
PRAL	2007, aggiornato al 2012	-	Aggiornata	Aggiornata
Monzese	2013	-	Aggiornata	Aggiornata
Pavese	2015	-	-	aggiornata

Tabella 10. Aggiornamento delle mappature delle coperture in cemento-amianto esistenti in Lombardia. In funzione della data del rilievo, ciascuna mappatura è stata aggiornata per mezzo delle ortoimmagini AGEA acquisite nelle date successive al rilievo.

Come si evince dalla Tabella 10, la mappatura del Comune di Milano, realizzata nel 1999, è stata aggiornata al 2012, al 2015 e al 2018. La mappatura PRAL, realizzata nel 2007 ma già stata aggiornata al 2012, è stata aggiornata al 2015 e al 2018, ecc. ecc. Si è deciso di effettuare l'aggiornamento alle diverse date 2012, 2015 e 2018 e non solamente alla data più recente, il 2018, perché in questo modo è stato possibile confrontare il tasso di rimozione delle coperture tra le diverse aree in periodi compatibili ed è stato inoltre possibile studiare come è variato nel tempo il tasso di rimozione delle coperture in cemento-amianto in relazione a fattori esterni (es. incentivi alla installazione dei pannelli fotovoltaici,...). L'aggiornamento di ciascuna delle quattro mappature è stato realizzato a video tramite fotointerpretazione comparativa tra le ortoimmagini AGEA seguendo il criterio descritto nella Tabella 11.

Mappatura	Anno del rilievo aereo con MIVIS	Aggiornamento al 2012	Aggiornamento al 2015	Aggiornamento al 2018
Milano	1999	Utilizzate le ortoimmagini AGEA 1999 e 2012.	Utilizzate le ortoimmagini AGEA 2012 e 2015.	Utilizzate le ortoimmagini AGEA 2015 e 2018.
PRAL	2007, aggiornata al 2012	Nessuna operazione.	Utilizzate le ortoimmagini AGEA 2012 e 2015.	Utilizzate le ortoimmagini AGEA 2015 e 2018.
Monzese	2013	Nessuna operazione.	Utilizzate le ortoimmagini AGEA 2012 e 2015.	Utilizzate le ortoimmagini AGEA 2015 e 2018.
Pavese	2015	Nessuna operazione.	Nessuna operazione.	Utilizzate le ortoimmagini AGEA 2015 e 2018.

Tabella 11. Sono indicate le coppie di ortoimmagini che sono state utilizzate per ciascuna fase di aggiornamento.

I risultati della integrazione e dell'aggiornamento delle mappature esistenti sono stati prodotti in formato Shapefile e riferiti nel sistema WGS84, UTM 32.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

4.2 Validazione dei risultati

4.2.1 Metodologia di validazione

La validazione dei risultati dell'integrazione e aggiornamento delle mappature è consistita nel controllo della qualità dell'aggiornamento e del riporto della geometria delle coperture sul DB Topografico (o in mancanza, sull'ortofotomappa AGEA 2018) su un insieme di 400 coperture (poligoni) individuate da ARPA Lombardia. Le mappature sottoposte alla validazione sono illustrate nella Figura 12.

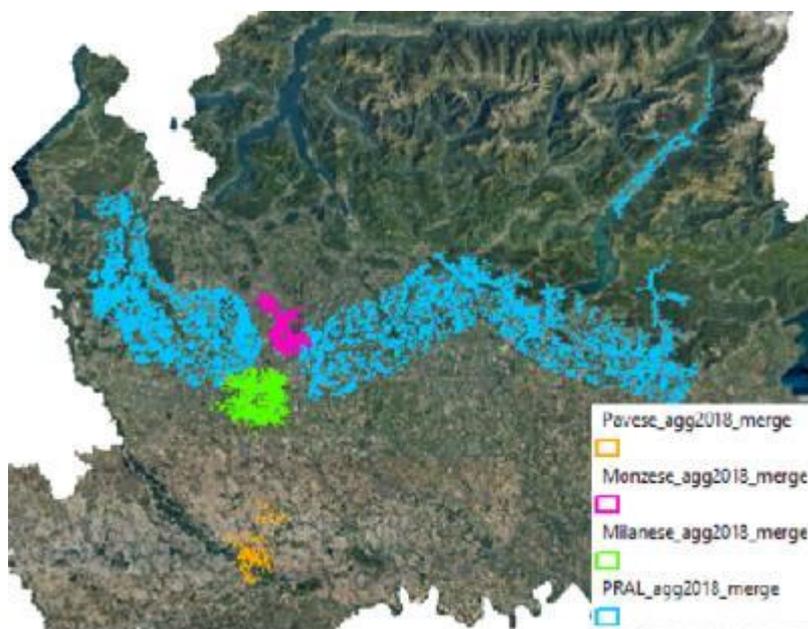


Figura 9. Rappresentazione sinottica delle diverse mappature aggiornate, fornite come file vettoriali poligonali distinti.

La Tabella 12 riassume il conteggio del numero di poligoni delle diverse mappature aggiornate.

Mappatura	N° poligoni
PRAL	36.213
Milanese	7.978
Monzese	4.552
Pavese	1.388
Totale	50.131

Tabella 12. Conteggio del numero di poligoni delle mappature integrate e aggiornate.

Al fine della validazione, le diverse mappature riferite alle diverse aree, sono state unite in un unico file vettoriale poligonale (Figura 10).

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

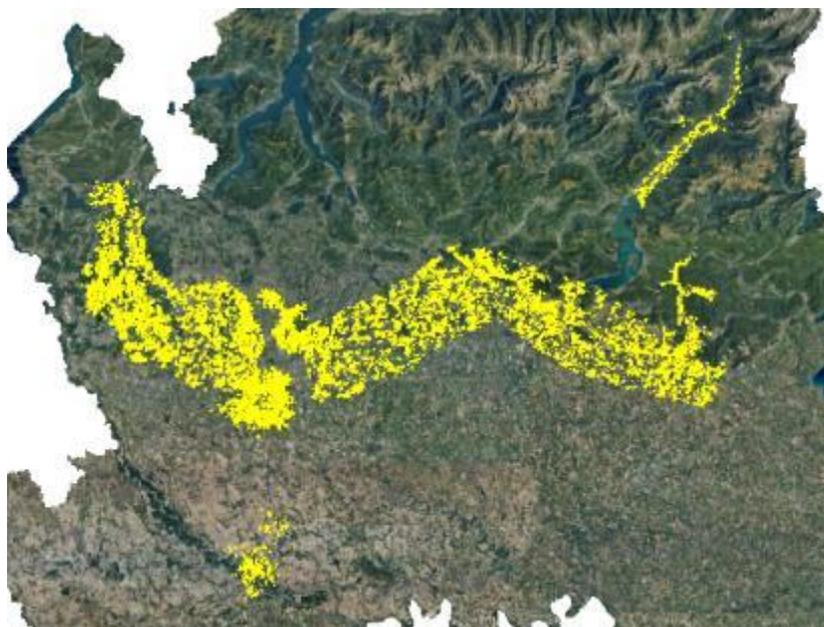


Figura 10. Unione delle diverse mappature in un file vettoriale unico.

Nel file di output prodotto, utilizzato per le successive verifiche, sono stati naturalmente mantenuti gli attributi alfanumerici dei file originali, in particolare gli identificativi univoci dei poligoni, i campi tematici in cui vengono codificate la classificazioni riferite alle diverse annualità di aggiornamento delle mappature, gli eventuali campi “flag” e note introdotti, ecc.. Al fine delle successive verifiche, è stata fatta una selezione casuale di 400 poligoni, effettuata in ambiente QGIS (comando *select random polygons*).



Figura 11. Selezione casuale, all'interno del totale delle coperture, di 400 poligoni (evidenziati in blu), oggetto delle successive verifiche.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Mappatura	N° poligoni	N° poligoni estratti casualmente per la verifica
PRAL	36213	291
Milanese	7978	58
Monzese	4552	42
Pavese	1388	9
Totale	50131	400

Tabella 13. Sintesi numerica e percentuale dei poligoni di verifica selezionati casualmente nelle diverse aree.

La verifica prevedeva sull'insieme di 400 poligoni selezionati casualmente le seguenti attività:

- Controllo della qualità dell'aggiornamento, ovvero della corretta attribuzione tematica dei cambiamenti / non cambiamenti in ogni copertura mappata nelle diverse date delle ortofoto disponibili.
- Controllo del corretto riporto delle geometrie sui poligoni del DB Topografico (o in sua assenza delle ortofoto 2018).

Al fine della verifica, in ambiente GIS ArcMap sono state caricate le diverse annualità delle ortofoto regionali disponibili (2012, 2015, 2018), ed un servizio webGIS che permette la visualizzazione delle coperture del DB Topografico su tutto il territorio regionale. Al fine di ottimizzare la fase di verifica, ogni poligono della mappatura è stato visualizzato con visibili i codici riferiti alla classificazione nelle diverse annualità di aggiornamento (esempio generale nella Figura 15).



Figura 12. Visualizzazione, sullo sfondo dell'ortofoto 2018, dei poligoni della mappatura (poligoni bordo giallo); ogni poligono viene visualizzato con il "label" delle codifiche di classificazione riferita ad ogni annualità (in questo caso, 2012-2015-2018); ad esempio il label 1-1-1 identifica coperture mappate che non risultano cambiate nei tre anni, il label 1-1-2 identifica poligoni con cambio nella copertura visibile nella terza data (2018).

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Nello specifico, al fine di valutare la correttezza del poligono di verifica, selezionato casualmente, al centro dell'immagine precedente, in cui si segnala un cambiamento visibile nel 2018, è possibile consultare le ortofoto precedenti e verificare la correttezza dell'attribuzione tematica.



Figura 13. Visualizzazione comparata dell'ortofoto 2015 (sx) e 2018 (dx) per uno specifico poligono oggetto di verifica, per il quale veniva correttamente segnalato un cambio della copertura fra il 2015 e il 2018 (codice 1-1-2).

La seconda parte della verifica dei poligoni riguarda il corretto riporto della geometria rispetto allo strato informativo degli edifici nel DB Topografico. In questo caso di esempio, il poligono finale coincide correttamente con due poligoni originari del DB Topografico.



Figura 14. Verifica del corretto riporto della geometria del poligono della mappatura in corrispondenza degli elementi presenti nello strato edifici del DB Topografico (a destra; in questo caso il poligono della mappatura coincide correttamente con due poligoni originari del DB Topografico).

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Le valutazioni qui esemplificate sono state effettuate sui 400 poligoni selezionati casualmente, riportando le valutazioni nella tabella degli attributi dello shapefile, in specifici campi numerici ("CHK_TR" e "CHK_DB", rispettivamente per i due parametri oggetto delle verifiche) e testuali (campo note libero per descrivere eventuali osservazioni aggiuntive, e un campo di sintesi che concatena i due parametri precedenti).

4.2.2 Risultati della validazione

Per la grande maggioranza dei 400 poligoni di verifica, si può confermare la corretta attribuzione dei codici tematici di cambiamento o non cambiamento della copertura, riferiti alle diverse annualità di disponibilità di ortofoto; per un ridotto sottoinsieme, si sono osservati alcuni errori di tematizzazione o comunque delle incertezze interpretative.

Nel seguito si riportano alcuni esempi.

Il caso seguente è un esempio di probabile errore di codifica del codice riferito al 2018: dal confronto delle ortofoto 2015 e 2018, è piuttosto evidente un cambio nella copertura dell'edificio.



Figura 15. Visualizzazione comparata dell'ortofoto 2015 (sx) e 2018 (dx) per uno specifico poligono oggetto di verifica; la codifica finale 1-1-1 attribuita (ovvero copertura non cambiata nelle tre annualità), è probabilmente errata, poiché è abbastanza evidente un cambio nella copertura visibile nel 2018; la codifica corretta sarebbe in questo caso 1-1-2.

Un secondo esempio di probabile errore individuato nei poligoni di verifica è il seguente: in questo caso, il poligono della mappatura originale è stato diviso in due diversi poligoni (fonte DB Topografico), di cui per uno è stata attribuita erroneamente la codifica 1-1-3, ovvero cambiamento della copertura dal 2015 al 2018 con installazione di pannelli fotovoltaici.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021



Figura 16. il poligono della mappatura originale (poligono rosso) è stato diviso in due diversi poligoni (sulla base delle geometrie del DB Topografico), di cui per uno dei due (destra), oggetto di verifica, è stata attribuita la codifica 1-1-3, ovvero cambiamento della copertura dal 2015 al 2018 con installazione di pannelli fotovoltaici. Dall'ortofoto 2018 (sfondo nell'immagine) non si osservano in realtà nuovi pannelli e si tratta probabilmente di un refuso nella codifica (che dovrebbe rimanere 1-1-1).

Un altro esempio di probabile errore è esemplificato nell'immagine seguente.



Figura 17. il poligono della mappatura originale in questo caso identificava la totalità della copertura; in fase di aggiornamento e di riporto geometrico è stato diviso in tre diversi poligoni, e per tutte le tre porzioni è stata inserita la codifica 2-0-0 (ovvero cambiamento già osservabile nel 2012); sulla base delle ortofoto è però probabile ritenere che solo in parte la copertura sia stata sostituita; la porzione centrale dovrebbe in questo caso mantenere la codifica 1-1-1.

Un altro esempio di probabile errore è esemplificato nell'immagine seguente.



Figura 18. confronto fra ortofoto 2015 (in alto) e ortofoto 2018 (in basso); il poligono azzurro, oggetto di verifica, viene codificato erroneamente come 1-1-1 (ovvero cemento-amianto sempre presente nelle tre date); dal confronto delle ortofoto è invece altamente probabile che sia avvenuto un cambio nella copertura prima dal 2015 al 2018 (ovvero codice corretto 1-1-2).

In alcuni casi, la qualità delle ortofoto o la presenza di ombre sulle coperture non ha consentito una attribuzione sicura delle codifiche, così come una adeguata “certezza” anche nella fase di verifica dei poligoni; questi pochi casi dubbi (per un totale di 5) sono stati marcati ma non conteggiati come errori.

Complessivamente, sull’insieme dei 400 poligoni selezionati casualmente per la verifica, 393, pari al 98,25% del totale, sono risultati correttamente classificati dal punto di vista tematico, ovvero con attribuzione corretta dei codici di “variazione” o “non variazione” della copertura nelle diverse annualità di aggiornamento delle ortofoto.

Per la grande maggioranza dei 400 poligoni di verifica, si può confermare il corretto riporto geometrico dei poligoni della mappatura sulla base delle geometrie dello strato informativo edifici del DB
 File: Relazione Finale Progetto AMIANTO Ver.1.6.Docx Pagina 25 di 115

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Topografico o, in sua assenza, delle ortofoto 2018. Per un ridotto sottoinsieme, si sono osservati alcuni possibili errori di riporto geometrico. Nel seguito si riportano alcuni esempi.

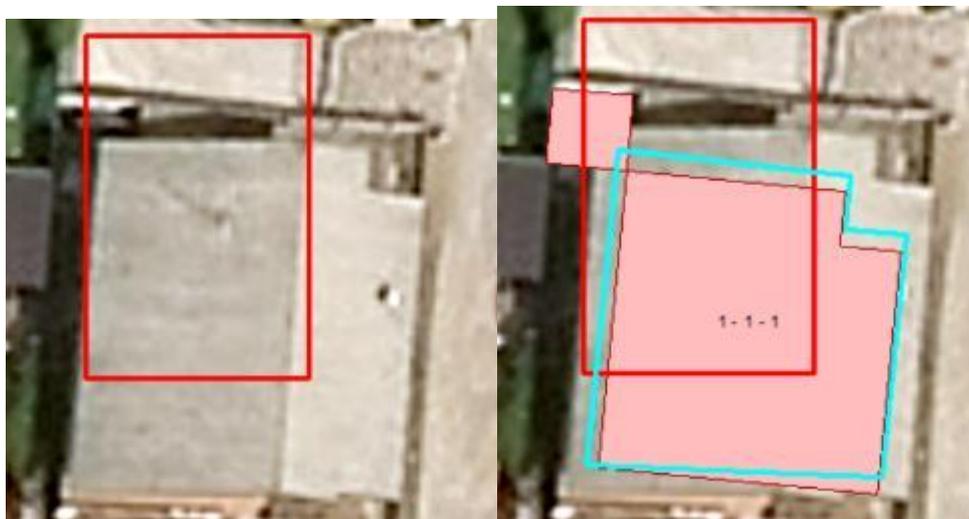


Figura 19. Visualizzazione, a sinistra, di uno dei poligoni originari della mappatura (in rosso); a destra, il poligono è stato ridisegnato sulla base di una geometria più rappresentativa dell'edificio in esame (poligono azzurro oggetto di verifica), ma con geometrie non coincidenti con il rispettivo poligono del DB Topografico.



Figura 20. Visualizzazione, a sinistra, di uno dei poligoni originari della mappatura (in rosso); sulla base delle geometrie dell'edificio corrispondente nel DB Topografico (immagine al centro), il poligono è stato ridisegnato sulla base di una geometria corretta, tagliandolo correttamente nella porzione inferiore, mentre nella porzione superiore viene inclusa una porzione di copertura, presumibilmente non in amianto poiché non ricompresa nella mappatura originaria; il poligono definitivo avrebbe quindi dovuto essere leggermente più corto eliminando anche la porzione settentrionale.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

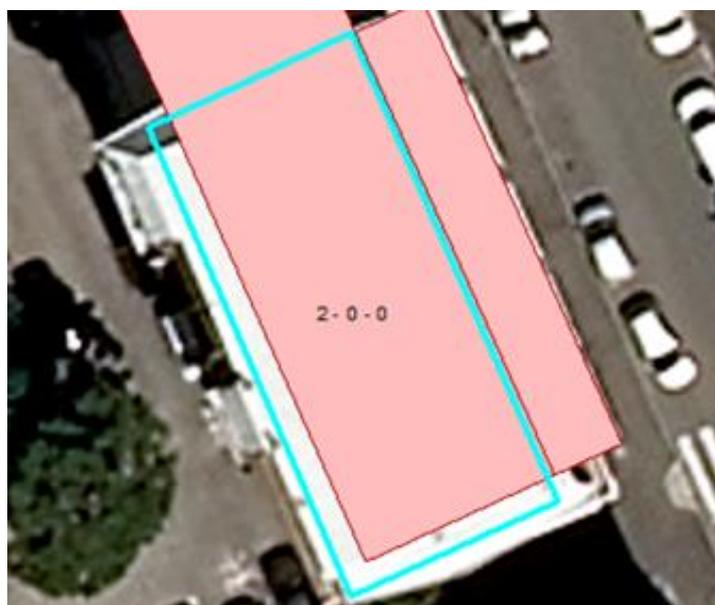


Figura 21. La geometria del poligono in oggetto (poligono azzurro), codificato come 2-0-0 (ovvero cambiamento visibile già nel 2012) è stata solo parzialmente ricostruita utilizzando il corrispondente poligono del DB Topografico, ovvero solo nel limite a nord ed est ma non nelle porzioni sud-ovest.

Per quanto riguarda i casi di poligoni per cui non è disponibile il corrispettivo vettoriale nel DB Topografico, si conferma la corretta attribuzione della geometria sulla base della forma della copertura come visibile nell'ortofoto 2018.

Complessivamente, sull'insieme dei 400 poligoni selezionati casualmente per la verifica, 395, pari al 98,75 %, sono risultati correttamente riportati sulle geometrie del DB Topografico (o in sua assenza sull'ingombro dell'edificio come visibile nell'ortofoto 2018).

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

4.2.3 Sintesi dei risultati della validazione

Dalle verifiche effettuate sul campione di 400 poligoni selezionati casualmente, è emerso che:

- Sull'insieme dei 400 poligoni di verifica, 393, pari al 98,25 % del totale, risultano correttamente classificati dal punto di vista tematico, ovvero con attribuzione corretta dei codici di "variazione" o "non variazione" della copertura nelle diverse annualità di aggiornamento delle ortofoto.
- Sull'insieme dei 400 poligoni di verifica, 395, pari al 98,75 %, risultano correttamente riportati sulle geometrie del DB Topografico (o in sua assenza sull'ingombro dell'edificio come visibile nell'ortofoto 2018).

Combinando attraverso una media aritmetica le valutazioni riferite ai due parametri oggetto del controllo si ottiene una accuratezza totale pari al 98,5%. Stante la soglia del 95% stabilita dal Capitolato speciale, si è considerato superato il controllo.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

5 Estensione della mappatura

5.1 Introduzione

In questa sezione si descrivono le modalità tecniche e operative con cui è stata realizzata la mappatura delle coperture in cemento-amianto dei capoluoghi di provincia che non erano stati rilevati nelle precedenti mappature ed inoltre la mappatura di alcune aree extraurbane di particolare importanza per la elevata presenza di cemento-amianto. Si descrivono quindi le principali caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata, gli elementi di controllo applicati in merito all'esecuzione delle riprese aeree iperspettrali con i sensori Hypspec VNIR 1800 e SWIR 384. Di seguito, vengono inoltre illustrate le metodologie di classificazione iperspettrale "supervised" utilizzate per l'individuazione delle coperture in cemento amianto e le verifiche di accuratezza della classificazione.

5.2 Aree oggetto delle riprese

Le riprese aeree si sono svolte sulle Aree di Interesse (AOI) rappresentate nella Figura 22.

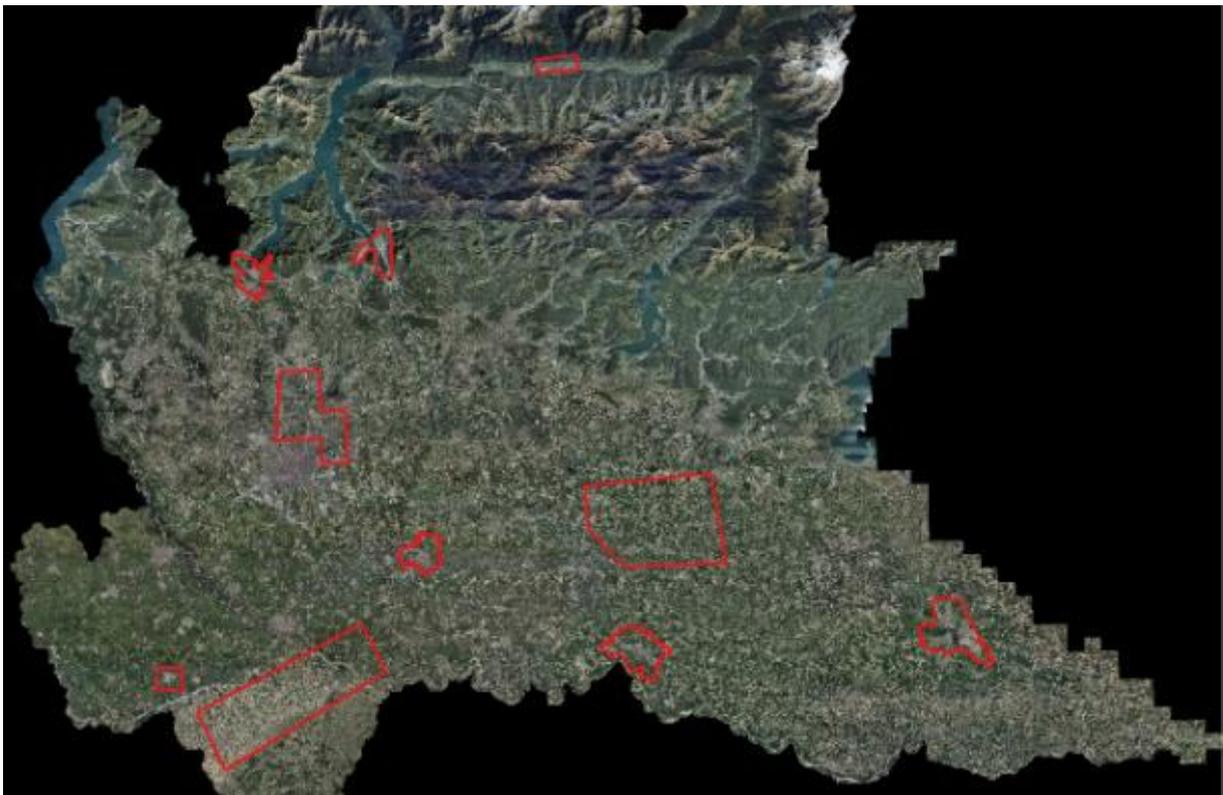


Figura 22. Aree coperte dalle riprese aeree con sensore iperspettrale.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Area	Superfici (km ²)
Comuni di Lecco, Sondrio, Mantova, Lodi, Cremona, Ferrera e Como	323,49
Segrate	157,76
Area A: parte di pianura dell'Oltrepò Pavese. Comprende i Comuni di: Voghera, Stradella, Broni, Casteggio fino a Corteolona.	415,58
Area B: bassa bresciana. Comprende i Comuni di: Orzinuovi, Bagnolo Mella, Manerbio, Leno, Verolanuova.	399,44
Totale	1.296,27

Tabella 14. Superfici delle aree volate.

5.3 Caratteristiche dei sensori

Il rilievo aereo è stato eseguito utilizzando i sensori iperspettrali Hypspx VNIR 1800 e SWIR 384 costruiti dalla società norvegese Norsk Elektro Optik (NEO). La Tabella 15 mostra le caratteristiche dei due sensori.

 ARPA LOMBARDIA Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Parametro	Sensore VNIR-1800	Sensore SWIR-384
Spectral range (nm)	400 – 1000	960 – 2500
Spectral sampling (nm)	3.26	5.45
N° of spatial pixels	1800	384
N° of spectral channels	186	288
Field of view (FOV) (deg)	16.5	16.0
Pixel FOV (mrad)	0.16/0.32	0.73/0.73
Bit resolution (raw data)	16	16
Noise floor (e-)	2.4	150
Dynamic range	20000	7500
Peak SNR	>240	>1100
Max speed (fps)	260	400
Power cons. (W)	30	30
Dimensions (cm)	39 – 9.9 - 15	38 – 12 – 17.5

Tabella 15. Caratteristiche dei sensori.

I due sensori iperspettrali coprono complessivamente il range spettrale compreso tra 400 e 2500 nm, hanno un numero totale di 474 bande spettrali e sono collegati rigidamente ad un'unità di misure inerziali (IMU). Il modello di sensore inerziale utilizzato è stato *POS AV 510 con IMU LN200 LITTON* della società canadese Applanix. I due sensori sono stati installati contemporaneamente sul medesimo aeromobile, all'interno della stessa botola, condividendo la medesima unità GNSS, a garanzia della contemporaneità e coerenza dei dati registrati.

5.4 Caratteristiche dell'aeromobile

Le riprese sono state eseguite con un aeromobile P68 Partenavia. L'equipaggio era composto da un pilota e da un navigatore che, posizionato a lato del pilota, è il responsabile dell'acquisizione dei dati.

Partenavia P68 (Bimotore) marche I – GIFE Con botola fotogrammetrica	Quota operativa massima 5.500 m Sistema GPS: Trimble Ssi 4000 Sistema Applanix POS/AV – 510 DG Flight & sensor control management Leica FCMS or TrackAir TopoFlight
---	---



Tabella 16. Caratteristiche dell'aeromobile.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021



Figura 23. Installazione a bordo dei sensori

L'installazione dei sensori è stata effettuata da un'officina certificata (Part 145), al fine di assicurarne l'aeronavigabilità. Immediatamente dopo l'installazione e prima dell'esecuzione delle riprese, è stato effettuato un volo di test di calibrazione per determinare i valori di "bore sight" dei sensori, vale a dire le deviazioni angolari di posizionamento che gli stessi hanno rispetto al valore teorico previsto. Questo test si rende necessario per definire con elevata precisione l'orientamento spaziale dei sensori durante il volo e di conseguenza ottenere la massima accuratezza nella georeferenziazione del dato finale.

5.5 Piano di volo

La pianificazione del volo richiede come primo elemento la scelta della "quota di volo", in funzione della quale si ottiene il valore di risoluzione al terreno (GSD). In ottemperanza a quanto specificato dal Capitolato Tecnico, il parametro della "quota di volo" è stato impostato a 2.050 metri, per ottenere la seguente risoluzione a terra dei sensori:

- VNIR GSD = 0,66 m
- SWIR GSD = 3 m

La sovrapposizione laterale tra le strisciate è stata pianificata al 35% per il sensore VNIR, a cui corrisponde una sovrapposizione laterale del 30% dello SWIR; in questo modo è stato possibile garantire sempre la copertura tra strisciate contigue anche in presenza di eventuale turbolenza e cambi di assetto repentini dell'aeromobile.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

La seguente tabella riassume i valori principali del piano di volo impostato per i due sensori che registrano in contemporanea.

Flight parameters	VNIR 1800	SWIR 384
Min altitude	2062,5 m	2054,8 m
Max frame time	9,8687 ms	44,8579 ms
Max Integration time	9,8667 ms	44,6579 ms
Peak SNR	255	1100
Effective spatial pixels in georeferenced image	1800	384
Overlap	35%	30%
HFOV	17,00 °	16,00 °
Swath on ground	1233,0 m	1155,1 m
Spacing for flight lines	801,4 m	808,6 m
Max speed (oversampling and SNR increase does not apply)	160,33	193,10

Tabella 17. Parametri di volo.

L'orientamento delle strisciate è sempre impostato in direzione Nord - Sud, per evitare il più possibile di avere un'illuminazione solare laterale. Le riprese sono state pianificate per ottenere il massimo dell'intensità del segnale, ovvero il più possibile nelle ore a cavallo del mezzogiorno. Fa eccezione a questa impostazione l'area del Comune di Sondrio ed alcune strisciate del Comune di Lecco dove, per problematiche legate alla sicurezza del volo in presenza di rilievi nelle aree prossime a quella di interesse, è stato necessario impostare l'orientamento delle strisciate seguendo la direzione principale della vallata, e per poter mantenere la quota di volo (e quindi la risoluzione a terra) prevista. La Figura 24 mostra il totale dei piani di volo che, nei paragrafi successivi verranno descritti singolarmente in dettaglio.

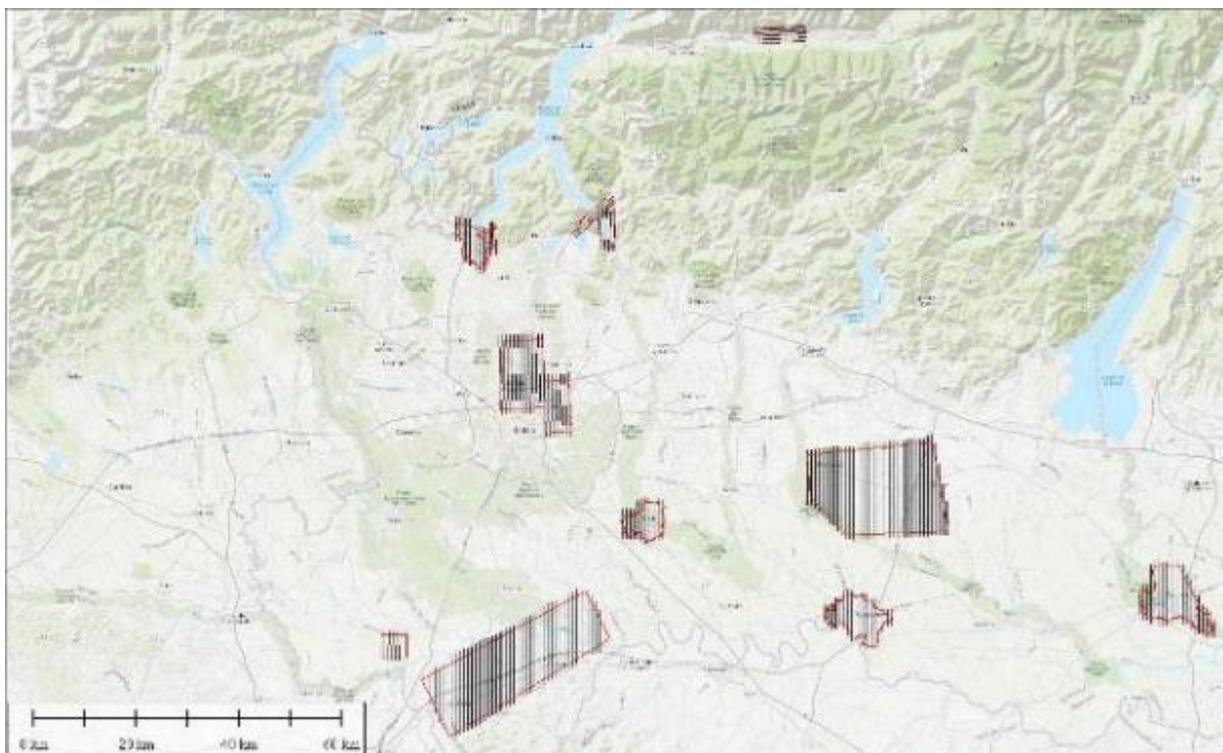


Figura 24. Totale dei piani di volo volati.

Nell'Allegato 1. Elenco delle strisciate" è riportata una tabella contenente la data e l'orario di realizzazione e l'orientamento di tutte le strisciate acquisite ed elaborate.

5.6 Correzione radiometrica del dato

Le immagini grezze (in gergo "Raw-Data"), sono state acquisite dal sensore VNIR con 186 bande, registrando 16 bit/pixel/banda; il sensore SWIR ha invece acquisito 288 canali spettrali sempre a 16 bit. Il primo passaggio del processing dei dati è stato la correzione radiometrica. I due sensori sono costituiti da CCD composti da singoli pixel, che hanno caratteristiche di risposta differenti tra loro e non omogenee; la calibrazione radiometrica, perciò, è stata effettuata su ogni singolo sensore per eliminare questa diversità e per rendere uniforme la risposta spettrale.

La prima calibrazione dei sensori è stata effettuata dalla casa costruttrice, posizionando ciascun sensore all'interno di una sfera che irradia il sensore in modo omogeneo e con valori di radianza noti. In questa fase vengono misurate le caratteristiche dei singoli pixel e definiti pertanto i parametri di amplificazione che ne uniformano le risposte. Le informazioni ottenute vengono quindi memorizzate in un file grazie al quale è possibile effettuare in seguito la calibrazione radiometrica di ogni singolo volo.

La calibrazione radiometrica è stata realizzata con il software fornito dalla casa costruttrice (Hyspex Rad).

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

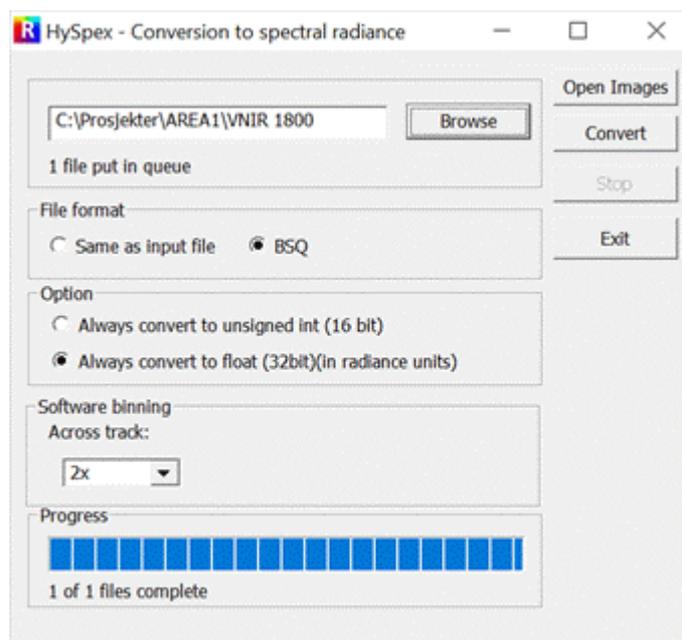


Figura 25. Finestra di Input del software Hypspx Rad.

La Figura 25 mostra la schermata del software Hypspx Rad che richiede come file di input il dato RAW e in output fornisce la predetta correzione.

Per evitare di perdere eventuali informazioni spettrali i dati corretti radiometricamente vengono registrati in 32 bit per canale a partire dai 16 bit originali.

5.7 Correzione geometrica

La prima fase di correzione geometrica dei dati è basata sul processamento dei dati di navigazione (GNSS/IMU) per determinare la traiettoria dell'aeromobile e si avvale di un insieme di stazioni GRS (Ground Reference Station) di riferimento a terra. Le GRS utilizzate sono quelle appartenenti alla rete di posizionamento interregionale satellitare SPIN3 GNSS che comprende Lombardia, Piemonte e Valle d'Aosta. Si è utilizzata inoltre anche la rete Italpos. L'elenco delle stazioni GNSS fisse utilizzate per le riprese in esame è riportato nell' "Allegato 2. Stazioni GNSS di riferimento".

Le GRS sono in grado di registrare i segnali GPS con caratteristiche simili alla strumentazione di bordo e sono contemporanee all'esecuzione del volo. A questo scopo sono state utilizzate stazioni fisse la cui distanza dall'aeromobile non superasse mai i 20 km per il ricevitore più vicino e i 50 km per quello più lontano. Avendo a disposizione i dati registrati da queste stazioni fisse di terra sono stati eseguiti i calcoli della traiettoria dell'aeromobile nei sorvoli, combinandoli con i dati ripresi dal sistema INS/GPS installato a bordo dell'aereo. Queste informazioni sono fondamentali per poter successivamente georiferire le immagini acquisite. L'elaborazione della traiettoria GPS è stata prodotta con il software POSGNSS (contenuto nel POSPac dell'Applanix). Questo software offre diversi strumenti per analizzare la qualità del dato GPS e della soluzione finale calcolata.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Dopo aver eseguito il processamento dei dati di navigazione (GNSS/IMU) per determinare la traiettoria dell'aeromobile si è provveduto ad associare, alla posizione istantanea dell'aereo, la linea di scansione registrata in quell'istante dal sensore (grazie al file denominato "event file" registrato durante la ripresa, nel quale è memorizzato il tempo GPS di registrazione di ogni singola linea di scansione). Abbinando opportunamente la posizione e l'assetto di volo dell'aeromobile con la linea di scansione registrata in un determinato istante è possibile ricostruire la geometria del volo in maniera completa. Questo passaggio è stato effettuato in modo indipendente per i due sensori all'interno del software Hypex NAV, fornito dalla casa costruttrice.

Le successive fasi di processing geometrico del dato sono state svolte utilizzando il software PARGE, sviluppato dalla società svizzera ReSe Applications LLC (ReSe Applications GmbH) (<https://www.rese-apps.com/index.html>) specializzata nel processing di dati telerilevati e specificatamente nella spettroscopia da immagini. Il software ha richiesto in input i seguenti elementi:

- Image File - File raw della strisciata (output del software Hypex/Rad);
- File della traiettoria e delle posizioni delle linee di scansione – (File di output di Hypex NAV)
- Sensor file – File specifico del sensore contenente le sue caratteristiche spettrali ottenuto dalla calibrazione radiometrica descritta in precedenza
- Il datum di riferimento per la trasformazione
- Il Modello Digitale del Terreno
- I valori di boresight del sensore (file di output della calibrazione del sensore sull'aeromobile)

Il software, in questo modo, ha eseguito la rettifica e la georeferenziazione del dato, ottenendo la strisciata finale corretta geometricamente, con i valori di risoluzione finale impostati pari ad 1 m per il VNIR e 3 m per lo SWIR, e correttamente posizionata nel sistema di riferimento prescelto. Relativamente al metodo di ricampionamento delle immagini è stato utilizzato il "nearest neighbour" per mantenere il contenuto radiometrico inalterato nella trasformazione.

Il Modello Digitale del Terreno, con risoluzione 5 m, è quello della Regione Lombardia.

Valori di boresight

Il volo di Calibrazione è stato effettuato il 7 maggio 2020. La calibrazione (come descritto in precedenza) serve per determinare i valori dei residui angolari, questi parametri dipendono dalla installazione a bordo dell'aeromobile e possono leggermente variare di volta in volta anche sul medesimo aeromobile, per cui devono essere determinati ogni volta che si installa il sensore a bordo. Questi valori vengono poi inseriti nel software di processing per la correzione geometrica.

Valutazione dell'accuratezza della georeferenziazione

Per la valutazione dell'accuratezza della georeferenziazione sono stati acquisiti 8 punti per ogni strisciata disposti lungo l'asse e alle estremità laterali della stessa. L'errore residuo su x e y, espresso in RMSE, deve essere inferiore a 3 m. Nell' "Allegato 3. Elenco dei punti di verifica della qualità

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

geometrica” è riportato un elenco di 81 punti di verifica ciascuno dei quali è posizionato su una strisciata. Per ciascun punto è calcolato lo RSME. Il valore medio degli RSME è 1,00 m. Il massimo è 2,62 m e il minimo 0,08 m.

5.8 Classificazione

Le riprese sono state effettuate in contemporanea con i due sensori SWIR e VNIR che, come descritto in precedenza, hanno differente risoluzione. Per la fase di classificazione sono stati unificati i due data set, dopo la loro corretta georeferenziazione, su un unico file al fine di operare le fasi di analisi spettrale. Per poter effettuare queste operazioni si è reso necessario ricampionare le immagini SWIR ad 1 metro, per renderle omogenee al dato VNIR, mantenendo la massima risoluzione.

Dal momento che i due sensori hanno una sovrapposizione nella finestra spettrale compresa tra 960 e 1000 nm, le prime 10 bande del sensore SWIR corrispondenti a queste lunghezze d’onda sono state eliminate. Inoltre, in questo file merge delle bande, si è deciso di non considerare le bande dalla 158 alla 182 e dalla 273 alla 288 del volo SWIR, a seguito di un’analisi specifica della quota di rumore delle singole bande. In totale sono state scartate 39 delle 288 bande del sensore SWIR, pari al 14%.

L’identificazione delle coperture in cemento amianto è stata effettuata tramite l’algoritmo di classificazione di tipo “supervised” SAM (Spectral Angle Mapper). Questo tipo di classificazione si basa sulla conoscenza di alcune aree campione rappresentative delle classi che si vogliono individuare. Queste superfici rappresentative vengono localizzate sulle immagini, ne vengono estratte le caratteristiche spettrali e vengono utilizzate per classificare tutta la scena. Queste aree campione, denominate ROI (“Region of Interest”), rappresentano il riferimento per la successiva classificazione, che consiste sostanzialmente nell’attribuzione di un pixel ad una determinata classe (classe “amianto”) in funzione della sua similitudine con quella firma spettrale (firma spettrale delle aree campione). Il software utilizzato è ENVI della società Harris. L’algoritmo determina la similarità spettrale tra i due spettri attraverso il calcolo dell’“angolo” che essi formano, trattando dunque gli stessi come vettori in uno spazio con dimensionalità uguale al numero delle bande. Il parametro angolare di classificazione è variabile e può essere scelto dall’operatore il quale ne imposta diversi valori (per l’intero processo e per le singole ROI) al fine di ottenere classificazioni ottimali.

La classificazione è stata effettuata processando ogni singola strisciata indipendentemente dalle altre perché, come illustrato, la ROI ha una firma spettrale legata alla strisciata da cui è estrapolata, e successivamente i vari risultati georiferiti saranno visualizzati in un software GIS per ottenere la copertura finale. Si è classificata ciascuna strisciata utilizzando una o più ROI derivate dalla strisciata stessa o, laddove non esistente, tramite un dataset di informazioni (*Libreria Spettrale*) ereditate da una strisciata contigua. Le fasi che costituiscono il processo di classificazione delle e coperture d’amianto sono pertanto le seguenti:

1. Individuazione di campioni e definizione delle aree di interesse.
2. Riconoscimento dei campioni sulle immagini e definizione delle ROI (Region Of Interest)
3. Creazione di una libreria spettrale di riferimento.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

4. Classificazione con algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper).
5. Interpretazione e verifica dei risultati.

Il punto di partenza della classificazione è l'estrazione della firma spettrale di coperture sicuramente costituite da amianto. Nel progetto AMIANTO sono stati utilizzati 400 punti di verità a terra ricavati dalle autodichiarazioni NA\1 opportunamente verificate e georeferenziate.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

5.9 Vettorizzazione delle mappe classificate

Il risultato della classificazione ha prodotto una mappa raster contenente i pixel classificati come cemento-amianto. Per la trasformazione dal formato raster a quello vettoriale non è stata adottata una vettorizzazione automatica poiché in generale produce poligoni eccessivamente irregolari che non riproducono con sufficiente accuratezza la reale geometria dei tetti degli edifici. Si è scelto quindi di utilizzare come base geometrica il DB Topografico della Regione Lombardia.

Il DB Topografico è disponibile per oltre il 95% dei Comuni, è organizzato in diversi layer tematici contenenti informazioni compatibili con la scala 1:10.000 o inferiore. Il layer contenente le "Unità volumetriche" degli edifici contiene la perimetrazione dei tetti alla linea di gronda ed è disponibile per circa l'80% dei Comuni. Per la perimetrazione delle coperture in cemento-amianto è stato utilizzato quest'ultimo layer. Con una query geografica sono stati evidenziati tutti i poligoni del layer "Unità volumetriche" contenenti pixel classificati come cemento-amianto, dopodiché, per via fotointerpretativa, si è proceduto a verificare per ciascun poligono evidenziato, la conformità della geometria del poligono con la geometria del tetto nella mappa raster. Poiché le geometrie della base vettoriale e di quella raster non sempre coincidono, si è stabilito che nel caso di scostamenti superiori ai 5 m la geometria vettoriale venisse modificata appoggiandosi alla geometria dell'ortofotografia AGEA 2018. Si sono presentati i seguenti casi particolari:

- 1) Nel caso in cui la copertura classificata era costituita soltanto in parte da cemento-amianto nel corrispondente poligono del DB Topografico, la sola porzione classificata è stata identificata aggiungendo ulteriori vettori al poligono corrispondente del DB Topografico per suddividerlo in differenti parti ed attribuire la caratteristica di amianto unicamente alla parte interessata, rispettando la congruenza geometrica con i poligoni del DB Topografico.
- 2) Nel caso in cui non fosse stato disponibile il DB Topografico nell'area in esame, sono stati digitalizzati nuovi poligoni in corrispondenza delle coperture identificate basandosi sull'ortofotografia AGEA 2018.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

5.10 Validazione dei risultati

5.10.1 Metodologia di validazione

La validazione dei risultati della estensione della mappatura è consistita nel controllo della accuratezza della classificazione su un insieme di 400 coperture (poligoni) individuate da ARPA Lombardia. Le diverse mappature fornite separatamente per diversi lotti di consegna riferiti a diverse aree, sono state unite in un unico file vettoriale poligonale.

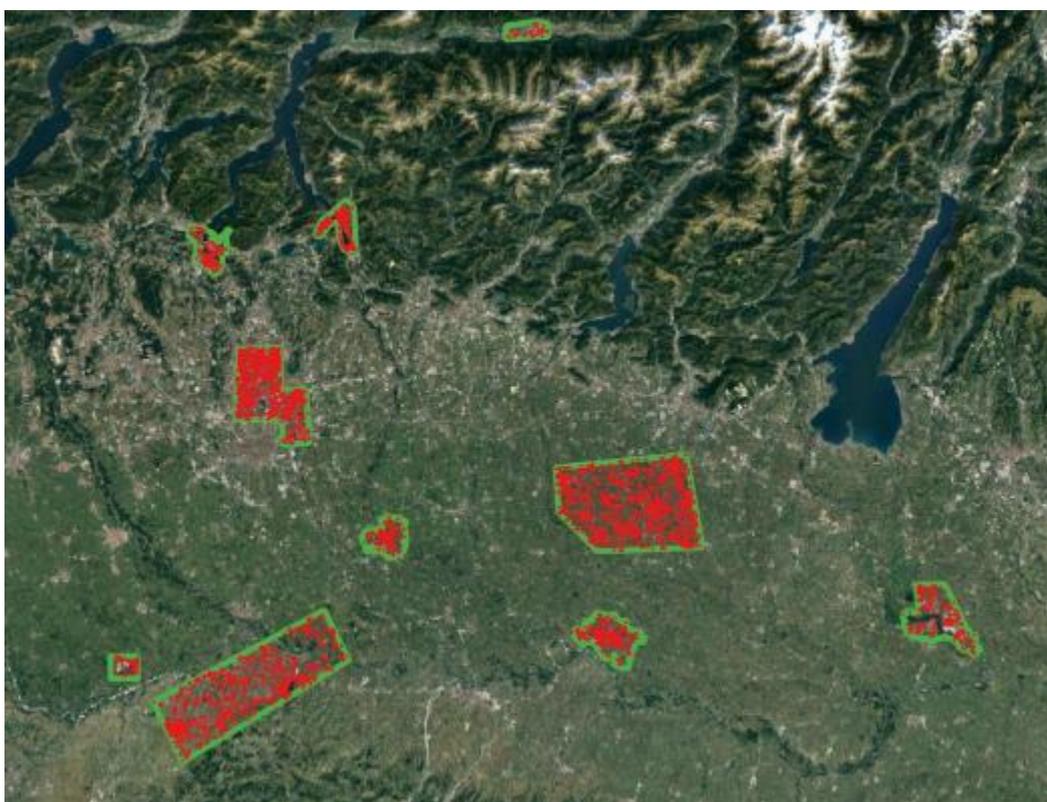


Figura 26. Rappresentazione sinottica dell'estensione della mappatura oggetto di verifica; i poligoni verdi sono le aree selezionate per la mappatura, i poligoni rossi sono le coperture in cemento-amianto mappate, aggregate in un unico shapefile vettoriale.

L'accuratezza della classificazione dipende da due aspetti concorrenti ovvero, da un lato, da quanto è affidabile l'individuazione di coperture in cemento-amianto realmente esistenti (generalmente indicata come *Producer's Accuracy*, e dipendente dalla percentuale di "falsi negativi" o "errori di omissione" introdotti), e dall'altro dalla affidabilità nel non introdurre dei "falsi positivi" o "errori di commissione" nella mappatura (aspetto generalmente indicato come *User's Accuracy*). L'accuratezza complessiva della classificazione ("*Overall Accuracy*") considera quindi complessivamente entrambi questi due parametri.

Ai fini della stima dell'accuratezza complessiva della classificazione, la strategia adottata è quindi stata orientata alla ricerca sia dei possibili falsi negativi (errori di commissione) che dei possibili falsi positivi (errori di omissione) della mappatura fornita, cercando a priori di distribuire in modo uniforme i 400 punti di verifica previsti.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Dei 400 punti previsti, il primo gruppo di 200 punti di verifica indipendenti sono relativi a coperture in cemento-amianto tuttora in posto, e diversi rispetto agli analoghi punti di verità a terra utilizzati per calibrare il classificatore. Questi 200 punti di verifica, per cui si valuta quindi a posteriori in modo indipendente la correttezza della classificazione come copertura in cemento-amianto (in alternativa i punti vengono marcati come “falsi negativi”) derivano da diverse fonti:

1. Prioritariamente, derivano dalla georeferenziazione delle autonotifiche (moduli NA\1) della presenza di coperture in cemento-amianto, fornite dalla Direzione Generale Welfare della Regione Lombardia, e successivamente bonificate e georeferenziate, e la cui attuale presenza è confermata da verifiche con le immagini ad altissima risoluzione disponibili (immagini in GoogleEarth, immagini satellitari WorldView3), o immagini recenti da terra (Google StreetView).
2. Poiché la numerosità di punti NA\1 con le caratteristiche richieste di ottima georeferenziazione e ragionevole certezza di permanenza attuale della copertura non è sufficiente, in seconda battuta sono state selezionate coperture prossime a punti NA\1 già forniti, su coperture visivamente simili e in contesti urbani omogenei. Anche in questo caso i punti sono stati verificati con le immagini ad alta risoluzione più recenti disponibili e in alcuni casi anche con osservazioni dirette.

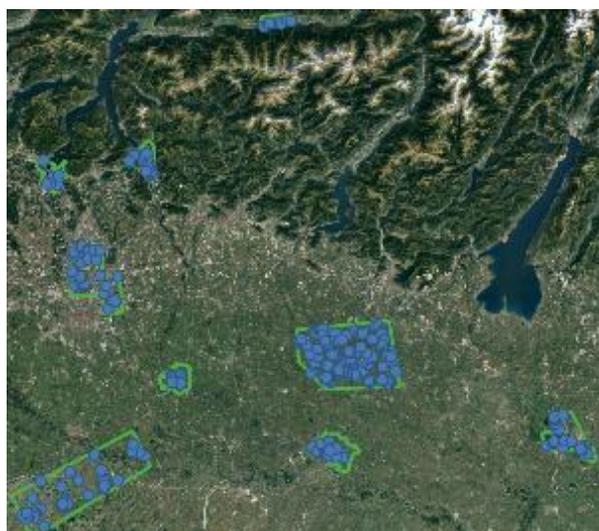


Figura 27 .Vista d’insieme e distribuzione del primo gruppo di 200 punti di verità a terra, relativi a coperture in cemento-amianto tuttora in posto.



Figura 28. Due esempi di dettagli su due punti di verità a terra rappresentativi di coperture in cemento amianto tuttora in posto, visualizzati da immagini aeree recenti, e verificati ulteriormente con osservazioni dirette (da drone nel primo caso e con immagini da terra nel secondo).

Di questo gruppo di 200 punti, rappresentativi di punti di verità a terra con copertura in cemento-amianto, 8 edifici non sono stati individuati nella mappa classificata (ovvero 8/200 errori di omissione).

Al fine di quantificare invece i possibili errori di commissione (ovvero i “falsi positivi”), la selezione di adeguati e rappresentativi punti di verità a terra è intrinsecamente più complicata rispetto al caso precedente.

Dei 200 punti previsti da ricercare, si è optato di selezionarne un primo gruppo (100 punti) sfruttando la cartografia regionale DUSAF1 del 1999 e impostando un campionamento casuale di coperture; più nel dettaglio, è stata utilizzata come maschera l'area classificata come “urbanizzato” nel 1999, e all'interno delle aree urbane libere (quindi edificate successivamente), sono stati marcati, tramite fotointerpretazione di immagini ad altissima risoluzione, 100 edifici con coperture di colore grigio e di materiale ondolato, ovvero coperture che con ragionevole certezza non sono in cemento-amianto

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

(data l'epoca di edificazione, confermata da ortofoto storiche) ma che da una semplice interpretazione visiva potrebbero generare una possibile confusione nell'interpretazione.

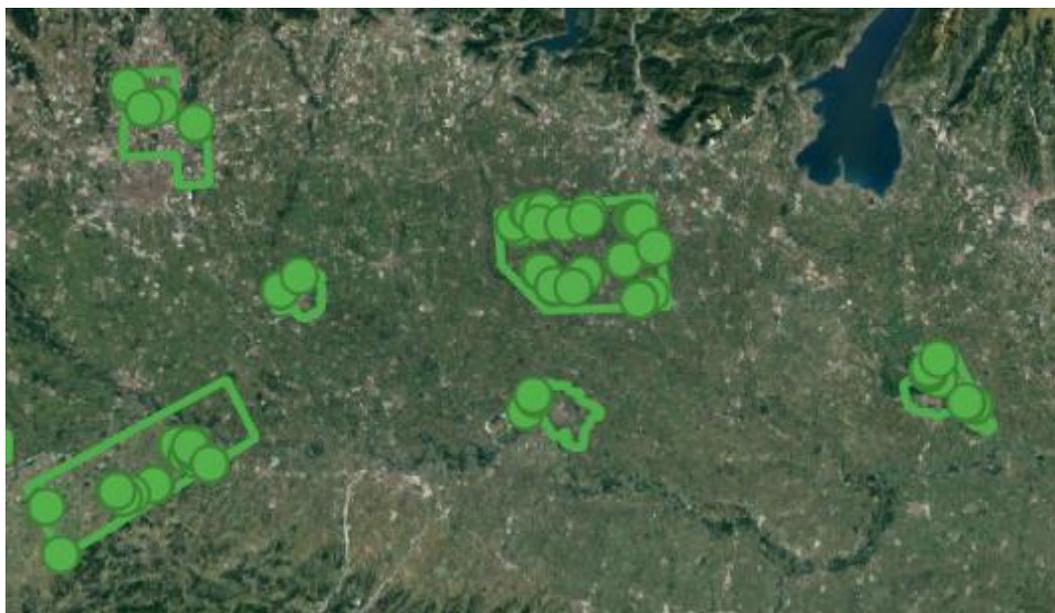


Figura 29. Vista d'insieme e distribuzione del gruppo di 100 punti di verità a terra "non-amiante", relativi a coperture localizzate in aree edificate recenti ma che per aspetto e forma potrebbero generare confusione con la sola fotointerpretazione.

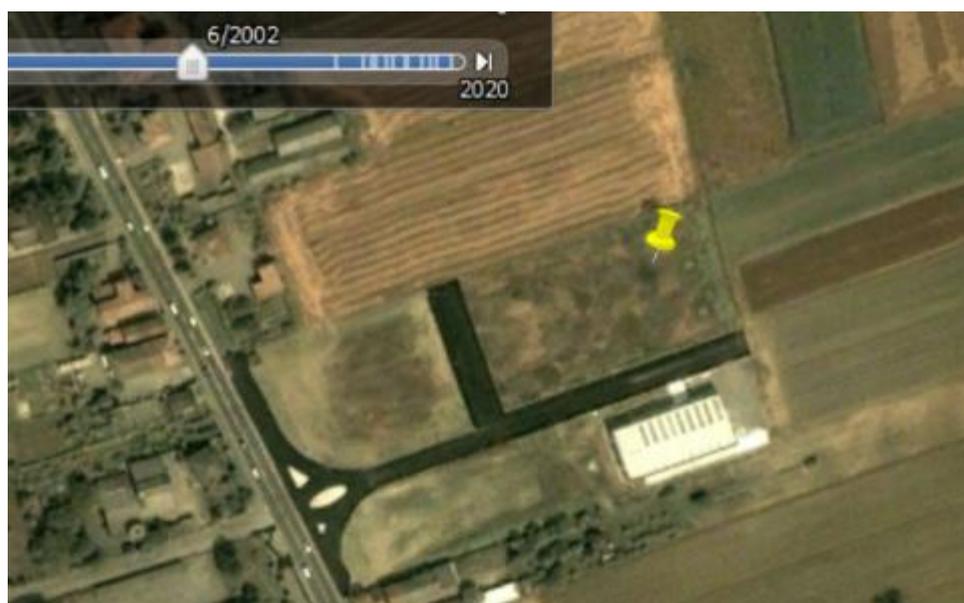


Figura 30 .Dettaglio di esempio di due coperture considerate come verità a terra “non amianto”, poiché, pur essendo potenzialmente confondibili per aspetto e tipologia, risultano fuori dal poligono “urbanizzato” in DUSAF1 e, dall’immagine storica visibile in Google Earth, su edifici non ancora edificati nel 2002.

Di questo gruppo di 100 punti, su edifici con copertura grigi e ondulati ma in ambiti edificati successivamente al 1999, nessuno è stato classificato come cemento-amianto nella mappatura fornita (ovvero 0/100 errori di commissione).

Un secondo gruppo di punti funzionale alla ricerca di potenziali errori di commissione (“falsi positivi”) è stato selezionato sempre sfruttando la cartografia regionale di uso del suolo DUSAF, ma questa volta a partire direttamente dalla mappatura fornita.

In questo caso la strategia è stata quella di associare al centroide di ogni poligono della mappatura fornita il codice di uso del suolo relativo al 1999 (DUSAF1) e al 2018 (DUSAF6). Combinando adeguatamente queste due codifiche, sono state individuate le tipologie di transizione di uso del suolo da 1999 a 2018 che sono un potenziale “warning” di situazioni di potenziale errore nella mappatura (ad esempio, in particolare, poligoni che sono localizzati all’interno di aree che hanno subito trasformazioni da “seminativo” a “urbanizzato” solo successivamente al 1999).

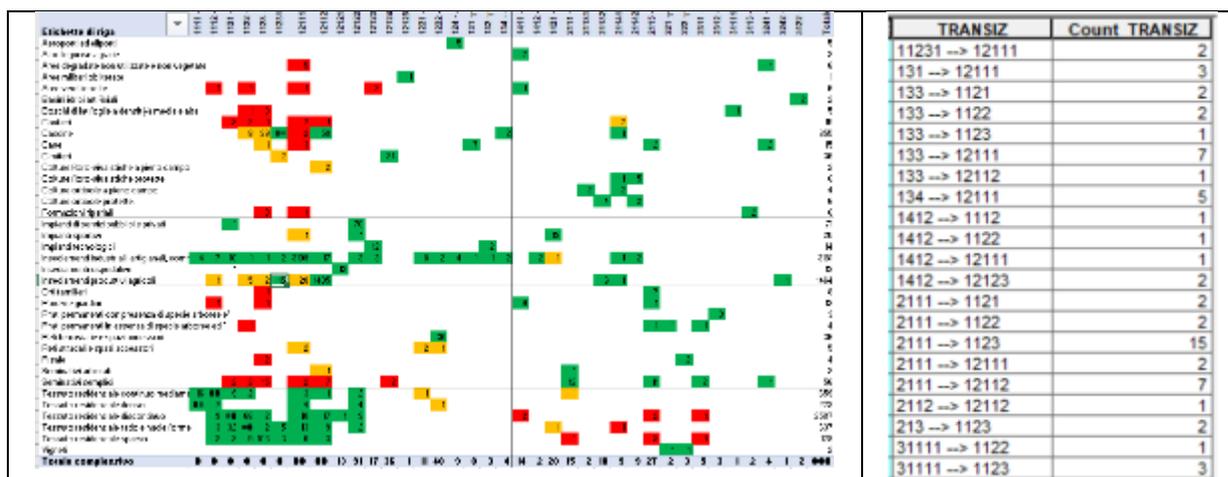


Figura 31. Estratto della tabella risultante dall’incrocio fra centroidi dei poligoni della mappatura e rispettivi codici di uso del suolo da DUSAF 1999 e DUSAF 2018; alcune combinazioni di transizione di uso del suolo consentono la selezione di situazioni di “potenziali” warning di “falsi positivi” da verificare puntualmente.

I punti risultanti dalla selezione di combinazioni di uso del suolo che risultano dei possibili “warning” di potenziali falsi positivi sono risultati 63. Tali 63 coperture sono state quindi controllate puntualmente tramite fotointerpretazione. Successivamente a questo ulteriore controllo su questo sottoinsieme di 63 coperture così selezionate, è emerso che 5 coperture risultano effettivamente essere con alta probabilità dei falsi positivi (ovvero 5/63 errori di commissione).

Per raggiungere infine la quota di 400 punti di controllo prevista, è stata effettuata una sessione di fotointerpretazione di ulteriori 37 coperture. Alcuni di questi 37 punti sono effettivamente di difficile interpretazione, per tipologia della copertura, aspetto generale, grado di deterioramento della copertura, ecc..., ma per 6 di questi punti prevale l’interpretazione che non si tratti effettivamente di coperture in cemento-amianto. Nelle immagini seguenti si riporta a titolo di esempio la valutazione effettuata su uno di queste coperture.



Figura 32. Dettaglio di esempio di un falso positivo: si tratta di una copertura classificata come cemento-amianto, di cui si ha una ragionevole certezza, da immagini aeree e da terra precedenti, che la copertura in cemento-amianto fosse effettivamente in posto almeno fino al 2018, ma appare rimossa poi nel 2019, ed assente quindi alla data del rilievo iperspettrale del 2020.

Di questo gruppo finale di 37 punti e successivamente ricontrollati tramite fotointerpretazione, si ritiene di considerarne 6 come falsi positivi (6/37 errori di commissione).

Le diverse casistiche riscontrate sui 400 punti di verifica possono essere riassunte utilizzando la cosiddetta "matrice di confusione", riportata nella Tabella 18, in cui vengono esplicitati i valori risultanti di *User's Accuracy*, *Producer's Accuracy* e in particolare di accuratezza complessiva (*Overall Accuracy*).

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

		Classi Verità		
		CA	non-CA	TOT
Classi Mappatura	CA	281	11	292
	non-CA	8	100	108
	TOT	289	111	400

User's Accuracy	
96,2%	94,4%
92,6%	

Overall Accuracy	
95,3%	

Producer's Accuracy	97,2%	90,1%
	93,7%	

Tabella 18. Matrice di confusione.

L'accuratezza complessiva della classificazione risulta essere pari a 95,3% e quindi nettamente superiore alla soglia del 90% stabilita dal Capitolato Speciale.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

6 Analisi dei risultati

I risultati del Progetto sono riassunti nei paragrafi seguenti, distinguendoli nelle due fasi principali di aggiornamento e integrazione delle mappature esistenti (Fase 1, par. 6.1) ed estensione della mappatura (Fase 2, par. 6.2).

6.1 Fase 1: aggiornamento mappature esistenti

Al fine dell'analisi dei risultati, i poligoni oggetto delle diverse consegne parziali della Fase 1 (differenziate per aree di mappatura), sono state unite in un unico strato informativo vettoriale.

La figura seguente riassume, per le quattro diverse aree di mappatura disponibili oggetto della Fase 1, il numero di Comuni interessati, la superficie dell'areale di mappatura, il n° di poligoni cartografati, e le annualità dei diversi aggiornamenti della mappatura disponibili.

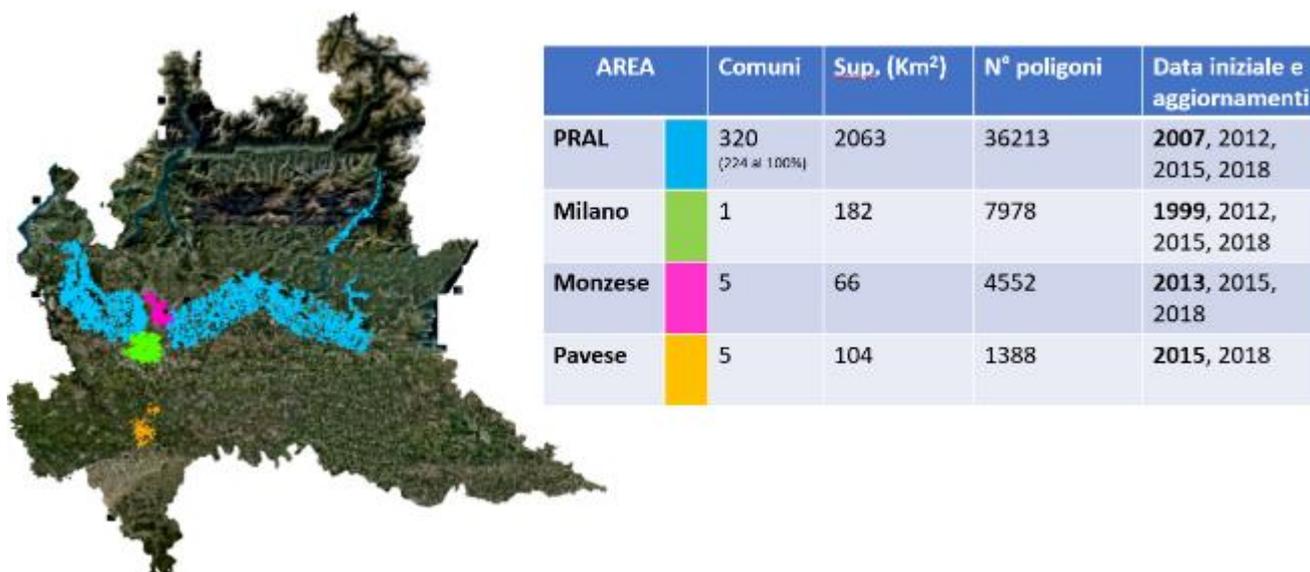


Figura 33. Mappa di sintesi con la localizzazione delle diverse mappature delle coperture oggetto della Fase 1 del progetto, e caratteristiche di sintesi riassunte in tabella.

Nei paragrafi seguenti, vengono riassunte le analisi riferite alle diverse aree di mappatura disponibili, differenziando in particolare inizialmente le analisi riferite all'area PRAL, che per estensione complessiva e storicità merita una trattazione separata (par. 6.1.1).

6.1.1 Analisi dei cambiamenti nell'area PRAL

La mappatura riferita all'area del PRAL interessa 320 Comuni (di cui 224 mappati al 100% del loro territorio), su una superficie complessiva di circa 2063 Km².

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

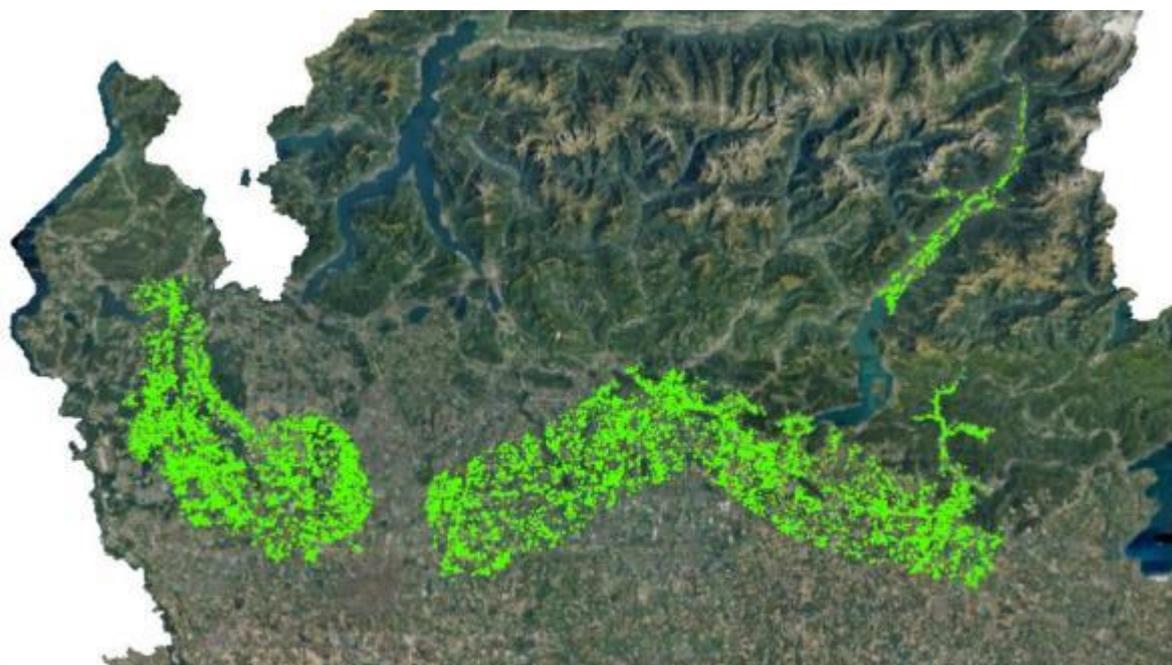


Figura 34. Localizzazione dei poligoni relativi alla mappatura originaria del PRAL, aggiornata nella fase 1 del progetto.

In origine, il n° di poligoni mappati nell'area PRAL era di 26006 poligoni; dopo i vari editing geometrici e l'allineamento effettuato sul DB Topografico, i 26006 poligoni originari dell'area PRAL sono diventati **36213** poligoni.

Gli strati vettoriali relativi ai diversi lotti di consegna sono stati uniti (procedura *merge*) in uno shapefile unico per derivare le statistiche (riferite alla superficie) su tutta l'area PRAL relativamente alle variazioni sulle annualità disponibili (2007-2012-2015-2018).

Il grafico seguente riassume le variazioni complessive, in termini di superficie, riscontrate nell'area PRAL.

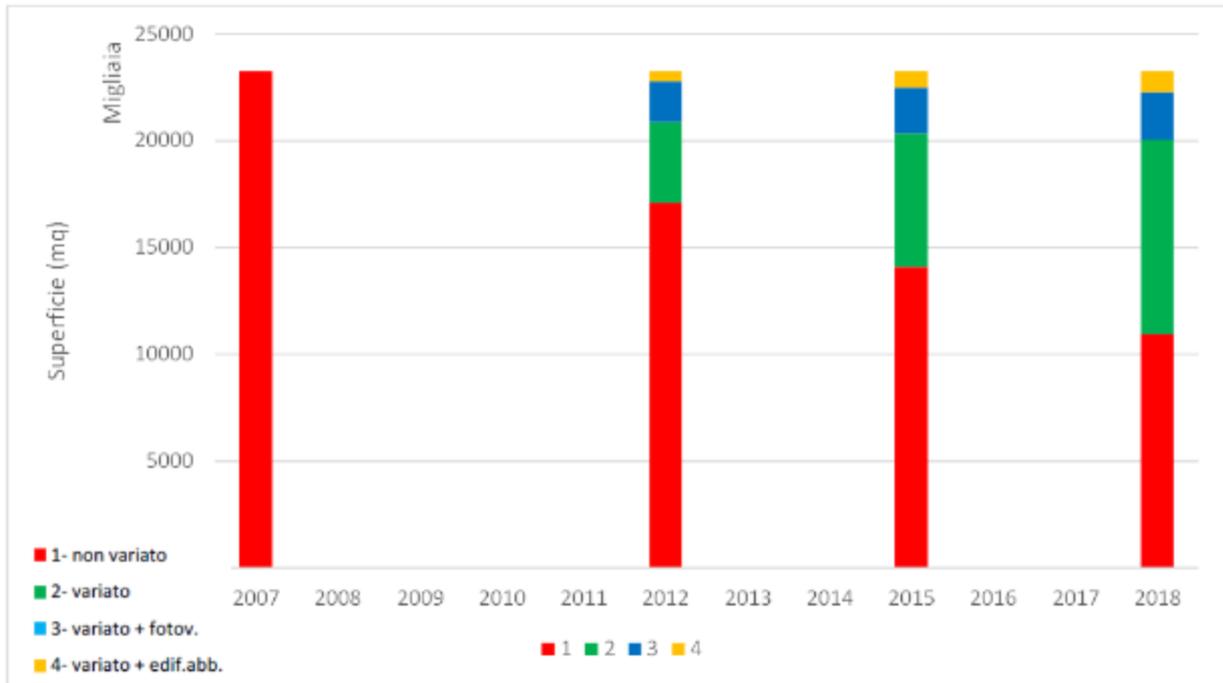


Figura 35. Statistiche di sintesi, riferite alla variazione complessiva dei poligoni mappati originariamente nel 2007, e successivamente aggiornati al 2012, 2015 e 2018 (sintesi riferita alla superficie).

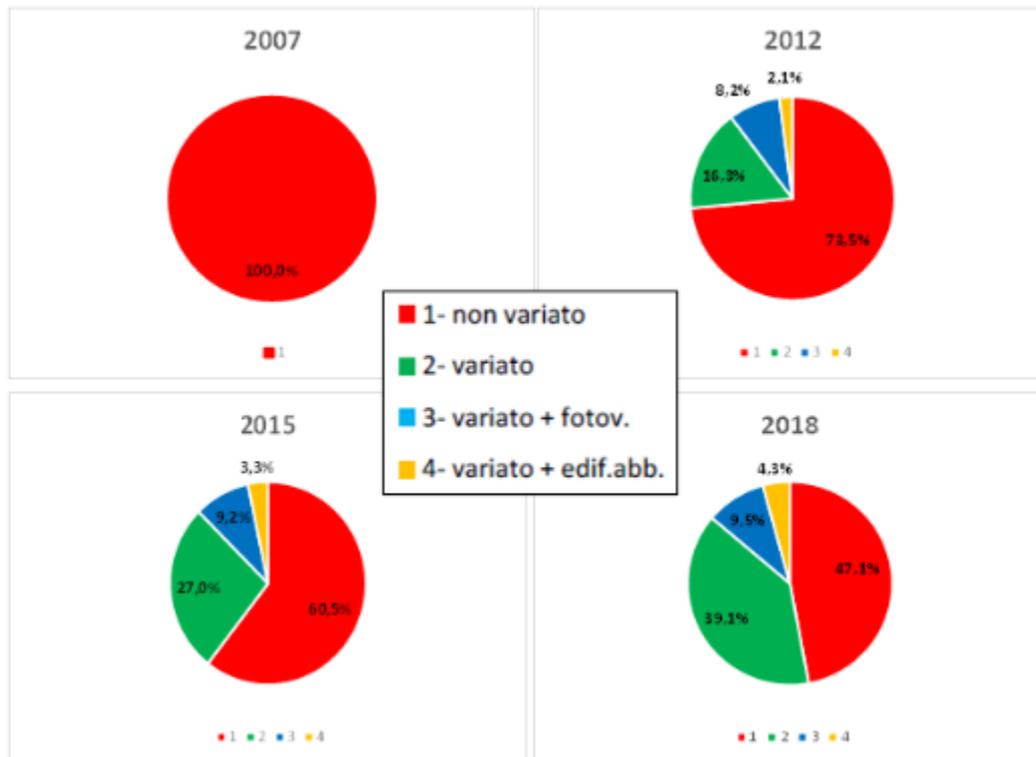


Figura 36. Grafici rappresentativi per le diverse annualità di aggiornamento della classificazione dei poligoni mappati, distinti nelle diverse classi di "non variato" e tipologie di variazione.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Dall'analisi dei grafici precedenti emergono le seguenti osservazioni:

- I trend di rimozione nei periodi 2012-2015 e 2015-2018 appaiono simili.
- I trend di rimozione nei periodi 2012-2015 e 2015-2018 appaiono leggermente inferiori al periodo precedente 2007-2012.
- Si osserva una chiara diminuzione nel tasso di sostituzione delle coperture con impianti fotovoltaici nei periodi più recenti.

In estrema sintesi, nella sola area PRAL i poligoni che al 2018 risultano con codice 1 (ovvero con copertura in cemento-amianto ancora presente) risultano 17208, per una superficie complessiva di circa 10,9 Km².

6.1.2 Analisi dei cambiamenti complessivi nelle diverse aree disponibili

L'immagine seguente riporta la mappatura complessiva delle coperture in cemento amianto, relativamente all'unione delle diverse mappature disponibili (Area PRAL, Milano, Monzese, Pavese).



Figura 37. Localizzazione dei poligoni relativi alle diverse mappature aggiornate e integrate nella fase 1 del progetto.

Nelle diverse aree di mappatura oggetto della Fase 1, come già specificato, la prima annualità di mappatura può essere diversa, così come riassunta nella Figura 33. Per questa ragione, non è possibile effettuare una analisi complessiva delle variazioni in modo omogeneo per tutte le aree di mappatura relativamente a tutte le annualità disponibili.

Nella tabella seguente, viene però riportata la sintesi numerica, differenziata per aree di mappatura (e relative annualità di aggiornamento), delle superfici di coperture in cemento amianto mappate.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

	1999	2007	2012	2013	2015	2018
PRAL		23.273.642	17.103.677		14.033.502	10.905.394
Milano	1.460.897		631.546		443.540	319.512
Monzese				1.175.833	965.050	768.752
Pavese					408.507	339.571

Tabella 19. Sintesi numerica delle superficie di coperture in cemento amianto (in m²), mappati nelle diverse aree e nelle diverse annualità disponibili.

Focalizzando la sintesi relativamente all'ultima annualità di aggiornamento della mappatura disponibile (2018), sul totale delle quattro aree di mappatura disponibili, risultano 22385 poligoni residui con coperture in cemento amianto mappati, per una superficie complessiva totale di circa 12,33 Km².

Rispetto alla precedente annualità di aggiornamento disponibile sul totale dell'area (2015), in cui risultavano 28765 poligoni residui con coperture in cemento amianto mappati, per una superficie complessiva totale di circa 15,85 Km²; nel triennio 2015-2018 risulta quindi una diminuzione complessiva nell'ultimo triennio della superficie totale delle coperture del 22,2 %.

La seguente tabella riassume più nel dettaglio queste considerazioni sulle variazioni 2015-2018, disaggregate anche nelle diverse aree di mappatura.

AREA mappatura	Superfici in cemento-amianto (m2)		Variazione percentuale delle coperture
	2015	2018	
PRAL	14.033.502	10.905.394	-22,3%
Milano	443.540	319.512	-28,0%
Monzese	965.050	768.752	-20,3%
Pavese	408.507	339.571	-16,9%
TOTALE	15.850.599	12.333.229	-22,2%

Tabella 20. Sintesi numerica delle superficie di coperture in cemento amianto (in m²) mappati nel 2015 e 2018 nelle diverse aree e indicazione della variazione riscontrata nel triennio 2015-2018.

Rispetto all'areale più ampio della mappatura del PRAL, che quindi traina le statistiche complessive, si evidenzia un tasso di variazione, nel periodo 2015-2018, più rapido nell'area di Milano (anche se su superfici residue minoritarie), mentre si evidenziano tassi di rimozione tendenzialmente più lenti nelle coperture residue nelle aree del Monzese e del Pavese.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

6.1.3 Focus sui cambiamenti 2015-2018: classi di uso del suolo DUSAF e aree dismesse

Al fine di fornire un approfondimento relativamente alle transizioni riscontrate nel periodo 2015-2018, è possibile effettuare una analisi rispetto alla cartografia di uso del suolo regionale, attraverso una intersezione fra le mappature delle coperture 2015-2018 e l'uso del suolo DUSAF.

La seguente tabella deriva dall'incrocio tematico dei poligoni di tutte le mappature disponibili (per gli aggiornamenti del 2015 e del 2018), rispetto alla cartografia di uso del suolo DUSAF. Tale elaborazione è funzionale ad approfondire la probabile differente velocità di rimozione in diversi contesti territoriali di uso del suolo.

Sottoclasse DUSAF		Sup. CA 2015	Sup. CA 2018	%	var % 15-18
1111	Tessuto residenziale denso	107.040	81.632	0,66%	-24%
1112	Tessuto residenziale continuo mediamente denso	452.983	340.003	2,76%	-25%
1121	Tessuto residenziale discontinuo	1.578.752	1.238.416	10,04%	-22%
1122	Tessuto residenziale rado e nucleiforme	169.237	133.844	1,09%	-21%
1123	Tessuto residenziale sparso	36.647	30.929	0,25%	-16%
11231	Cascine	135.014	121.987	0,99%	-10%
12111	Insedimenti industriali, artigianali, commerciali	11.365.390	8.678.570	70,37%	-24%
12112	Insedimenti produttivi agricoli	762.786	678.611	5,50%	-11%
12121	Insedimenti ospedalieri	9.728	7.169	0,06%	-26%
12122	Impianti di servizi pubblici e privati	109.572	79.218	0,64%	-28%
12123	Impianti tecnologici	8.302	7.767	0,06%	-6%
12124	Cimiteri	14.076	10.630	0,09%	-24%
12125	Aree militari obliterate	23.858	8.335	0,07%	-65%
1221	Reti stradali e spazi accessori	3.126	2.413	0,02%	-23%
1222	Reti ferroviarie e spazi accessori	31.503	28.057	0,23%	-11%
124	Aeroporti ed eliporti	609	609	0,00%	0%
131	Cave	15.420	12.413	0,10%	-20%
133	Cantieri	8.477	7.525	0,06%	-11%
134	Aree degradate non utilizzate e non vegetate	4.993	4.437	0,04%	-11%
(vuoto)		1.013.087	860.664	6,98%	-15%
Totale complessivo		15.850.600	12.333.230	100,00%	-22%

Tabella 21. Tabella risultante dall'incrocio tematico fra le mappature delle coperture 2015 e 2018 e della cartografia regionale di uso del suolo DUSAF, limitatamente alle sottoclassi di uso del suolo urbanizzato.

In prima analisi, va sottolineato che la maggior parte (70,37 %) di poligoni di cemento amianto ricade ovviamente nella sottoclasse di uso del suolo DUSAF 1.2.1.1.1 (Insedimenti industriali, artigianali, commerciali), seguita dalle diverse classi di urbanizzato di tipo residenziale, e le altre classi di uso del suolo "urbanizzato", statisticamente molto meno rappresentate.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Nonostante questa differenziazione sulla rappresentatività statistica delle diverse classi di uso del suolo, è possibile evidenziare differenze nei tassi di variazione, rispetto alla situazione media osservata nel periodo 2015-2018 (- 22 % di superfici di coperture in cemento amianto).

Se da un lato all'interno della classe più rappresentata "insediamenti industriali" il tasso di variazione appare leggermente più alto (- 24%) rispetto alla media, si evidenzia in particolare un tendenziale minor tasso di riduzione delle coperture in cemento-amianto all'interno di alcune classi di uso del suolo, come in particolare le cascine (solo - 10%), gli insediamenti produttivi di tipo agricolo (- 11%) e le aree degradate e non vegetate (- 11 %). Si evidenziano quindi tipologie di territori e di classi di uso del suolo dove i tassi di rimozione sono tendenzialmente più lenti.

A corredo di queste valutazioni, si riporta anche una analoga intersezione delle mappature delle coperture 2015-2018 rispetto alla localizzazione delle aree dismesse censite, reperibili dal Geoportale della Regione Lombardia. Analogamente al caso precedente, quindi, è stata valutata la localizzazione delle coperture in cemento amianto all'interno dei poligoni delle aree dismesse, e la loro eventuale rimozione nell'ultimo triennio 2015-2018.



Figura 38. Esempio dell'analisi di confronto fra mappatura delle coperture in cemento amianto all'interno dei poligoni delle aree dismesse; l'esempio è riferito all'area dismessa "ex-cartiera Vita Mayer – Cairate (VA)" (poligono giallo), in cui le coperture risultano ancora in posto nel 2018.

La sintesi statistica di questo confronto relativamente alle coperture nelle aree dismesse è riportata nella tabella seguente.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

CA in aree dismesse		
	n° poligoni	sup (mq)
2015	390	319.993
2018	319	290.283
		-9,3%

Tabella 22. Sintesi del confronto fra mappatura 2015 e 2018 all'interno dei poligoni delle aree dismesse censite nel Geoportale.

I poligoni con copertura in cemento amianto mappati nel 2015 all'interno delle aree dismesse risultavano 390, diminuiti al numero di 319 nel 2018, per una riduzione areale del solo 9%.

Anche in questo caso, seppur su un campione statistico ridotto, appare un netto minor tasso di rimozione delle coperture residue all'interno delle aree dismesse, rispetto alla situazione media.

Si evidenziano quindi specifiche classi di uso del suolo o tipologie di territori "meno attrattivi" per la rimozione delle coperture residue, e questo aspetto ha potenzialmente un peso rispetto alla formulazione degli scenari attesi futuri.

6.1.4 Aggiornamento delle stime a scala regionale

In questo paragrafo, vengono riassunte alcune elaborazioni e valutazioni volte all'aggiornamento delle stime delle coperture residue a scala regionale, sulla base delle informazioni aggiornate sui territori delle mappature disponibili. Tale tipo di valutazioni furono introdotte, nell'ambito del PRAL, in particolare al fine di stimare i quantitativi sul totale regionale, e per ricavare input informativi a supporto della pianificazione delle attività di bonifica e di conferimento del materiale da smaltire e quindi anche del dimensionamento delle discariche necessarie.

In questa fase è quindi possibile aggiornare tali valutazioni, sulla base dell'ulteriore estensione dei territori mappati, e del loro aggiornamento temporale.

Dal punto di vista metodologico, è stato utilizzato lo stesso approccio di analisi proxy, basato sulla relazione statistica, a scala comunale, fra superfici delle coperture in cemento amianto mappate e superficie urbanizzata comunale.

È stata quindi effettuata l'analisi in ambiente GIS, aggregando, nei territori dei Comuni mappati completamente (235 Comuni) la mappatura delle coperture, intersecandola con la cartografia regionale DUSAF (selezionando le sottoclassi relative al tessuto urbanizzato 1.x, escludendo le classi 1.4 relative alle aree verdi urbane).

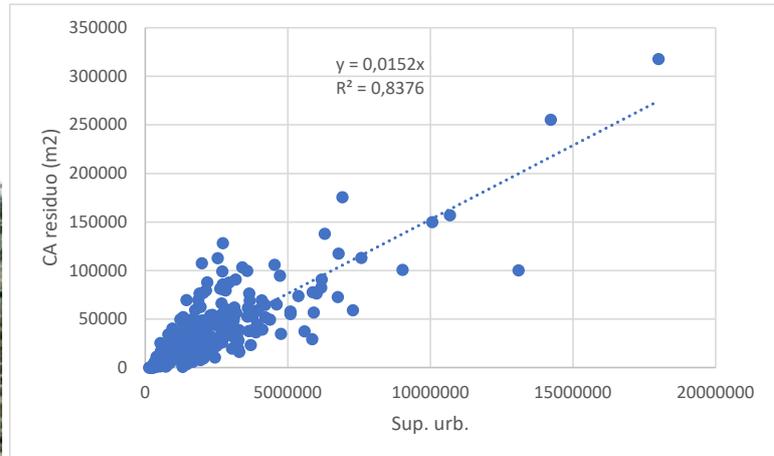


Figura 39. Localizzazione dei 235 Comuni che risultano completamente mappati, e analisi della correlazione statistica fra superficie urbanizzata comunale e superficie totale delle coperture in cemento amianto mappate nel Comune.

Sui 235 Comuni oggetto di tale analisi, è possibile quindi individuare la relazione statistica individuata fra superficie totale delle classi di uso del suolo urbanizzato e superfici totali delle coperture in cemento amianto a scala comunale.

L'estrapolazione delle stime a scala regionale sfrutta quindi l'applicazione di questa relazione statistica ai Comuni non mappati.

Nel dettaglio, quindi, relativamente alla stima delle coperture residue relativamente all'ultima annualità di mappatura disponibile (2018), la stima complessiva deriva dalla somma delle superfici residue mappate direttamente (per i 235 comuni mappati completamente), e della stima delle superfici "attese" nei Comuni non mappati (applicando il proxy territoriale individuato).

Sul totale regionale, sulla base di questo approccio, si stima al 2018 un totale di circa 40,57 Km² di coperture in cemento amianto residuo. Applicando il coefficiente di conversione utilizzato nel PRAL (30 m²/m³) tali superfici sommano a circa 1,35 Milioni di m³.

Con lo stesso approccio di analisi proxy, è possibile inoltre aggiornare i quantitativi residui anche relativamente alle annualità precedenti, al fine di derivare i trend osservabili nel passato.

Più nel dettaglio, poiché come descritto precedentemente solo per il 2015 e per il 2018 è disponibile la mappatura su tutte le quattro aree disponibili, mentre per le annualità precedenti esistono momenti di mappatura leggermente differenti nelle diverse aree, è stato applicato il seguente approccio:

- per 2015 e 2018, la stima deriva dalla somma dei quantitativi cartografati nelle quattro aree mappate e dalla estrapolazione, col proxy "aree urbanizzate", nelle aree non mappate;
- per 2012 e 2007 è stata effettuata una retrodatazione sulla base di tassi di variazione osservati nell'area PRAL (assolutamente predominante come superfici totali), fissando il 100% ai valori mappati nel 2018. In questo modo si ovvia al fatto che per le tre aree più piccole "Milano", "Monzese" e "Pavese" non si dispone della mappatura nelle annualità più antiche.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

La seguente tabella e figura riassume quindi le stime a scala regionale dei quantitativi stimati di coperture residue nelle diverse annualità disponibili.

	2007	2012	2015	2018
Stima coperture residue (Km ²)	86,6	63,6	52,3	40,6
Stima coperture residue (Mm ³)	2,89	2,12	1,74	1,35

Tabella 23. Andamento dei quantitativi residui delle coperture in cemento amianto stimate sul totale del territorio regionale, indicate in termini di superficie e di volume (applicando il coefficiente PRAL di 30 m²/m³)

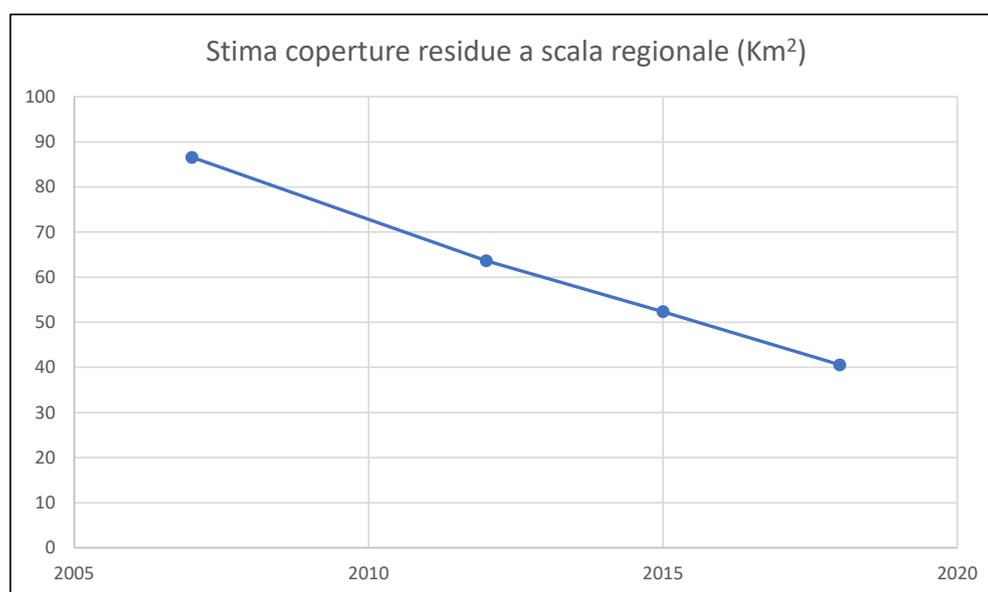


Figura 40. Andamento dei quantitativi residui delle coperture in cemento amianto stimate sul totale del territorio regionale, indicate in termini di superficie.

6.1.5 Scenario futuro delle coperture residue a scala regionale

Sulla base dell'estrapolazione a scala regionale della stima delle coperture in cemento amianto residue, e della loro variabilità nelle diverse annualità di mappatura disponibili, è possibile quindi aggiornare lo scenario atteso della diminuzione complessiva delle coperture residue a scala regionale. La valutazione qui descritta è relativa quindi all'input derivante dalle mappature risultanti dalla Fase 1 del Progetto (ovvero le quattro mappature originarie aggiornate fino al 2018), che si ritiene di presentare per omogeneità e continuità con analoghe elaborazioni precedenti; l'ulteriore valutazione aggiornata, derivante anche dall'integrazione dell'estensione della mappatura 2020 su ulteriori nuovi territori, verrà poi descritta nel successivo paragrafo 6.2.4.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Sulla base dei dati disponibili e con gli approcci di stima descritti, il seguente grafico riassume lo scenario stimato di progressiva diminuzione e azzeramento delle coperture in cemento amianto a scala regionale.

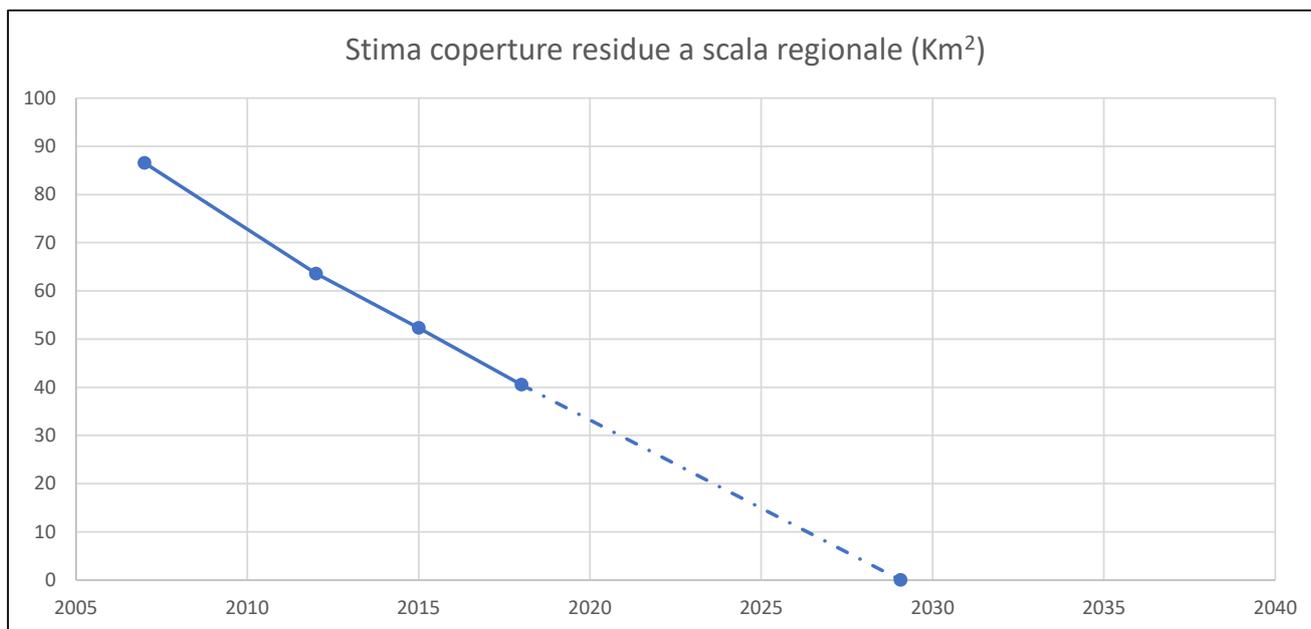


Figura 41. Scenario futuro di progressiva diminuzione delle coperture in cemento amianto a livello regionale; vengono riportati i dati stimati osservati nelle annualità di mappatura 2007, 2012, 2015 e 2018 e lo scenario lineare futuro, basato sull'extrapolazione dei tassi di rimozione osservati nell'ultimo periodo 2015-2018.

In particolare, lo scenario applicato considera un tasso futuro di rimozione delle coperture analogo a quello osservato nell'ultimo triennio disponibili (2015-2018).

Sulla base di questo approccio, la data in cui la proiezione raggiunge lo zero risulta essere successivo all'anno 2029.

Naturalmente, va precisato che si tratta di una proiezione tendenziale affetta da, oltre che numerose incertezze iniziali legate all'extrapolazione a scala regionale, anche su diversi assunti futuri, innanzitutto sull'assunzione che i tassi di rimozione futuri possano essere analoghi a quelli osservati nel periodo 2015-2018; in particolare non è possibile quantificare effetti di ulteriore variazione nei tassi di rimozione (attuali e futuri) dovuti a cause come la crisi economiche, gli impatti dell'emergenza Covid, o altri effetti «territoriali» che possono assumere importanza differenziata anche a livello territoriale.

In generale, inoltre, va ricordato che la stima è sicuramente «cautelativa» (ovvero va inteso come possibile azzeramento delle coperture «non prima» del 2029), a causa di diversi fattori insiti nella mappatura (tendenziale sottostima delle aree mappate a causa di limiti dell'osservabilità delle superfici più piccole, del fatto che la mappatura individua la proiezione in pianta dei tetti, della non osservabilità di amianto oggetto di sovracoperture, ecc..).

Inoltre, va considerato che lo scenario di progressiva riduzione «lineare» non considera effetti di probabile ulteriore rallentamento di tipo «territoriale», come quelli descritti nel paragrafo 6.1.3: si fa

riferimento in particolare al caso di coperture in specifici contesti, come in aree marginali o dismesse, o comunque in aree che risultano poco appetibili per investimenti di rimozione e riqualificazione, ecc.. La combinazione di tali tipi di effetti di rallentamento è visualizzata in maniera qualitativa nel grafico seguente.

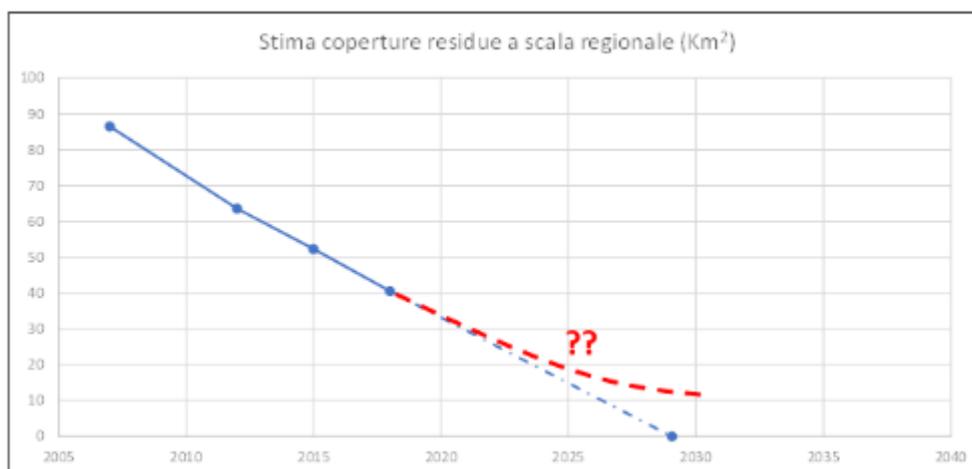


Figura 42. Rappresentazione qualitativa del possibile effetto futuro di possibile rallentamento della progressiva riduzione delle coperture residue, rispetto al trend osservato nel periodo 2015-2018.

6.1.6 Confronto con dati MUD

In continuità con analoghe elaborazioni effettuate nel passato relativamente alle precedenti annualità di aggiornamento della mappatura, si propone l'aggiornamento del confronto con la produzione di rifiuti contenenti amianto, derivabili dai dati annuali estratti dal MUD.

Tali dati, forniti dal Settore APC, Osservatorio Rifiuti, sono relativi alla produzione annua complessiva a scala regionale dei rifiuti contenenti amianto, sulla serie storica dal 2006 al 2018; i dati sono suddivisi per CER ed espressi in tonnellate.

DATI IN TONNELLATE								ANNO	CER 170605 (m3)	
TOTALE PER CODICE CER								2006	103.025	
	081304	101309	150111	160111	160212	170801	170805	Totale I	2007	109.415
2006	0,0	0,0	175,1	1,4	31,9	2.083,0	67.996,3	70.288,8	2008	103.338
2007	0,2	0,0	208,1	4,9	6,7	1.743,8	72.213,6	74.177,3	2009	126.733
2008	0,0	0,0	222,9	0,7	2,8	3.345,7	68.202,8	71.774,8	2010	172.194
2009	0,3	0,0	160,8	0,5	1,2	3.220,8	83.644,0	87.017,7	2011	203.306
2010	0,1	0,0	117,0	1,4	13,9	2.804,8	113.648,1	116.585,3	2012	161.111
2011	0,4	0,0	158,9	0,9	15,8	2.536,1	134.181,7	136.893,6	2013	162.586
2012	0,1	0,0	125,9	7,4	28,1	3.600,6	108.333,0	109.996,0	2014	155.767
2013	0,1	0,0	195,6	1,0	25,0	2.088,6	107.306,6	109.617,7	2015	156.349
2014	0,2	0,0	215,1	1,5	27,8	2.238,9	102.806,3	106.290,8	2016	143.330
2015	0,0	0,0	347,0	1,0	20,5	1.703,3	103.190,6	106.262,3	2017	120.015
2016	0,0	0,0	263,9	1,9	11,5	1.397,6	94.597,8	96.272,8	2018	108.193
2017	0,0	380,0	315,1	1,0	267,7	2.838,7	79.309,9	82.812,4		
2018	0,0	842,4	210,5	0,5	22,7	2.874,5	71.407,5	75.158,1		

Figura 43. Tabella relativa alla produzione regionale di rifiuti contenenti amianto; l'amianto compatto è riferito al CER 170605; i dati annuali espressi in tonnellate sono quindi poi convertiti in volume.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Per la conversione da peso a volume dei rifiuti, relativamente al solo CER 170605, è stato utilizzato il coefficiente di trasformazione di 0,66 tonn./m³ (lo stesso utilizzato nelle stime degli anni precedenti, derivante da indicazioni di Gestori di Impianti di Trattamento, per passare da massa di rifiuto a volume “utile” o “lordo” per il corretto smaltimento in discarica).

I dati MUD esprimono quindi i flussi annuali di rifiuti prodotti sul territorio regionale, e si prestano quindi, pur sottolineando le enormi differenze di metodologia di raccolta, di formato e di significato, al confronto con i flussi osservabili dalle diverse annualità di aggiornamento delle mappature (2007-2012-2015-2018).

Allo scopo, quindi sono stati aggregati e confrontati, da un lato le stime di superfici mappate ed estrapolate a scala regionale, e successivamente convertite in volume utilizzando il coefficiente PRAL di 30 m²/m³, e dall'altro, i dati complessivi di rifiuto CER 170605 nei 3 periodi “coevi” alle mappature (ovvero i periodi 2007-2012, 2012-2015, 2015-2018).

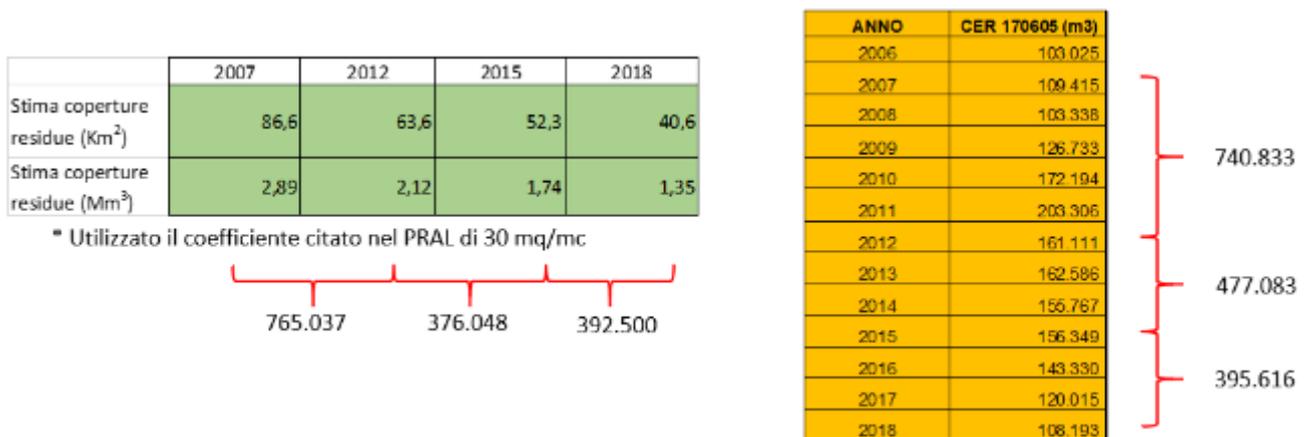


Figura 44. Rappresentazione grafica del processo di confronto fra i flussi di rifiuti contenenti amianto fonte MUD, rispetto al confronto delle diverse mappature, su periodi confrontabili.

Confrontando quindi questi due flussi di dati, pur provenienti da fonti e metodologie di analisi completamente differenti, è possibile osservare una notevole concordanza generale nei quantitativi stimati di amianto rimosso nei diversi periodi disponibili.

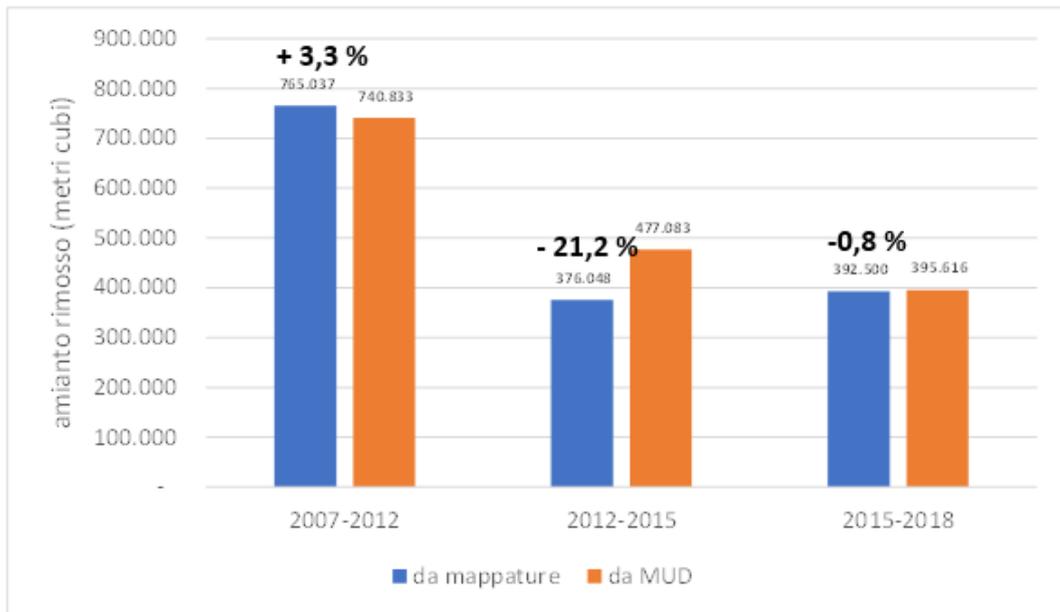


Figura 45. Confronto fra i flussi di rifiuti contenenti amianto fonte MUD, rispetto quelli risultanti dal confronto delle diverse annualità delle mappature (estrapolate a scala regionale), su periodi omogenei e confrontabili.

6.2 Fase 2: estensione della mappatura

Nei prossimi paragrafi vengono riassunti i risultati derivanti dalla Fase 2 del Progetto Amianto, relativa all'estensione della mappatura ad ulteriori territori regionali, effettuata con un nuovo rilievo iperspettrale.

Come descritto nel paragrafo 5, i rilievi aerei oggetto dell'estensione della mappatura sono stati realizzati nel mese di maggio 2020, sui diversi areali previsti, per un totale di 1296 Km².

Le mappature realizzate sono quindi state oggetto di diversi lotti di elaborazione e consegna, ed ai fini dell'analisi complessiva dei risultati, i poligoni oggetto dei diversi areali di mappatura sono stati raggruppati in un unico strato informativo vettoriale.

La figura seguente riassume a scala regionale i diversi areali di mappatura 2020 realizzati, e la copertura dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al loro interno.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

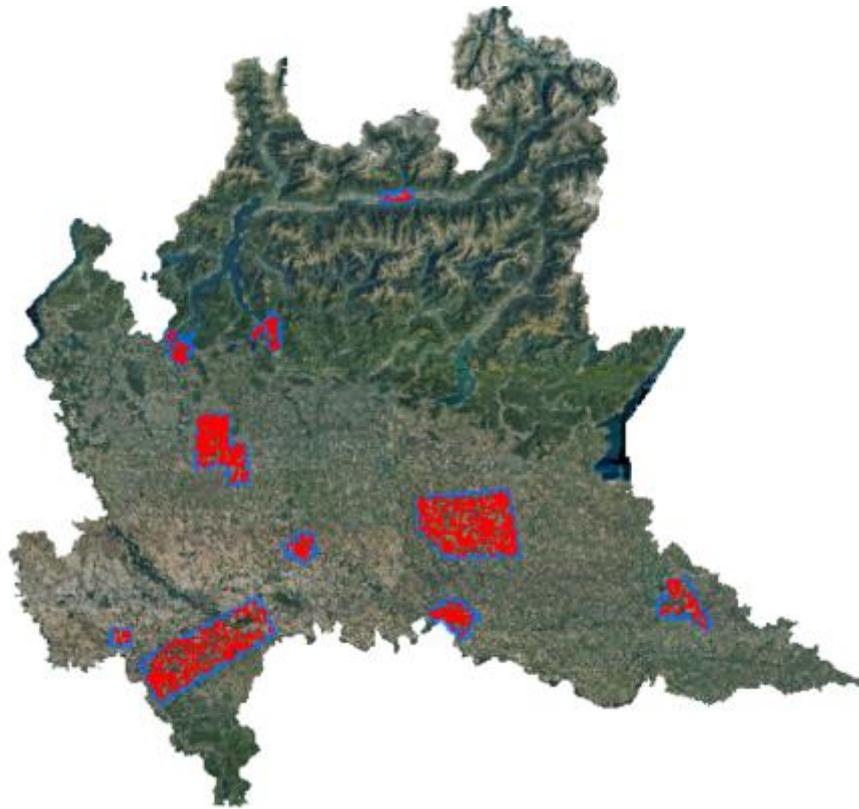


Figura 46. Sintesi a scala regionale dei diversi areali di mappatura 2020 realizzati (poligoni blu), e della copertura dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al loro interno (poligoni rossi).

Sul totale delle aree rilevate nel 2020 (complessivamente di 1296 Km²), sono stati mappati 10903 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 5325463 m².

Nelle immagini seguenti, si riporta una breve rassegna complessiva della mappatura realizzate nei differenti areali di mappatura previsti, con riportati i comuni coinvolti e brevi statistiche riassuntive.

6.2.1 Sintesi delle mappature 2020 nei diversi areali

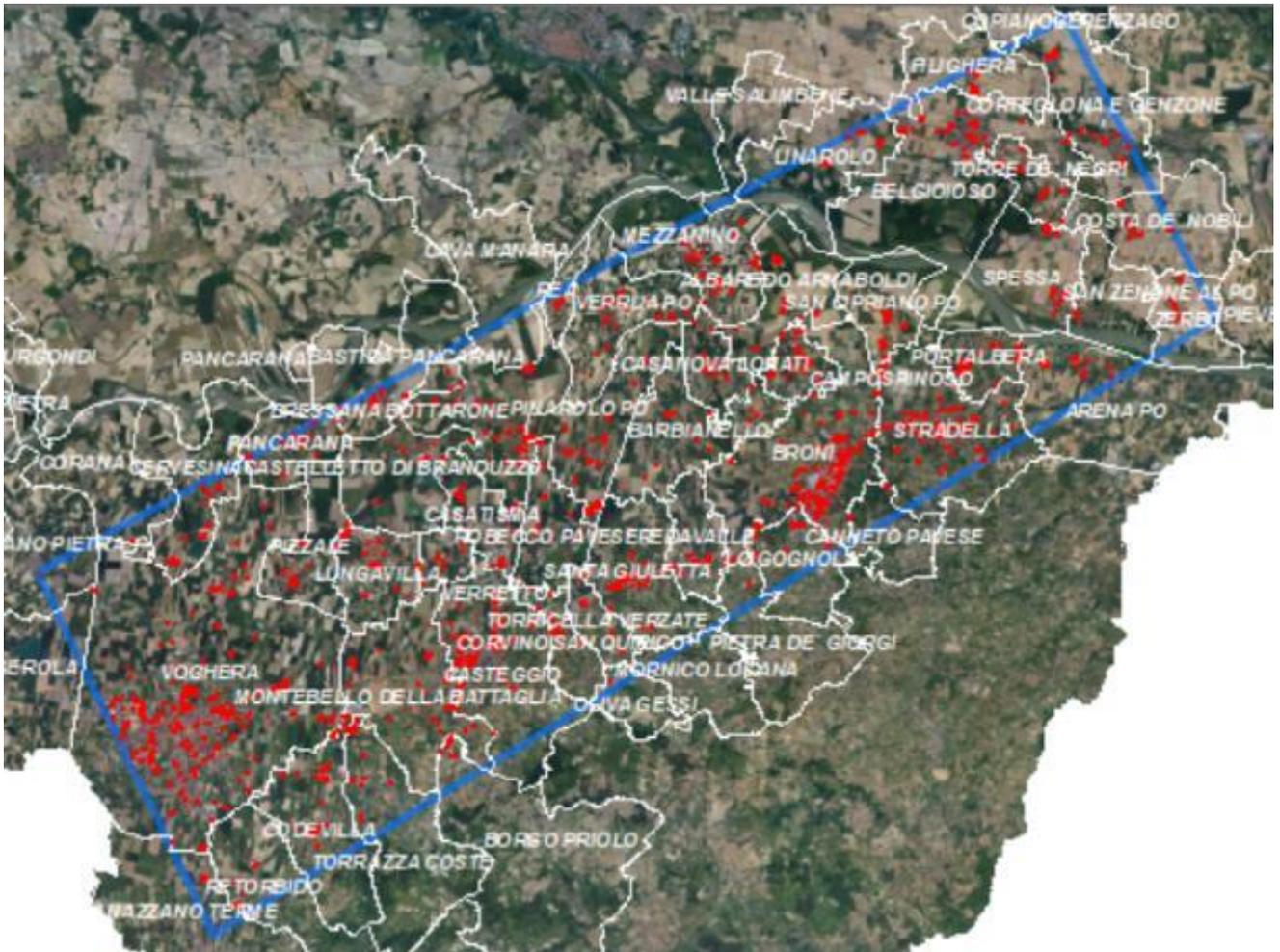


Figura 47. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 “Oltrepò pavese” (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi), con indicazione dei Comuni mappati (completamente o parzialmente).

Nell’area A (Oltrepò pavese) sono stati mappati 2135 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 1114810 m².

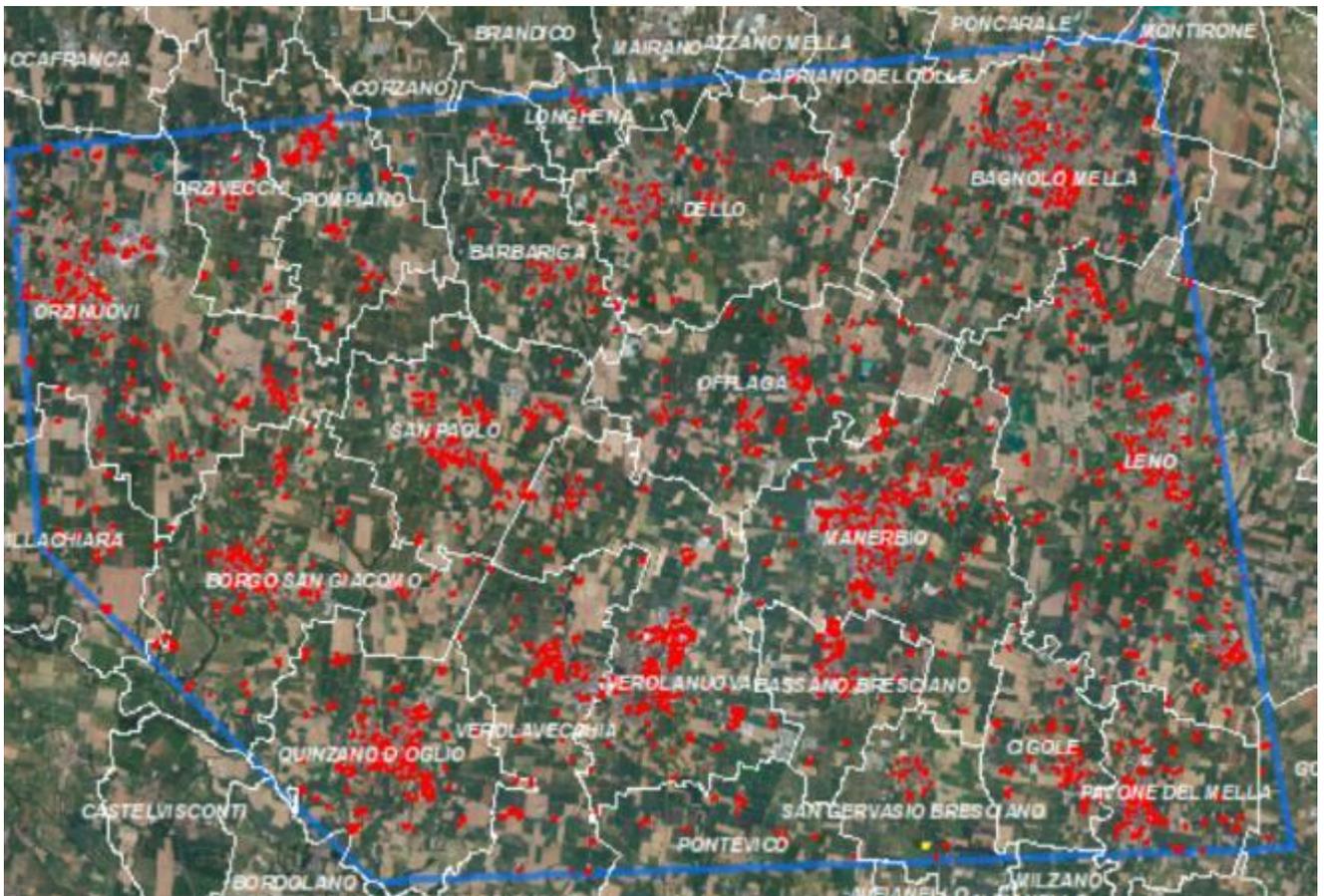


Figura 48. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 “pianura bresciana” (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi), con indicazione dei Comuni mappati (completamente o parzialmente).

Nell’area B (pianura bresciana) sono stati mappati 4521 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 1981052 m².



Figura 49. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 “Nord-Est milanese” (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi), con indicazione dei Comuni mappati (completamente o parzialmente).

Nell’area del Nord-Est milanese sono stati mappati 1853 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 1058888 m².

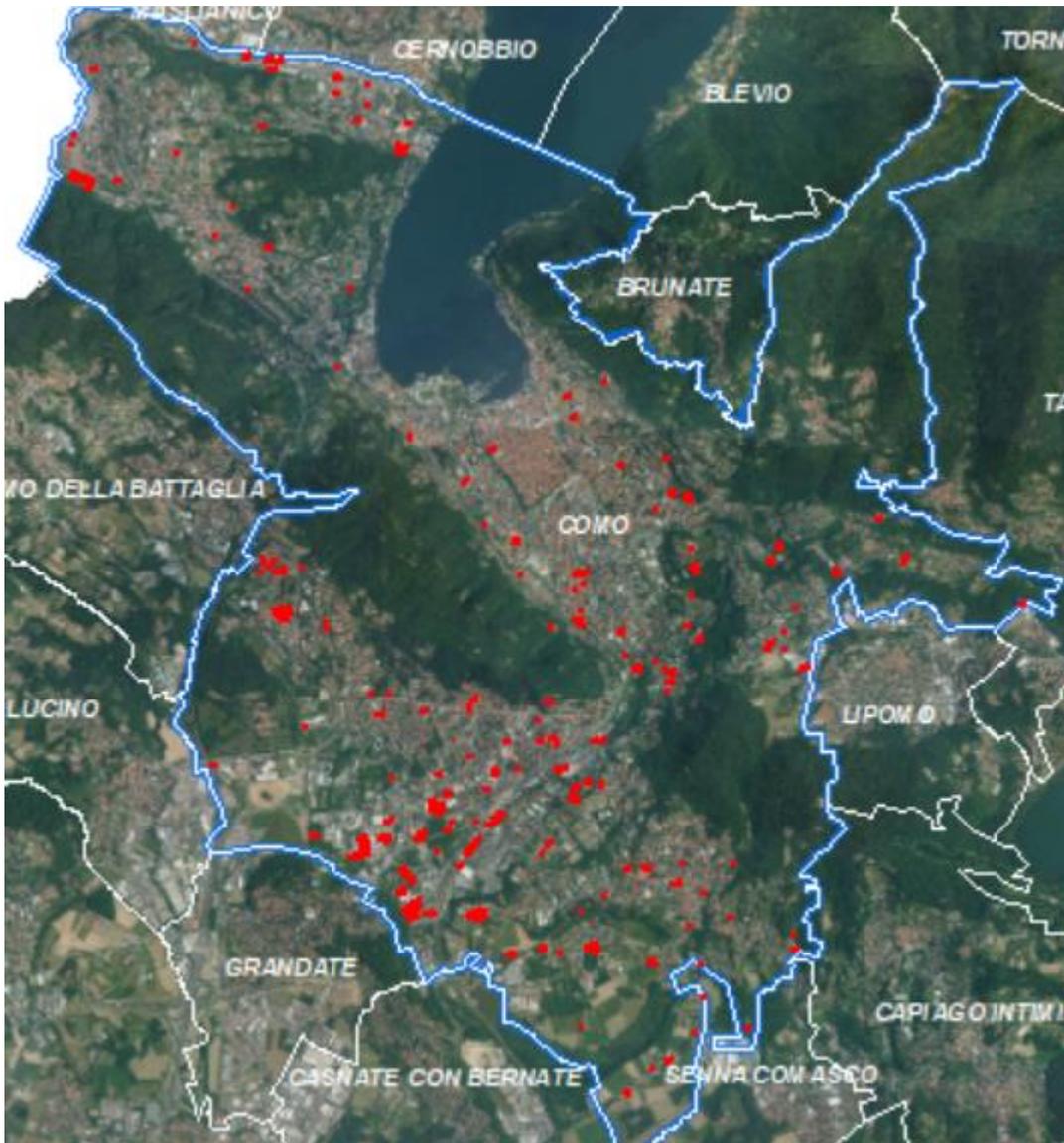


Figura 50. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 “Como capoluogo” (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi).

Nell’area del Comune di Como sono stati mappati 265 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 104027 m².



Figura 51. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 "Cremona capoluogo" (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi).

Nell'area del Comune di Cremona sono stati mappati 674 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 266395 m².

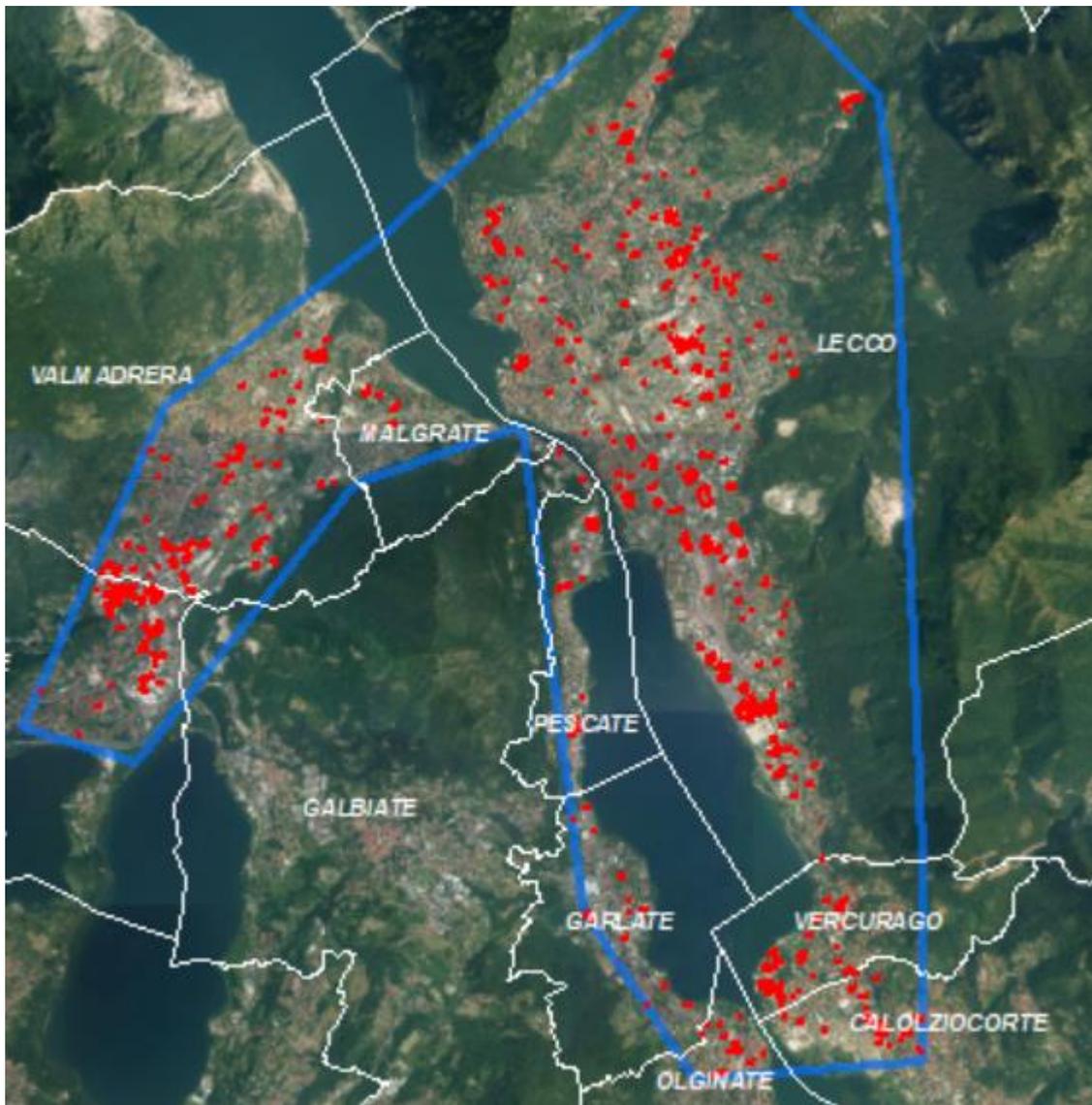


Figura 52. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 "Lecco" (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi), con indicazione dei Comuni mappati (completamente o parzialmente).

Nell'area del Comune di Lecco e Comuni limitrofi sono stati mappati 492 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 272024 m².

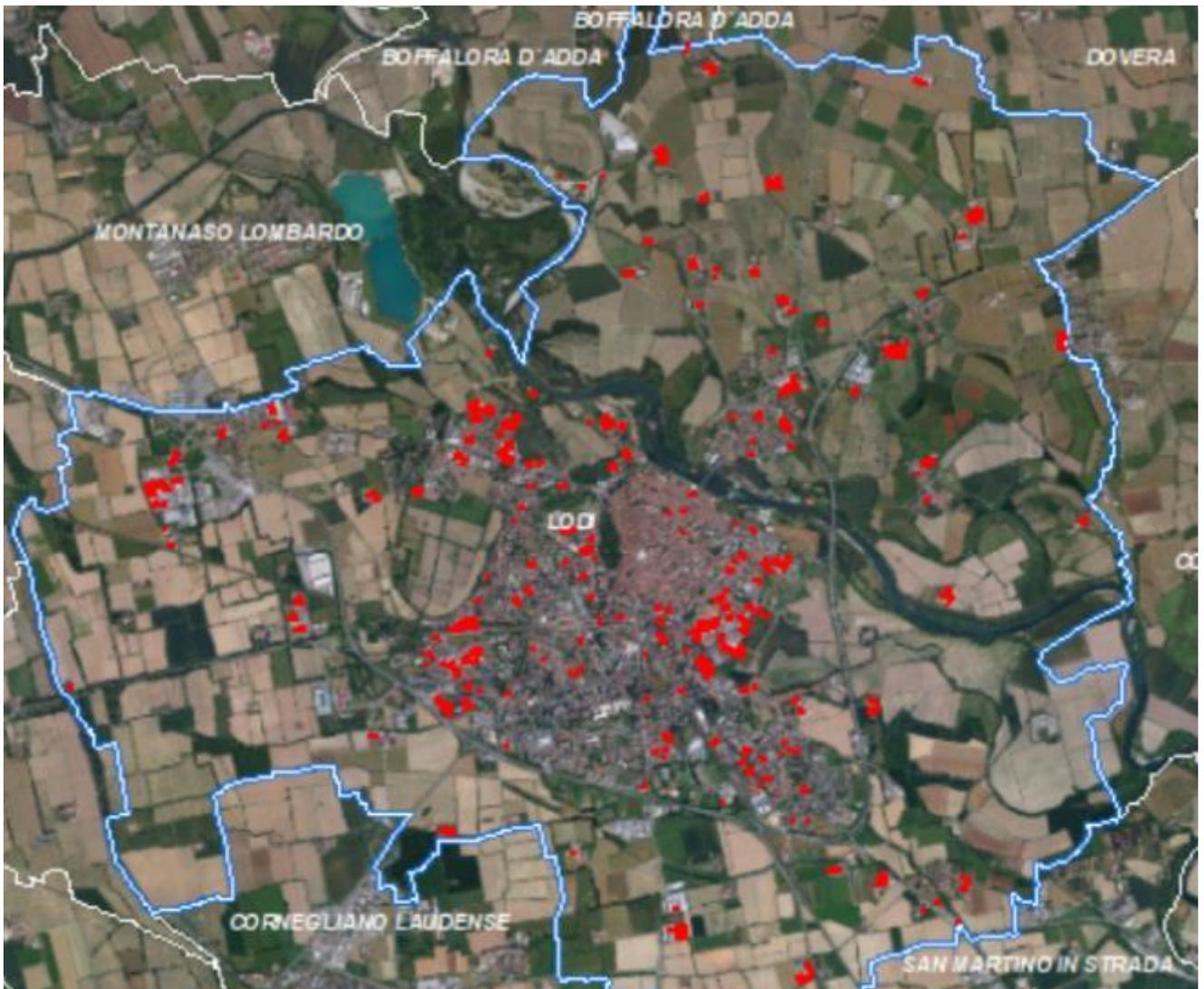


Figura 53. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 "Lodi capoluogo" (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi), con indicazione dei Comuni mappati (completamente o parzialmente).

Nell'area del Comune di Lodi sono stati mappati 351 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 168817 m².

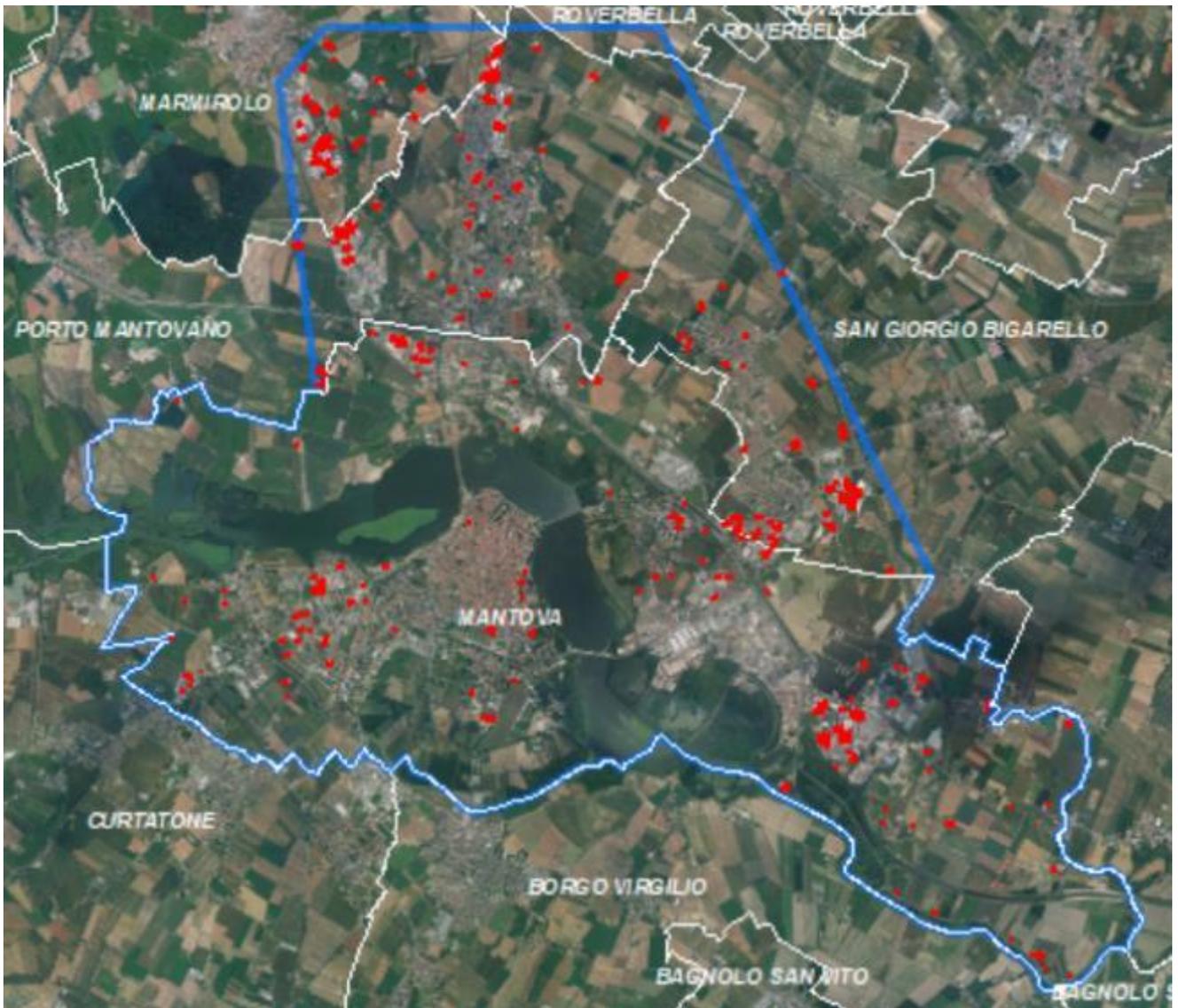


Figura 54. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 "Mantova" (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi), con indicazione dei Comuni mappati (completamente o parzialmente).

Nell'area del Comune di Mantova e Comuni limitrofi sono stati mappati 390 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 281607 m².



Figura 55. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 "Sondrio" (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi), con indicazione dei Comuni mappati (completamente o parzialmente).

Nell'area del Comune di Sondrio e Comuni limitrofi sono stati mappati 62 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 20788 m².

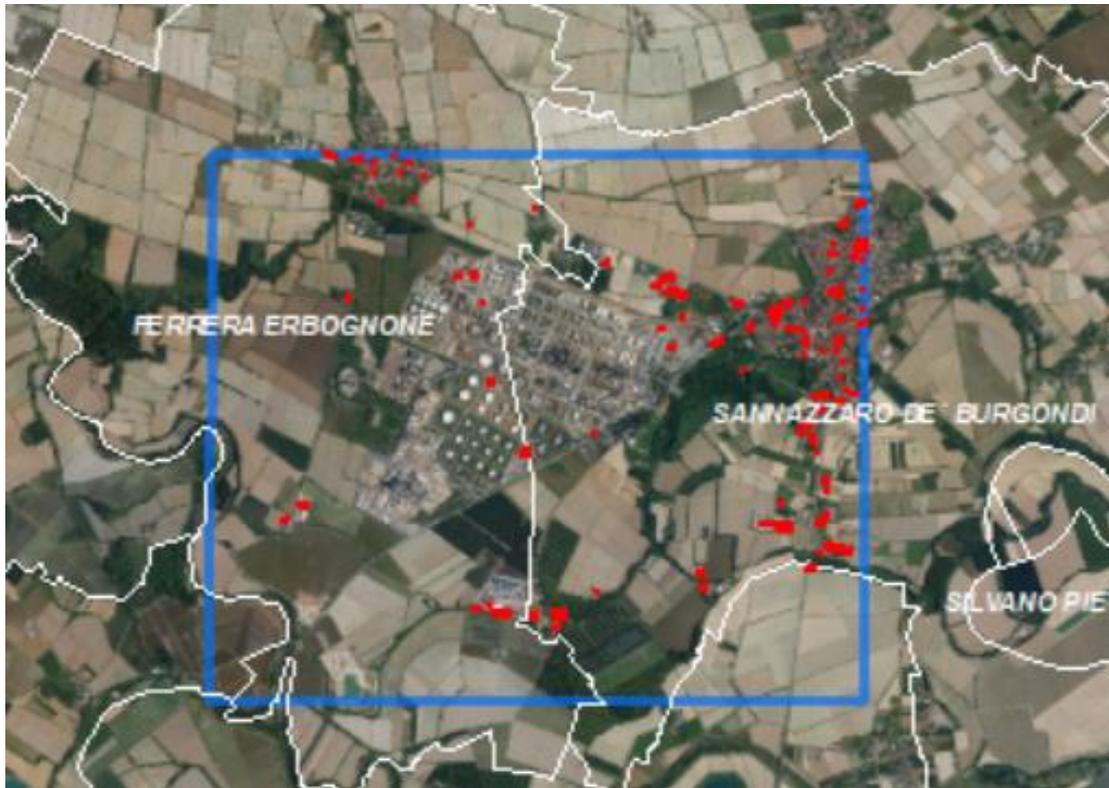


Figura 56. Sintesi, per il poligono di mappatura 2020 “Ferrera” (poligono blu), della localizzazione dei poligoni con coperture in cemento amianto mappati al suo interno (poligoni rossi), con indicazione dei Comuni mappati (completamente o parzialmente).

Nell’area del Comune di Ferrera Erboگونه e Sannazzaro de Burgondi (parziale) sono stati mappati 160 poligoni con copertura in cemento amianto, per una superficie totale di 57049 m².

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

6.2.2 Statistiche dimensionali sui poligoni mappati

Sulla base dell'unione delle diverse mappature 2020 riferite ai diversi areali in un unico strato informativo vettoriale, è possibile derivare l'analisi statistica dimensionale dei poligoni delle coperture mappate.

Nel grafico seguente, si riportano le curve percentuali cumulate, riferite a classi dimensionali prefissate (in m²), riferito al conteggio assoluto dei poligoni e della loro superficie.

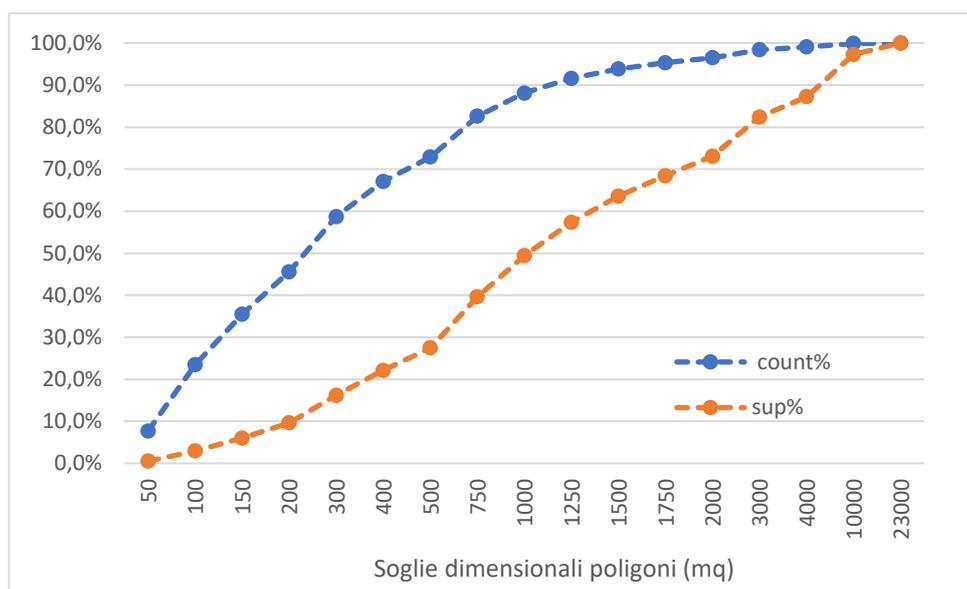


Figura 57. Rappresentazione dell'andamento delle curve percentuali riferite ai poligoni della mappatura, per classi dimensionali: viene riportato l'andamento riferito al conteggio dei poligoni e alla loro superficie.

Dal confronto delle due curve emergono in sintesi i seguenti dati statistici:

- il valore mediano della superficie dei poligoni mappati è di poco superiore ai 200 m² (226 m² per la precisione), anche se in termini complessivi il "peso" relativo dei poligoni più ampi sposta la distribuzione della curva riferita alle superfici più verso i valori più alti (ad esempio, per raggiungere il 50% della superficie totale mappata, occorre sommare tutti i poligoni inferiori a circa 1000 m², ovvero quasi il 90% del totale dei poligoni).
- un numero significativo di poligoni mappati ha dimensioni tutto sommato ridotte (ad esempio, circa il 23% dei poligoni mappati ha dimensioni inferiori ai 100 m²).

Queste considerazioni, confrontate ad esempio con le analoghe valutazioni dimensionali dei poligoni mappati nel PRAL (in cui ad esempio il valore mediano complessivo dei poligoni era di 421 m²), evidenzia la tendenziale migliore capacità della nuova mappatura di individuare coperture di estensione inferiore rispetto al passato. Naturalmente in questa considerazione va anche tenuto presente che la nuova metodologia prevede in aggiunta anche il riporto della mappatura sui poligoni del DB Topografico, quindi la valutazione non è del tutto comparabile anche per questo motivo.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

6.2.3 Confronti fra superfici stimate al 2018 e mappate nel 2020 su areali specifici

Disponendo della nuova mappatura delle coperture in cemento amianto aggiornata al 2020, è possibile innanzitutto effettuare alcune valutazioni di confronto rispetto alle stime precedenti sulle coperture “attese” nelle aree non coperte dalle mappature precedenti (Fase 1 del progetto). La situazione generale è riassunta nella figura seguente.

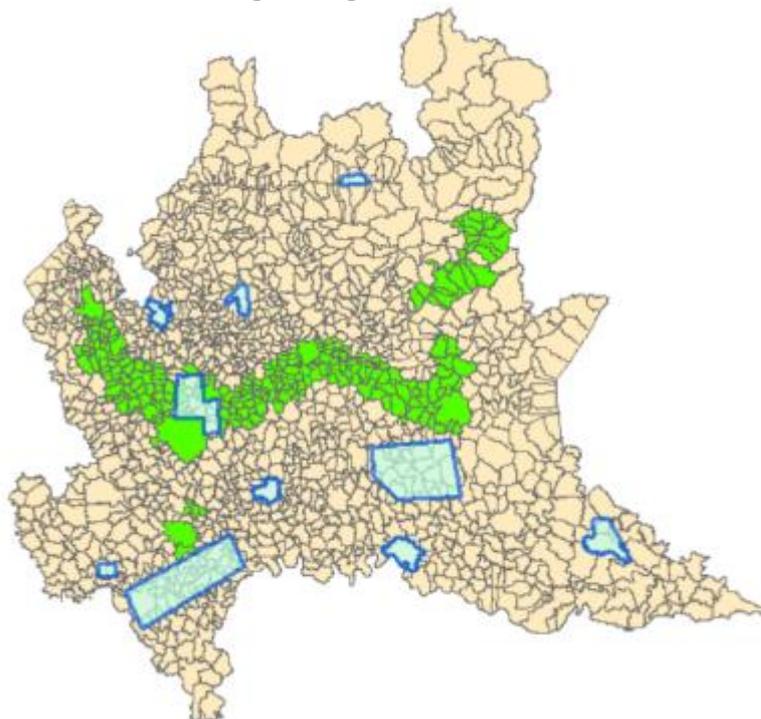


Figura 58. Sintesi a scala regionale dei dati disponibili relativamente alle mappature in cemento amianto: i Comuni in verde sono le aree oggetto delle mappature precedenti, in cui quindi si dispone della mappatura, aggiornata al 2018, e le relative aggregazioni del dato mappato a scala comunale; i poligoni ocra sono i Comuni che non erano stati oggetto di alcuna mappatura precedente, sui quali è stata applicata la stima, sulla base del proxy urbanizzazione, delle coperture in cemento amianto-atteso riferita al 2018; i poligoni celeste con bordo blu sono gli areali della nuova mappatura aggiornata al 2020.

Sulla base della mappatura delle coperture aggiornata al 2020, i dati sono quindi stati aggregati su base comunale.

I comuni interessati totalmente o parzialmente dalle mappature 2020 sono in totale 123, e 54 di questi risultano mappati al 100%.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

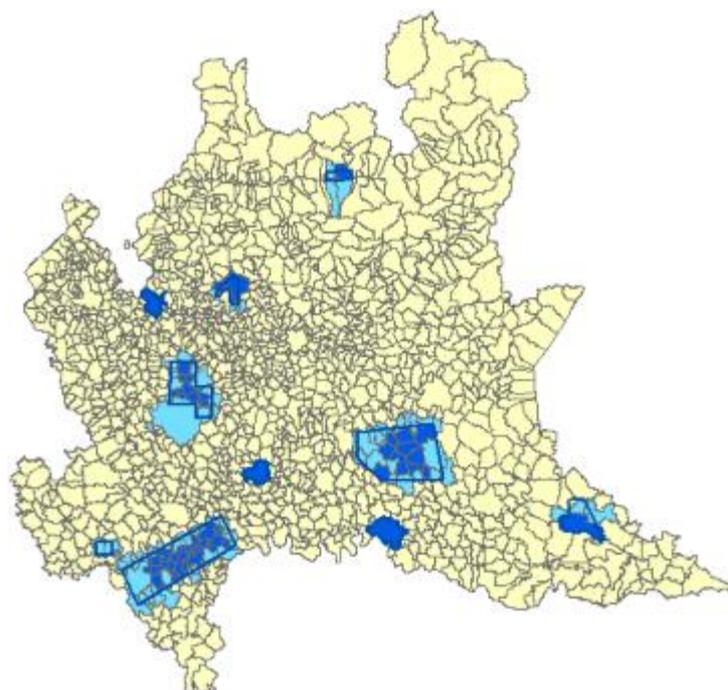


Figura 59. Risultato dell'aggregazione a livello comunale dei dati della mappatura 2020: i Comuni azzurri sono mappati solo parzialmente, i Comuni blu (54) sono mappati completamente.

Le analisi di confronto successive sono quindi basate, per non introdurre incertezze non controllabili adeguatamente, solo sui 54 Comuni mappati completamente, che comunque risultano ben distribuiti e rappresentativi di situazioni territoriali molto differenziate, essendo localizzati nella pianura bresciana (24), nell'Oltrepò pavese (10), nel Nord-Est milanese (10), o essendo capoluoghi di provincia o Comuni con essi immediatamente confinanti (10).

Il confronto, su base comunale, fra le stime delle coperture stimate "attese" al 2018, sulla base dei dati delle mappature precedenti e loro estrapolazione, e le superfici effettivamente mappate nel 2020 è riassunto nei grafici seguenti.

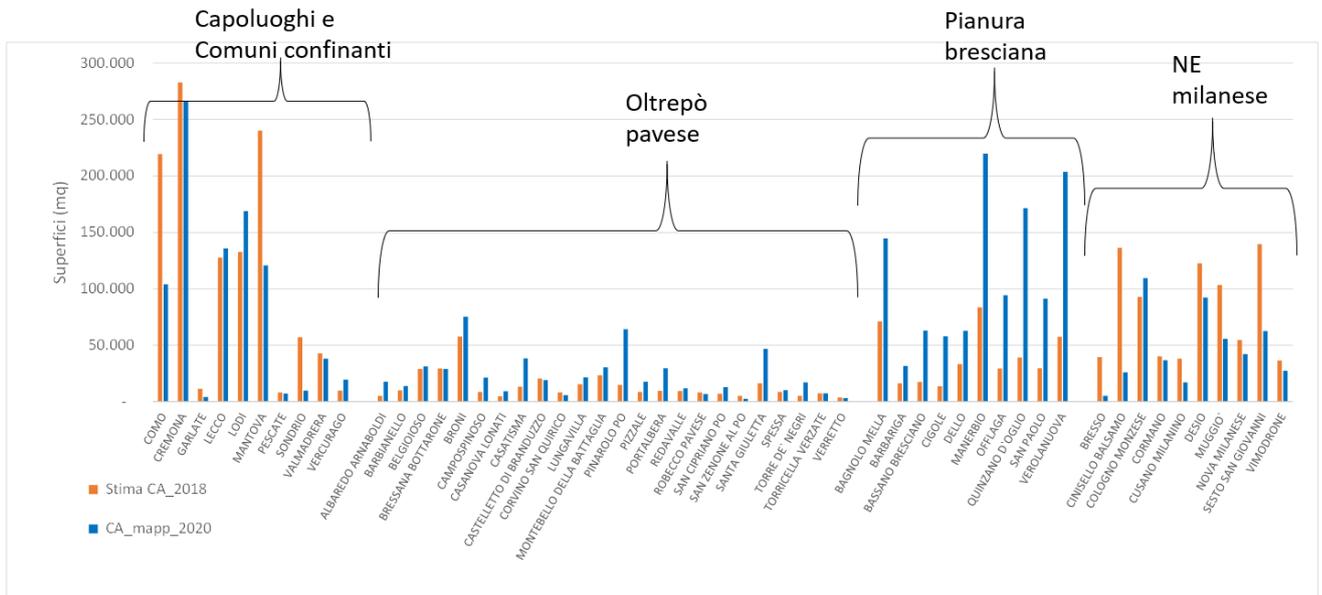


Figura 60. Confronto fra superfici mappate del 2020 (istogramma blu) e superfici “attese” stimate, riferite al 2018, ricavate dalle estrapolazioni sulla base delle mappature 2018 (istogramma arancione); sono riportati i 54 Comuni mappati completamente nel 2020, aggregati per macro aree differenziate.

La figura precedente riassume il confronto quantitativo, attraverso le due serie di istogrammi, fra le superfici di coperture in cemento amianto stimate al 2018 (sulla base del metodo di estrapolazione basato sulle mappature della fase1) e le superfici effettivamente rilevate nel 2020 sulla base della nuova mappatura. I gruppi di Comuni (i 54 Comuni mappati completamente nel 2020) sono raggruppati per specifico areale.

Le due stesse serie di dati sono inoltre rappresentate anche nel diagramma seguente, rappresentando i dati in un grafico a dispersione (sempre mantenendo differenziati i diversi areali).

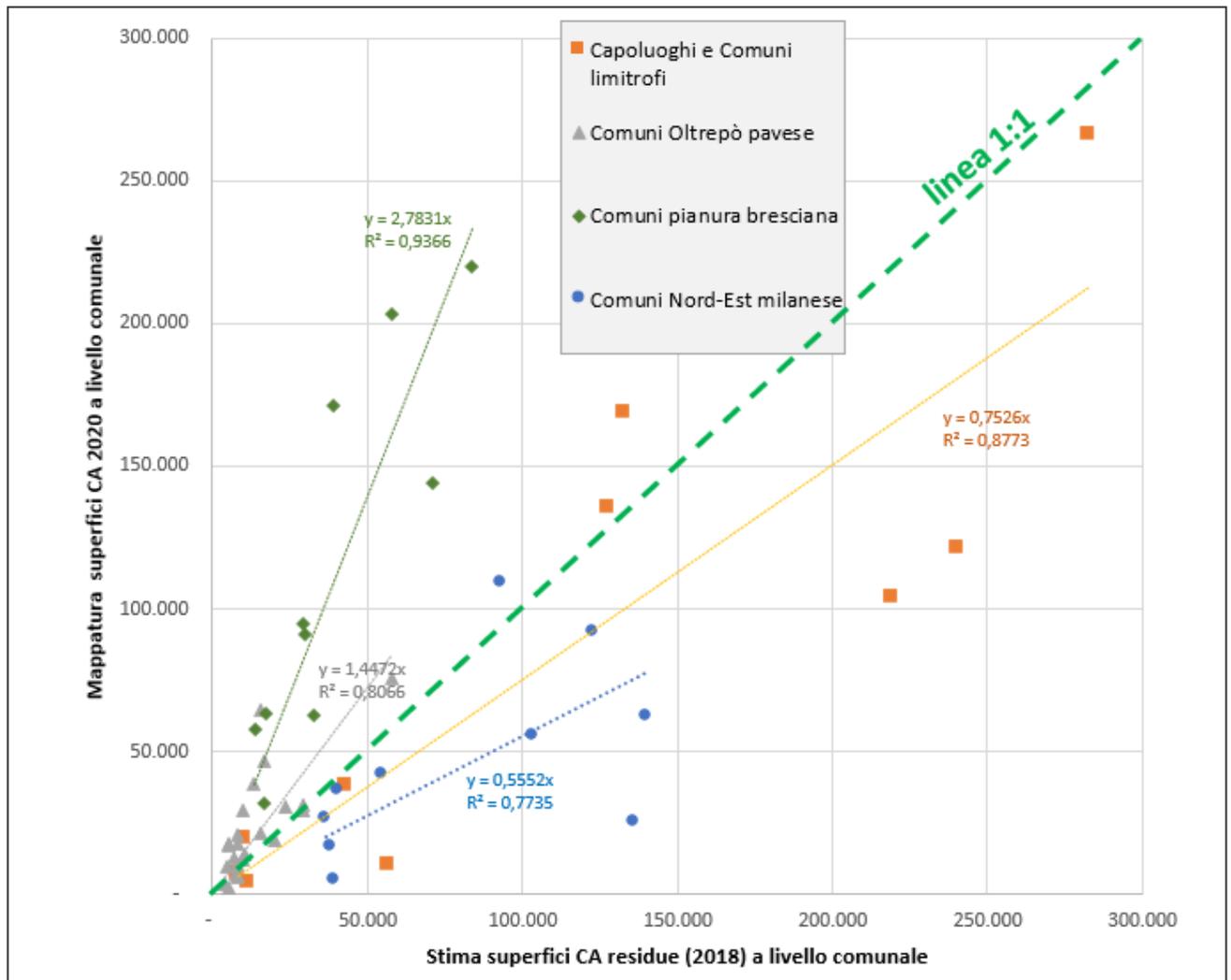


Figura 61. Confronto tramite diagramma a dispersione fra le superfici mappate del 2020 e le superfici “attese” stimate, riferite al 2018, ricavate dalle estrapolazioni sulla base delle mappature 2018; sono riportati i 54 Comuni mappati completamente nel 2020, disaggregate in serie separate di cui si riportano i parametri statistici; viene inoltre riportata in grafico la linea teorica 1:1

In generale, considerando l'estrema variabilità territoriale, le differenze di metodologia (superfici stimate con proxy territoriale rispetto a mappatura effettiva), le differenze insite nelle differenti mappature aeree considerate, e ovviamente anche il delta temporale del biennio 2018-2020, la concordanza nelle due serie di dati appare buona. I principali “driver” nella distribuzione sono rappresentati dall'estensione territoriale dei singoli Comuni e dal loro grado di urbanizzazione, oltre che dalla tipologia del tessuto antropizzato.

In alcuni contesti territoriali, le superfici mappate nel 2020 risultano significativamente più alte rispetto allo stimato atteso. Questo avviene in particolare nel set di Comuni localizzati nella pianura bresciana; in questo caso, si ritiene che la principale motivazione risieda appunto nella tipologia del tessuto urbanizzato in questa area, in genere non particolarmente denso, ma con alta presenza di insediamenti produttivi e agricoli (insediamenti industriali, allevamenti zootecnici, ...): in questo caso quindi è probabile che il metodo proxy basato sulle mappature precedenti sottostimi le superfici reali

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

in questo contesto territoriale, che era tendenzialmente poco rappresentato nelle mappature originarie.

I Comuni dell'Oltrepò pavese sono caratterizzati generalmente da ridotte estensioni urbanizzate, piuttosto disperse e con discreta presenza di infrastrutture agricole e cascine, e le superfici mappate risultano mediamente solo leggermente superiori all'atteso stimato nel 2018.

In altri contesti territoriali invece si rileva l'opposto (ovvero la mappatura 2020 ha valori tendenzialmente più bassi rispetto alle superfici "attese" stimate al 2018): questo si rileva soprattutto nei capoluoghi di provincia (dove probabilmente ha un peso significativo la diversa tipologia di una quota parte consistente del tessuto urbanizzato "storico", dove le coperture in cemento-amianto sono ovviamente meno presenti). Un analogo comportamento "tendenziale" si rileva anche nei Comuni del Nord-Est Milanese, dove una ulteriore possibile ragione dello scostamento è anche dovuto, in un contesto di alta densità di urbanizzazione industriale, agli elevati tassi di rimozione delle coperture negli anni recenti.

Nel complesso, sul totale dei 54 Comuni analizzati, i due tipi di scostamento, che localmente e su singoli Comuni appaiono significativi, tendono poi a elidersi parzialmente: in queste aree complessive, la somma delle superfici stimate "attese" al 2018 risulta di circa 265 ha, mentre le superfici effettivamente mappate nel 2020 sommano a circa 303 ha, ovvero circa il 14% in più.

Va inoltre ricordato che la nuova mappatura del 2020, rispetto alle precedenti mappature, ha caratteristiche nettamente migliori in termini di risoluzione radiometrica e rapporto segnale/disturbo del sensore utilizzato, e di migliore risoluzione geometrica che tendenzialmente consente di individuare coperture più piccole.

6.2.4 Aggiornamento al 2020 delle stime a scala regionale

Sulla base dei dati rilevati nella nuova mappatura del 2020, integrando con le precedenti valutazioni effettuate a valle della Fase 1 sui territori non mappati, è possibile quindi aggiornare le estrapolazioni a scala regionale e quindi le stime delle coperture residue.

Pur con i limiti del metodo di estrapolazione con il proxy territoriale individuato, riassunti nel paragrafo precedente, sulla base con la mappatura effettiva del 2020, si ritiene che il metodo di estrapolazione delle stime ai territori non mappati sia replicabile anche in questo caso, considerando l'estrema variabilità delle diverse tipologie di territorio.

Al fine quindi di aggiornare le stime a scala regionale al 2020, si è proceduto in questi modi, a seconda della disponibilità dei dati nelle diverse aree:

1. nei Comuni mappati nel 2020, ovviamente sono state conteggiate le superfici di coperture effettivamente rilevate con la nuova mappatura.
2. nei Comuni oggetto di mappature precedenti, in cui quindi il dato delle superfici effettivamente mappate è relativo al 2018, si è proceduto all'applicazione di un coefficiente di riduzione basato sui trend medi rilevati nel precedente triennio 2015-2018.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

3. nei Comuni tuttora non oggetto di alcuna mappatura, le stime precedenti, relative alle coperture “attese” sulla base del metodo proxy basato sulla superficie urbanizzata comunale, sono state anch’esse “attualizzate” al 2020 applicando i trend annui rilevati nelle aree mappate nel triennio precedente 2015-2018.

Al fine dei casi 2 e 3, i trend annui applicati sono gli stessi rilevati nel triennio precedente nelle aree delle mappature della fase 1. Nello specifico (richiamando i dati riassunti nella Tabella 20), la diminuzione media complessiva delle superfici nell’ultimo triennio 2015-2018 risultò del 22,2%. Nel periodo 2018-2020 è quindi stato applicata una riduzione delle superfici del 14,8 %.

A seguito di queste elaborazioni a scala regionale, differenziate in funzione dei migliori dati disponibili nei diversi territori, l’aggiornamento al 2020 del grafico della presenza di coperture in cemento amianto a scala regionale è il seguente.

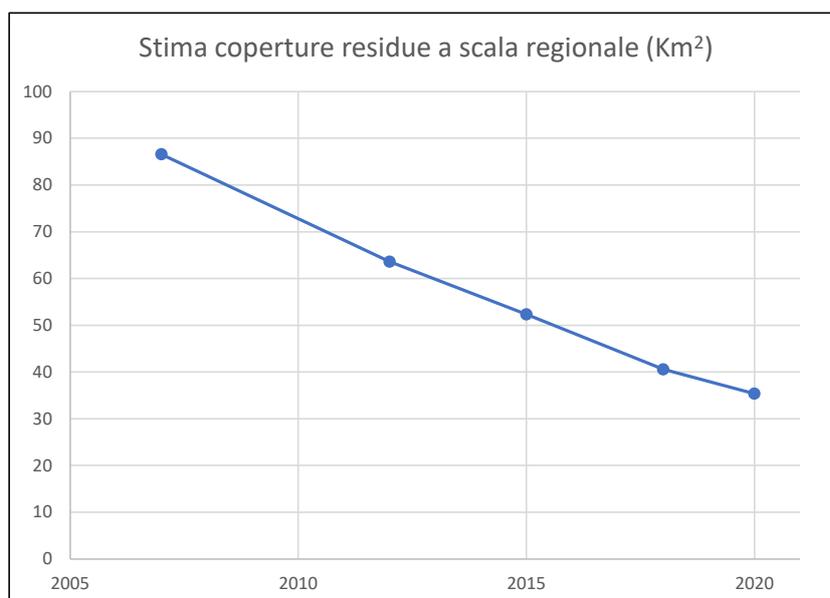


Figura 62. Aggiornamento dell’andamento dei quantitativi residui delle coperture in cemento amianto stimate sul totale del territorio regionale, indicate in termini di superficie.

	2007	2012	2015	2018	2020
Stima coperture residue (Km ²)	86,6	63,6	52,3	40,6	35,3
Stima coperture residue (Mm ³)	2,89	2,12	1,74	1,35	1,18

Figura 63. Aggiornamento dei quantitativi residui delle coperture in cemento amianto stimate sul totale del territorio regionale, indicate in termini di superficie e di volume (applicando il coefficiente PRAL di 30 m²/m³)

Pur con le notevoli incertezze riassunte nel testo, è possibile inoltre aggiornare lo scenario futuro di riduzione progressiva delle coperture a scala regionale.

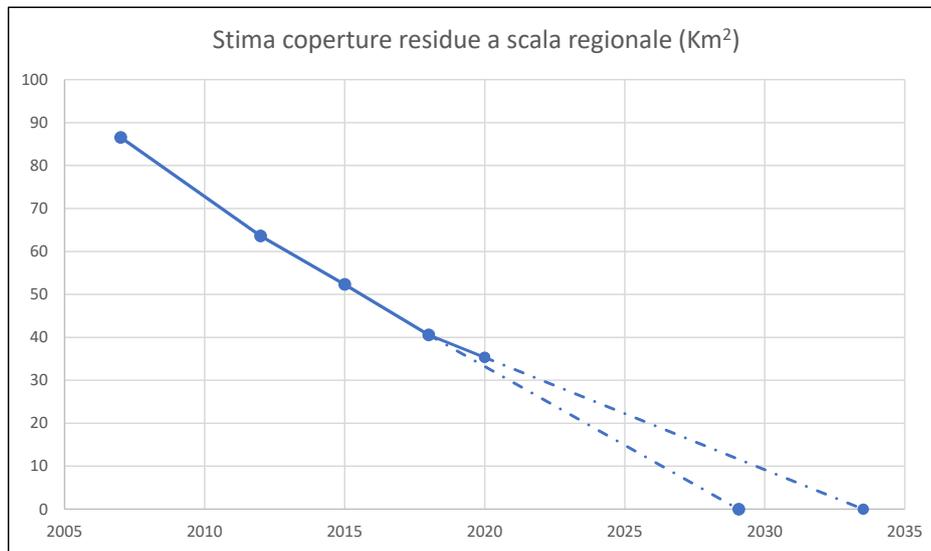


Figura 64. Aggiornamento dello scenario futuro di progressiva diminuzione delle coperture in cemento amianto a livello regionale; vengono riportati i dati stimati nelle annualità di mappatura 2007, 2012, 2015, 2018 e 2020, lo scenario precedente basato sull'estrapolazione dei tassi di rimozione osservati nel periodo 2015-2018, e lo scenario ulteriore basato sui dati del biennio 2018-2020.

Rispetto alle valutazioni precedenti (riassunte nel par 6.1.5), in cui lo scenario “minimo” di azzeramento delle coperture, sulla base dell’ultima mappatura 2018 e dei trend osservato nel triennio 2015-2018, portava la proiezione di azzeramento dei quantitativi al 2029, seguendo lo stesso approccio di estrapolazione lineare, ma considerando ora le coperture residue complessive stimate al 2020, e applicando il trend 2018-2020, la data si sposterebbe almeno al 2033.

Si sottolinea infine, come già descritto nel par 6.1.5, che tali valutazioni, considerando le numerose variabili in gioco e le incertezze insite nei metodi di stima ed estrapolazione, rappresentano uno scenario approssimato e solo indicativo, che potrà essere ulteriormente rivalutato e aggiornato negli anni futuri sulla base di eventuali nuovi aggiornamenti delle mappature disponibili o di una loro ulteriore estensione.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

7 Test di nuove metodiche su un'area pilota

Nell'ambito del Progetto Amianto erano previste alcune attività di approfondimento e sperimentazione, funzionali alla valutazione di altre tecniche di rilevamento delle coperture in cemento amianto, oltre a quella adottata e applicata operativamente nel Progetto, basata sui rilievi aerei iperspettrali; fra queste, era prevista inizialmente una sperimentazione di nuove tecnologie di classificazione delle immagini ad alta risoluzione basate su tecniche di Machine Learning, al fine di valutare un loro potenziale beneficio nella capacità di discriminare le coperture.

Sulla scorta delle esperienze preliminari di utilizzo di queste tecniche di analisi di Machine Learning in contesti molto differenti (ovvero nell'ambito del Progetto SAVAGER al fine dell'individuazione di abbandoni di rifiuti) sono state affrontate le difficoltà di utilizzo e alcuni limiti operativi di queste nuove tecnologie.

Un primo ordine di limitazioni è legato agli aspetti hardware: in particolare, le tecniche di Deep Learning richiedono notevoli risorse computazionali e schede grafiche molto performanti adeguate allo scopo.

Un seconda tipologia di difficoltà è legata alla necessità di addestrare gli algoritmi con un elevato numero di campioni di verità a terra; nel caso dell'individuazione del cemento amianto, se da un lato la discriminabilità della "struttura" di queste coperture dal punto di vista tessiturale è piuttosto agevole tramite fotointerpretazione, va anche considerata l'estrema variabilità nella tipologia di posa del materiale in funzione della struttura dei tetti (volte a botte, tetti a falde, di dimensioni, disposizioni e livello di alterazione molto variabili, ecc...).

Il limite di fondo principale dell'applicazione di questo tipo di tecniche nel caso del cemento amianto risiede però nel loro utilizzo finale: quand'anche si riuscisse a identificare ed estrarre automaticamente le coperture caratterizzate dalla risposta "tessiturale" tipica (ma non univoca..) anche delle coperture in cemento amianto, è inevitabile che in questo insieme ci sia una quantità considerevole di coperture non in cemento amianto ma semplicemente "grigie" e con copertura "ondulata"; a questo punto la loro effettiva separazione e classificazione, senza poter disporre dell'informazione aggiuntiva essenziale derivante dalla firma spettrale, risulterebbe certamente molto difficoltosa e dispendiosa in termini di verifiche a terra e controlli indipendenti necessari.

Questo tipo di considerazioni hanno fatto propendere, nel corso del Progetto, ad accantonare la prevista sperimentazione di utilizzo delle tecniche basate su Machine Learning nell'ambito della classificazione delle coperture in cemento amianto.

Nell'ambito delle previste attività di approfondimento di ulteriori tecniche, potenzialmente alternative ai rilievi iperspettrali da aereo, si propone nel paragrafo 7.1 una breve rassegna dei diversi dati di osservazione della terra nell'ottica dei loro possibili contributi di informazione spettrale e tessiturale fornita ai fini della discriminazione delle coperture in cemento amianto.

I dati sono descritti suddividendoli per tipologia di piattaforma e di sensoristica utilizzata, e riassumendo per ogni tipologia le caratteristiche essenziali in termini di discriminabilità delle coperture, oltre che gli elementi essenziali legati alla fattibilità operativa di realizzare mappature su ampie porzioni territoriali.

Nel paragrafo 7.1.4, in particolare, vengono riassunti i risultati di una sperimentazione di utilizzo di dati satellitari multispettrali ad alta risoluzione geometrica.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

7.1 Rassegna dei dati di osservazione della terra e contributi nella mappatura delle coperture

Per la realizzazione della mappatura delle coperture in cemento amianto, a livello generale ci si può avvalere di diverse informazioni, che possono essere utilizzate in congiunzione, che possono essere raggruppate in queste tre categorie:

1. **Informazione spettrale:** può essere acquisita con una camera multispettrale (con 4 o 5 bande spettrali), con uno scanner multispettrale (con un numero di bande spettrali fino ad alcune decine), o con uno scanner iperspettrale, (con un numero di bande spettrali fino ad alcune centinaia). Le coperture in cemento-amianto sono caratterizzate da una firma spettrale che è influenzata da diversi fattori come le caratteristiche della matrice cementizia e lo stato di alterazione. La capacità di discriminazione tra firme spettrali diverse, ad esempio tra cemento-amianto e cemento, può essere aumentata in vari modi: allargando l'intervallo spettrale in cui opera il sensore, dal visibile (VIS), all'infrarosso vicino (NIR: Near InfraRed) fino alla regione dell'infrarosso medio (SWIR: Short Wave InfraRed); inoltre può essere aumentata accrescendo il numero di bande spettrali.
2. **Informazione tessiturale:** può essere acquisita da aereo con una camera digitale con risoluzione a terra adeguata, dai 10 ai 30 cm. Ad esempio, le ortoimmagini AGEA, o le stesse immagini satellitari e aeree ad altissima risoluzione visualizzabili in ambienti come Google Earth, possono essere utilizzate per questo scopo. Esistono algoritmi per identificare automaticamente la *texture* tipica delle lastre ondulate. Naturalmente come evidenziato in premessa, questa caratteristica non individua con certezza le coperture in cemento-amianto ma l'informazione tessiturale, unita all'informazione spettrale, può contribuire ad aumentare la probabilità di identificare correttamente le coperture in cemento-amianto.
3. **Informazione ausiliaria:** è costituita da carte storiche di uso del suolo e/o immagini storiche che forniscono indicazioni sull'età degli edifici. Come noto la Legge N°257/1992 ha proibito l'utilizzazione di materiali contenenti amianto a partire dal 1994. Quindi una copertura situata su un edificio realizzato dopo il 1994 difficilmente potrà essere in cemento-amianto. L'accuratezza della mappatura aumenta ulteriormente se oltre all'informazione spettrale e tessiturale si aggiunge l'informazione sull'età stimata dell'edificio.

Prescindendo qui dall'informazione ausiliaria, che assume un carattere indipendente, si propone nei prossimi paragrafi una breve rassegna dei diversi dati provenienti dall'osservazione della terra nell'ottica dei contributi di informazione spettrale e tessiturale fornita ai fini della discriminazione delle coperture in cemento amianto.

La prima macro-distinzione fra gli approcci è relativa alle piattaforme utilizzate, suddividendole nelle due tipologie aerea/satellitare. La prima tipologia (rilievi da piattaforma aerea) è quella tradizionalmente più utilizzata per le mappature delle coperture in cemento-amianto; in questa sede questa tipologia è intesa in senso ampio, comprendendo ad esempio anche l'ipotesi di utilizzo dei droni. La seconda tipologia di piattaforma considerata comprende sia i dati satellitari a medio-bassa risoluzione che i dati satellitari commerciali ad alta risoluzione.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Il secondo livello di suddivisione riguarda la macro-categoria di sensoristica utilizzata; in questo caso la principale differenziazione è fra sensori di tipo iperspettrale (ovvero i sensori dotati di decine di bande spettrali, distribuite in diverse regioni dello spettro elettromagnetico), rispetto a sensori multispettrali di più comune utilizzo (comprendendo in questa seconda tipologia i sensori multispettrali montati a bordo dei satelliti a media risoluzione come Landsat8, Spot, Sentinel-2, ecc..), così come le camere multispettrali sensibili solo nelle regioni elettromagnetiche del visibile e del vicino Infrarosso (NIR), utilizzate correntemente per rilievi aerei tradizionale o quelle utilizzabili con rilievi da drone.

7.1.1 Dati acquisiti da piattaforma aerea e sensori iperspettrali

Questa tipologia di dati e di soluzione tecnologica è quella tradizionalmente più utilizzata ed affidabile ai fini della mappatura delle coperture, ed è quella perseguita dapprima nell'ambito del Progetto PRAL (tramite rilievi aerei iperspettrali nel 2007 con sensore MIVIS) ed ora nell'attuale Progetto Amianto (tramite l'estensione della mappatura nel 2020 con il nuovo sensore Hypex).

Tale tipo di approccio di mappatura delle coperture in cemento-amianto è decisamente consolidato, ed utilizzato, oltre che da ARPA Lombardia, anche in diversi altri contesti in Italia (a scala regionale in Puglia e in Valle d'Aosta, ed anche localmente in numerosi altri contesti), anche se con differenze molto significative in termini di estensione delle aree coperte, caratteristiche degli approcci di classificazione, e accuratezze ottenute.

Dal punto di vista della discriminabilità delle coperture, l'approccio ed i livelli di accuratezza raggiungibili sono piuttosto consolidati. In genere le accuratezze tematiche delle classificazioni risultano superiori al 90%.

In questa sede non si propone una trattazione approfondita della metodologia di acquisizione dei dati e delle tecniche di elaborazione, rimandando alla descrizione inserita nel paragrafo 5 della presente relazione.

7.1.1.1 Dati da drone e sensori iperspettrali

Questa tipologia di approccio è potenzialmente di notevole interesse ai fini della mappatura delle coperture in cemento-amianto, ma al momento non risulta ancora tecnicamente ed economicamente operativa.

Le alte potenzialità teoriche derivano in particolare dalla combinazione dell'alta risoluzione geometrica raggiungibile con rilievi da drone (siano essi droni ad ala fissa o multirotori) e soprattutto dall'alta risoluzione radiometrica ottenibile dai sensori iperspettrali; dal punto di vista pratico però, allo stato attuale sono in commercio solo alcuni primi sensori iperspettrali miniaturizzati realizzati per l'utilizzo da drone.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Il loro costo è allo stato attuale ancora molto alto, e sussistono in ogni caso diversi limiti alla loro reale utilizzabilità in contesti operativi, ed inoltre, su ampie porzioni territoriali. In sintesi, al momento questa opzione non appare tecnicamente ed economicamente percorribile.

7.1.2 Dati acquisiti da piattaforma aerea e sensori multispettrali

Questa tipologia di approccio, accomunata dall'utilizzo di rilievi aerei e dall'uso di camere multispettrali tradizionali (che dispongono generalmente solo di bande nel visibile e al massimo nell'infrarosso vicino) può essere ulteriormente distinta in altri casi, descritti sinteticamente nei paragrafi seguenti.

7.1.2.1 Ortoimmagini aeree

Questo tipo di approccio di mappatura si riferisce all'utilizzo di ortofotografie aeree "tradizionali", acquisite e rese disponibili periodicamente dalla Regione per diversi scopi (aggiornamento cartografie tematiche di uso del suolo, controlli in agricoltura, ecc..). Nel caso specifico, si fa riferimento all'utilizzo delle ortofoto acquisite originariamente da AGEA e rese disponibili alla Regione e ad ARPA. L'ultima annualità attualmente disponibile è riferita al 2018: si tratta di immagini digitali nelle 4 bande del visibile (Red, Green, Blue) e del vicino Infrarosso (NIR), a risoluzione di 0,2 metri. Nell'ambito del Progetto Amianto tali dati sono stati utilizzati nella Fase 1 al fine dell'aggiornamento tramite fotointerpretazione delle mappature precedenti.

Dal punto di vista del potenziale utilizzo, invece, al fine di una prima mappatura, e quindi della discriminabilità delle coperture in cemento amianto, la disponibilità delle sole 4 bande nel visibile e NIR è naturalmente il principale aspetto limitante.

A titolo di esempio, nell'immagine seguente si riporta il confronto dell'andamento della risposta spettrale nelle quattro bande delle ortofotografie AGEA per un numero significativo di pixel rappresentativi di coperture in cemento amianto, e su altri edifici senza coperture in cemento-amianto ma risposta spettrale simile, almeno nella regione del visibile (in termini generici, denominati edifici con "tetti grigi").

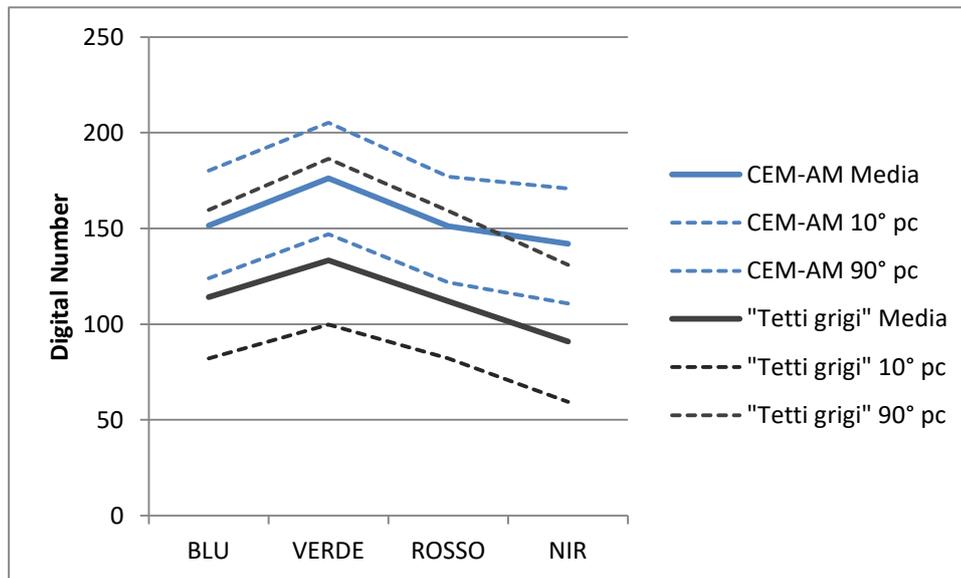


Figura 65: Distribuzione statistica (sono rappresentate media, 10° e 90° percentile) della risposta spettrale nelle bande del visibile (blu, verde, rosso) e dell'infrarosso vicino (NIR) dalle ortoimmagini AGEA, per un numero significativo di pixel rappresentativi di due tipologie di coperture ("cemento-amianto" e generici edifici "grigi" non in amianto).

Dal grafico precedente emergono in particolare alcuni aspetti di interesse: il primo è che in genere, e in particolare nel caso delle ortofoto AGEA, i dati sono espressi in "Digital Number", ovvero non in grandezze fisiche come la Radianza o la Riflettività, e sono compressi e riscaldati a 8 bit (ovvero i valori di ogni pixel assumono in ogni banda valori da 0 a 255). Per ottimizzare le classificazioni e aumentare la discriminabilità spettrale degli oggetti, andrebbero recuperate e utilizzate più correttamente le ortoimmagini AGEA in formato originale non compresso e senza perdite di informazione.

Inoltre, confrontando l'andamento delle curve relative alle superfici in cemento-amianto e di altri tetti "grigi" ma non in amianto, è evidente che la discriminabilità spettrale è molto limitata (in particolare nelle bande RGB, mentre una modesta più ampia discriminabilità si osserva nella regione del NIR). In sintesi, quindi, con un approccio di classificazione semiautomatico di questo tipo di ortoimmagini, ancorché opportunamente limitato ai soli pixel degli edifici, ecc., è possibile ottenere accuratèzze tendenzialmente medio-basse.

In alcuni casi, questo tipo di approccio di identificazione delle coperture in cemento-amianto è stato utilizzato (ad esempio da ARPA Piemonte su ampie aree del territorio regionale piemontese) abbinando una classificazione preliminare basata su ortoimmagini aeree ad una successiva fase di controllo degli edifici identificati nella prima fase con potenziale copertura in cemento-amianto. La prima fase di classificazione preliminare raggiunse una percentuale di accuratezza di circa il 68%, ovvero con una alta percentuale di "falsi positivi" o "errori di commissione", che possono essere esclusi solo con le successive verifiche e sopralluoghi diretti. A fine 2014, nel totale dell'area piemontese indagata, furono identificati, a seguito della prima fase tramite classificazioni semi-automatiche, un totale di 107.402 edifici con potenziale copertura in cemento amianto; di questi, fu poi effettuato un sopralluogo diretto su 23.382 edifici; in questo sottoinsieme, è stata certificata l'assenza di coperture in cemento-amianto in 7.374 casi.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Questo tipo di approccio di classificazione sconta una inevitabile alta percentuale di errori di “commissione” (ovvero coperture classificate erroneamente come cemento-amianto), e deve obbligatoriamente essere abbinato ad una notevole mole di rilievi in campo per le verifiche e le esclusioni dei singoli casi di mis-classificazione.

Almeno a livello teorico, questo tipo di classificazione semi-automatica potrebbe essere in parte migliorata sfruttando anche la componente “tessiturale” degli edifici con copertura in cemento-amianto (ovvero cercando di sfruttare anche il *pattern* geometrico medio dovuto all’effetto combinato della forma ondulata tipiche delle lastre di cemento-amianto e della geometria di posa delle lastre): nella pratica, tale effetto, ancorché piuttosto ben riconoscibile dall’occhio umano, è difficilmente formalizzabile e sfruttabile dagli algoritmi dei software di *pattern recognition*, poiché le casistiche di posa delle coperture sono innumerevoli, e la loro variabilità è ulteriormente amplificata dalle diverse condizioni di orientamento e illuminazione degli edifici, delle diverse geometrie delle falde dei tetti, ecc.. Tale estrema variabilità è identificabile solo tramite un approccio di classificazione esclusivamente fotointerpretativo, che dal punto di vista operativo avrebbe notevoli difficoltà di applicazione nel caso di ampie estensioni territoriali. Inoltre, va sottolineato che anche un approccio esclusivamente foto-interpretativo, pur utilizzando dati aerei ad alta risoluzione, è potenzialmente affetto da un certo numero di incertezze e di possibili errori di commissione.

7.1.2.2 Dati da drone

Questo tipo di approccio di mappatura si riferisce all’utilizzo di dati acquisiti da piattaforme aeree di tipo SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto), sia di tipo ad ala fissa che multirottore.

L’indubbio vantaggio di questo tipo di approccio è essenzialmente la risoluzione spaziale ottenibile (generalmente nell’ordine dei centimetri), che consente quindi l’osservazione di coperture anche di ridotta estensione. Come nel caso delle immagini aeree tradizionali, il principale limite è però legato alla discriminabilità delle coperture in cemento-amianto nei casi in cui si dispone di immagini relative esclusivamente alle regioni del visibile e dell’infrarosso vicino.

Dal punto di vista pratico, è stato possibile valutare i risultati alcune esperienze di classificazione delle coperture da drone, realizzate e fornite in via sperimentale da ditte private. In particolare, in un caso il test di classificazione è stato condotto utilizzando un drone ad ala fissa equipaggiato con una camera digitale tradizionale (RGB+NIR), su una area industriale precedentemente mappata nell’ambito del PRAL, per cui si disponeva quindi di una buona casistica di casi di confronto fra i due diversi approcci di mappatura.

In questo caso, se da un lato emergono le concordanze, ovvero gli edifici che risultano identificati con copertura in cemento-amianto sia nella mappatura PRAL che nella classificazione semi-automatica realizzata da drone, emergono anche diverse casistiche di errori di commissione, ed in particolare ad esempio su edifici non ancora cartografati nella Carta Tecnica Regionale del 1994.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

A meno di clamorose illegalità (il bando dell'amianto del 1992, ma il suo uso fu "tollerato" per non più di un paio di anni) in questi casi si tratta con ogni probabilità di errori di commissione della mappatura delle coperture da SAPR.

Va sottolineato che la risposta spettrale, nelle sole regioni del visibile e del NIR, e anche la loro "tessitura", di questi tetti erroneamente classificati, visivamente è di fatto indistinguibile dalle coperture in cemento-amianto, anche tramite fotointerpretazione di immagini aeree ad altissima risoluzione (esempio in Figura 66).

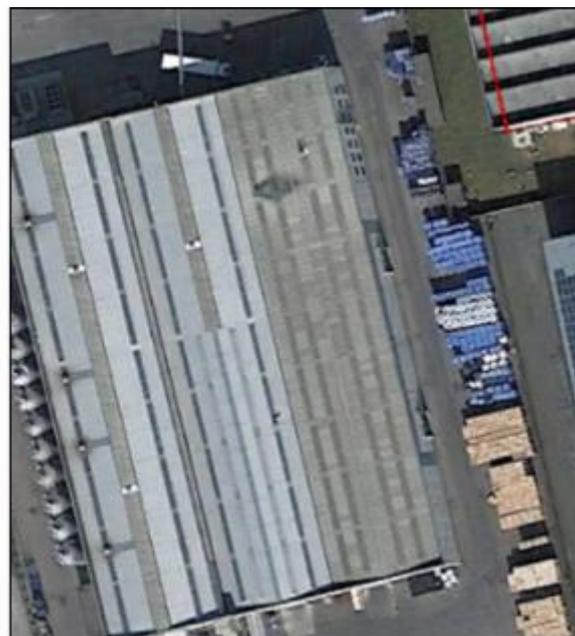


Figura 66: Dettaglio di edifici mappati da drone come cemento-amianto, in una sperimentazione svolta da una ditta privata, ma che non risultavano ancora cartografati nella CTR del 1994.

Infine, vanno rilevati alcuni casi in cui le classificazioni semiautomatiche effettuate sulla base dei dati ripresi da drone, individuano come possibili coperture in cemento-amianto anche delle porzioni di coperture su edifici molto recenti e con tipologie di materiale generalmente molto più riflettente (tipicamente nelle parti di tetto con le falde esposte a nord): tale errore di classificazione è un ulteriore chiaro indizio di una non sufficiente discriminabilità spettrale delle diverse coperture presenti, nel caso in cui si utilizzino solo le bande nel visibile e infrarosso vicino.

Più in generale, oltre a questi limiti intrinseci alla possibilità di identificare e classificare con sufficiente accuratezza le coperture in cemento-amianto utilizzando camere digitali tradizionali o sensori multispettrali tradizionali, anche dal punto di vista operativo emergono notevoli altre limitazioni pratiche all'utilizzo dei droni ai fini della mappatura estensiva delle coperture in cemento-amianto, in particolare derivanti dalle restrizioni operative dettate dalla normativa ENAC (esempio in Figura 67).

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

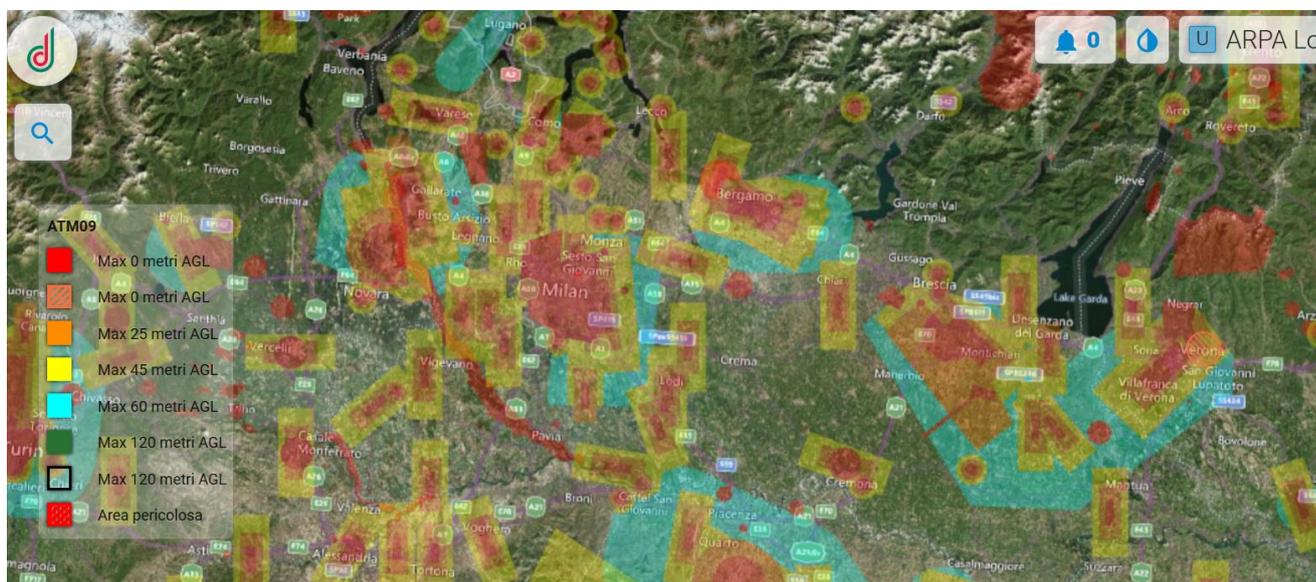


Figura 67. Stralcio della cartografia ufficiale (<https://www.d-flight.it/web-app/>) per la consultazione delle aree con limitazioni al volo dei droni; è riportata l'area della pianura lombarda, con evidenziazione delle diverse aree interdette al volo a meno di specifiche autorizzazioni (aree rosse), o con limitazioni progressive di quota massima rispetto al suolo.

Più in generale, un ulteriore limite operativo all'uso dei droni per mappature estensive risulta essere tuttora la difficoltà a coprire ampie porzioni di territorio (in funzione delle limitazioni dettate dall'autonomia di volo dei velivoli); l'utilizzo di droni appare invece sicuramente adeguato per rilevare con elevato dettaglio ridotte porzioni territoriali o addirittura singoli edifici, per applicazioni più specifiche e circoscritte come quella di valutare lo stato di degrado e ammaloramento delle coperture.

7.1.2.3 Immagini di GoogleEarth

Questo tipo di approccio di mappatura si riferisce all'utilizzo delle immagini consultabili in ambienti di visualizzazione pubblici come GoogleEarth. Generalmente in questo ambiente sono visualizzabili immagini satellitari ad alta risoluzione e immagini aeree ad altissima risoluzione (in molte zone anche a dettaglio centimetrico). Considerando l'area della pianura lombarda, la quasi totalità del territorio è infatti coperta da immagini aeree ad altissima risoluzione, in genere molto recenti e in costante aggiornamento, ed inoltre con la possibilità di visualizzare diverse immagini storiche. Un primo limite è che i dati sono visualizzati esclusivamente in colori reali, non si hanno quindi informazioni circa la risposta spettrale delle superfici in altre regioni dello spettro elettromagnetico.

Concettualmente questo tipo di casistica è simile al caso precedente dell'uso di ortoimmagini aeree ad altissima risoluzione. La principale differenza, però, è che in questo caso i dati disponibili in visualizzazione in GoogleEarth non sono direttamente elaborabili, ovvero non è possibile realizzare delle classificazioni semi-automatiche su questi dati. Le immagini possono essere quindi analizzate utilizzando un approccio esclusivamente fotointerpretativo. Naturalmente, pur considerando l'elevatissima risoluzione geometrica delle immagini disponibili, questo è un aspetto fortemente limitante, in particolare nell'ottica di mappare ampie porzioni di territorio o addirittura tutta la pianura lombarda.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Dal punto di vista esclusivamente fotointerpretativo, la qualità delle immagini disponibili è in genere molto alta e la fotointerpretazione di singoli edifici o su porzioni territoriali molto ridotte è teoricamente fattibile, poiché la combinazione di risposta spettrale (anche solo nel visibile) e in particolare del *pattern* geometrico delle coperture in cemento-amianto è generalmente piuttosto ben riconoscibile.

Va comunque sottolineato che anche questo approccio, ovvero esclusivamente di tipo fotointerpretativo, pur utilizzando dati ad altissima risoluzione, è potenzialmente affetto da un certo numero di incertezze e di possibili errori di commissione nell'identificazione delle coperture in cemento-amianto.



Figura 68: Esempi della variabilità tipica delle coperture in cemento-amianto, visualizzate dai dati aerei ad altissima risoluzione geometrica disponibile in GoogleEarth; i poligoni rossi sono derivanti dalla mappatura precedente realizzata nel PRAL.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

7.1.3 Dati acquisiti da piattaforma satellitare

7.1.3.1 Dati da piattaforma satellitare e sensori multispettrali a media risoluzione

Questo tipo di approccio di mappatura si riferisce all'utilizzo di dati satellitari a media risoluzione, come Landsat8, Sentinel-2, ecc., ovvero di satelliti dotati di sensori multispettrali con bande in diverse regioni dello spettro elettromagnetico (e in particolare, oltre alle tipiche regioni del visibile e del vicino infrarosso, anche nella regione dell'infrarosso medio), e che acquisiscono ripetutamente immagini gratuite e con una notevole ampiezza delle scene.

Dal punto di vista della discriminabilità teorica di classificare il cemento-amianto, grazie alle informazioni acquisite anche nella regione dell'infrarosso medio questo tipo di sensori hanno buone potenzialità, ma l'aspetto fortemente limitante è rappresentato dalle basse risoluzioni geometriche; ad esempio, la risoluzione del pixel di Landsat8 è di 30 metri, mentre il satellite Sentinel-2 acquisisce immagini a 10 metri di risoluzione nelle regioni del visibile e vicino infrarosso e a 20 metri nell'infrarosso medio. Va sottolineato inoltre che le bande spettrali disponibili nella regione dell'IR medio, sia ad esempio da Landsat8 che da Sentinel-2, hanno una notevole ampiezza della banda spettrale.

Focalizzandoci in prima battuta sui dati acquisiti da Sentinel-2 (che, in questa classe di satelliti è quello più promettente in termini di caratteristiche tecniche, e mole di dati che saranno disponibili dai prossimi mesi), nell'immagine seguente viene riportato un esempio di sovrapposizione dei poligoni derivanti della mappatura delle coperture in cemento amianto del PRAL ad una immagine di Sentinel-2. L'area di esempio è riferita ad un'area industriale nel comune di Rho, sufficientemente rappresentativa della dimensione media degli edifici identificati nell'area PRAL con coperture in cemento-amianto (l'etichetta su ogni poligono riporta la sua superficie in m²).



Figura 69: Sovrapposizione ad una immagine test di Sentinel-2 (immagine falso colore nelle bande dell'infrarosso medio, a 20 metri di risoluzione) della mappatura delle coperture del PRAL

Da questa semplice analisi qualitativa, risulta evidente che per la maggior parte dei poligoni, di dimensioni medio-piccoli, la risoluzione di 20 metri appare un fattore molto limitante; solo i poligoni di dimensione maggiore, e fra questi in particolare quelli di forma meno allungata, possono disporre di un certo numero di "pixel puri", ovvero in cui la risposta spettrale delle coperture in cemento-amiante può potenzialmente essere identificata con maggiore probabilità.

Considerando queste notevoli limitazioni dovute alla scarsa risoluzione geometrica, e richiamando le statistiche aggiornate relativamente alla dimensione mediana dei poligoni mappati nella Fase 2 del Progetto (circa 200 m², come riportato nel paragrafo 6.2.2), si ritiene che i dati satellitari a media risoluzione possano fornire solo un contributo conoscitivo minimale, relativamente ai soli edifici di maggiore estensione (grandi capannoni industriali, coperture di stalle, ecc..).

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

7.1.3.2 Dati da piattaforma satellitare e sensori iperspettrali

Questo tipo di approccio di mappatura si riferisce all'utilizzo di dati satellitari dotati di sensori iperspettrali, ovvero di sensori dotati di alto numero di bande spettrali, generalmente con ampiezze delle bande molto ridotta, e distribuite in diverse regioni dello spettro elettromagnetico.

Il principale limite all'utilizzo di questo tipo di dati, è che i pochi sensori attualmente operativi o di prossimo lancio dispongono di basse risoluzioni geometriche; di fatto la loro reale utilizzabilità ai fini della mappatura delle coperture in cemento-amianto appare attualmente ancora scarsa.

Una opportunità è rappresentata dalla missione satellitare iperspettrale PRISMA, operata dall'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e operativa da pochi mesi. Purtroppo, però la risoluzione geometrica di 30 m, nel range spettrale da 400 a 2500 nm, ne limita fortemente l'utilizzo per la tematica dell'amianto.

Un'altra opportunità tecnologica futura è lo sviluppo commerciale dei nanosatelliti, ovvero di satelliti del peso di alcuni chilogrammi, ed in particolare dei *CubeSat*: nanosatelliti di dimensioni multiple di un cubo di 10 centimetri di lato. I *CubeSat* con i loro costi di realizzazione e messa in orbita molto contenuti, se paragonati a quelli dei satelliti tradizionali, danno la possibilità anche a piccole organizzazioni pubbliche e private promuovere missioni di Earth Observation, ed almeno, in parte, di equipaggiare il nanosatellite con diversi tipi di sensoristica. Attualmente le prime applicazioni di questo tipo di approccio prevedono l'utilizzo di sensori, anche iperspettrali, ma anche in questo caso con risoluzioni previste dell'ordine delle decine di metri.

7.1.3.3 Dati da piattaforma satellitare e sensori multispettrali ad alta risoluzione

Questo tipo di approccio di mappatura si riferisce all'utilizzo dei dati ad alta risoluzione acquisiti in particolare dal satellite commerciale WorldView-3; allo stato attuale, tale satellite è l'unico disponibile a livello commerciale in grado di acquisire immagini ad alta risoluzione geometrica ed in diverse bande dello spettro elettromagnetico (e, in particolare, anche nella regione dell'infrarosso medio). Le acquisizioni di WorldView-3 sono programmabili su specifiche aree di interesse e in differenti modalità di acquisizione. In particolare, i sensori di WV-3 acquisiscono immagini in diverse regioni dello spettro elettromagnetico e a diverse risoluzioni.

Sensor Bands	Panchromatic: 450 - 800 nm	
	8 Multispectral:	
Coastal:	400 - 450 nm	Red: 630 - 690 nm
Blue:	450 - 510 nm	Red Edge: 705 - 745 nm
Green:	510 - 580 nm	Near-IR1: 770 - 895 nm
Yellow:	585 - 625 nm	Near-IR2: 860 - 1040 nm
	8 SWIR Bands:	
SWIR-1:	1195 - 1225 nm	SWIR-5: 2145 - 2185 nm
SWIR-2:	1550 - 1590 nm	SWIR-6: 2185 - 2225 nm
SWIR-3:	1640 - 1680 nm	SWIR-7: 2235 - 2285 nm
SWIR-4:	1710 - 1750 nm	SWIR-8: 2295 - 2365 nm

Figura 70: Estratto del *Datasheet* commerciale della società DigitalGlobe, con le caratteristiche essenziali delle bande spettrali del satellite WorldView-3

Per quanto riguarda la risoluzione geometrica delle diverse bande spettrali:

- Il sensore pancromatico acquisisce dati a 30 cm.
- Il sensore multispettrale acquisisce 8 bande spettrali a 1,2 metri.
- Il sensore nella regione dell'infrarosso medio (SWIR) acquisisce 8 bande nominalmente a 3,7 metri, che però, a causa di restrizioni dovute alla normativa americana, attualmente vengono commercializzate degradate a 7,5 metri di risoluzione.

Dal punto di vista della discriminabilità teorica delle coperture in cemento-amianto, le 8 bande multispettrali e le 8 bande SWIR sono posizionate in regioni potenzialmente molto utili (si veda l'esempio nella figura seguente, dove al grafico relativo alle firme spettrali di diverse coperture, ricavate dal sensore iperspettrale MIVIS, sono state aggiunte le localizzazioni delle bande di WV-3), e l'ampiezza delle bande spettrali è notevolmente più piccola rispetto ad altri sensori satellitari disponibili in questa regione spettrale (come ad esempio quelli montati su Landsat8 o Sentinel-2).

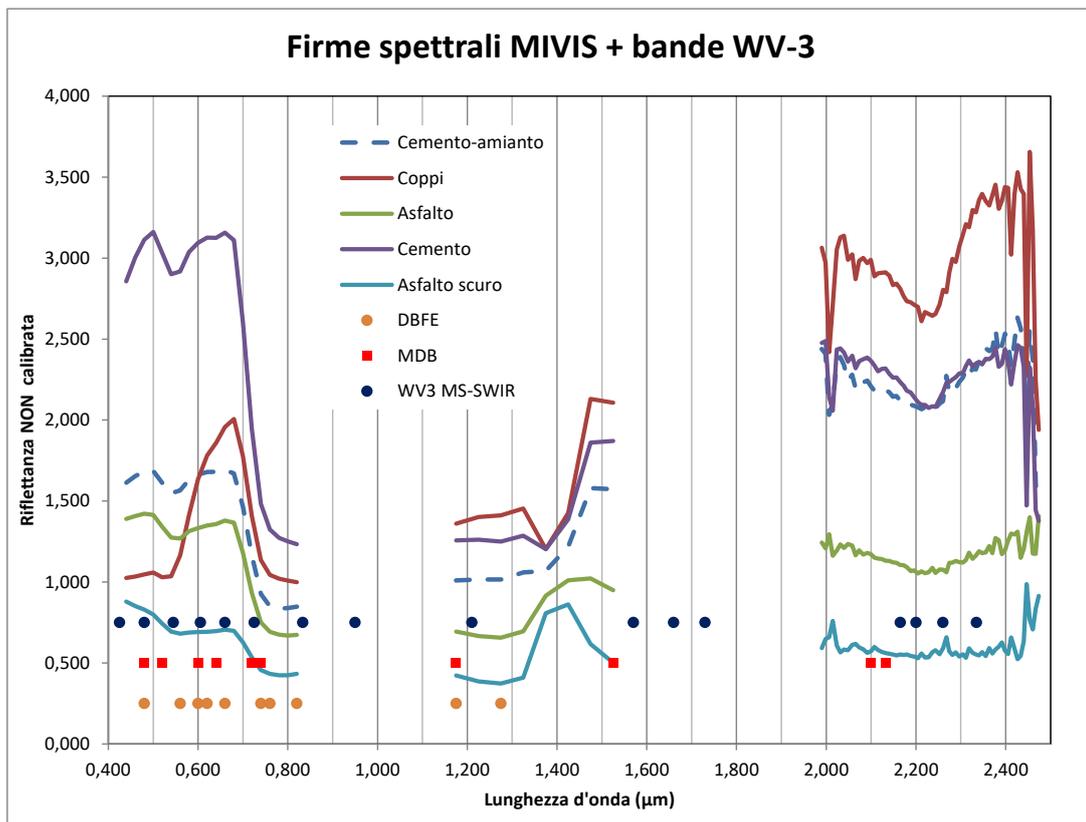


Figura 71: Grafico relativo alle firme spettrali medie di alcune tipologie di superfici, fra cui il cemento-amianto, rilevate dal sensore iperspettrale MIVIS, ed identificazione tramite algoritmi specifici (punti identificati con DBFE e MDB) delle bande spettrali più utili per la mappatura dell'amianto; sono state aggiunte, per confronto, le localizzazioni centrali delle 16 bande di WorldView-3 (8 multispettrali e 8 SWIR, individuate dai pallini blu).

Una sperimentazione effettuata su dati test acquisiti dal satellite worldView-3 è descritta nel successivo paragrafo.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

7.1.4 Sperimentazione dei dati WorldView-3 su un'area test

Al fine di valutare, almeno in via preliminare, la fattibilità di utilizzo dei dati di WorldView-3 ai fini della mappatura delle coperture in cemento-amianto, è stato condotto un test utilizzando una specifica acquisizione test “di archivio” di questo satellite, realizzata e resa disponibile dai *data provider* DigitalGlobe e Planetek Italia, su un'area della pianura lombarda.

L'area test selezionata, di estensione pari a 5x5 Km, è localizzata in provincia di Bergamo, e copre parte dei Comuni di Orio al Serio, Grassobbio, Azzano San Paolo, Seriate, Zanica e Cavernago. Tale area è stata selezionata in particolare poiché ricade all'interno dell'area che fu mappata con MIVIS nell'ambito del PRAL, ed al suo interno ricadono un buon numero di coperture in cemento-amianto note ed una buona variabilità di altre tipologie di coperture degli edifici.

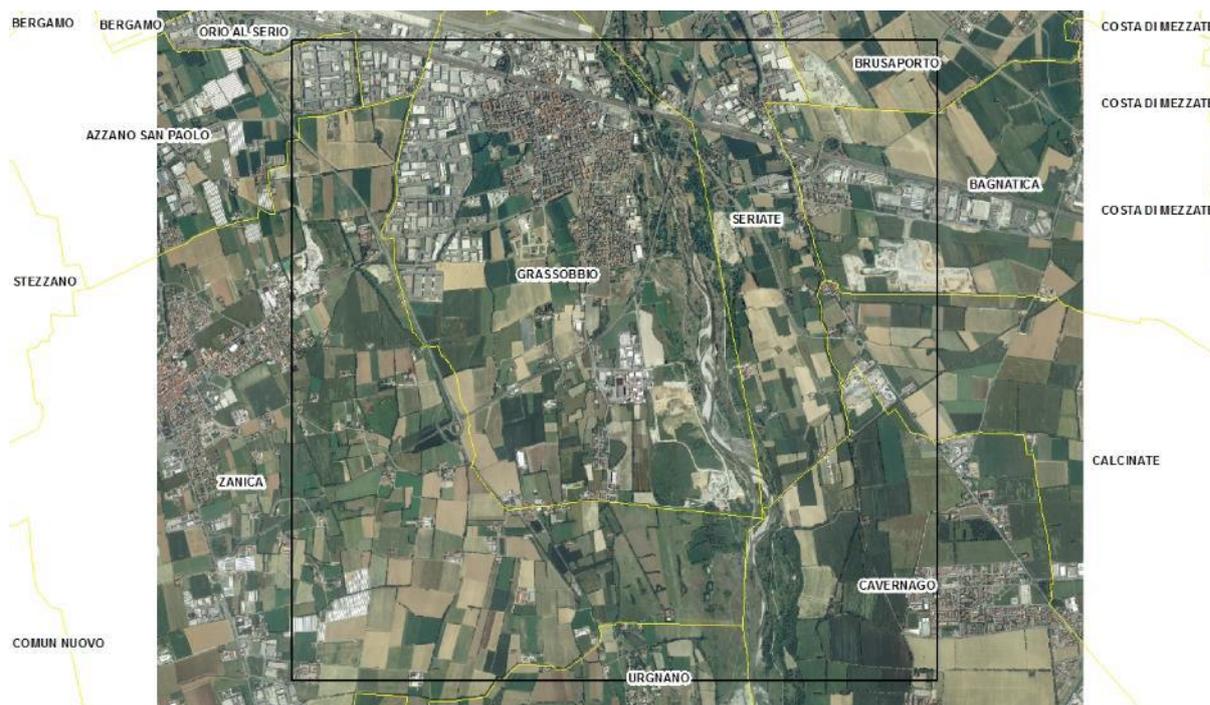


Figura 72: Area test interessata dalla sperimentazione dei dati satellitari WorldView-3

Per motivi tecnici, l'acquisizione di VW-3 sull'area test avvenne in due diversi periodi durante l'estate 2015; in particolare, le 8 bande del sensore SWIR (infrarosso medio) furono acquisite il 25 luglio 2015, mentre le 8 bande multispettrale (regioni del visibile e NIR) e la banda pancromatica furono acquisite solo più di due mesi più tardi (il 26 settembre 2015).

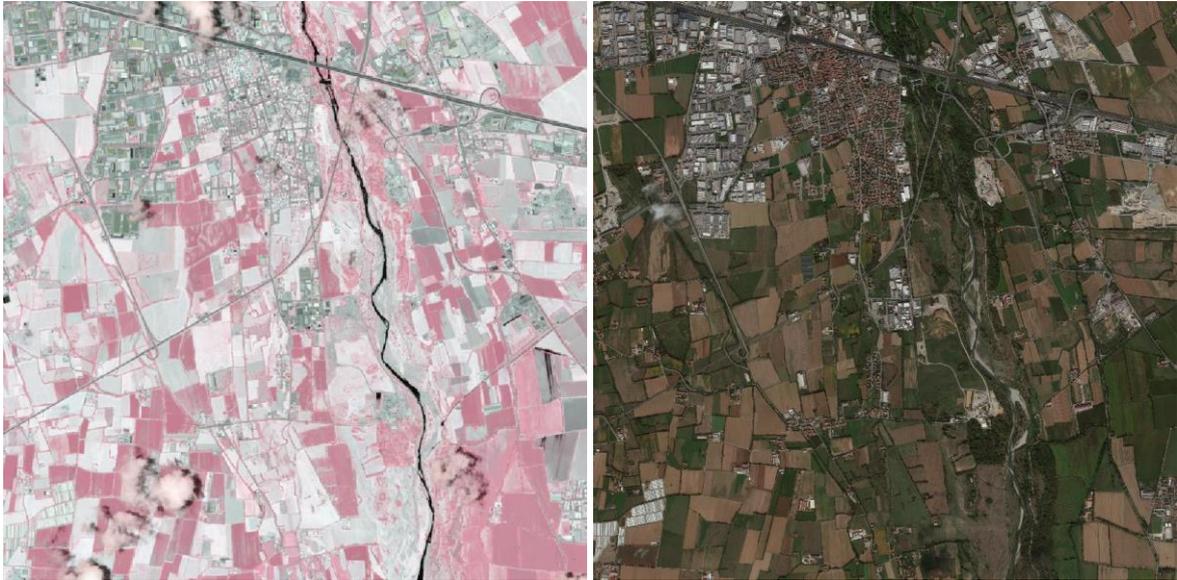


Figura 73: Quicklook delle due differenti acquisizioni realizzate con WorldView-3 sull'area test (poligoni di 5x5 Km): a sinistra, acquisizione SWIR realizzata il 25/7/15, a destra acquisizione multispettrale realizzata il 26/9/15.

In entrambe le acquisizioni si osservano delle piccole nubi, comunque di ridotta entità, che solo localmente pregiudicano l'utilizzo dei dati satellitari.

Dal punto di vista tecnico, il maggiore ostacolo all'elaborazione e alla valutazione dei dati test disponibili è la differente tempistica di acquisizione delle bande multispettrali e delle bande SWIR, poiché le condizioni di illuminazione nei due periodi sono considerevolmente differenti; anche la geometria di acquisizione delle due riprese è differente, quindi le diverse coperture degli edifici sono visualizzate da angoli di vista differenti, e quindi le diverse risposte degli oggetti, in termini di "firme spettrali", sono affette da un ulteriore elemento di variabilità.

Per questi motivi, la prima parte delle analisi sui dati test di WorldView-3 è stata condotta in modo distinto sui due data set separati (ovvero prima sulle sole bande SWIR e poi sulle sole bande multispettrali), con l'obiettivo generale di valutare, almeno qualitativamente, la discriminabilità spettrale di diverse tipologie di coperture (e naturalmente al loro interno delle coperture in cemento-amianto).

A questo scopo, sono stati individuati diversi punti rappresentativi di specifiche classi di coperture artificiali, con lo scopo di valutare la risposta spettrale dei corrispondenti pixel nelle diverse bande di WV-3 (figura seguente). Oltre a punti per la classe "coperture in cemento-amianto", selezionati sulla base della mappatura realizzata con MIVIS, sono stati raccolti "campioni" di pixel riferiti alle classi, volutamente generiche, "asfalto chiaro", "asfalto scuro", "edifici grigi", "edifici con coppi", "edifici riflettenti".

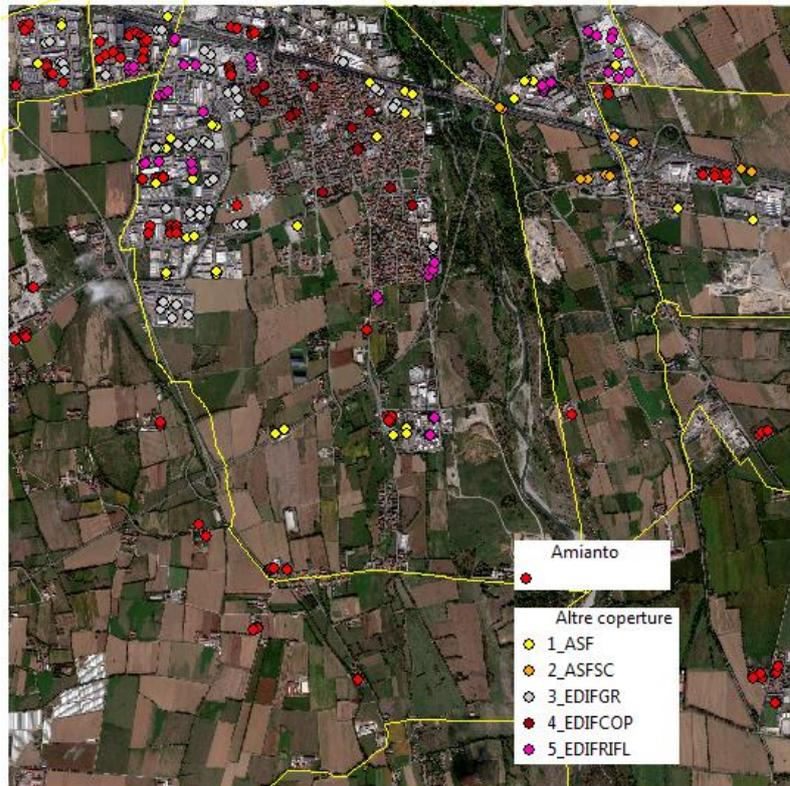


Figura 74: Raccolta, nell'immagine WorldView-3 test disponibile, di punti rappresentativi delle principali classi di coperture artificiali di cui si vuole valutare la discriminabilità spettrale (cemento-amianto, asfalto chiaro, asfalto scuro, edifici grigi non in amianto, edifici con coperture di coppi, edifici riflettenti)

A titolo di primo esempio, si riportano gli andamenti statistici (media, 10° e 90° percentile) dei pixel rappresentativi di tre classi di superfici molto differenti (anche solo per la loro risposta nella regione del visibile e NIR) come le coperture in cemento-amianto, l'asfalto "chiaro" e l'asfalto "scuro", relativamente sia alle 8 bande multispettrali che alle 8 bande SWIR.

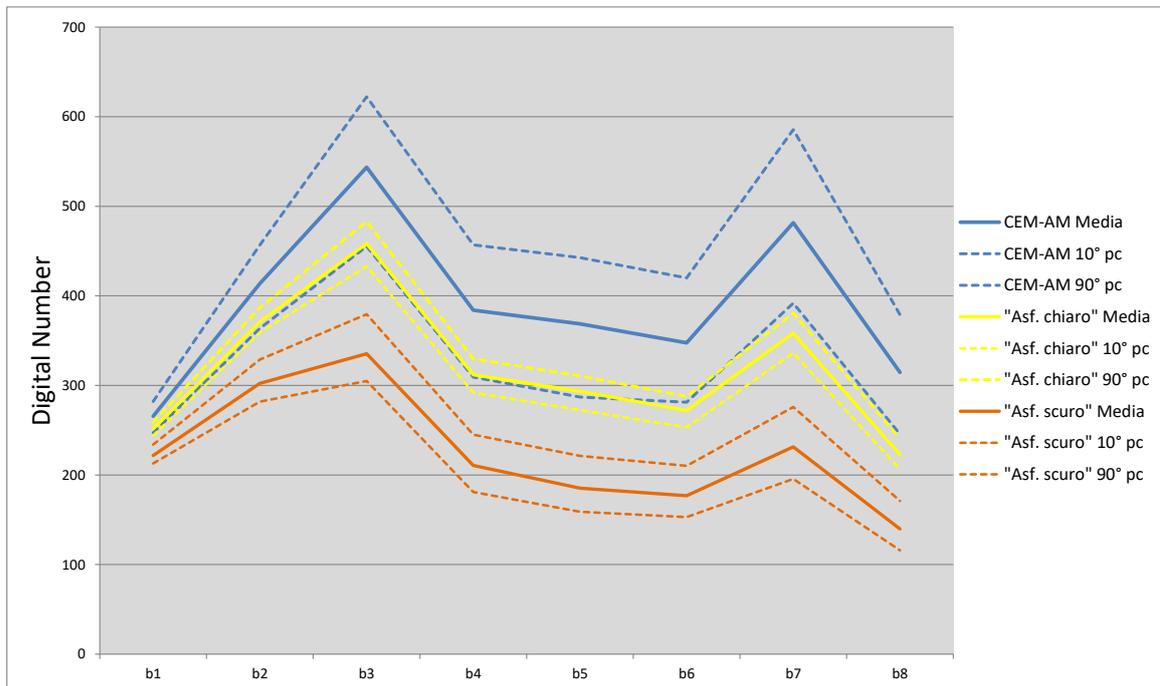


Figura 75: Distribuzione statistica (sono rappresentate media, 10° e 90° percentile) della risposta spettrale nelle 8 bande multispettrali di WV-3, per un numero significativo di pixel rappresentativi delle tipologie di coperture “cemento-amianto”, “asfalto chiaro” e “asfalto scuro”.

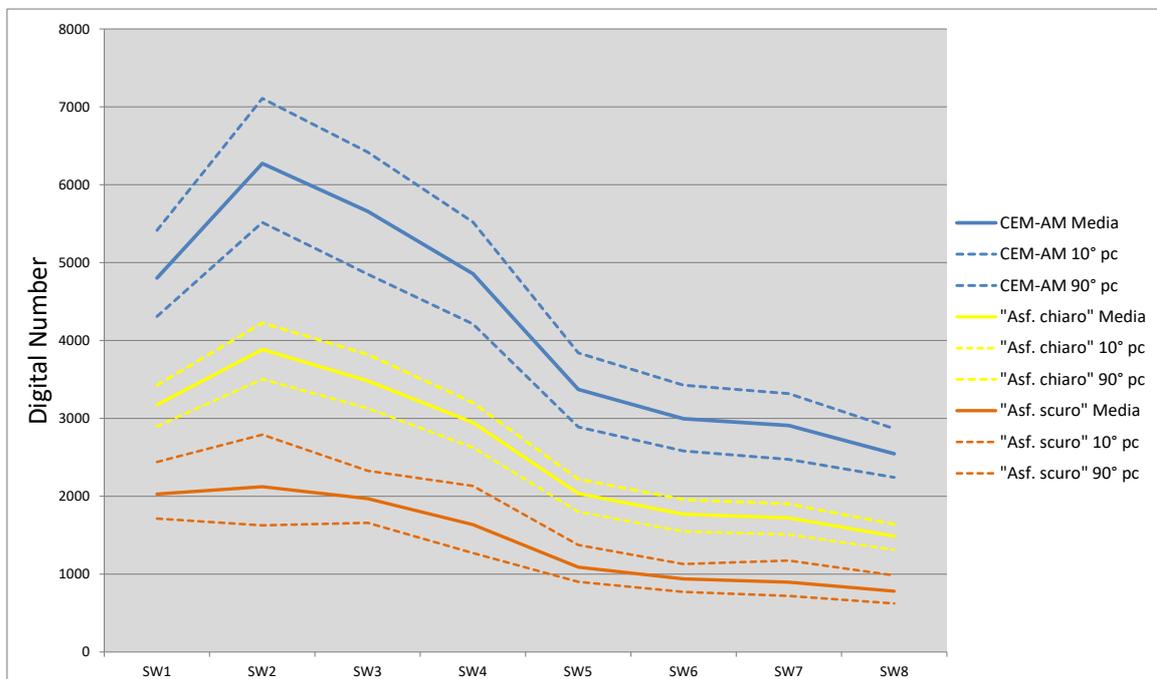


Figura 76: Distribuzione statistica (sono rappresentate media, 10° e 90° percentile) della risposta spettrale nelle 8 bande SWIR di WV-3, per un numero significativo di pixel rappresentativi delle tipologie di coperture “cemento-amianto”, “asfalto chiaro” e “asfalto scuro”.

L’osservazione qualitativa principale che emerge dall’analisi di questi primi casi è che la separabilità spettrale di queste classi, già buona nelle regioni visibile e NIR, appare considerevolmente maggiore nelle bande SWIR. Allo stesso modo, è possibile valutare in modo quali-quantitativo le differenti

risposte di superfici maggiormente "critiche" dal punto di vista della loro separabilità spettrale, come, in particolare, le coperture in cemento-amianto rispetto ad altre coperture di edifici "grigi", ovvero casistiche di superfici, almeno nel visibile, difficilmente distinguibili. Nel grafico seguente, ad esempio, viene riportato il confronto fra la risposta di queste due classi di superfici nelle 8 bande del multispettrale.

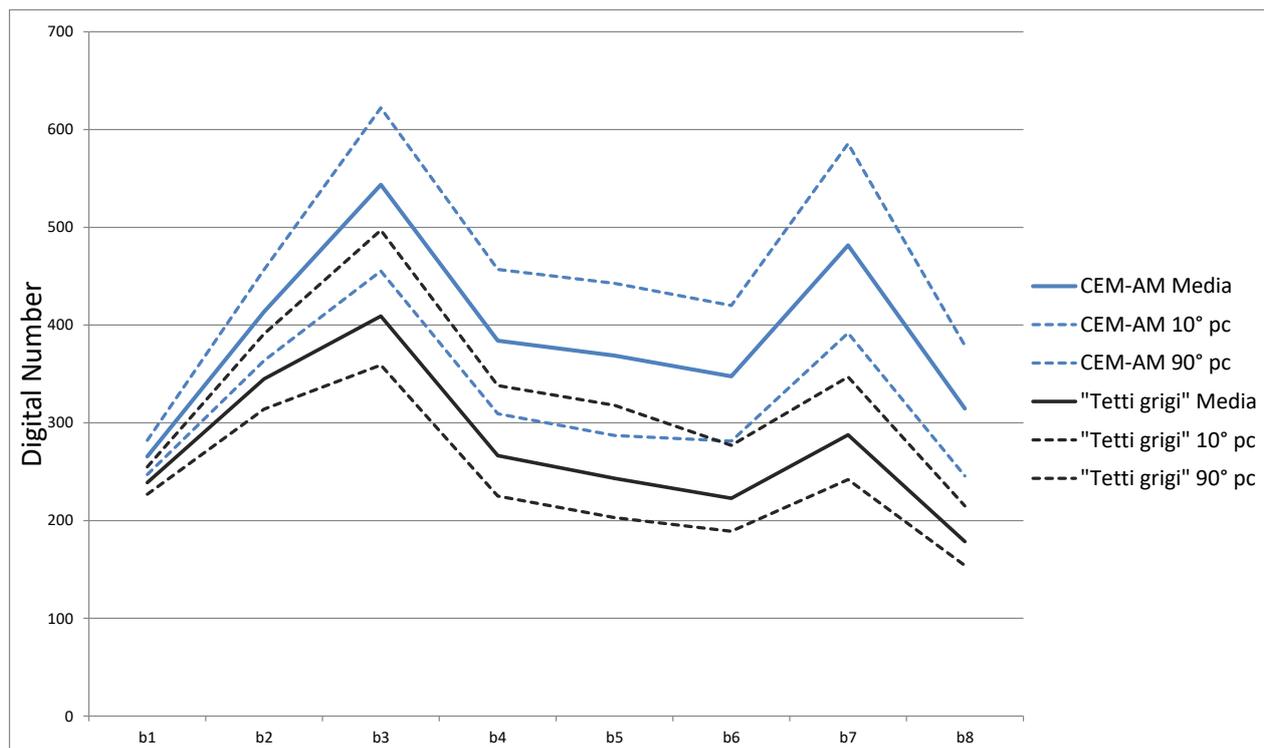


Figura 77: Distribuzione statistica (sono rappresentate media, 10° e 90° percentile) della risposta spettrale nelle 8 bande multispettrali di WV-3, per un numero significativo di pixel rappresentativi delle tipologie di coperture "cemento-amianto" e "edifici grigi".

In questo caso, si osserva un parziale sovrapposizione statistica dei due fasci di curve relativi alle due classi in esame, ovvero emerge una non completa separabilità di queste due tipologie di superfici usando le sole bande multispettrali di WV-3; va comunque sottolineato che il data set di punti utilizzati è lo stesso utilizzato per valutare la scarsa separabilità utilizzando le sole ortofoto AGEA nelle sole bande RGB e NIR (si veda per confronto la Figura 65). In questo caso, usando i dati WV-3 multispettrali, le due classi appaiono avere una tendenziale migliore separabilità (in particolare, ad esempio, nella banda "b7", ovvero la banda nella regione del NIR attorno a 840 nm).

Nel grafico seguente viene riportato il successivo e analogo confronto fra la risposta delle due classi di superfici "cemento-amianto" e "tetti grigi", ma relativo alle 8 bande dello SWIR.

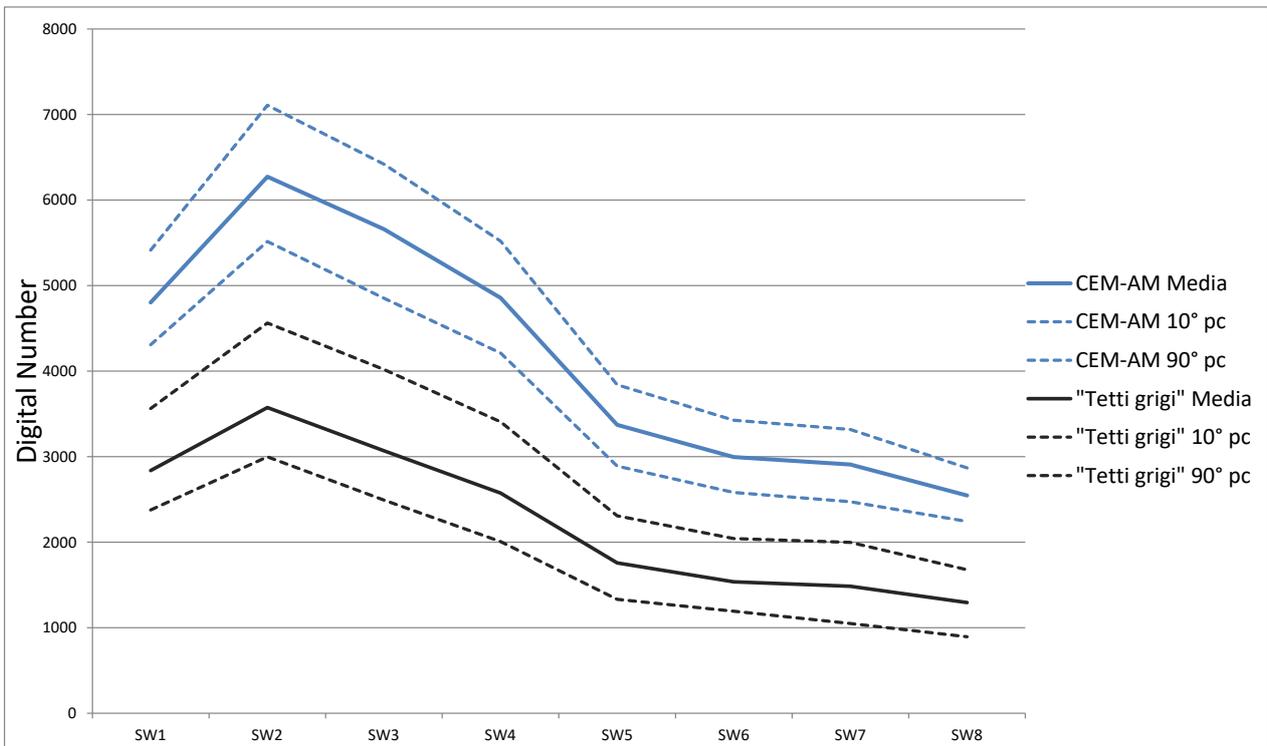


Figura 78: Distribuzione statistica (sono rappresentate media, 10° e 90° percentile) della risposta spettrale nelle 8 bande SWIR di WV-3, per un numero significativo di pixel rappresentativi delle tipologie di coperture “cemento-amianto” e “edifici grigi”.

Dall’analisi dell’andamento dei fasci di curve relativi alle due classi in esame, in questo caso appare una buona separabilità delle due tipologie di superfici nella regione dello SWIR; più nel dettaglio, l’andamento statistico appare molto omogeneo nelle diverse bande SWIR (ovvero il segnale nelle diverse bande SWIR appare essere molto correlato).

Tale tipo di confronto è stato ripetuto anche fra la classe “cemento-amianto” e le altre macro classi di superfici indagate e, in estrema sintesi, sulla base di queste analisi sui dati WV-3 e almeno a livello qualitativo, il contributo informativo ottenibile dalle bande dello SWIR appare molto importante al fine di una migliore identificazione di classi di superfici, che nelle sole regioni spettrali del visibile e del NIR sono affette da un certo grado di ambiguità e sovrapposizione nella risposta spettrale.

Oltre che con confronti realizzati separatamente fra i dati delle due acquisizioni nel multispettrale e nello SWIR, e limitandosi ai dati “grezzi” (ovvero usando i Digital Number originali), le due acquisizioni di WV-3 sono state successivamente elaborate al fine di trasformare i dati nativi, espressi come Digital Number, dapprima in Radianza e successivamente in Riflettività. A questo scopo, sono stati utilizzati i coefficienti di trasformazione reperibili nei metadata delle immagini e le metodologie standardizzate definite, almeno per i dati del precedente satellite WorldView-2, in specifici documenti tecnici redatti dalla DigitalGlobe (in particolare, il documento “Radiometric Use of WorldView-2 Imagery - Technical Note”).

Una volta trasformati in Riflettività (intesa formalmente come “Top of Atmosphere Reflectance”) i dati acquisiti dai due differenti sensori multispettrale e SWIR anche a distanza di due mesi, sono,

almeno a livello teorico, indipendenti dalle diverse condizioni di illuminazione e possono essere quindi analizzati assieme, anche in termini di analisi delle "firme spettrali" delle diverse superfici nell'insieme delle regioni spettrali del visibile, IR vicino e IR medio.

A titolo di esempio, quindi, si riporta un grafico di sintesi in cui sono confrontate, per le tipologie di superfici indagate, le statistiche riferite alla loro riflettività percentuale nel totale delle 16 bande di WV-3 (distribuite quindi in tutto il range dal visibile all'IR medio). In questo caso, a differenza dei casi precedenti, l'asse delle ascisse riporta l'effettiva localizzazione delle bande spettrali (riferita alla lunghezza d'onda centrale della singola banda spettrale).

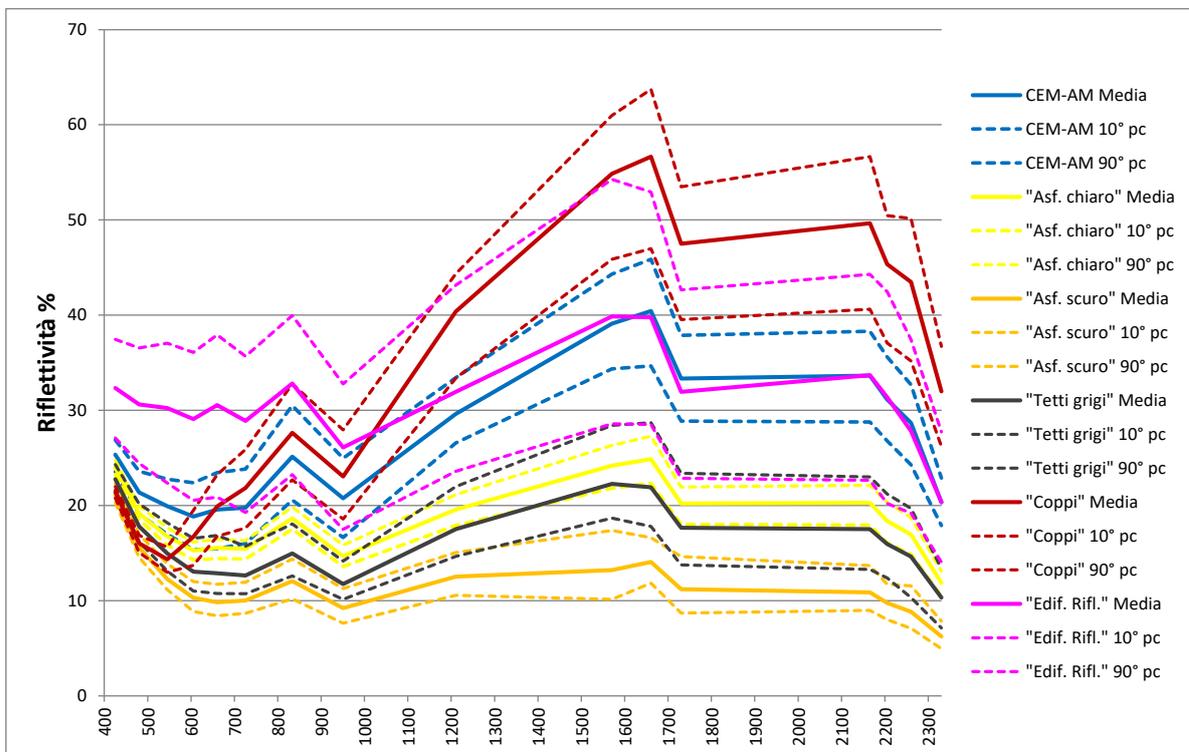


Figura 79: Curve di riflettività spettrale delle classi di superfici analizzate, ricavate dalle immagini multispettrali e SWIR di WV-3; come nei casi precedenti, per ogni classe di superficie viene riportata la media, il 10° e il 90° percentile).

Focalizzando infine l'attenzione, anche per una migliore lettura del grafico, solo sulle tre classi di superfici più difficili da discriminare (cemento-amianto, edifici con tetto grigio, edifici riflettenti) viene confermata una buona separabilità spettrale, sicuramente migliore rispetto ai casi in cui si dispone delle sole bande multispettrali tradizionali.

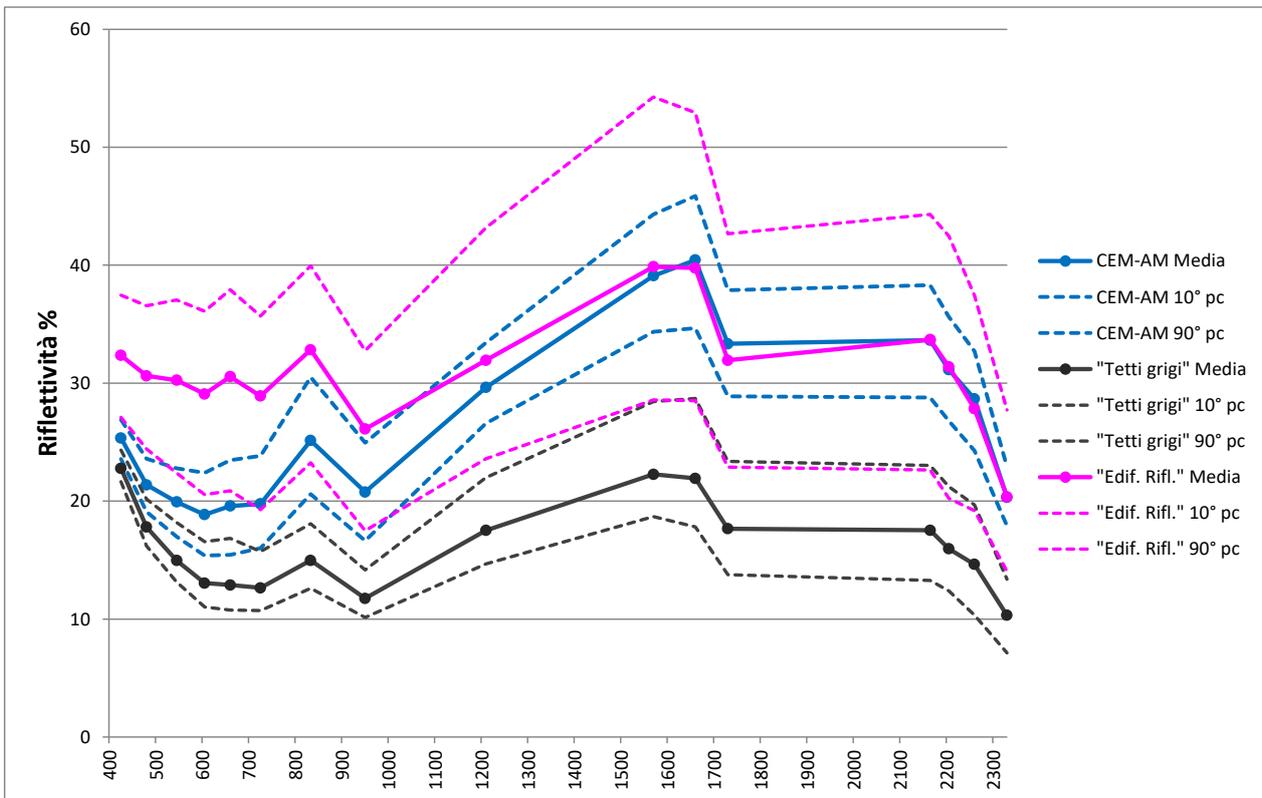


Figura 80: Curve di riflettività spettrale delle classi di superfici “cemento-amianto”, “edifici grigi”, “edifici riflettenti”, ricavate dalle immagini multispettrali e SWIR di WV-3; come nei casi precedenti, per ogni classe di superficie viene riportata la media, il 10° e il 90° percentile).

Nel grafico in Figura 80, va sottolineato in particolare il confronto fra la classe “cemento-amianto” e la classe “edifici riflettenti”: queste due tipologie di superfici appaiono avere una notevole differenziazione della risposta nella regione del visibile e del NIR, mentre, viceversa, nella regione dello SWIR hanno riflettività medie molto simili (anche se con una variabilità molto ampia, in particolare nel caso degli edifici riflettenti, caratterizzati appunto da una ampia gamma di materiali). Questa osservazione sottolinea l’importanza di poter disporre, ai fini di una classificazione il più possibile accurata, dei dati di entrambi i sensori multispettrale e SWIR.

Allo stato attuale, sulla base delle valutazioni effettuate, l’opzione di mappatura che prevede l’utilizzo dei dati satellitari di WorldView-3 appare, almeno dal punto di vista tecnico, promettente. Un ulteriore margine di miglioramento è legato alla potenziale disponibilità futura dei dati del sensore SWIR non degradati a 7,5 metri, come allo stato attuale a causa di restrizioni normative americane, ma alla risoluzione nativa di 3,7 metri.

Nelle valutazioni complessive costi/benefici di questa possibile soluzione, va ovviamente considerato anche il fattore del costo di questo tipo di dato, che viene acquisito con una logica commerciale. Da informazioni preliminari acquisite dai rivenditori di questo dato sono emerse delle quotazioni indicative di massima, riferite ad una superficie indicativa mappata di 1000 Km²:

Ripresa (singola, non stereo) multispettrale - 0-15° ONA - 30 cm - Ortho Ready Standard - Bundle 8 bande

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

- *Superficie di 1.000 Km² : Euro 51.000 + IVA*

Ripresa (singola, non stereo) SWIR - 0-15° ONA – 7,5 m - Ortho Ready Standard contestuale alla ripresa multispettrale

- *Superficie di 1.000 Km² : Euro 51.000 + IVA*

Per le superfici più ampie di 5.000 e 10.000 Km² possono sicuramente essere considerate delle economie di scala.

I due prodotti (bande multispettrali e bande SWIR), hanno un costo analogo. Dalla sperimentazione effettuata, è emersa però l'importanza di poter disporre di entrambe queste tipologie di dati al fine di aumentare la discriminabilità spettrale delle principali classi di superfici. Inoltre, vanno considerati gli altri costi ulteriori rispetto all'acquisizione del dato telerilevato, legati alle fasi di pre-elaborazione, classificazione e restituzione dei dati nei formati finali richiesti.

In questo senso quindi, complessivamente e considerando tutti questi fattori, la soluzione di mappatura sulla base di dati satellitari multispettrali ad alta risoluzione, seppur potenzialmente interessante e promettente dal punto di vista tecnico, non appare ad oggi sufficientemente competitiva rispetto ai tradizionali rilievi aerei iperspettrali, che garantiscono migliori risoluzioni geometriche, elevata omogeneità nelle acquisizioni sulle aree di interesse, ed elevate accuratezze tematiche nella mappatura.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

8 Formato dei dati

I dati prodotti nelle due Fasi principali del Progetto AMIANTO sono raccolti in una cartella compressa denominata “**AMIANTO_consegna**”.

Al suo interno sono presenti le due cartelle con i dati relativi alla Fase1 (Aggiornamento delle mappature esistenti) e alla Fase2 (Estensione della mappatura).

In particolare, nella cartella Fase1 è reso disponibile il file vettoriale, in formato ESRI shapefile, denominato “**AMIANTO_Fase1_AggiornamentoMappature.shp**”.

Tale shapefile è l'unione delle diverse mappature esistenti, aggiornate rispetto alle annualità disponibili, come descritto nel Paragrafo 4.

I campi della tabella degli attributi dello shapefile riportano queste informazioni:

- campo testuale **FONTE**: denominazione della mappatura originaria oggetto di aggiornamento (PRAL, Comune Milano, Comuni Monzese, Comuni Pavese).
- campo numerico **AREA**: superficie del poligono mappato, in m².
- campi numerici **1999, 2012, 2013, 2015, 2018**: campi che codificano la classificazione delle singole coperture mappate nei diversi anni disponibili, secondo la legenda riportata in Tabella 8 : il valore 1 codifica una copertura in cemento amianto ancora presente “non variata” nella specifica annualità, il valore 2 codifica una variazione avvenuta rispetto all'annualità precedente, il valore 3 codifica una variazione avvenuta rispetto all'annualità precedente con contestuale installazione di coperture fotovoltaiche, il valore 4 codifica una variazione avvenuta rispetto all'annualità precedente con contestuale demolizione dell'edificio; il valore 0 è riferito a situazioni di non disponibilità dell'informazione (ad esempio per l'anno 1999 nei poligoni che non siano della mappatura del Comune di Milano), o di poligoni in cui i cambiamenti nella copertura sono già stati individuati nelle annualità precedenti.

Infine, nella cartella Fase2 sono resi disponibili i due file vettoriali, in formato ESRI shapefile, denominati “**AMIANTO_Fase2_AreeMappatura2020.shp**”, che identifica gli areali oggetto dell'estensione della Mappatura delle coperture realizzata con il rilievo del 2020, descritto nel Paragrafo 5, e lo strato “**AMIANTO_Fase2_EstensioneMappatura.shp**”, che identifica le coperture in cemento amianto mappate. In questo caso, l'unico campo descrittivo, trattandosi della prima mappatura, è il campo “**AREA**”, che esprime la superficie dei singoli poligoni mappati in m².

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

9 Possibili sviluppi futuri

La metodologia adottata nel progetto AMIANTO si è dimostrata altamente affidabile e accurata e potrà essere adottata nuovamente in futuro per aggiornare le mappature prodotte dal progetto AMIANTO e per mappare i territori non ancora rilevati.

Si può ipotizzare che la maggior parte delle coperture in cemento-amianto sia presente nelle aree di pianura antropizzate per una superficie totale di circa 10.000 Km². Considerando che di questa superficie attraverso il progetto AMIANTO è già stata mappata una superficie di 3.700 Km², resterebbero da mappare ancora 6.300 Km².

Una futura riedizione del progetto, potrebbe articolarsi nuovamente in due fasi:

- Fase 1: aggiornamento delle coperture prodotte dal progetto AMIANTO sulla base delle ortoimmagini AGEA che la Regione acquisisce sistematicamente o di altre immagini ad altissima risoluzione adatte allo scopo.
- Fase 2: esecuzione di nuovi rilievi aerei iperspettrali per mappare le superfici rimanenti.

Nella seguente Tabella 24 , si forniscono delle stime di massima dei costi di realizzazione delle fasi suddette:

	Km ²	Costo/Km ² €	Costo totale €
Fase 1: Aggiornamento mappature prodotte dal progetto AMIANTO.	3.700	25	92.500
Fase 2: Estensione della mappatura alle aree di pianura non ancora rilevate.	6.300	200	1.260.000
Totale	10.000		1.352.500

Tabella 24. Stima dei costi (IVA inclusa) per la estensione della mappatura delle coperture in cemento-amianto alle aree di pianura per una superficie totale di 10.000 Km².

Il costo complessivo per realizzare la mappatura della Lombardia maggiormente antropizzate è stimato quindi in circa 1,3 milioni €.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

10 Riferimenti normativi

D.G.R. IX/3913 6 Agosto 2012, "Attività inerenti la messa a sistema delle fonti di informazione sulla presenza di amianto in Lombardia finalizzata al monitoraggio della relativa bonifica".

Legge Regionale 31 Luglio 2012 N° 14, "Modifiche e integrazioni alla Legge Regionale 29 Settembre 2003 N° 17 (Norme per il risanamento dell'ambiente, bonifica e smaltimento dell'amianto)".

Decreto Direzione Generale della Sanità N. 13237 del 18/11/2008 avente per oggetto: "Approvazione del protocollo per la valutazione dello stato di conservazione delle coperture in cemento amianto e contestuale abrogazione dell'algorithmo per la valutazione delle coperture esterne in cemento amianto di cui alla D.G.R. N.VII/1439 del 4/10/2000".

D.G.R. VIII/1526 22 Dicembre 2005, "Approvazione del Piano Regionale Amianto della Lombardia (PRAL)".

Legge Regionale 29 Settembre 2003 N° 17, "Norme per il risanamento dell'ambiente, bonifica e smaltimento dell'amianto".

D.P.R. 8 Agosto 1994, "Atto di indirizzo e coordinamento alle regioni e alle province autonome di Trento e di Bolzano per l'adozione di piani di protezione, di decontaminazione, di smaltimento e di bonifica dell'ambiente, ai fini della difesa dai pericoli derivanti dall'amianto".

Legge 27 Marzo 1992 N° 257, "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto".

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

11 Riferimenti bibliografici

"Ancora amianto in Lombardia ?", Note informative sull'attuazione delle politiche regionali, N. 24, Febbraio 2016, Regione Lombardia, il Consiglio.

"Mappatura delle coperture in cemento-amianto e monitoraggio delle fibre di amianto in aria", Rapporto esecutivo, 24 Febbraio 2015, ARPA Lombardia.

"Missione valutativa. L'informazione ai cittadini e la riduzione dell'amianto in Lombardia", Rapporto Finale, Gennaio 2014, Rapporto di Ricerca, Eupolis Lombardia.

"Aggiornamento al 2012 della mappatura 2007 delle coperture in cemento-amianto tramite fotointerpretazione delle ortofoto AGEA 2012", 1 Agosto 2014, ARPA Lombardia.

"Mappatura delle coperture in cemento-amianto. Piano Regionale Amianto della Lombardia (PRAL)", Relazione Finale, 11 Novembre 2008, ARPA Lombardia.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

12 Allegato 1. Elenco delle strisciate

La Tabella 25 Tabella 2 indica la data e l'orario di realizzazione e l'orientamento delle singole strisciate elaborate.

Data	Ora (Local Time)	Run	Heading	Area
20200507	12:37	1	360	CREMONA
20200507	12:42	2	180	CREMONA
20200507	12:48	3	360	CREMONA
20200507	12:51	4	180	CREMONA
20200507	13:00	5	360	CREMONA
20200507	13:02	6	180	CREMONA
20200507	13:10	7	180	CREMONA
20200507	13:16	8	360	CREMONA
20200507	13:22	9	180	CREMONA
20200508	10:56	1	360	SEGRATE
20200508	11:00	2	180	SEGRATE
20200508	11:07	3	360	SEGRATE
20200508	11:15	4	180	SEGRATE
20200508	11:20	5	360	SEGRATE
20200508	11:27	6	180	SEGRATE
20200508	11:34	7	360	SEGRATE
20200508	11:41	8	180	SEGRATE
20200508	11:48	9	360	SEGRATE
20200508	11:55	10	180	SEGRATE
20200508	12:02	11	360	SEGRATE
20200508	12:08	12	180	SEGRATE
20200508	12:16	13	360	SEGRATE
20200508	12:26	14	180	SEGRATE
20200508	12:32	15	360	SEGRATE
20200508	12:38	16	180	SEGRATE
20200508	12:44	17	360	SEGRATE
20200508	12:49	18	180	SEGRATE
20200508	12:54	19	360	SEGRATE
20200508	13:01	20	180	SEGRATE
20200509	10:10	1	360	LODI
20200509	10:15	2	180	LODI
20200509	10:19	3	360	LODI
20200509	10:23	4	180	LODI
20200509	10:28	5	360	LODI
20200509	10:36	6	180	LODI
20200509	10:39	7	360	LODI
20200509	10:45	8	180	LODI
20200509	10:51	9	360	LODI
20200509	10:55	10	180	LODI
20200509	11:01	11	360	LODI
20200509	11:07	12	180	LODI
20200509	11:26	10	360	CREMONA
20200509	11:31	11	180	CREMONA

Data	Ora (Local Time)	Run	Heading	Area
20200509	11:38	12	360	CREMONA
20200509	11:43	13	180	CREMONA
20200509	11:49	14	360	CREMONA
20200509	11:55	15	180	CREMONA
20200509	12:00	16	360	CREMONA
20200509	12:06	17	180	CREMONA
20200509	12:08	18	360	CREMONA
20200509	12:20	1	360	AREA B
20200509	12:25	2	180	AREA B
20200509	12:30	3	360	AREA B
20200509	12:42	5	360	AREA B
20200509	12:48	6	180	AREA B
20200509	12:58	7	360	AREA B
20200509	13:04	8	180	AREA B
20200509	13:11	9	360	AREA B
20200509	13:17	10	180	AREA B
20200521	10:15	1	180	MANTOVA
20200521	10:20	2	360	MANTOVA
20200521	10:25	3	180	MANTOVA
20200521	10:30	4	360	MANTOVA
20200521	10:37	5	180	MANTOVA
20200521	10:42	6	360	MANTOVA
20200521	10:52	7	180	MANTOVA
20200521	10:58	8	360	MANTOVA
20200521	11:04	9	180	MANTOVA
20200521	11:12	10	360	MANTOVA
20200521	11:15	11	180	MANTOVA
20200521	11:24	12	360	MANTOVA
20200521	11:32	13	180	MANTOVA
20200521	11:38	14	360	MANTOVA
20200521	11:43	15	180	MANTOVA
20200521	11:48	16	360	MANTOVA
20200521	11:54	17	180	MANTOVA
20200521	11:59	18	360	MANTOVA
20200521	12:03	19	180	MANTOVA
20200521	12:06	20	360	MANTOVA
20200521	12:45	11	360	AREA B
20200521	12:53	12	180	AREA B
20200521	13:02	13	360	AREA B
20200521	13:09	14	180	AREA B
20200521	13:20	15	360	AREA B
20200521	13:28	16	180	AREA B
20200521	13:36	17	360	AREA B
20200521	13:45	18	180	AREA B
20200521	13:52	19	360	AREA B
20200521	14:02	20	180	AREA B
20200521	14:09	21	360	AREA B
20200521	14:17	22	180	AREA B
20200521	14:25	23	360	AREA B
20200521	14:32	24	180	AREA B

Data	Ora (Local Time)	Run	Heading	Area
20200524	11:33	1	49	LECCO
20200524	11:38	2	228	LECCO
20200524	11:43	3	49	LECCO
20200524	11:50	4	228	LECCO
20200524	11:58	5	360	LECCO
20200524	12:02	6	180	LECCO
20200524	12:07	7	360	LECCO
20200524	12:13	8	180	LECCO
20200524	12:18	9	360	LECCO
20200524	12:39	1	180	COMO
20200524	12:44	2	360	COMO
20200524	12:48	3	180	COMO
20200524	12:52	4	360	COMO
20200524	12:57	5	180	COMO
20200524	13:02	6	360	COMO
20200524	13:08	7	180	COMO
20200524	13:11	8	360	COMO
20200524	13:16	9	180	COMO
20200524	13:23	10	360	COMO
20200524	13:28	11	180	COMO
20200524	13:33	12	360	COMO
20200524	13:37	13	180	COMO
20200524	13:42	14	360	COMO
20200525	11:08	6	267	SONDRIO
20200525	11:14	5	87	SONDRIO
20200525	11:20	4	267	SONDRIO
20200525	11:25	3	87	SONDRIO
20200525	11:29	2	267	SONDRIO
20200525	11:35	1	87	SONDRIO
20200525	12:12	4	180	AREA B
20200525	12:22	25	360	AREA B
20200525	12:32	26	180	AREA B
20200525	12:37	27	360	AREA B
20200525	12:43	28	180	AREA B
20200525	12:50	29	360	AREA B
20200525	12:58	30	180	AREA B
20200525	13:06	31	360	AREA B
20200525	13:14	32	180	AREA B
20200525	13:21	33	360	AREA B
20200525	13:28	34	180	AREA B
20200525	13:35	35	360	AREA B
20200525	13:42	36	180	AREA B
20200525	13:46	37	360	AREA B
20200526	10:26	1	360	FERRERA
20200526	10:31	2	180	FERRERA
20200526	10:34	3	360	FERRERA
20200526	10:38	4	180	FERRERA
20200526	10:42	5	360	FERRERA
20200526	10:47	6	180	FERRERA
20200526	10:52	7	360	FERRERA

Data	Ora (Local Time)	Run	Heading	Area
20200526	10:56	8	180	FERRERA
20200526	11:03	1	360	AREA A
20200526	11:05	2	180	AREA A
20200526	11:10	3	360	AREA A
20200526	11:15	4	180	AREA A
20200526	11:20	5	360	AREA A
20200526	11:26	6	180	AREA A
20200526	11:32	7	360	AREA A
20200526	11:41	8	180	AREA A
20200526	11:48	9	360	AREA A
20200526	11:56	10	180	AREA A
20200526	12:06	11	360	AREA A
20200526	12:12	12	180	AREA A
20200526	12:18	13	360	AREA A
20200526	12:25	14	180	AREA A
20200526	12:32	15	360	AREA A
20200526	12:39	16	180	AREA A
20200526	12:46	17	360	AREA A
20200526	12:54	18	180	AREA A
20200526	13:00	19	360	AREA A
20200526	13:07	20	180	AREA A
20200526	13:14	21	360	AREA A
20200526	13:21	22	180	AREA A
20200527	10:37	52	360	AREA A
20200527	10:41	51	180	AREA A
20200527	10:45	50	360	AREA A
20200527	10:50	49	180	AREA A
20200527	10:54	48	360	AREA A
20200527	11:00	47	180	AREA A
20200527	11:07	46	360	AREA A
20200527	11:14	45	180	AREA A
20200527	11:21	44	360	AREA A
20200527	11:29	43	180	AREA A
20200527	11:35	42	360	AREA A
20200527	11:43	41	180	AREA A
20200527	11:50	40	360	AREA A
20200527	11:57	39	180	AREA A
20200527	12:04	38	360	AREA A
20200527	12:14	37	180	AREA A
20200527	12:18	36	360	AREA A
20200527	12:25	35	180	AREA A
20200527	12:31	34	360	AREA A
20200527	12:38	33	180	AREA A
20200527	12:46	32	360	AREA A
20200527	12:53	31	180	AREA A
20200528	10:08	29	360	AREA A
20200528	10:15	28	180	AREA A
20200528	10:22	27	360	AREA A
20200528	10:28	26	180	AREA A
20200528	10:35	25	360	AREA A

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

Data	Ora (Local Time)	Run	Heading	Area
20200528	10:42	30	180	AREA A
20200528	10:48	24	360	AREA A
20200528	10:55	23	180	AREA A

Tabella 25. Sintesi delle strisciate e degli orari delle riprese.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

13 Allegato 2. Stazioni GNSS di riferimento

La Tabella 26 elenca le stazioni GNSS fisse utilizzate per la prima correzione geometrica dei dati.

Volo	Stazioni GNSS
20200507	AQNC_ITALPOS (ACQUANEGRA) LODO_ITALPOS (LODI) PAMA_ITALPOS (PARMA)
20200508	COMO_SPIN (COMO) LODO_ITALPOS (LODI) MIL2_SPIN (MILANO)
20200509	AQNC_ITALPOS (ACQUANEGRA) BREU_SPIN (BRESCIA) CREA_SPIN (CREMA) CREM_SPIN (CREMONA) LODO_ITALPOS (LODI)
20200521	BREU_SPIN (BRESCIA) CREM_SPIN (CREMONA) MANT-SPIN (MANTOVA)
20200524	COMO_SPIN (COMO) CREA_SPIN (CREMA) LECO_SPIN (LECCO)
20200525	BREU_SPIN (BRESCIA) CREA_SPIN (CREMA) CREM_SPIN (CREMONA) DARF_SPIN (DARFO-BOARIO TERME) LECO_SPIN (LECCO) SONP_SPIN (SONDRIO)
20200526	ALSN-SPIN (ALESSANDRIA) PAVI-SPIN (PAVIA) SERR_SPIN (SERRAVALLE-SRIVIA) VARZ-SPIN (VARZI) VIGE_SPIN (VIGEVANO)
20200527	LODO_ITALPOS (LODI) VARZ_SPIN (VARZI)
20200528	LODO_ITALPOS (LODI) VARZ_SPIN (VARZI) VOCA_ITALPOS (VIGEVANO)

Tabella 26. Elenco delle stazioni GNSS fisse utilizzate per la prima correzione geometrica dei dati.

 Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente	ARPA Lombardia	Progetto: AMIANTO
		Versione: 1.6
		Data emissione: 02/08/2021

14 Allegato 3. Elenco dei punti di verifica della qualità geometrica

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva in cui si è stata selezionata una strisciata di esempio per ogni area di lavoro.

Identificativo RUN	Punto	X	Y	X _{REF}	Y _{REF}	RMSE
run 7 segrate	1	515864,497	5050107,500	515866,183	5050107,042	1,75
run 7 segrate	2	515225,507	5052460,515	515225,681	5052461,320	0,82
run 7 segrate	3	515360,502	5050983,465	515361,007	5050983,219	0,56
run 7 segrate	4	515289,534	5049225,479	515289,732	5049226,431	0,97
run 7 segrate	5	515928,536	5041475,469	515929,542	5041474,820	1,20
run 7 segrate	6	516085,543	5041633,375	516085,429	5041633,948	0,58
run 7 segrate	7	514893,458	5046304,510	514894,020	5046305,016	0,76
run 7 segrate	8	515797,468	5052604,489	515799,139	5052604,935	1,73
run 20 area A	1	509127,489	4992785,490	509127,249	4992785,816	0,40
run 20 area A	2	510096,488	4991755,430	510097,386	4991755,598	0,91
run 20 area A	3	510196,591	4986495,657	510197,953	4986496,917	1,86
run 20 area A	4	509170,520	4984291,548	509170,543	4984292,249	0,70
run 20 area A	5	510046,217	4984368,624	510045,502	4984368,425	0,74
run 20 area A	6	509776,484	4984819,498	509776,089	4984820,014	0,65
run 20 area A	7	509095,473	4987653,452	509095,204	4987653,814	0,45
run 20 area A	8	509983,435	4982129,499	509982,976	4982129,794	0,55
run 20 area B	1	594880,470	5025159,499	594880,873	5025159,859	0,54
run 20 area B	2	595056,491	5024781,492	595056,618	5024781,408	0,15
run 20 area B	3	594634,479	5033370,715	594634,794	5033371,865	1,19
run 20 area B	4	595530,417	5024892,767	595531,390	5024892,767	0,97
run 20 area B	5	594552,685	5024220,614	594552,435	5024219,950	0,71
run 20 area B	6	595350,331	5023570,552	595350,922	5023571,091	0,80
run 20 area B	7	594535,482	5017716,559	594535,026	5017716,164	0,60
run 20 area B	8	579687,538	5000310,838	579687,942	5000309,974	0,95
run 9 Cremona	1	580840,502	4997536,506	580841,277	4997537,187	1,03
run 9 Cremona	2	580271,552	4999276,462	580272,102	4999276,779	0,63
run 9 Cremona	3	580770,483	5002167,527	580771,049	5002168,075	0,79
run 9 Cremona	4	579804,378	4998643,739	579803,524	4998643,742	0,85
run 9 Cremona	5	580799,085	4995764,513	580801,379	4995764,214	2,31
run 9 Cremona	6	580316,500	4996134,058	580316,849	4996134,386	0,48
run 9 Cremona	7	580825,550	4999168,512	580825,683	4999168,882	0,39
run 9 Cremona	8	579687,538	5000310,838	579687,942	5000309,974	0,95
run 8 Como	1	506642,443	5073163,335	506643,663	5073163,113	1,24
run 8 Como	2	507117,407	5072823,564	507117,102	5072824,728	1,20
run 8 Como	3	507577,514	5070986,556	507579,178	5070987,344	1,84
run 8 Como	4	506623,519	5070185,467	506624,297	5070185,810	0,85
run 8 Como	5	507479,363	5067104,423	507479,402	5067104,859	0,44
run 8 Como	6	507530,470	5069479,496	507530,664	5069479,882	0,43
run 8 Como	7	506579,318	5070745,587	506579,318	5070746,541	0,95
run 8 Como	8	650411,216	4965993,946	650411,098	4965994,301	0,37
run 2 Lecco	1	528366,569	5077983,709	528366,993	5077984,635	1,02
run 2 Lecco	2	530955,497	5079229,528	530955,880	5079230,470	1,02
run 2 Lecco	3	531599,757	5080867,482	531599,787	5080867,085	0,40
run 2 Lecco	4	531337,535	5079450,508	531338,210	5079451,407	1,12
run 2 Lecco	5	526459,497	5075068,533	526460,539	5075068,828	1,08
run 2 Lecco	6	530053,447	5079144,550	530053,249	5079145,780	1,25
run 2 Lecco	7	526813,471	5075445,519	526814,387	5075445,967	1,02

Identificativo RUN	Punto	X	Y	X _{REF}	Y _{REF}	RMSE
run 2 Lecco	8	527356,501	5076564,502	527356,999	5076564,616	0,51
run 4 Sondrio	1	569501,924	5113519,495	569503,315	5113519,310	1,40
run 4 Sondrio	2	563472,548	5113590,439	563475,128	5113590,888	2,62
run 4 Sondrio	3	561593,546	5113072,570	561593,969	5113073,629	1,14
run 4 Sondrio	4	568281,479	5113498,454	568281,995	5113498,899	0,68
run 4 Sondrio	5	566550,518	5114249,530	566550,559	5114250,501	0,97
run 4 Sondrio	6	563271,411	5114114,384	563271,593	5114116,659	2,28
run 4 Sondrio	7	568402,475	5113991,582	568404,126	5113993,234	2,34
run 4 Sondrio	8	561727,899	5113728,969	561728,256	5113730,754	1,82
run 8 Mantova	1	640427,123	5000910,169	640427,043	5000910,169	0,08
run 8 Mantova	2	641384,472	5000304,417	641386,560	5000304,765	2,12
run 8 Mantova	3	640633,530	4998504,421	640634,175	4998504,098	0,72
run 8 Mantova	4	640375,121	5006545,459	640374,440	5006545,549	0,69
run 8 Mantova	5	641384,187	5007517,665	641386,569	5007517,507	2,39
run 8 Mantova	6	640359,510	5003785,508	640359,004	5003785,745	0,56
run 8 Mantova	7	640827,536	5007193,480	640828,297	5007193,201	0,81
run 8 Mantova	8	641342,504	5005346,353	641344,272	5005347,289	2,00
run 7 Lodi	1	538762,475	5016364,530	538762,249	5016365,198	0,71
run 7 Lodi	2	539822,478	5016481,485	539822,914	5016481,660	0,47
run 7 Lodi	3	538719,440	5018235,533	538720,215	5018236,554	1,28
run 7 Lodi	4	539767,544	5018375,504	539768,648	5018375,801	1,14
run 7 Lodi	5	539209,474	5020950,501	539209,772	5020950,666	0,34
run 7 Lodi	6	538766,523	5023164,488	538766,247	5023165,461	1,01
run 7 Lodi	7	539336,480	5017041,530	539336,307	5017041,883	0,39
run 7 Lodi	8	539783,925	5017827,387	539785,374	5017828,111	1,62
run 8 Ferrera	1	489700,459	4995589,421	489700,693	4995588,860	0,61
run 8 Ferrera	2	490490,506	4994785,491	490491,720	4994786,117	1,37
run 8 Ferrera	3	490607,421	4993397,375	490608,149	4993396,511	1,13
run 8 Ferrera	4	489639,549	4993395,523	489639,290	4993395,116	0,48
run 8 Ferrera	5	490504,475	4995260,508	490505,593	4995261,207	1,32
run 8 Ferrera	6	489676,237	4994293,466	489675,426	4994293,331	0,82
run 8 Ferrera	7	490041,475	4993081,462	490041,545	4993080,553	0,91
run 8 Ferrera	8	490713,133	4993997,630	490714,754	4993997,999	1,66

Tabella 27. Tabella riassuntiva in cui si è stata selezionata una strisciata di esempio per ogni area di lavoro.