



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
SCUOLA DI SCIENZE**

Dipartimento di Geoscienze

Direttore: Prof.ssa Cristina Stefani

Laurea Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica

**IL CONTRIBUTO DELL'INTERFEROMETRIA
RADAR SATELLITARE NELLE INDAGINI
GEOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE IN
AREE DI PIANURA SOGGETTE A FENOMENI
DI SUBSIDENZA: IL CASO DELL'AREA DI
PORTOGRUARO (VE)**

Relatore:

Prof. Alessandro Fontana

Correlatori:

Prof. Mario Floris

Dr.ssa Giulia Tessari

Laureanda:

Mariachiara Mulè

Anno Accademico: 2015-2016

INDICE

Abstract	5
INTRODUZIONE	9
1. INQUADRAMENTO DELL'AREA IN STUDIO	13
1.1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE.....	14
1.2. GEOMORFOLOGIA ED EVOLUZIONE TARDO-QUATERNARIA..	17
1.2.1. Il Last Glacial Maximum (LGM)	19
1.2.2. Il Post-LGM.....	20
1.3. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	26
2. LA SUBSIDENZA	33
2.1. STUDI PREGRESSI SULLA SUBSIDENZA NELLA PROVINCIA DI VENEZIA	35
3. METODI E DATI	37
3.1. TELERILEVAMENTO SATELLITARE RADAR	37
3.1.1. Geometria di acquisizione dei sensori RADAR	40
3.1.2. Synthetic Aperture Radar (SAR)	42
3.2. L'INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR.....	43
3.2.1. Vantaggi e limiti dell'interferometria	45
3.3. TECNICHE A-DINSAR E APPLICAZIONE IN AREE IN SUBSIDENZA	46
3.4. DATI UTILIZZATI.....	48
3.5. ELABORAZIONE DEI DATI SATELLITARI.....	51
3.6. INDAGINI STRATIGRAFICHE E ANALISI IDROGEOLOGICHE ...	53
4. RISULTATI E DISCUSSIONE	57
4.1. ANALISI DELLE DISTRIBUZIONI DI VELOCITÀ DEI PS	57
4.2. ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DEGLI SPOSTAMENTI	67
4.3. NUOVI DATI STRATIGRAFICI.....	69
4.3.1. Carotaggio PRT1	72
4.4. CONFRONTO TRA IL MODELLO GEOLOGICO E INTERFEROMETRICO	77
4.5. IPOTESI SULLE CAUSE DELLA SUBSIDENZA	81
4.5.1. Analisi delle anomalie di velocità.....	81

4.5.2. Analisi dei dati idrogeologici.....	90
5. CONCLUSIONI.....	99
BIBLIOGRAFIA	103
Ringraziamenti.....	109
APPENDICE A	111
APPENDICE B	135

Abstract

In the last decades, thanks to the development of multi-stacking techniques, the Differential Interferometric Synthetic Aperture RADAR (DInSAR) became a fundamental and necessary tool for analysing and monitoring the spatial and temporal evolution of land subsidence in several coastal regions. This remote sensing technique allows to study the subsidence phenomena of large areas, with centimetric-millimetric precision. The benefit of DInSAR is also the availability of a great amount of data, acquired by different space agencies, which offers a wide coverage over the Earth surface.

The aim of this work is to show an innovative use of DInSAR, considering the possible relationship between the geological and geomorphological architecture of an Italian coastal plain and the rate of subsidence, inferred through analysis of interferometric data of the last 20 years. In this perspective the analysis of Synthetic Aperture Radar (SAR) data through Advanced Differential SAR Interferometry (A-DInSAR) could be used as a tool for geomorphological and geological mapping. Furthermore the assessment of the possible causes of the subsidence in Portogruaro and Concordia Sagittaria, which is important for the territorial management and planning, is reported and discussed.

The research is focused on a coastal sector of the venetian-friulian plain located upstream of Caorle lagoon, between Portogruaro and Concordia Sagittaria (north-eastern Italy), with an extent of about 50 km². In the last 125 kyr this area experienced an average downlift rate of about 0.4-0.5 mm/yr, related to crustal flexuring and sediment compaction. But the on-going subsidence is strongly higher, probably related to the reclamation of the 19-20th centuries, which induced the compaction of the Holocene deposits and the oxidation of the organic component in the soil, and groundwater withdrawal. This sector of the eastern Veneto Region was formed by the interplay between the fluvial system of Tagliamento River and lagoon and marine environments. During Lateglacial and early Holocene, between about 19-8 kyr BP, Tagliamento River eroded several

incised fluvial valleys, with a maximum depth of 15-25 m and a width of 500-2000 m. These features entrenched in the alluvial sediments of the Last Glacial Maximum (LGM) and since about 8 kyr BP the coastal and deltaic processes favoured their filling with lagoon and alluvial sediments. Downstream of Portogruaro the paleovalleys have been completely buried by younger deposits and their detection is possible only using subsoil investigations. On the contrary, these fluvial incisions are still partially visible through DEM and field observations upstream of Portogruaro.

The cities of Concordia Sagittaria and Portogruaro, developed over the buried fluvial incisions and several ancient buildings, experienced important deformations related to the compaction of the soft sediments filling the former fluvial depressions. This is the case of the tower bell of Portogruaro and some other late-Medieval and Venetian palaces. A peculiar situation characterises the cathedral of Concordia, where in the '90 of 20th century large volume of the subsoil below and near the church had been excavated to expose the archaeological remains of the Roman period. This intervention required special foundations for sustain the old building, but the on-going subsidence represents a major threat for the preservation of the ancient cathedral.

Portogruaro and Concordia Sagittaria represent a good test site to check the relationship between surface displacements obtained from interferometric data and geological information, because in this area a lot of geological and geomorphological information are available and Holocene and Pleistocene deposits are affected by an evident differential subsidence.

The study started from the analysis and comparison in GIS environment of the pre-existing data which allow to know the geological and geomorphological features of the area. In Portogruaro and Concordia Sagittaria a great amount of stratigraphic cores and geotechnical tests are available, allowing to reconstruct the stratigraphy of some sectors and to directly check in the field the position and the

depth of the boundaries delimitating the ancient fluvial incisions, now filled by younger sediments.

To investigate the downlift rates and reconstruct their areal pattern, I considered ERS, Envisat, COSMO Sky-Med and Sentinel-1 SAR data referred to the periods 1995-2000, 2003-2010, 2010-2016 and 2014-2016, respectively.

Particularly I considered ERS and Envisat Persistent Scatterers (PS) acquired with ascending orbit, because these data show the best correspondence of the spatial distribution of velocity with the boundaries of buried incisions (Figures 4.2, 4.3, 4.4, 4.5). The velocity maps, obtained through interpolation of PS, show that the interferometric steady unit overlaps the outcropping LGM plain, whereas the subsidence unit (with rate of $-1.5\div-3$ mm/yr) is located upon the buried incisions (Figures 4.6, 4.7). This correspondence was also found in the velocity maps obtained from COSMO Sky-Med interferometric data (Figures 4.8, 4.9), but only partially in that map obtained from Sentinel data (Figure 4.10), probably because the short time interval covered by the available data.

Then, through the available stratigraphic cores, I realised a stratigraphic section (Figure 4.14) and I compared this section and the stratigraphic section (Figure 4.15) realised by Alessandro Fontana (Fontana, 2006) with the velocity sections obtained from ERS and Envisat data (Figures 4.18, 4.19, 4.20, 4.21). I observed that a greater thickness of post-LGM deposits corresponds with a greater subsidence rate. I expect that the subsidence rate is linked with the thickness of fine deposits (organic clays and silts and peat) observed in the manual boring realized in PRT1 point (Figures 4.16 and 4.17).

Another aim of this project is the assessment of the possible causes of the subsidence in Portogruaro and Concordia Sagittaria.

Starting from the velocity maps derived from of ERS, Envisat, COSMO Sky-Med and Sentinel interferometric data, I identified some critical points, call velocity anomalies in this work, interested by a strong deformation rate, greater than 3 mm/yr (Figures 4.23, 4.24, 4.25). The observed critical points correspond to

recent buildings, roads and infrastructures. These localized subsiding areas can be explained as the result of ground consolidation related to urbanization and recent overloads (Figures 4.26, 4.27).

Finally through hydrogeological and bibliographic data I observed that the area of Portogruaro is affected by the extraction of groundwater resulting in depressurization of the deep thermal aquifer. I hypothesize that the depressurization of the deep thermal aquifer may caused subsidence in the study area. Another hypothesis is that lowering the water level of the shallow water table may led to the consolidation of the soil and consequently subsidence. In both cases the recognition of the limit of buried incisions through the rate of subsidence is linked to the different deformational behavior of the sediments filling the post-LGM incisions and the external LGM plain.

INTRODUZIONE

Negli ultimi due decenni l'utilizzo dell'interferometria differenziale RADAR ad apertura sintetica (DInSAR, Differential Interferometric Synthetic Aperture RADAR) è diventato fondamentale e necessario per lo studio ed il monitoraggio, spaziale e temporale, di processi naturali tra i quali la subsidenza. Questa tecnica di telerilevamento permette di studiare il fenomeno della subsidenza di grandi aree, con una precisione millimetrica nella determinazione delle velocità di spostamento. Inoltre permette di indagare periodi anche decennali grazie alla grande disponibilità di immagini RADAR acquisite, a partire dagli anni '90, dalle diverse missioni satellitari.

Numerosi studi hanno trattato l'utilizzo dell'interferometria differenziale come mezzo di studio e monitoraggio di aree in subsidenza e l'area veneziana è stata oggetto di importanti lavori (ad esempio Teatini et al., 2005). Di recente uno studio in Spagna (Conesa-Garcia et al., 2016) ha affrontato un aspetto innovativo di questa tecnica di telerilevamento, integrando l'interferometria differenziale con dati litostratigrafici e morfologici. Tramite questo approccio è stato rilevato un diverso comportamento deformativo nelle diverse unità del sistema alluvionale in subsidenza del Fiume Segura, a sud-est della Spagna.

Il lavoro di questa tesi consiste nello studio delle distribuzioni di velocità di subsidenza in un settore della pianura veneto-friulana, a monte della laguna di Caorle, compreso le città di Portogruaro e Concordia Sagittaria (VE). Si tratta di un'area che, grazie a numerosi studi svolti dalla provincia di Venezia, e dalla Regione Veneto per il progetto CARG con la realizzazione del Foglio 107 "Portogruaro", è nota da un punto di vista geologico e geomorfologico. La caratteristica peculiare dell'area è quella della presenza di un'incisione, profonda circa 20 m e larga più o meno 2000 m, sepolta negli ultimi 17000 anni da depositi di ambiente fluviale, lagunare e marino.

L'obiettivo della ricerca è quello di valutare se esiste una corrispondenza tra le aree interne ed esterne all'incisione e le aree individuate attraverso l'analisi della

distribuzione di velocità di spostamento ottenuta dai dati SAR, che in questa tesi verranno indicate come unità interferometriche. In questo modo si potrebbe testare, e successivamente usare, l'Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR) anche come ausilio alle indagini geologiche e geomorfologiche di quelle zone, come ad esempio gli ambienti di pianura costiera e le aree urbane, dove il sottosuolo può essere difficilmente indagabile.

La scelta del territorio in studio è ricaduta su questo settore della pianura veneto-friulana poiché ci si aspetta un diverso comportamento deformativo tra le aree che insistono sull'incisione sepolta e quelle esterne: l'aspettativa è che ci sia un maggiore tasso di subsidenza nei punti situati al di sopra dell'incisione, essendo per lo più costituiti da terreni organici di età olocenica. Inoltre a Concordia Sagittaria e Portogruaro, visto che sono due città molto urbanizzate, ci si aspetta di ottenere risultati soddisfacenti con l'analisi interferometrica.

Infine questa tesi si propone di individuare qualitativamente le possibili cause della subsidenza in atto nelle città di Portogruaro e Concordia Sagittaria, attraverso l'analisi dei dati bibliografici, geotecnici e idrogeologici riguardanti l'area in studio.

La fase iniziale del lavoro consiste in un confronto dei dati geologici e geomorfologici preesistenti, in ambiente GIS, con le distribuzioni di velocità ottenute dai dati interferometrici delle missioni satellitari:

- ERS 1/2, relative al periodo 1992-2000;
- Envisat, relative al periodo 2003-2010;
- COSMO Sky-Med, inerenti al periodo 2010-2016;
- Sentinel-1, relative al periodo 12/2014-03/2016.

I dati interferometrici delle missioni ERS e Envisat sono quelli forniti dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM). I dati Sentinel-1 e COSMO Sky-Med, invece, sono stati processati, al fine di ottenere le mappe di velocità di spostamento, dalla dottoressa Giulia Tessari. In particolare i dati SAR della missione COSMO Sky-Med sono stati richiesti appositamente per

lo studio di questa tesi, previa sottomissione di un progetto di ricerca all’Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

Dalle distribuzioni di velocità ottenute dai dati SAR e attraverso le mappe di velocità subsidenza è stata valutata l’eventuale corrispondenza tra i dati interferometrici e quelli geologici-geomorfologici.

Per valutare le possibili cause della subsidenza, invece, sono stati analizzati i fotogrammi aerei dell’area in studio dal 1983 al 2010, le immagini storiche disponibili su Google Earth dal 2003 al 2015, e i dati idrogeologici e bibliografici.

Una parte dei risultati ottenuti in questa tesi è stata presentata all’88° Congresso della Società Geologica Italiana a Napoli (sessione S26 - Remote sensing for the Geosciences and the Environment) con un poster dal titolo “Subsidence zonation through satellite interferometry in coastal plain environments of NE Italy: a possible tool for geomorphological and geological mapping in coastal plain environments” (Mulè M., Tessari G., Fontana A., Meisina C., Floris M.).

1. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

L'area in studio scelta per lo svolgimento di questa tesi (Figura 1.1) è un settore della pianura veneto-friulana, situato a monte della laguna di Caorle. Si tratta di un'area compresa tra le città di Concordia Sagittaria e Portogruaro il cui attuale contesto geologico e geomorfologico è stato fortemente influenzato da quanto avvenuto negli ultimi 30000 anni, a partire dal Last Glacial Maximum (LGM). Si tratta tra l'altro di aree in cui sono stati effettuati numerosi studi che consentono di avere una solida conoscenza geologica e geomorfologica del sottosuolo, come ad esempio il Foglio geologico 107 "Portogruaro" (Fontana et al., 2012).

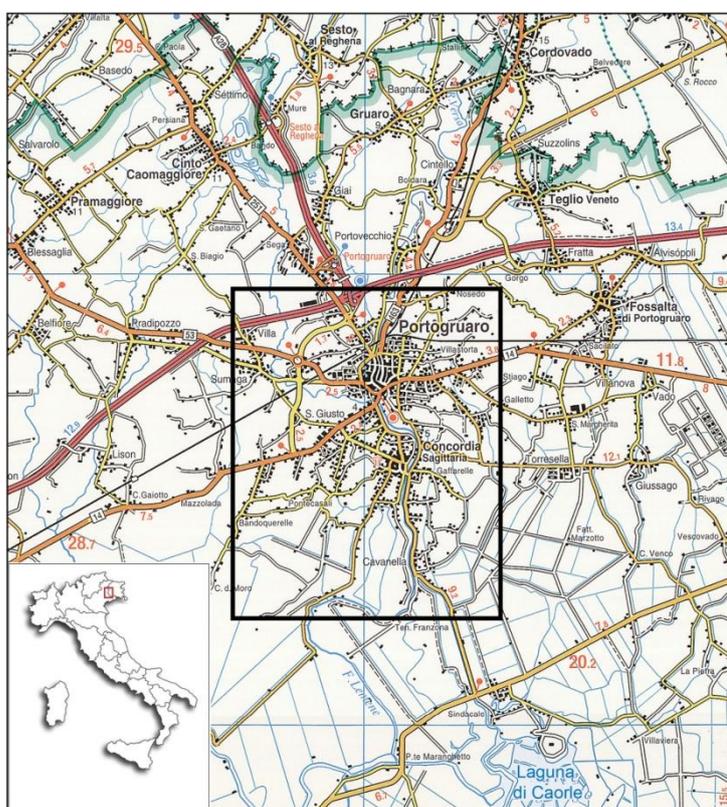


Figura 1.1 - Inquadramento geografico dell'area in studio (Stralcio della Carta Topografica del Friuli Venezia Giulia alla scala 1:150.000, Ed. Tabacco).

L'area si caratterizza per la presenza dei centri abitati di Portogruaro e Concordia Sagittaria, che possiedono un nucleo urbanistico antico. Nel caso di Portogruaro vi è un'estesa zona centrale già edificata nel periodo medievale e con numerosi edifici di epoca veneziana ancora abitati.



Figura 1.2 – La Cattedrale di Concordia Sagittaria e l’adiacente area archeologica.

Alcuni di questi denotano porzioni inclinate o deformate per effetto di cedimenti del terreno di fondazione, come ad esempio il campanile del duomo di S. Andrea. Nel caso di Concordia Sagittaria l’area era già un importante insediamento durante l’età del Ferro, e un *Municipium* romano a partire dal I secolo a.C. (Fontana, 2006). In questa cittadina vi sono alcuni edifici medievali e un caso particolare riguarda la cattedrale di S. Stefano, dove negli anni ’90 del XX secolo sono stati realizzati degli scavi in sotterraneo per riesumare e lasciare in mostra i resti archeologici dell’epoca romana (Figura 1.2).

1.1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

A scala regionale la pianura veneto-friulana si trova nell’avampaese, situato a nord-est della microplacca Adria, condiviso dalla catena Sud-Alpina orientale, sud-est vergente, e dalla catena degli Appennini, nord-est vergente (Massari, 1990; Doglioni, 1993). A partire dal Neogene (23 Ma) e durante il Quaternario, questo bacino di avampaese è stato riempito da sedimenti per lo più clastici, che nell’area in studio raggiungono uno spessore di circa 1000 m, e la pianura veneto-friulana costituisce il top deposizionale di questo riempimento. Al di sotto di questi sedimenti plio-quadernari si trovano formazioni di flysch risalenti all’Eocene-Oligocene che si depositarono al tetto dei calcari della Piattaforma Mesozoica Friulana (65-247 Ma) i quali arrivano ad avere uno spessore di circa 6000-7000 m. Durante il tardo Liassico (85 Ma), in un contesto estensionale

legato all'apertura della Tetide, questa piattaforma fu frammentata in blocchi separati da ambienti di mare profondo ovvero bacini. L'area in studio è situata al margine tra la piattaforma Friulana ed il bacino di Belluno (Zanferrari, 2012).

Da un punto di vista orogenetico quest'area ha subito due orogenesi legate alla collisione tra la microplacca Adria, appartenente alla placca Africana, e quella Europea:

- ✓ Orogenesi Dinarica, avvenuta tra il Cretaceo superiore e l'Eocene medio-superiore (80-40 Ma) con conseguente genesi delle Dinaridi esterne; quest'orogenesi provocò la formazione di alcune strutture tra cui la dorsale di Cesarolo;
- ✓ Orogenesi Alpino-Himalayana, di età cretacea-neogenica, con conseguente formazione delle Alpi, ovvero di una catena a doppia vergenza, una verso nord di età cretacea e una verso sud di età neogenica (Miocene); questa seconda vergenza costituisce quelle che sono note come Alpi meridionali o catena Sudalpina.

L'area di Portogruaro è situata nel rialzo di avampaese della catena Dinarica, che dal Miocene è stato condiviso con la catena Alpina meridionale (Amato et al., 1976). L'orogenesi Dinarica e, successivamente, quella Alpina provocarono l'emersione di alcune aree tra cui la dorsale di Cesarolo che si posiziona a est rispetto l'area in studio in questa tesi. La dorsale è un alto strutturale del substrato prequaternario caratterizzato da una forte anomalia termica che comporta temperature di 50-60 °C a profondità di 500-600 m (Barnaba, 1990).

Durante il Miocene superiore ed in particolare nel Messiniano (6 Ma) l'abbassamento del livello del mare nel Mediterraneo, legato alla chiusura dello stretto di Gibilterra, permise al reticolo fluviale di assumere un carattere erosivo definendo la morfologia del substrato prequaternario. Le incisioni vennero riempite, durante il Pliocene, dalla deposizione di sedimenti di ambiente marino prossimale, sabbie e silt deltizi. La dominanza del mare sul continente fu anche favorita dalla subsidenza tettonica legata all'avanzamento verso nord-est del

fronte appenninico che, dal Pliocene inferiore, iniziò a condividere l'avampaese con le Alpi meridionali e le Dinaridi.

Durante il Pleistocene l'avanzamento degli Appennini ha infatti indotto nell'area studiata una subsidenza di almeno 500 m che ha provocato un approfondimento della base dei depositi quaternari, che nell'area di Portogruaro si trova a 600-650 m di profondità (Figura 1.3, Zanferrari, 2012).

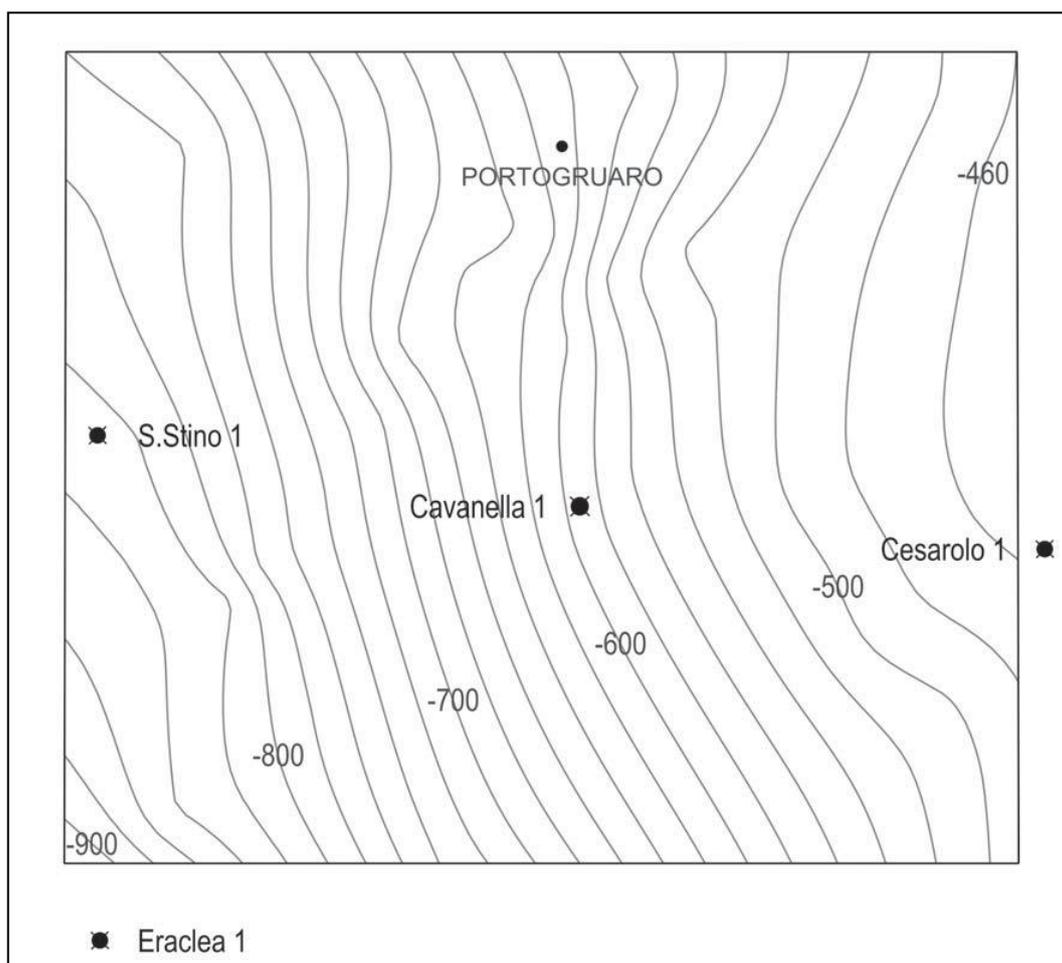


Figura 1.3 - Andamento della base dei depositi quaternari nell'area del foglio 107 "Portogruaro" (Zanferrari, 2012).

Nell'area in studio questo tipo di subsidenza è tutt'ora in atto con un tasso medio di $-0.4\div-0.5$ mm/anno registrato negli ultimi 125000 anni (Ferranti et al., 2006; Antonioli et al., 2009).

Le ultime centinaia di metri di depositi che formano la pianura sono il prodotto dell'alternanza dei cicli glacio-eustatici avvenuti nel Quaternario in cui si sono alternati periodi relativamente freddi e periodi relativamente caldi.

In particolare i depositi della penultima glaciazione si trovano a circa 50-60 m di profondità (Fontana et al., 2010).

1.2. GEOMORFOLOGIA ED EVOLUZIONE TARDO-QUATERNARIA

L'evoluzione morfologica della pianura veneto-friulana è stata fortemente influenzata da quanto avvenuto dal tardo Pleistocene sino ad oggi ovvero a partire dall'ultimo massimo glaciale (LGM, Last Glacial Maximum). A partire da circa 30000 anni fa, infatti, la pianura veneto-friulana è stata interessata dall'avanzamento dei ghiacciai che dalle valli Alpine raggiunsero la pianura (Monegato et al., 2007; Fontana et al., 2008) trasportando e scaricando sedimenti e determinando la formazione di sistemi deposizionali, noti come megafan alluvionali (Figura 1.4).

Si definiscono megafan quelle strutture deposizionali aventi una forma planare a ventaglio e con estensione superiore a 1000 km² (Fontana, 2006; Fontana et al., 2008). L'area analizzata in questa tesi fa parte del megafan del Tagliamento, che ha un'estensione di 1200 km² e, come gli altri megafan dell'Italia nord-orientale, è caratterizzato da una differenziazione sia longitudinale che trasversale. Longitudinalmente la fascia delle risorgive separa due settori del megafan del Tagliamento: alta e bassa pianura.

L'alta pianura è formata da depositi ghiaiosi e sabbiosi, con pendenze che allo sbocco vallivo sono di circa 7 ‰ e calano fino al 3 ‰ presso la fascia delle risorgive.

La bassa pianura invece è dominata da depositi limoso-argillosi di piana di esondazione e corpi sabbiosi di canale, e presenta pendenze che calano progressivamente verso valle, fino ad azzerarsi presso la zona lagunare.

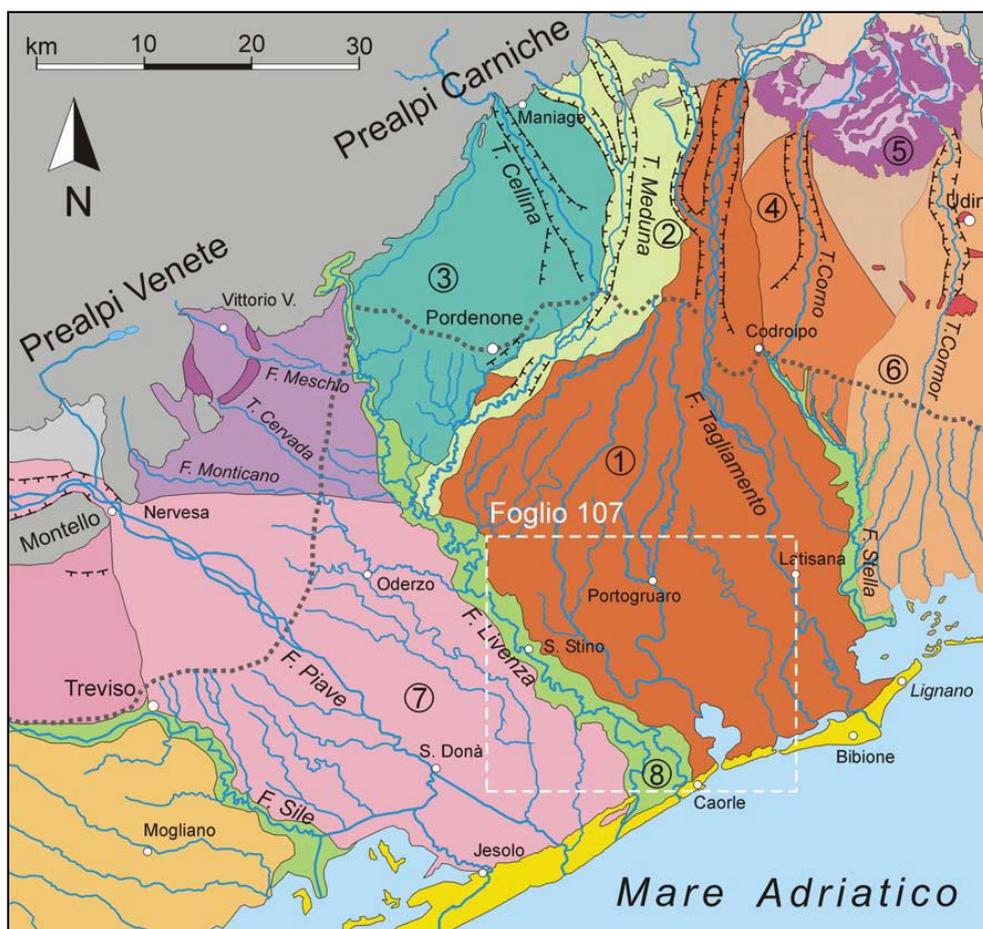


Figura 1.4 - Schema dei sistemi deposizionali della pianura Veneto-Friulana (modificato da Fontana et alii., 2004). Legenda: (1) megafan del Tagliamento; (2) conoide del Meduna; (3) conoide del Cellina; (4) conoide del Corno; (5) anfiteatro morenico del Tagliamento; (6) megafan del Cormor; (7) megafan del Piave di Nervesa; (8) depositi del Livenza. Nel riquadro bianco è definita l'area del Foglio 107 "Portogruaro" (Fontana et al., 2012).

Trasversalmente invece nel megafan del Tagliamento si osservano delle differenze legate alle varie direttrici del sistema fluviale, attive in determinati periodi e poi abbandonate, per cui nella direttrice attiva si avrà sedimentazione, mentre nel resto del megafan si ha stabilità e potenzialmente formazione di suoli. Tale meccanismo determina differenze geomorfologiche tra settori adiacenti del megafan.

1.2.1. Il Last Glacial Maximum (LGM)

Il settore distale del megafan del Tagliamento raggiunse il suo massimo sviluppo areale durante l'ultima glaciazione e, in particolare, nel LGM (29000-19000 anni fa). Il LGM può essere suddiviso localmente in fase pleniglaciale (29000-22000 anni fa) e fase cataglaciale (22000-19000 anni fa; Fontana et al., 2012; 2014). Nel pleniglaciale si ebbe l'acme della glaciazione e quindi l'avanzamento dei ghiacciai che garantirono il trasporto verso la pianura di un'ingente quantità di sedimenti, alimentando i sistemi fluviali e determinando un'importante aggradazione verticale. Il megafan del Tagliamento crebbe di spessore per 25-30 m. L'abbassamento del livello eustatico di 120 m rispetto a quello attuale spostò la linea di costa di 400 km verso mare (Correggiari et al., 1996) e, a causa della bassa pendenza (inferiore a 1 ‰) che caratterizza la pianura veneto-friulana, l'abbassamento del livello di base fu comunque accompagnato da deposizione e non da incisione fluviale (Fontana et al., 2004; 2008). In questa fase le ghiaie giungevano al massimo fino all'attuale fascia delle risorgive, mentre più a valle, nella bassa pianura, giungevano solo limi, argille e sabbie. A questa unità stratigrafica viene dato il nome di Unità di Lison nella carta delle unità geologiche della provincia di Venezia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008) e di Subsistema di Canodusso nella carta geologica nazionale CARG (Fontana et al., 2012). L'unità di Lison è formata da limi e limi argillosi, alternati a livelli decimetrici di sabbie e sabbie limose, con laminazione millimetrica da piano parallela a debolmente inclinata; talvolta sono presenti orizzonti di argille, limi organici e torbe da centimetrici a decimetrici. Lo spessore dell'unità è stimabile attorno ai 30-35 m nel settore settentrionale del Portogruarese, mentre è di circa 15-20 m nella parte costiera (Bondesan et al., 2008).

Durante il cataglaciale i ghiacciai iniziarono a ritirarsi e i sistemi fluviali iniziarono ad incidere i megafan alluvionali nell'alta pianura, mentre continuarono ad aggradare moderatamente in quella bassa (Fontana et al., 2012; 2014). Infatti in questa fase il Tagliamento si incise nella parte apicale del suo megafan, portando così al confinamento degli alvei e di conseguenza ad un aumento della capacità di

trasporto solido del corso d'acqua che, nella bassa pianura, formò stretti dossi, alimentati da sottili canali tipo wandering, con sabbie grossolane e ghiaie fini, che raggiunsero l'odierno margine lagunare. A questa unità stratigrafica viene dato il nome di Unità di Torresella nella carta delle unità geologiche della provincia di Venezia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008) e di Subsistema di Remanzacco nella carta geologica nazionale CARG (Fontana et al., 2012). L'Unità di Torresella è formata da sabbie, limi sabbiosi, sabbie ghiaiose, ghiaie sabbiose e limose che corrispondono a dossi fluviali, larghi 100-300 m, che si elevano di massimo 2 m rispetto la pianura circostante.

1.2.2. Il Post-LGM

Attorno a 17000 anni fa il ghiacciaio del Tagliamento si ritirò all'interno della sua valle, abbandonando definitivamente la pianura e limitando quindi notevolmente la quantità di sedimento che arrivava verso valle. Di conseguenza la capacità di incisione dei sistemi fluviali non si limitò più alle porzioni apicali dei megafan ma bensì interessò anche i settori di bassa pianura. In quel periodo il Tagliamento iniziò ad incidersi lungo più direttrici e, vista la capacità di trasporto solido acquisita dal confinamento del flusso, si verificò l'arrivo delle ghiaie fino all'attuale linea di costa (Fontana, 2006). Quelle del post-LGM sono incisioni scavate nei depositi del LGM, larghe 500-2000 m e profonde 8-25 m (Figura 1.5).

A questa unità stratigrafica viene dato il nome di Unità di Cinto Caomaggiore nella carta delle unità geologiche della provincia di Venezia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008) e coincide con la parte basale dell'Unità di Malamocco, appartenente al Sistema del Po, nella carta geologica nazionale CARG (Fontana et al., 2012). Tale unità è costituita dai depositi di canale e consiste essenzialmente in ghiaie, sabbie ghiaiose e più raramente in limi e limi sabbiosi. A monte di Portogruaro le incisioni post-LGM sono ancora visibili sulla superficie topografica, attraverso il DEM e l'osservazione sul campo, mentre più a valle sono state colmate dai depositi lagunari e dalle alluvioni medievali (Bondesan et

al., 2008). Presso Portogruaro il tetto delle ghiaie si trova a 5-8 m di profondità, mentre si approfondisce a 10-12 m in corrispondenza di Concordia. Lo spessore delle ghiaie, che caratterizzano la base delle incisioni post-LGM, è compreso tra 5 e 12 metri e il diametro medio dei clasti generalmente è di 2-3 cm (Bondesan et al., 2008).

Nel post-LGM si è attuata anche la trasgressione marina che ha fatto risalire il livello del mare da -120 m s.l.m fino a raggiungere la posizione attuale; occorre sottolineare che questa risalita riguarda il livello del mare relativo cioè è associata in parte alla risalita del livello del mare eustatico (avvenuta fino a 7000-5000 anni fa) e in parte alla subsidenza che caratterizza la pianura veneto-friulana. L'effetto della trasgressione marina fu particolare dove erano presenti le incisioni precedentemente formate dal Tagliamento, che favorivano l'ingresso del mare nell'entroterra.

La formazione delle lagune iniziò a partire da 7500-6000 anni fa. Nel caso particolare delle incisioni su cui attualmente scorrono i fiumi di risorgiva Lemene e Reghena, i depositi lagunari sono stati trovati fino a Portogruaro (Fontana, 2006). L'unità stratigrafica costituita dai depositi lagunari olocenici prende il nome di Unità di Caorle nella carta delle unità geologiche della provincia di Venezia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008) e coincide con l'Unità di Torcello, appartenente al Sistema del Po, nella carta geologica nazionale CARG (Fontana et al., 2012).

I sedimenti di quest'unità sono generalmente costituiti da limi-argillosi, argille, limi-sabbiosi e sabbie; sovente nelle sequenze sono presenti orizzonti torbosi o limoso organici decimetrici con macroresti vegetali, spesso corrispondenti a frammenti di canne palustri (*Phragmites*). Si segnalano inoltre frequenti resti di molluschi tipo *Cerastoderma glaucum*, *Loripes lacteus*, *Bittium scabrum* e *Cyclope neritea*. Nei carotaggi i sedimenti appaiono spesso molto omogenei e privi di laminazione per effetto della bioturbazione degli animali che vivevano sul fondo lagunare.

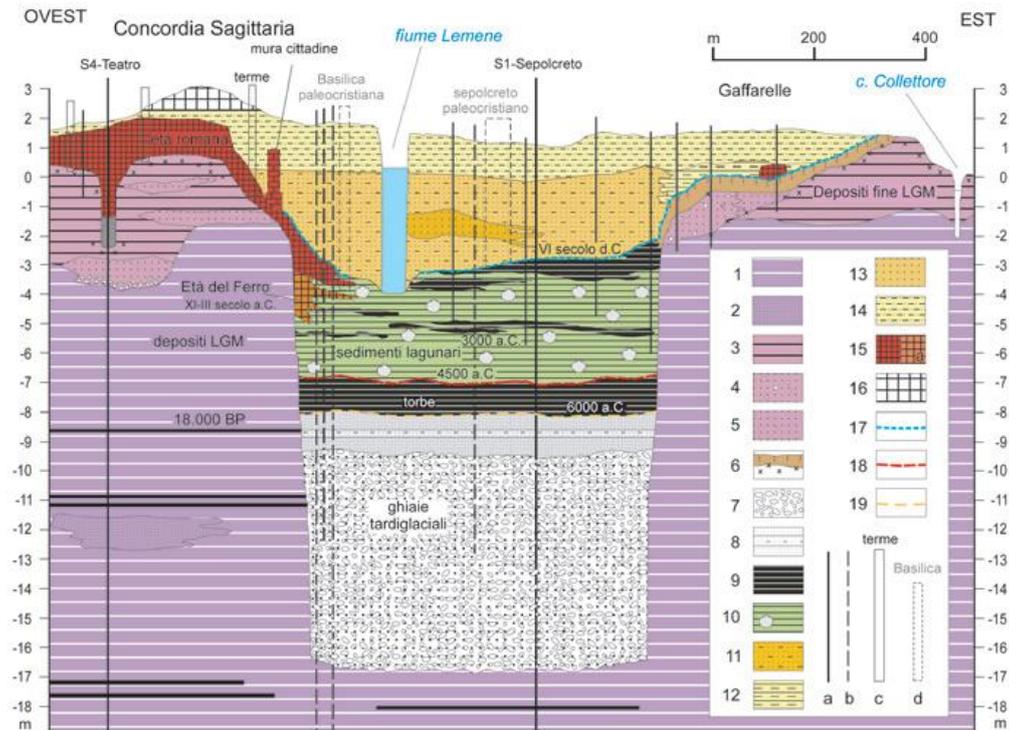


Figura 1.5 - Sezione stratigrafica dell'antica valle fluviale presente a est di Concordia (Fontana, 2006). Legenda: a) sondaggi; b) proiezione di sondaggi poco distanti dalla traccia della sezione; c) scavi archeologici editi, presenti lungo la sezione; d) proiezione di scavi archeologici; 1) piana pleniglaciale limoso-argillosa; 2) canale pleniglaciale sabbioso; 3) piana cataglaciale limoso-argillosa; 4) canale cataglaciale sabbioso-ghiaioso, con diametro max 1-2 cm; 5) canale cataglaciale sabbioso; 6) suolo sepolto della superficie LGM con abbondanti concrezioni; 7) ghiaie medie (2-5 cm) tardoglaciali o dell'Olocene iniziale trasportate dal Tagliamento che formò la valle (Unità di Cinto Caomaggiore); 8) sabbie e limi dell'Olocene iniziale; 9) torbe e depositi organici ricchi di frammenti vegetali; 10) sedimenti lagunari e palustri caratterizzati da limi argillosi e limi con frammenti di molluschi lagunari e frammenti vegetali; 11) depositi di rotta e canale fortemente idromorfi costituiti da limi sabbiosi e sabbie fini; 12) depositi di tracimazione (limi e limi argillosi con frammenti vegetali e di gasteropodi continentali); 13) depositi di canale, sabbie medie disposte in stratificazione incrociata e parallela; 14) depositi di dosso, sabbie limose e sabbie; 15) depositi antropici legati alla frequentazione romana; 15a) preromani; 16) depositi antropici moderni e attuali; 17) discontinuità tra i depositi lagunari-fluviali e quelli del Tagliamento del VI secolo d.C.; 18) discontinuità tra i depositi torbosi e lagunari olocenici; 19) discontinuità tra i depositi fluviali del Tagliamento che incise la valle e il riempimento fluvio-lagunare olocenico. Questa sezione coincide con la sezione stratigrafica C-D del Paragrafo 4.3. (per localizzazione della sezione vedi Figura 3.7).

Il limite inferiore è costituito da una superficie erosiva sviluppata sulla pianura alluvionale; nei settori interessati da direttrici fluviali, come quella del Tagliamento medievale, il limite superiore è stato sepolto dalle alluvioni (Bondesan et al., 2008).

Intorno al 1000 a.C. si verificò una nuova fase di incisione del Tagliamento ma tra il II e I millennio l'innalzamento del livello del mare olocenico e la conseguente diminuzione di pendenza del tratto finale dei corsi d'acqua comportarono una fase di sedimentazione, con formazione di dossi più alti e più ampi rispetto a quelli del Pleistocene. In questa fase di aggradazione la direttrice occupata dal Tagliamento fino all'epoca romana è stata quella del *Tiliaventum Maius*, disattivata tra il V e X secolo d.C., quando il Tagliamento attivò la sua attuale direttrice e, temporaneamente, quella occupata dall'attuale Lemene (Figura 1.6).

Nel VI-VII secolo d.C. il Tagliamento possedeva la stessa direttrice dell'attuale Lemene, seppellendo la città romana di Concordia Sagittaria. A questa unità stratigrafica viene dato il nome di Unità di Concordia nella carta delle unità geologiche della provincia di Venezia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008) e costituisce la parte basale dell'Unità di Torcello, appartenente al Sistema del Po, nella carta geologica nazionale CARG (Fontana et al., 2012).

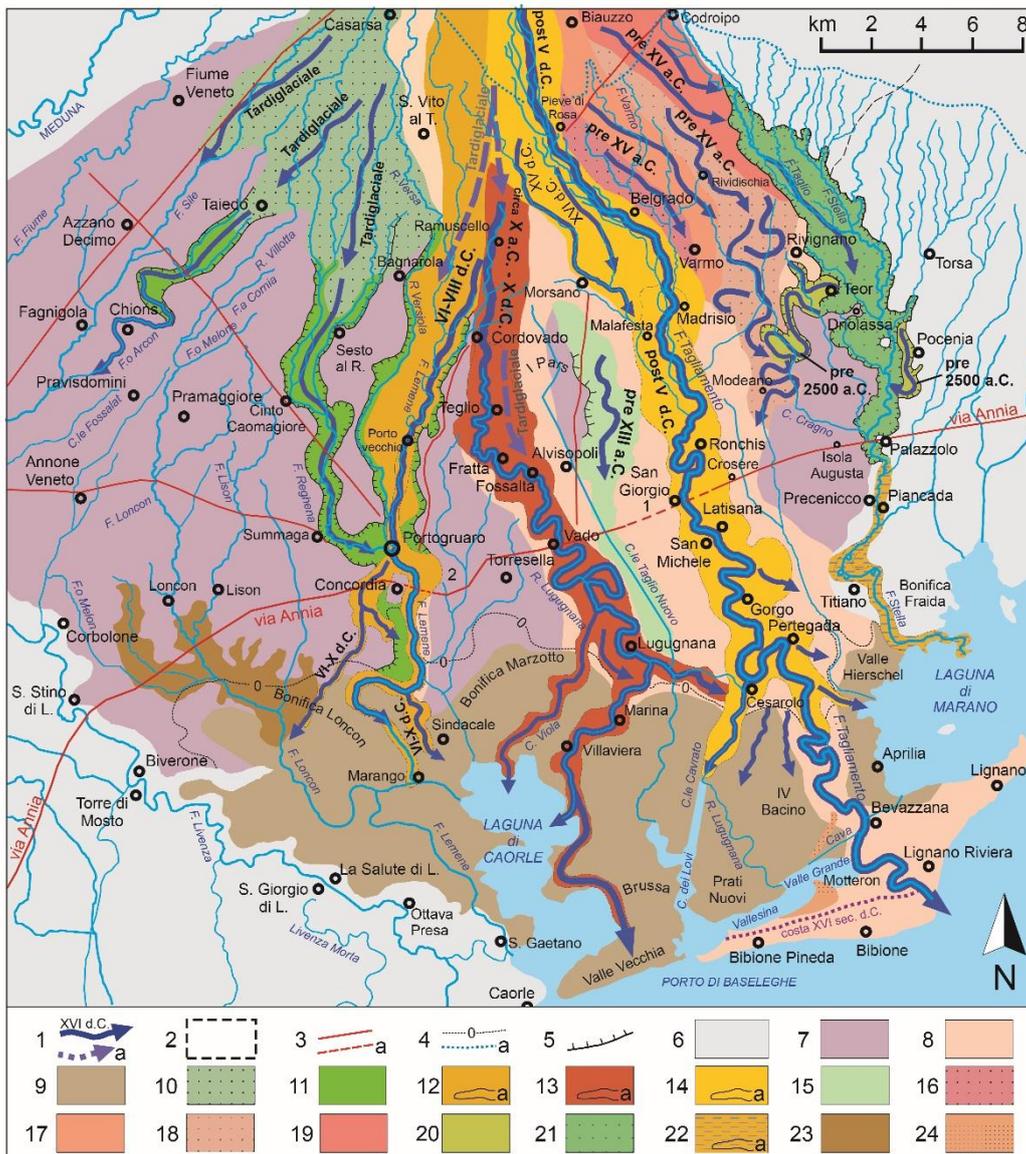


Figura 1.6 - Direttrici del Tagliamento nel post-LGM (Fontana, 2006). 1) direttrice fluviale; 1a) direttrice fluviale sepolta; 2) traccia di sezione stratigrafica; 3) traccia di strada romana; 3a) traccia sepolta; 4) isoipsa 0 m s.l.m.; 4a) limite superiore delle risorgive; 5) orlo di scarpata fluviale; 6) depositi di altri bacini idrografici; 7) depositi LGM; 8) depositi post-LGM; 9) depositi lagunari olocenici; 10) rami tardiglaciali tra Fiume Veneto e San Vito al Tagliamento; 11) incisioni tardiglaciali attualmente occupate dai fiumi Lemene e Reghena; 12) Tagliamento di Concordia, VI-VIII secolo d.C.; 12a) dosso; 13) percorso attivo in epoca romana (Tiliaventum Maius); 13a) dosso; 14) Tagliamento attuale, post V secolo d.C.; 14a) dosso; 15) depressione dei paleoalvei di Alvisopoli; 16) paleoalvei di Glaunicco-Varmo; 17) paleoalvei di San Vidotto; 18) paleoalvei di Rividischia; 19) paleoalvei di Iutizzo; 20) incisioni dei paleoalvei di Campomolle e di Pocenja; 21) incisione dello Stella; 22) depositi dello Stella con influenze del Tagliamento; 22a) dosso; 23) area palustre del fiume Loncon; 24) dune preromane.

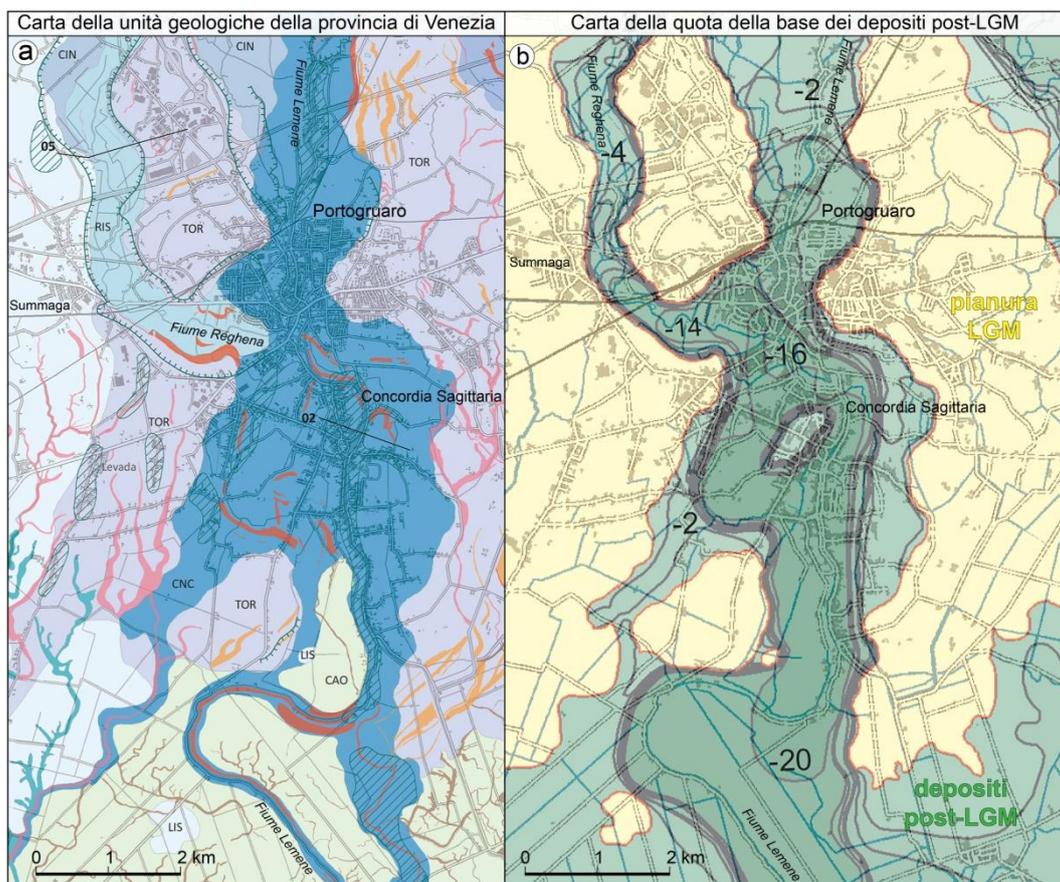


Figura 1.7 – a) Carta delle unità geologiche della provincia di Venezia. Legenda: CNC= Unità di Concordia; CAO= Unità di Caorle; LIS= Unità di Lison; TOR= Unità di Torresella; RIS= Unità dei Fiumi di Risorgiva; CIN= Unità di Cinto Caomaggiore (Bondesan et al., 2008). b) Carta della quota della base dei depositi post-LGM (Bondesan et al., 2008).

Tale unità è costituita da limi sabbiosi, sabbie e limi, e quindi da depositi di ambiente fluviale appartenenti a facies di alveo e dosso fluviale e, solo secondariamente, di piana d'erosione. Il limite inferiore è di tipo erosivo e il limite superiore corrisponde alla superficie topografica, variamente rimodellata dagli interventi antropici (Bondesan et al., 2008).

1.3. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Nei primi 600 m di profondità, e quindi al di sopra del substrato prequaternario, il sottosuolo dell'area in studio è costituito da terreni sciolti con granulometria variabile dall'argilla alla ghiaia. In questi si localizzano acquiferi confinati sabbiosi-ghiaiosi, separati da livelli di limo e argilla, a volte anche importanti in termini di spessore. A questi acquiferi confinati si aggiunge la falda freatica discontinua e con bassa trasmissività che nell'area in studio ha una soggiacenza variabile e compresa tra 2 e 4 m. La permeabilità degli acquiferi confinati oscilla tra 10^{-3} e 10^{-6} m/s essendo costituiti per lo più da sabbie e in alcuni livelli da sabbie e ghiaie (Zangheri, 2011).

Nella pianura veneto-friulana la distinzione tra bassa e alta pianura riguarda anche il sistema idrogeologico (Figura 1.8).

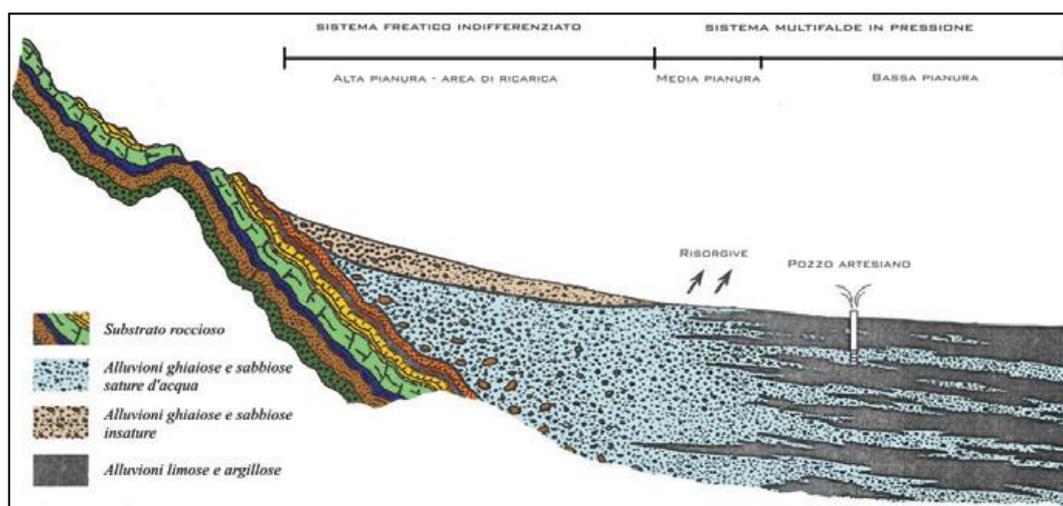


Figura 1.8- Modello idrogeologico della pianura veneta (Zangheri, 2011).

La zona di alta pianura, con dominanza di ghiaia e ciottoli, è caratterizzata da un acquifero indifferenziato molto permeabile, con uno spessore di varie decine di metri ed in comunicazione idraulica con il sistema multifaldeggiante della medio-bassa pianura. Infatti, è proprio l'acquifero indifferenziato dell'alta pianura a ricaricare quello di bassa pianura; a sua volta la ricarica della falda freatica di alta pianura è garantita dall'infiltrazione di acqua nel sottosuolo dovuta alla dispersione dei

fiumi in corrispondenza dello sbocco vallivo (Dal Prà et al., 2000). La profondità della tavola d'acqua della falda freatica di alta pianura è di una decina di metri, tuttavia man mano che ci si allontana dalle Prealpi questa profondità diminuisce finché la tavola d'acqua non interseca la superficie topografica in corrispondenza della fascia delle risorgive da cui infatti si generano i corsi di risorgiva, come il Lemene e il Reghena. Procedendo verso la bassa pianura lo spessore delle ghiaie è sempre minore, fino a sparire del tutto, tranne per alcuni livelli profondi in cui le ghiaie persistono. Nella zona di bassa pianura l'acquifero indifferenziato ghiaioso di alta pianura viene sostituito da un sistema multifalde di acquiferi confinati per lo più sabbiosi separati da depositi a granulometria fine impermeabili (Dal Prà et al., 2000). Si tratta di acquiferi discontinui spessi da qualche metro a qualche decina di metri; nel Portogruarese, per mezzo di dati stratigrafici e della conoscenza della profondità dei pozzi di sfruttamento censiti, ne sono stati individuati 10 (Figura 1.9).

<i>N° acquifero</i>	<i>Limiti</i>	<i>Profondità tetto (m)</i>	<i>Profondità letto (m)</i>
I	Semi confinato/ confinato	10	20 - 25
II	Confinato	34 - 40	50 - 55
III	Confinato	60 - 70	80 - 90
IV	Confinato	110 - 120	130 - 135
V	Confinato	150 - 160	220 - 240
VI	Confinato	240 - 250	290 - 300
VII	Confinato	300 - 310	350 - 380
VIII	Confinato	400 - 410	460
IX	Confinato	480 - 490	?
X	Non individuato nelle stratigrafie ma dalla presenza di pozzi profondi	?	?

Figura 1.9 - Schema degli acquiferi individuati nel Portogruarese (Dal Prà et al., 2000).

Trattandosi di acquiferi discontinui non tutti sono presenti nel sottosuolo di Concordia e Portogruaro. Dal profilo idrogeologico della Figura 1.10 è possibile

osservare che le falde profonde presenti nel sottosuolo dell'area in studio sono la 4, 5, 6, 9.

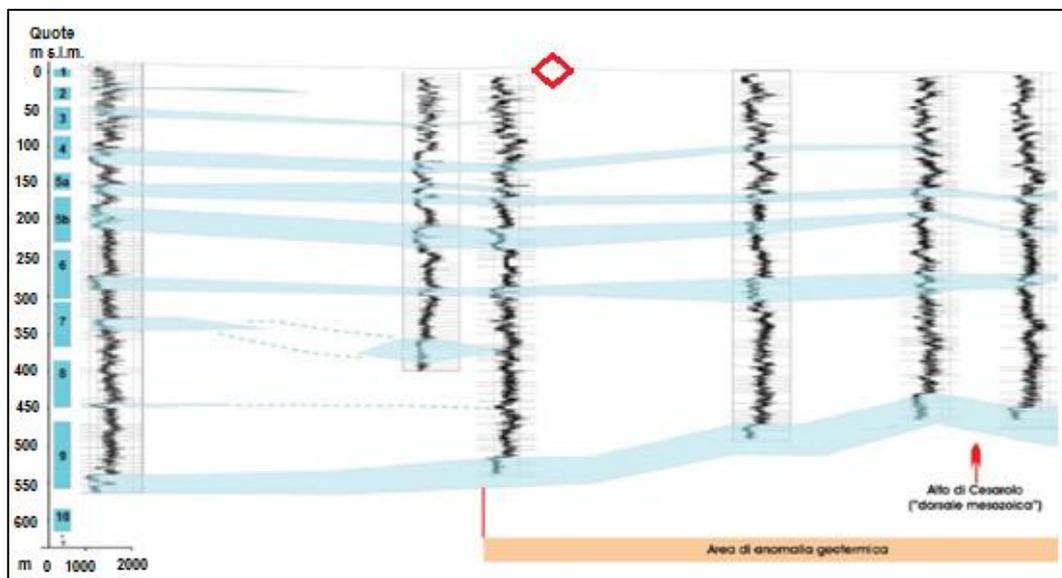


Figura 1.10 - Profilo idrogeologico (Zangheri, 2011). Nota la traccia del profilo idrogeologico, il rombo rosso indica la posizione approssimata dell'area in studio (per localizzazione del profilo vedi Figura 1.11).

Nel sottosuolo della pianura veneto-friulana vengono distinti due sistemi di acquiferi (Zangheri, 2011):

- ✓ acquiferi superficiali, nei primi 30 m di profondità;
- ✓ acquiferi profondi, tra 30 e 600 m di profondità;

I due sistemi di acquiferi, superficiali e profondi, risultano importanti per motivi diversi. Gli acquiferi profondi sono molto sfruttati per l'estrazione di acque termali poiché risentono dell'anomalia geotermica dovuta alla dorsale di Cesarolo, un alto strutturale della piattaforma Mesozoica Friulana che, attraverso la scarsa permeabilità del flysch sovrastante i calcari mesozoici, trasmette calore agli acquiferi miocenici e quaternari più profondi, posti a 500-600 m di profondità. L'area in studio è periferica all'anomalia termica ma comunque ne risente; infatti le falde più profonde, comprese tra 480 e 600÷700 m di profondità, hanno una temperatura di 20-30 °C e sono molto sfruttate anche perché presentano una prevalenza fino a 20 metri sul piano campagna (Figura 1.11).

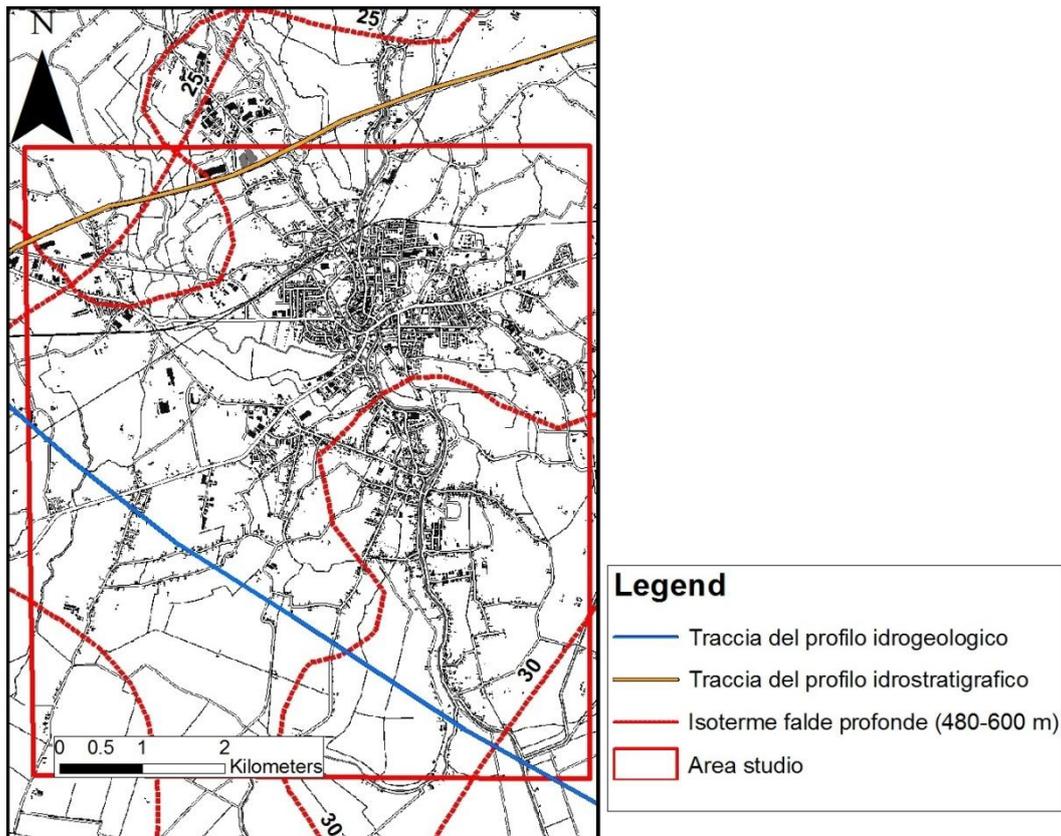


Figura 1.11 - Isotherme delle falde più profonde e relative temperature legate all'anomalia geotermica della dorsale di Cesarolo (Zangheri, 2011); traccia del profilo idrogeologico (Figura 1.10, Zangheri, 2011); traccia del profilo idrostratigrafico (Figura 1.12, Fabbri et al., 2013).

Inoltre gran parte dell'area in studio ricade nella porzione in cui gli acquiferi profondi vengono sfruttati anche come risorsa idropotabile e quindi al prelievo di acque termali occorre sommare quello per uso acquedottistico e per altri usi privati.

Gli acquiferi più superficiali costituiscono invece una risorsa di scarso pregio ma sono comunque interessanti in quanto interferiscono con le attività agricole e opere di ingegneria civile. Di recente è inoltre cresciuto l'interesse per questi acquiferi in quanto potrebbero essere utilizzati come sistemi geotermici (Zangheri, 2011).

In particolare nel sottosuolo dei primi 30 m di profondità sono presenti corpi sabbiosi-ghiaiosi, in cui si impostano gli acquiferi confinati, alternati a livelli di

materiale più fine (limo, argilla e torba) che fungono da acquiclude/acquitardo (Fabbri et al., 2013).

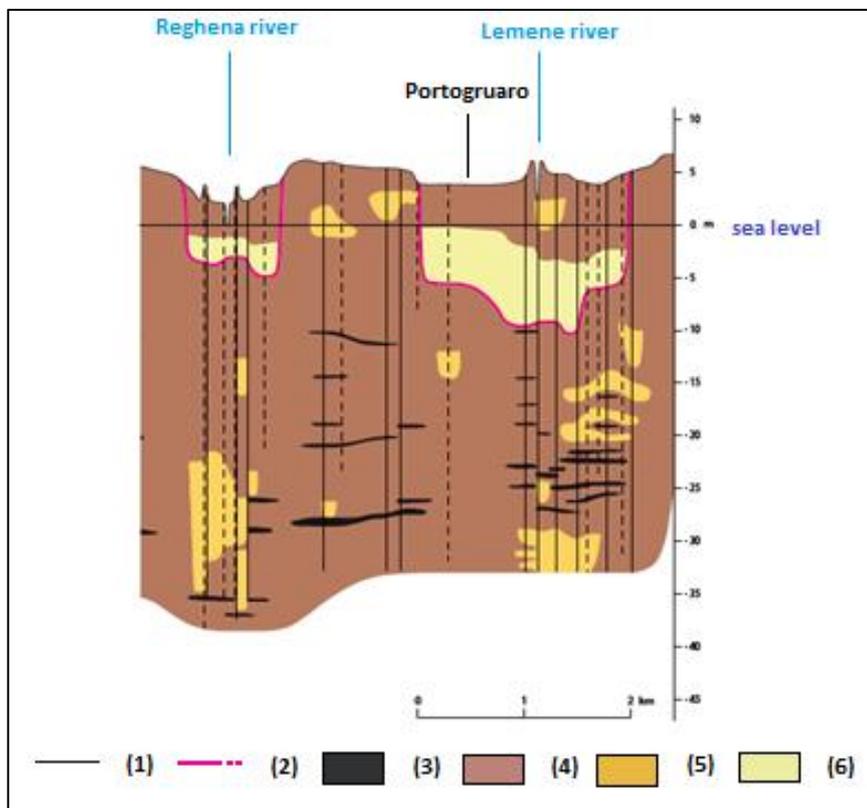


Figura 1.12 – Particolare del profilo idrostratigrafico (Fabbri et al., 2013). Legenda: (1) superficie topografica; (2) limite certo/incerto delle incisioni post-LGM sepolte; (3) torba; (4) acquiclude-acquitardo; (5) acquifero prevalentemente sabbioso; (6) acquifero prevalentemente ghiaioso. Per localizzazione del profilo idrostratigrafico vedi Figura 1.11.

Nel profilo idrostratigrafico (Figura 1.12) vengono rappresentate le incisioni sepolte formate dal Tagliamento nel post-LGM e lungo la cui direttrice scorrono oggi in superficie il Lemene e il Reghena. Fino a Portogruaro alla base di queste due incisioni sono presenti ghiaie con diametro compreso tra i 2 e 5 cm e sabbie ghiaiose, sovrastate da limi e torbe. Questi livelli ghiaiosi e sabbiosi, insieme a quelli più superficiali associati ai corpi di canale olocenici del Tagliamento, costituiscono il sistema di acquiferi superficiali; in particolare quelli alla base delle incisioni sono confinati, mentre quelli di paleoalveo più superficiali sono semiconfinati/confinati (Fabbri et al., 2013).

Infine quest'area della pianura veneto-friulana, trovandosi in parte al di sotto del livello medio del mare, è soggetta ad una rete di bonifica, a scolo meccanico soprattutto, ed in parte naturale e alternato, da parte del Consorzio di Bonifica Veneto Orientale. La rete di bonifica influenza il regime potenziometrico degli acquiferi più superficiali, nei quali infatti le oscillazioni piezometriche sono limitate entro 1.5 metri al massimo.

2. LA SUBSIDENZA

La subsidenza è un fenomeno di lento abbassamento del suolo che può coinvolgere aree a scala locale o regionale e si esplica con tassi di qualche centimetro/millimetro all'anno. Le cause che inducono tale fenomeno possono essere naturali o artificiali:

- ✓ le cause naturali possono essere di origine tettonica (Watts, 1982; Dokka, 2006), legate ad attività vulcanica (Branney, 1995; Takada & Fukushima, 2013) o alla consolidazione dei terreni (Tovey et al., 2002; Van Asselen, 2011). In genere la subsidenza associata a cause di questo tipo riguarda aree a scala regionale, avviene con tassi molto bassi e dunque non comporta effetti immediati;
- ✓ le cause artificiali possono essere legate all'estrazione di fluidi dal sottosuolo (Stramondo et al., 2007; Tomàs et al., 2005; Klemm et al., 2010) o alla costruzione di edifici e manufatti (Stramondo et al., 2008; Manunta et al., 2008). Entrambe le cause inducono il processo di consolidazione dei terreni che di solito avviene entro una decina di anni e riguarda aree a scala locale. Tale processo può comportare danni anche evidenti poiché i tassi di spostamento sono in genere più elevati rispetto a quelli associati a cause naturali. Attualmente la causa di subsidenza più diffusa in ambienti di pianura costiera è l'estrazione dei fluidi dal sottosuolo (Ye-Shuang Xu et al., 2007).

La teoria della consolidazione monodimensionale di Terzaghi riguarda il processo di dissipazione delle sovrappressioni neutre indotte dall'imposizione di carichi sul suolo. Per il principio delle tensioni efficaci di Terzaghi, in un sistema multifase, le tensioni totali possono essere scomposte in tensioni efficaci e pressioni neutre: le prime agiscono sullo scheletro solido del terreno, le seconde sulla fase liquida. Quando viene applicato un carico sul terreno si ha una variazione delle tensioni totali che all'inizio si trasmette unicamente sulla componente delle pressioni neutre comportandone un aumento. Attraverso il processo di consolidazione le

tensioni totali rimangono inalterate e l'incremento delle tensioni, associato all'imposizione del carico, viene trasferito dalla componente delle pressioni neutre a quella delle tensioni efficaci. L'incremento delle tensioni efficaci comporta una variazione dell'assetto strutturale dei grani, e quindi una diminuzione del volume dei pori e di conseguenza il cedimento del terreno. L'intervallo di tempo entro il quale tale processo avviene dipende dalla permeabilità del terreno, dal suo coefficiente di compressibilità e dallo spessore dello strato in cui, attraverso un moto di filtrazione del fluido, le sovrappressioni vengono dissipate. Tutte queste grandezze definiscono il coefficiente di consolidazione del terreno che è indicativo del tempo necessario affinché le sovrappressioni vengano dissipate. L'entità del cedimento, oltre a dipendere dalle caratteristiche geotecniche, profondità e spessore del terreno, nel caso dell'imposizione di un carico, dipende da quanto carico viene applicato sul terreno stesso (Terzaghi and Peck, 1967). All'interno del processo di consolidazione vengono distinte due fasi: quella della consolidazione primaria, che riguarda la dissipazione delle sovrappressioni, e quella della consolidazione secondaria, che avviene in tempi molto lunghi dopo che le sovrappressioni sono già state dissipate. L'importanza di questa seconda fase della consolidazione dipende da un parametro C_{α} , che corrisponde alla pendenza del tratto finale della curva che esprime la deformazione nel tempo in scala semilogaritmica; tale parametro nelle argille consolidate ha un valore che varia da 0.005 a 0.02 ma per le argille organiche aumenta e può raggiungere anche valori superiori a 0.03 (questo vuol dire che gli effetti della consolidazione secondaria sono maggiori quando è presente la componente organica nel terreno).

Quando invece la subsidenza è associata all'emungimento di fluidi dal sottosuolo, a seguito del prelievo stesso si ha un calo delle pressioni interstiziali e di conseguenza un aumento delle tensioni efficaci, e quindi un riassetto dei grani che costituiscono lo scheletro solido. In questo caso l'entità della subsidenza dipende dalla portata estratta e dalla profondità.

Infine, un'altra causa frequente della subsidenza è la bonifica idraulica di quelle aree che si trovano al di sotto del livello del mare, come nel caso della fascia

costiera della pianura veneto-friulana: attraverso impianti di drenaggio si impone un abbassamento della tavola d'acqua con conseguente calo delle pressioni interstiziali e quindi compattazione del terreno; in presenza di terreni organici, tra l'altro, l'ossidazione della materia organica, indotta dall'abbassamento della falda, comporta una perdita di massa e quindi un calo della superficie topografica del suolo.

I tempi e gli spostamenti di un'area in subsidenza sono tali da non averne una immediata sensibilità e da non comportare perdite di vite umane, ma a lungo termine abbassamenti di qualche millimetro all'anno possono comportare cedimenti tali da danneggiare opere di ingegneria civile, fondazioni di edifici antichi, e quindi provocare perdite economiche (Zhang et al., 2007; Zeitoun & Wakshal, 2013).

2.1. STUDI PREGRESSI SULLA SUBSIDENZA NELLA PROVINCIA DI VENEZIA

Una prima mappa di subsidenza riguardante la provincia di Venezia, inerente al periodo 1973-1993, è stata realizzata dall'attuale ISMAR-CNR di Venezia, ed identifica come zone subsidenti quelle ai margini della laguna e parte dei litorali. Da allora partirono una serie di progetti di ricerca finalizzati alla creazione di una rete di monitoraggio del fenomeno anche nel settore nord-orientale della provincia di Venezia. Successivamente è stata elaborata (Teatini et al., 2005) una mappa di subsidenza a scala regionale inerente al periodo 1992-2002, realizzata attraverso l'interpolazione di dati ottenuti da un sistema di monitoraggio integrato che comprendeva misure GPS, misure altimetriche e utilizzo dell'interferometria differenziale SAR. In questa mappa risultano in subsidenza diverse zone, tra cui Portogruaro e Concordia, con tassi compresi tra -2 e -5 mm/anno. La rielaborazione di tale mappa, descritta nell'Atlante Geologico della Provincia di Venezia (Carbognin et al., 2011), ha evidenziato la criticità del fenomeno nel

settore nord-orientale della provincia di Venezia all'interno del quale ricade l'area in studio in questa tesi.

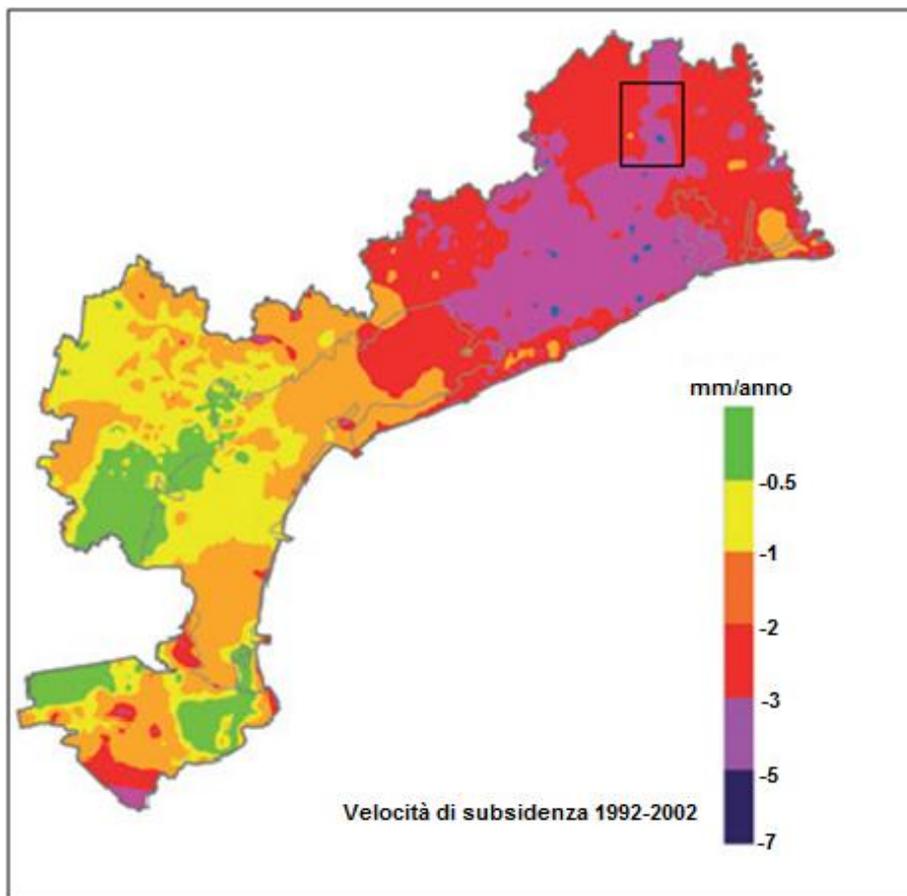


Figura 2.1 - Mappa della velocità di subsidenza della provincia di Venezia e dintorni dal 1992 al 2002 (Carbognin et al., 2011). Nel riquadro nero è localizzata l'area in studio di questa tesi.

In questo settore, interessato da bonifica idraulica, sfruttamento delle acque sotterranee e sedimentazione recente, gli abbassamenti misurati mostrano picchi di $-5\div-7$ mm/anno in alcuni punti ed è ancora più preoccupante il fatto che tassi di $-3\div-5$ mm/anno sono stati rilevati con una certa continuità temporale e in un'area molto estesa (Figura 2.1, Carbognin et al., 2011).

3. METODI E DATI

3.1. TELERILEVAMENTO SATELLITARE RADAR

Con il termine telerilevamento (remote sensing) vengono indicate tutte quelle tecniche di analisi di aree e oggetti che non necessitano del diretto contatto con gli stessi ma ne sfruttano l'interazione con le onde elettromagnetiche. Nel caso del telerilevamento satellitare le onde elettromagnetiche vengono emesse e ricevute, o soltanto ricevute, da sensori, rispettivamente attivi o passivi, montati su un satellite che orbita ad una distanza compresa tra 200 e 36000 km dalla superficie terrestre. Le orbite seguite dai satelliti possono essere equatoriali o polari/quasi-polari:

- ✓ nel primo caso si tratta di orbite circolari, che si posizionano lungo il piano equatoriale e che vengono percorse in 24 ore con la stessa velocità angolare della terra. I satelliti che seguono questo tipo di orbite viaggiano ad una quota di circa 36000 km di altezza e si definiscono geostazionari. Si tratta dei satelliti usati ad esempio per scopi meteorologici;
- ✓ nel secondo caso, invece, le orbite sono ellittiche, perpendicolari al piano equatoriale, polari se passano sopra i poli o quasi-polari se sono leggermente discostate dai poli. I satelliti che compiono questo tipo di orbite viaggiano generalmente a quote comprese tra 600 e 800 km permettendo di avere una maggiore risoluzione spaziale di quelli con orbita equatoriale. Le orbite polari o quasi-polari sono anche note come orbite eliosincrone poiché permettono al satellite di passare nello stesso posto, alla stessa ora, mantenendo inalterata la condizione di illuminazione.

Il termine RADAR (acronimo di Radio Detection and Ranging) indica quei sensori attivi che lavorano nel campo delle microonde dello spettro elettromagnetico, con lunghezza d'onda compresa tra 10 mm e 1 m e frequenza compresa tra 0.3 e 30 GHz (Figura 3.1). L'utilità nello sfruttamento di questa porzione dello spettro elettromagnetico sta nel fatto che nel campo delle

microonde la trasmissività del segnale attraverso l'atmosfera è del 100% per cui non viene in alcun modo preclusa l'acquisizione del segnale, nonostante la presenza di interferenze.

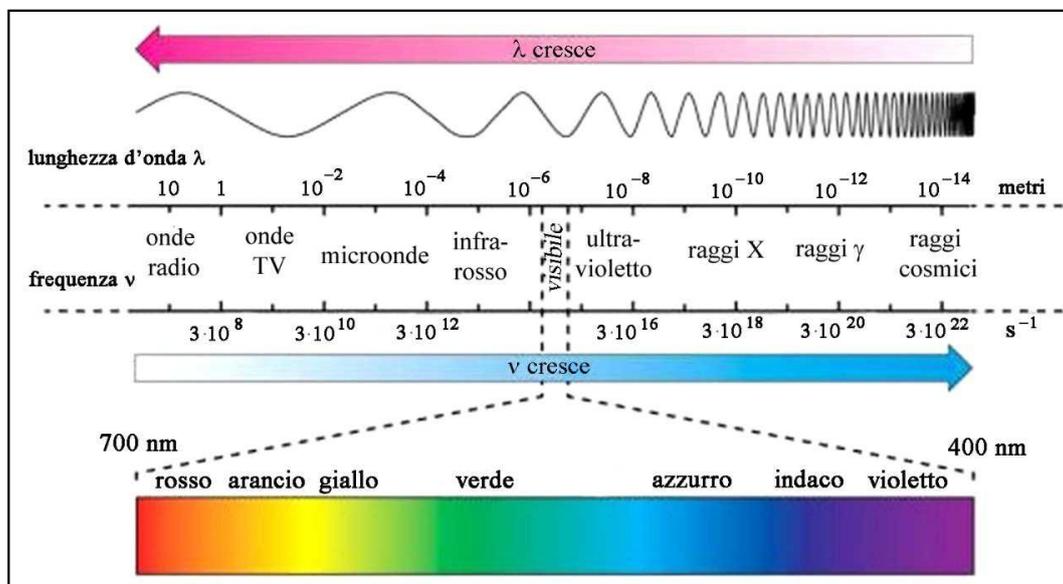


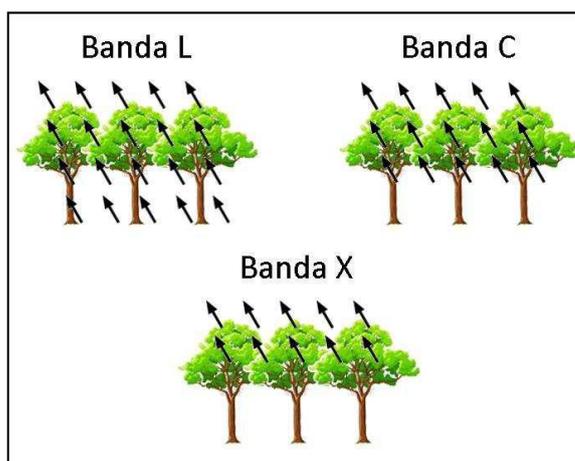
Figura 3.1 - Spettro delle onde elettromagnetiche (anniluce.wordpress.com/2012/01/13/viaggio-attraverso-lo-spettro-elettromagnetico/).

Il sistema di telerilevamento RADAR si basa sul principio che l'antenna trasmittente (sensore attivo) emette il segnale elettromagnetico e l'oggetto che viene colpito dall'onda elettromagnetica (bersaglio) emette a sua volta un segnale di retrodiffusione, che in parte torna all'antenna. La potenza del segnale retrodiffuso dal bersaglio, che raggiunge il ricevitore, dipende dalla geometria di acquisizione, dalle caratteristiche del segnale RADAR inviato, quali frequenza e polarizzazione, e dalle caratteristiche intrinseche del bersaglio quali rugosità, materiale di cui è costituito, geometria, dimensione ed umidità:

- più una superficie è rugosa e maggiore è la quantità di energia che torna al sensore poiché le asperità della superficie rendono la riflessione diffusa; quindi nell'immagine satellitare quella superficie apparirà più luminosa (bianca, nel caso di un'immagine a scala di grigi);
- maggiore è il contenuto d'acqua di un corpo e minore è il segnale che torna al sensore perché in questo caso la riflessione è speculare (i corpi

idrici infatti generano un'immagine nera poiché il segnale non viene riflesso al sensore).

Attraverso le acquisizioni RADAR, nota la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche e l'intervallo temporale che intercorre tra l'emissione del segnale e la ricezione del segnale riflesso, è possibile ricavare la distanza percorsa dal segnale e quindi la distanza sensore-bersaglio.



Band	P	L	S	C	X	K
f (GHz)	1	2	4	8	12	
λ (cm)	30	15	7,5	3,8	2,5	

Figura 3.2 - Comportamento del segnale in funzione delle bande RADAR a diversa lunghezza d'onda. La banda L con una maggiore lunghezza d'onda riesce ad attraversare lo strato vegetativo e ad essere restrodifusa dalla superficie terrestre; la banda X con minore lunghezza d'onda non penetra lo strato della vegetazione (IEEE, 1984).

I sensori RADAR più comuni operano nel campo delle microonde con lunghezza d'onda compresa tra 3 e 24 cm. Le bande a diversa lunghezza d'onda più usate dai diversi sensori sono la L, C, X: al diminuire della lunghezza d'onda si ottiene una risoluzione spaziale sempre maggiore ma al contempo diminuisce la capacità di penetrazione della vegetazione da parte del segnale elettromagnetico, limitando il successo di questa tecnica nelle aree vegetate (Figura 3.2).

3.1.1. Geometria di acquisizione dei sensori RADAR

I satelliti con sensori RADAR percorrono orbite eliosincrone muovendosi da nord verso sud (orbita discendente) e da sud verso nord (orbita ascendente). La direzione in cui viaggia il satellite è detta azimuth, il segnale viene inviato dal sensore al bersaglio lungo una linea detta LOS (Line Of Sight) ad una distanza detta slant range che è posta su una direzione inclinata rispetto la perpendicolare al sensore di un angolo pari a θ , mentre la distanza lungo l'orizzontale tra il sensore ed il bersaglio è detta ground range (Figura 3.3). L'ampiezza della scena illuminata dal fascio elettromagnetico è detta swath e varia in funzione dell'altezza a cui orbita il satellite e della geometria di acquisizione.

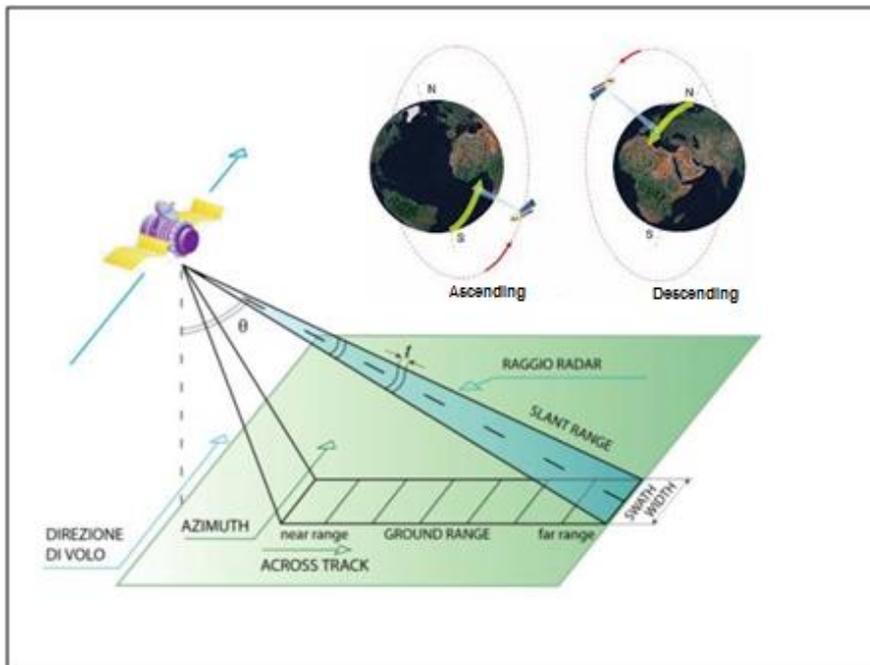


Figura 3.3 - Geometria di acquisizione dei satelliti RADAR.

L'acquisizione del segnale, inclinata di un angolo θ rispetto la perpendicolare al sensore, ha il vantaggio di permettere che punti a quota diversa diano segnali di ritorno al sensore in momenti diversi e quindi vengono distinti, ma d'altra parte determina le seguenti deformazioni prospettiche delle immagini RADAR (Figura 3.4):

- Il foreshortening si ha quando la pendenza del terreno è tale che la superficie colpita dal segnale RADAR risulti perpendicolare alla LOS; in questo caso la superficie, nell'immagine satellitare, apparirà accorciata e risulterà molto luminosa;
- Il layover si verifica quando la superficie topografia ha una pendenza maggiore rispetto all'angolo θ per cui, per esempio, nel caso di una montagna il segnale vedrà prima la cima e poi la base, invertendone la geometria. Il risultato è che tali superfici a maggiore pendenza appariranno più luminose e accorciate (caso limite del foreshortening);
- Lo shadow, invece, si ha quando un versante non viene fisicamente colpito dal segnale RADAR perché è rivolto in direzione opposta al sensore, e quindi nell'immagine apparirà nero.

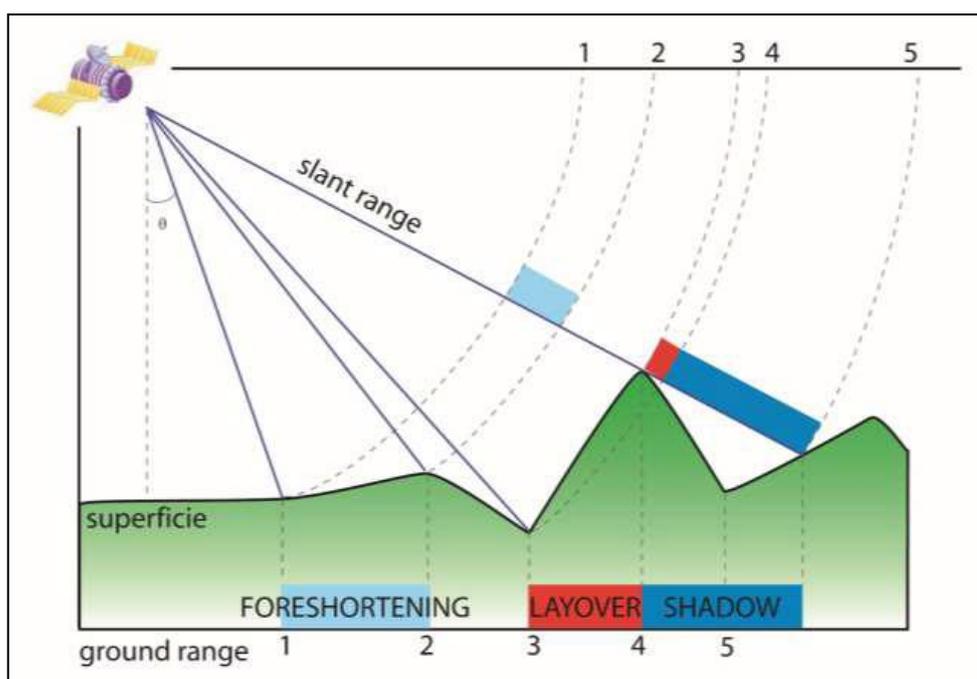


Figura 3.4 - Schema dei 3 casi in cui possono verificarsi i 3 tipi di deformazione prospettica.

Tutti i tre tipi di deformazione sono riconoscibili nelle immagini RADAR ma solo il foreshortening può essere corretto e rimosso, attraverso l'utilizzo di un modello digitale del terreno.

3.1.2. Synthetic Aperture Radar (SAR)

La risoluzione spaziale di un sistema di acquisizione è la distanza minima alla quale il sistema distingue due oggetti. Nei sistemi di telerilevamento RADAR si ha a che fare con due tipi di risoluzione spaziale:

- ✓ la risoluzione spaziale lungo lo slant range, che dipende dalla velocità della luce e dalla durata dell'impulso trasmesso; minore è la durata dell'impulso e migliore sarà la risoluzione in range;
- ✓ la risoluzione spaziale lungo l'azimuth, che dipende dalla distanza satellite-bersaglio e dalle dimensioni del fascio RADAR illuminante; la dimensione del fascio illuminante dipende a sua volta dalla lunghezza d'onda e dalla lunghezza dell'antenna trasmittente; maggiore è la dimensione fisica dell'antenna e più si riduce la dimensione del fascio incidente, ottenendo così una migliore risoluzione spaziale.

Per avere una risoluzione spaziale dell'ordine dei metri servirebbero antenne lunghe almeno 1 km perciò vengono usati i sensori SAR (Synthetic Aperture Radar, ovvero Radar ad Apertura Sintetica). Questi sensori sono in grado di creare un'antenna sintetica di grandi dimensioni grazie alla modalità di acquisizione che adottano. Essi inviano nello stesso istante una serie di impulsi con una propria frequenza tali da simulare un'antenna con una lunghezza sintetica maggiore di quella reale, così da garantire una buona risoluzione spaziale in azimuth (antenne di 10 m come quelle usate nella missione Ers hanno permesso di ottenere una risoluzione di 5 m in azimuth). Con questa tecnica di acquisizione tra l'altro la risoluzione spaziale diventa indipendente dalla distanza sensore-bersaglio per cui viene ottenuta la stessa risoluzione da sensori posti a differente quota rispetto la superficie terrestre.

3.2. L'INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR

L'interferometria differenziale è la tecnica con cui convenzionalmente vengono studiati i dati SAR.

Un'immagine RADAR può essere schematizzata come una griglia di pixel in ognuno dei quali sono contenute due informazioni del segnale acquisito: l'ampiezza e la fase. L'ampiezza è indicativa della quantità del segnale che viene retrodiffusa dal bersaglio al sensore, mentre la fase indica la differenza di fase che c'è tra il segnale emesso e quello ricevuto dal sensore. L'interferometria sfrutta il valore di fase contenuto in ogni singolo pixel per ottenere informazioni sugli spostamenti in atto nel suolo.

Ciò è possibile utilizzando due immagini RADAR, anche acquisite da sensori con orbite differenti, relative ad una stessa area e, a partire dalla differenza di fase tra le due immagini, noti alcuni parametri, vengono stimati eventuali spostamenti della superficie terrestre (Figura 3.5; Massonet e Feigl, 1998; Rosen et al., 2000).

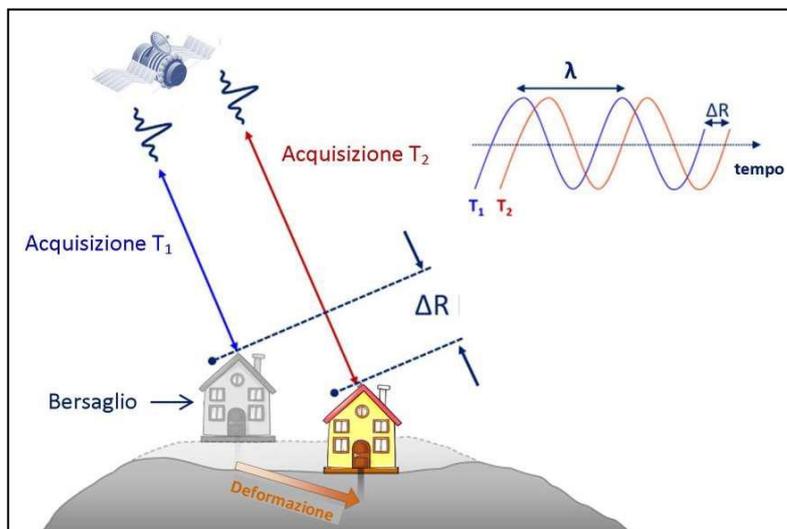


Figura 3.5 – Schema concettuale di un'analisi interferometrica.

In particolare la differenza di fase tra due acquisizioni ($\Delta\Phi$) può essere influenzata da diversi contributi:

$$\Delta\Phi = t + b + \alpha + \Delta R + noise$$

t = topografia;

b = baseline spaziale, ovvero la distanza tra le orbite dei sensori che hanno acquisito le due immagini;

α = disturbo atmosferico;

ΔR = spostamento del bersaglio avvenuto tra le due acquisizioni;

noise = rumore del sistema di acquisizione.

Il contributo di fase dovuto ad eventuali spostamenti dell'area analizzata può essere isolato, permettendo di ottenere la velocità di spostamento del bersaglio. Ciò è possibile stimando ed eliminando i restanti contributi di fase (la topografia dell'area in studio, ad esempio fornita da un modello digitale del terreno, il baseline spaziale) ed assumendo trascurabili il disturbo atmosferico e il rumore del sistema di acquisizione.

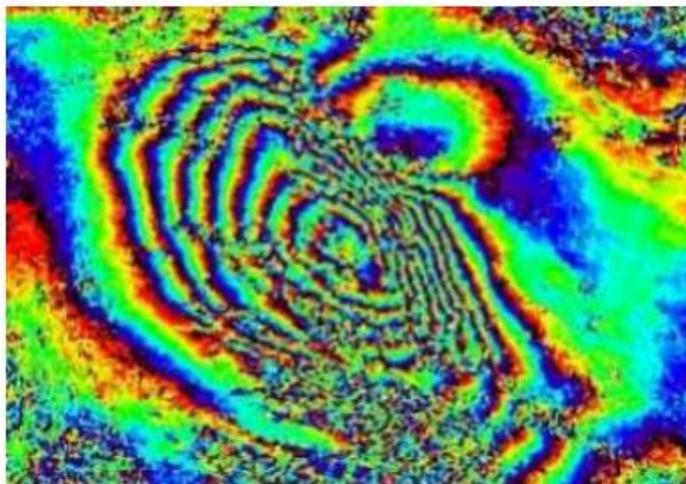


Figura 3.6 - Esempio di interferogramma risultante dall'analisi interferometrica. In particolare questo in figura si riferisce al terremoto dell'Aquila del 2009 (http://www.asi.it/it/news/sisma_abruzzo_le_immagini_dal_satellite_envisat_0).

Dunque, a partire da due immagini RADAR, è possibile ottenere un interferogramma (Figura 3.6) da cui viene ricavata la mappa degli spostamenti in atto nel suolo.

3.2.1. Vantaggi e limiti dell'interferometria

L'affidabilità dell'interferogramma risultante dall'analisi interferometrica dipende dalla coerenza delle immagini analizzate. Il parametro "coerenza" è un valore numerico che varia da 0 a 1 e che quantifica una variazione di riflettività del bersaglio tra le due acquisizioni: una coerenza pari a 1 indica che l'oggetto ha mantenuto inalterate le sue caratteristiche di riflettività, viceversa la coerenza sarà nulla. Sono diversi i parametri che la influenzano:

- ✓ l'intervallo di tempo che intercorre tra due successivi passaggi del sensore su una stessa area, detto tempo di rivisitazione;
- ✓ la presenza di aree vegetate riduce la coerenza per via di una variazione delle caratteristiche elettromagnetiche della vegetazione al variare delle stagioni; la presenza della vegetazione infatti costituisce uno dei limiti tecnici dell'interferometria;
- ✓ l'acquisizione delle due immagini in diverse condizioni atmosferiche riduce la coerenza per via del fatto che una diversa condizione di pressione, temperatura e umidità del bersaglio ne varia le caratteristiche di riflettività e rende anche significativo il contributo dato dal disturbo atmosferico alla differenza di fase registrata, rendendo meno precisa la determinazione degli spostamenti del suolo;
- ✓ un baseline spaziale superiore ai 200-300 m abbassa la coerenza e non permette lo svolgimento dell'analisi interferometrica.

Un grande limite dell'interferometria differenziale è quello di non riuscire a misurare spostamenti, tra celle di risoluzione adiacenti, superiori alla metà della lunghezza d'onda del segnale utilizzato per cui, avendo a che fare con microonde, la variabilità degli spostamenti rilevabili con questa tecnica deve essere dell'ordine dei millimetri o al massimo di qualche centimetro. Inoltre l'unica componente di spostamento rilevabile è quella che avviene lungo la LOS. Pertanto, in caso di spostamenti che avvengono in direzione verticale ed in direzione est-ovest, è possibile misurarne la componente lungo la LOS; gli

spostamenti in direzione nord-sud non possono essere valutati con l'interferometria essendo la direzione in cui i sensori SAR si muovono.

Nonostante i numerosi limiti dell'interferometria questa tecnica di telerilevamento è sempre più utilizzata nello studio dei fenomeni deformativi del suolo perché presenta comunque numerosi vantaggi:

- ✓ le acquisizioni avvengono in qualsiasi condizione di illuminazione e atmosferica, 24 ore su 24;
- ✓ rende possibile lo studio di aree difficilmente accessibili;
- ✓ permette di analizzare in poco tempo aree molto vaste;
- ✓ lo sviluppo di tecniche di analisi interferometrica multistacking ha migliorato la precisione negli spostamenti della superficie terrestre rilevabili;
- ✓ c'è una grande disponibilità di dati RADAR acquisiti dalle diverse agenzie spaziali.

3.3. TECNICHE A-DINSAR E APPLICAZIONE IN AREE IN SUBSIDENZA

Con lo scopo di rendere l'interferometria differenziale sempre più efficace e precisa, negli ultimi 20 anni sono state sviluppate delle tecniche di analisi multistacking che utilizzano numerosi dati SAR dell'area in analisi, così da poter stimare il contributo atmosferico della differenza di fase e poter ottenere una maggiore precisione negli spostamenti in atto. Alcune di queste tecniche sono la SBAS (Berardino et al., 2002), PS (Ferretti et al., 2001), SqueeSAR (Ferretti et al., 2011), SPN (Arnaud et al., 2003), CPT (Blanco-Sanchez et al., 2008), MT-UnSAR (Hooper, 2008) e ISBAS (Sowter et al., 2013). Queste tecniche sono note come Advanced Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (A-DInSAR).

In particolare la tecnica dei PS (Persistent Scatterers) si basa sull'analisi di punti bersaglio (noti come Diffusori o Riflettori Permanenti) ovvero edifici, affioramenti rocciosi, strutture metalliche o comunque oggetti che mantengono inalterata la propria firma elettromagnetica. In questo modo il segnale RADAR arriverà al sensore con un'ampiezza costante nel tempo, permettendo di stimare il contributo α dato dal disturbo atmosferico alla differenza di fase e quindi rimuoverlo. Ciò consente di ottenere una precisione nella stima degli spostamenti in atto dell'ordine dei millimetri. Il limite di questa tecnica è che sono necessarie almeno 20 acquisizioni e nel processamento dei dati viene assunto un trend lineare degli spostamenti. Inoltre, in aree vegetate, questa tecnica è poco efficace per la mancanza di riflettori permanenti.

La SBAS (Small BAseline Subset) invece è più efficace della precedente in aree vegetate perché non fa uso di riflettori permanenti ma combina tra loro coppie di dati SAR caratterizzati da un basso baseline spaziale e temporale. Vengono così ridotti i fenomeni di decorrelazione spaziale e temporale tra le acquisizioni e si rende più precisa la stima degli spostamenti in atto. Anche in questo caso sono necessarie almeno 15 immagini.

In letteratura diversi studi hanno mostrato l'efficacia di queste tecniche nell'indagine, mappatura e monitoraggio di aree in subsidenza (Tomas et al., 2005; Strasmondo et al., 2007; Manunta et al., 2008; Sousa et al., 2010; Tomas et al., 2010; Teatini et al., 2012; Raspini et al., 2014). In effetti il monitoraggio del fenomeno della subsidenza tramite dati interferometrici risulta particolarmente efficace poiché:

- ✓ si tratta di processi che avvengono lentamente con spostamenti dell'ordine dei centimetri/millimetri all'anno;
- ✓ le aree in subsidenza sono spesso quelle urbanizzate dove dunque la densità di punti bersaglio permanenti è elevata;
- ✓ gli spostamenti lungo la verticale che caratterizzano le aree in subsidenza possono essere rilevati dai sensori lungo la LOS ed inoltre quando il

movimento avviene lungo la verticale le informazioni ottenute dalla geometria di acquisizione ascendente e discendente coincidono.

Inoltre nel tempo si è visto come i dati interferometrici possano prestarsi a diversi tipi di utilizzo, che consentono di ottenere informazioni ben diverse tra loro:

- combinando immagini ad alta risoluzione acquisite in banda X, analizzate con la tecnica PS, con immagini acquisite in banda L, in grado di penetrare lo strato forestale, analizzate con la tecnica SBAS, è possibile ottenere informazioni sugli spostamenti in atto sia in aree antropiche che vegetate, sia a scala della singola struttura che dell'intera area in studio (Tosi et al., 2016);
- integrando l'interferometria differenziale con dati litostratigrafici e morfologici è possibile rilevare un diverso comportamento di deformazione nelle diverse unità di sistemi alluvionali in subsidenza (Conesa-García et al., 2016).

3.4. DATI UTILIZZATI

Il punto di partenza della tesi è stato quello di acquisire ed importare in ambiente GIS i dati geologici e geomorfologici necessari per la definizione dell'incisione sepolta e per la valutazione del modello geologico; sono state dunque acquisite ed importate nel progetto GIS le seguenti informazioni:

- ✓ Carta Topografica della Provincia di Venezia alla scala 1:50000;
- ✓ Carta Tecnica Regionale 1:10000 disponibile sul sito del Portale Cartografico della Regione Veneto (idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/);
- ✓ Carta della Pianura LGM affiorante (da Fontana, 2012 - Carta dello spessore del Sintema del Po , allegato alla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000 - Foglio 107 "Portogruaro");
- ✓ Carta delle Isopache dei depositi post-LGM (da Fontana, 2012 - Carta dello spessore del Sintema del Po, allegato alla Carta Geologica d'Italia alla scala

1:50000 - Foglio 107 “Portogruaro”). In questa carta vengono rappresentate delle linee a uguale spessore (da 2 a 20 m) dei depositi post-LGM, e dunque indicative della base delle ghiaie che caratterizzano il fondo dell’incisione sepolta del Tagliamento post-LGM; l’isopaca 2 m è inoltre indicativa del limite dell’incisione sepolta. La carta delle isopache dei depositi post-LGM, usata in GIS per le elaborazioni, coincide con la Carta della quota della base dei depositi post-LGM (Figura 1.7b, Bondesan et al., 2008);

- ✓ Sondaggi stratigrafici (profondi fino a 40 m) forniti dalla provincia di Venezia e dal relatore Alessandro Fontana;
- ✓ Sondaggio stratigrafico PRT1 eseguito appositamente per la realizzazione di questa tesi a nord-est dell’area in studio, all’interno dell’incisione sepolta.

In merito ai dati interferometrici utilizzati invece sono stati considerati:

- ✓ Persistent Scatterers, risultanti dal processamento dei dati acquisiti dalle missioni ERS 1/2 (Earth Resources Satellite), dal 1992 al 2000 (in particolare ERS-1 ha acquisito dati dal luglio 1991 al Marzo 2000, ERS-2 è stato operativo dall’estate del 1995), e dalla missione Envisat (ENVIRONMENTAL SATellite) dal 2003 al 2010, acquisiti sia secondo l’orbita ascendente che discendente; si tratta di immagini satellitari acquisite in banda C (con lunghezza d’onda di 5.6 cm), con risoluzione spaziale di 25 m, e con tempo di rivisitazione di 35 giorni. I PS usati in questa tesi sono quelli forniti dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM). I dati SAR in questione sono stati processati nell’ambito del progetto “Fornitura di Dati, Sistemi e Servizi per la Realizzazione del Sistema Informativo del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale” (PST-A) da Tele-Rilevamento Europa, uno spin-off del Politecnico di Milano;
- ✓ Persistent Scatterers, ottenuti dalle immagini della missione COSMO-SkyMed (2010-2016) sia dell’orbita ascendente che discendente, processati

dalla dottoressa Giulia Tessari. Le immagini della missione COSMO, i cui satelliti sono ancora in orbita, vengono acquisite in banda X con una lunghezza d'onda di 3.1 cm ed hanno una risoluzione spaziale di 3 m ed un tempo di rivisitazione di 16 giorni. Essendo acquisite in banda X, queste immagini consentono una migliore delimitazione delle aree con diversa velocità di subsidenza e permettono di estendere la serie storica degli spostamenti in atto. D'altra parte l'utilizzo di una banda con lunghezza d'onda così bassa non favorisce l'indagine in aree vegetate. Dunque, per ridurre i fenomeni di decorrelazione dei dati connessi alla variazione temporale delle superfici coltivate, la richiesta dei dati all'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) è stata fatta in maniera tale da minimizzare l'intervallo temporale tra un'acquisizione e l'altra così da ridurre la decorrelazione dovuta alla presenza di vegetazione. In considerazione anche della disponibilità di immagini nel catalogo dell'ASI, sono stati richiesti i dati acquisiti con orbita ascendente per il periodo 2010-2011, mentre per il periodo 2012-2016 sono stati richiesti quelli della traccia discendente;

- ✓ Persistent Scatterers delle immagini della missione Sentinel-1 (dicembre 2014-marzo 2016) acquisiti con orbita discendente, processati dalla dottoressa Giulia Tessari. Le immagini della missione Sentinel-1, i cui satelliti sono ancora in orbita, vengono acquisite in banda C, hanno un tempo di rivisitazione di 12 giorni ed una risoluzione spaziale di 25 m.

Per la seconda parte della tesi, relativa all'identificazione delle possibili cause della subsidenza, sono stati importati nel progetto GIS i seguenti dati:

- ✓ fotogrammi aerei dal 1983 al 2010 disponibili sul sito del Portale Cartografico della Regione Veneto (idt.regione.veneto.it/app/metacatalog/)
- ✓ immagini storiche disponibili su Google Earth dal 2003 al 2015;
- ✓ dati piezometrici risultanti dal monitoraggio fatto dalla Regione Veneto delle falde superficiali e profonde dal 1998 al 2014 e disponibili sul web (dati.veneto.it/dataset/acque-sotterranee-livello-piezometrico-delle-falde);

- ✓ dati pluviometrici dal 2010 al 2016 disponibili sul sito dell'Arpav (www.arpa.veneto.it);
- ✓ informazioni ottenute dalla bibliografia.

3.5. ELABORAZIONE DEI DATI SATELLITARI

Tutti i dati acquisiti ed utilizzati in questa tesi sono stati importati in un progetto GIS sul software ArcMap, utilizzando il sistema di riferimento “Gauss Boaga fuso ovest”, creando dei layer su una Basemap disponibile su ArcGIS Online, ovvero su un'immagine satellitare ad alta risoluzione dell'area. L'importazione dei dati in ambiente GIS ne consente la sovrapposizione ed il confronto, con un unico sistema di riferimento, agevolandone l'elaborazione.

L'area in studio è stata definita tenendo in considerazione la distribuzione spaziale dei PS ERS e Envisat disponibili, poiché tali dati interferometrici coprono la maggior parte dell'intervallo di tempo investigato. L'area di circa 53 km² comprende parte della città di Portogruaro e una parte di Concordia Sagittaria, e comprende sia l'urbanizzato delle due città che estese porzioni di aree agricole.

Procedendo in ordine temporale con i dati interferometrici, è stata fatta una prima valutazione visiva della distribuzione di velocità dei PS ERS e Envisat, sia della traccia ascendente che discendente, mettendo come base il limite dell'incisione sepolta. Il fine era quello di individuare quale distribuzione, tra la traccia ascendente e discendente, presentasse un diverso comportamento in termini di velocità di subsidenza tra le unità dentro l'incisione sepolta e la pianura LGM affiorante.

Poiché nella distribuzione dei PS Envisat con orbita discendente non sono emerse differenze in termini di velocità di subsidenza tra i punti nell'area dell'incisione e quelli situati all'esterno di essa, si è scelto di focalizzare l'attenzione sui PS delle immagini ERS e Envisat acquisite con orbita ascendente. Considerando dunque queste ultime due distribuzioni di velocità è stata fatta un'interpolazione spaziale

dei PS con lo strumento IDW (Inverse Distance Weight) disponibile su ArcMap ed è stata realizzata una mappa di velocità di subsidenza relativa al periodo 1995-2000, interpolando i PS ERS, e una relativa al 2003-2010, interpolando i PS Envisat. Lo stesso è stato fatto con i PS COSMO Sky-Med (acquisiti con orbita ascendente e discendente) e Sentinel (acquisiti con orbita discendente).

I PS ERS e Envisat, forniti dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, nell'ambito del progetto PST-A sono già stati filtrati e privati dai dati rumorosi. I dati SAR delle missioni COSMO Sky-Med e Sentinel-1 sono stati processati dalla dottoressa Giulia Tessari, e successivamente filtrati sulla base di valori soglia del rapporto segnale/rumore (μ/σ). Tali valori sono stati definiti considerando la distribuzione dei valori del parametro μ/σ associato ai PS presenti in ciascuna scena. Si è tenuto conto inoltre del numero di acquisizioni e dell'intervallo di tempo coperto dai dati della specifica missione. Infatti nel caso dei dati COSMO Sky-Med acquisiti con orbita discendente è stato imposto un valore soglia μ/σ pari a 3 poiché il numero di acquisizioni (66 nel periodo 2012-2016) è maggiore rispetto a quello dei dati COSMO Sky-Med acquisiti con orbita ascendente (34 acquisizioni nel periodo 2010-2011), caso in cui è stato imposto il valore soglia μ/σ superiore e pari a 3.2. Nel caso dei dati Sentinel, il valore soglia μ/σ è pari a 4 poiché il numero di acquisizioni è di 32 e il periodo coperto dai dati è dal 12/2014 al 03/2016.

In seguito all'analisi delle distribuzioni di velocità ERS e Envisat si è proceduto con la realizzazione di grafici rappresentativi delle serie temporali degli spostamenti in atto dal 1995 al 2000 e dal 2003 al 2010, facendo un confronto tra punti esterni e interni all'incisione.

3.6. INDAGINI STRATIGRAFICHE E ANALISI IDROGEOLOGICHE

Successivamente si è proceduto alla definizione di tre sezioni di interesse in cui fare un confronto tra il modello geologico e il modello di velocità di subsidenza, quest'ultimo ottenuto attraverso i dati interferometrici.

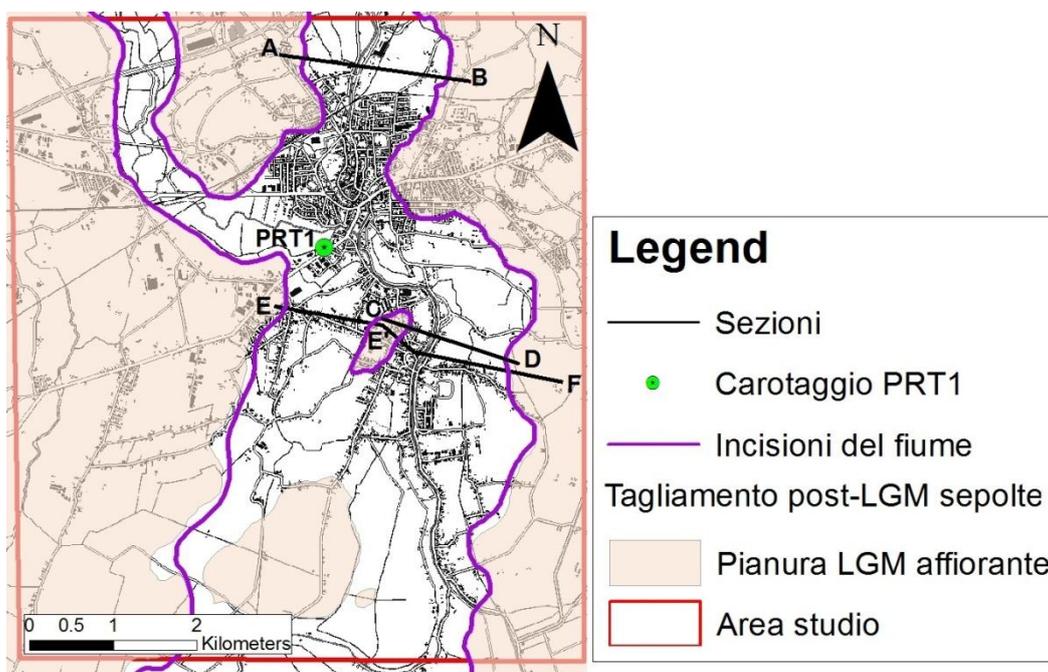


Figura 3.7 - Localizzazione delle sezioni A-B, C-D, E-F, e del punto PRT1 in cui è stato fatto il carotaggio manuale.

Per quanto riguarda la sezione A-B, la sezione stratigrafica è stata fatta considerando i sondaggi stratigrafici forniti dalla provincia di Venezia fino ad una profondità di 20 m. Per la sezione C-D, invece, è stata presa in considerazione la sezione stratigrafica di riferimento per la zona, pubblicata da Fontana nel 2006.

Il modello geologico descritto dalle due sezioni è stato verificato e confermato attraverso la realizzazione del carotaggio manuale fino a 8.85 m di profondità nel punto PRT1 (1798011.646 5075467.468 Metri).

Per la realizzazione della sezione A-B sono stati usati i seguenti sondaggi (per la descrizione delle stratigrafie vedi APPENDICE A):

- S1
- S1-1994
- S2-1994
- SS2
- S3
- S3-1994
- S4-1994
- S6
- S9
- SS6
- S14
- S13

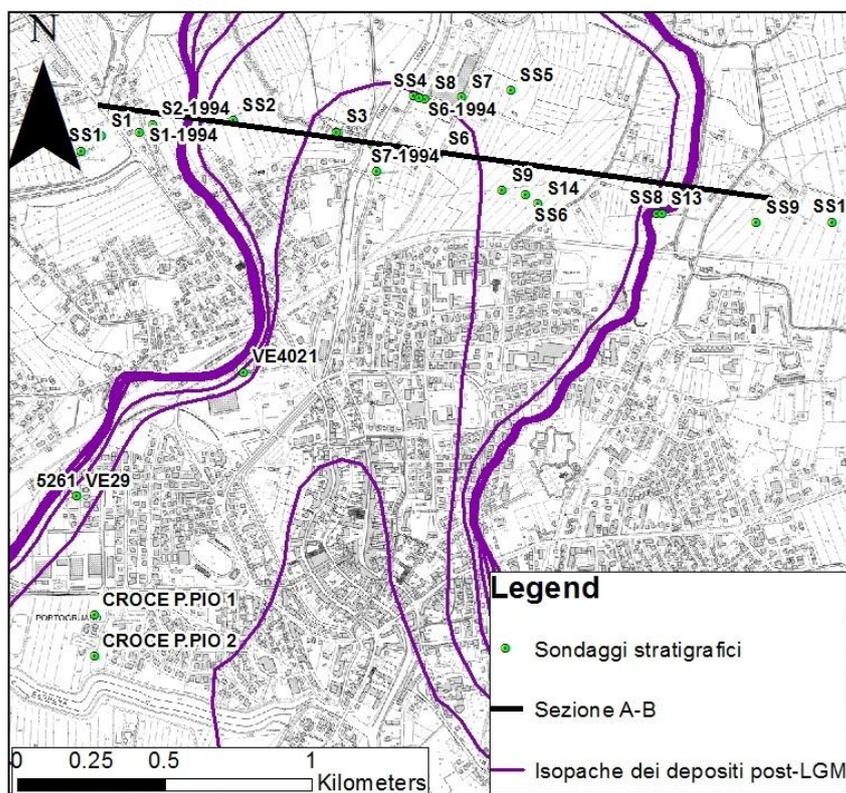


Figura 3.8 - Localizzazione dei sondaggi stratigrafici e della sezione A-B.

In entrambe le sezioni il modello interferometrico è stato definito facendo delle sezioni di velocità sulla base delle mappe di velocità di subsidenza ottenute con l'interpolazione IDW.

Per avere una maggiore certezza della corrispondenza tra dati stratigrafici e interferometrici, considerando la sezione E-F, è stata fatta una valutazione puntuale della velocità dei PS Envisat (con orbita ascendente) rapportata allo spessore dei depositi post-LGM. La posizione e l'andamento di tale sezione sono stati scelti in funzione della posizione dei singoli PS considerati e facendo in modo di attraversare perpendicolarmente le isopache dei depositi post-LGM.

La scelta dei PS Envisat è stata fatta considerando che, rispetto agli ERS (inerenti al periodo 1995-2000), l'intervallo di tempo coperto dai dati Envisat (2003-2010) è maggiore e dunque le velocità medie sono più rappresentative del fenomeno di subsidenza in atto.

Per la definizione delle possibili cause della subsidenza, sono state analizzate le anomalie di velocità riscontrate nelle mappe di velocità di subsidenza ERS e Envisat. Delle 6 aree anomale individuate è stata fatta l'analisi temporale delle immagini storiche disponibili dal 1983 al 2015 al fine di valutare se tali anomalie di velocità sono dovute all'imposizione di carichi sul terreno per la realizzazione di strade, edifici o infrastrutture. Lo stesso è stato fatto con le mappe di velocità COSMO Sky-Med e Sentinel; anche in questi casi sono state individuate 6 aree anomale.

Sono stati inoltre analizzati i livelli piezometrici dei pozzi monitorati dalla Regione Veneto, di cui soltanto due ricadono nell'area in studio:

- ❖ il pozzo 1004 (1799257.900 5075842.202 Metri), monitorato dal 2010 al 2014, che interessa la falda libera superficiale (6 m di profondità);
- ❖ il pozzo 308 (1797260.292 5070722.504 Metri), monitorato dal 1999 al 2014, che interessa la falda confinata profonda (530 m di profondità).

Infine, essendo il Portogruarese un'area molto studiata poiché fortemente sfruttata per il prelievo di acque dalle falde profonde, è stata fatta un'indagine bibliografica al fine di ipotizzare le possibili cause della subsidenza.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1. ANALISI DELLE DISTRIBUZIONI DI VELOCITÀ DEI PS

Con lo scopo di definire il limite tra zone con diversa velocità di subsidenza e di valutarne la corrispondenza con il limite dell'incisione sepolta, ci si è focalizzati sulle distribuzioni di velocità dei PS ERS e Envisat acquisiti con orbita ascendente. Infatti, nella distribuzione dei PS Envisat acquisiti con orbita discendente non sono emerse differenze molto significative di velocità dei PS tra fuori e dentro l'incisione sepolta (Figure 4.2, 4.3, 4.4, 4.5).

La simbologia usata per indicare le velocità medie dei singoli PS ERS e Envisat è mostrata in Figura 4.1.

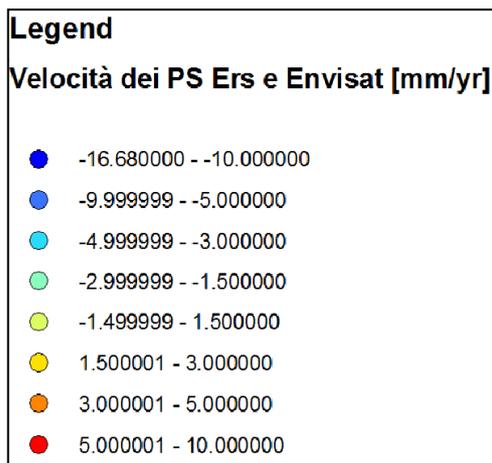


Figura 4.1 - Legenda dei simboli usati per indicare i valori di velocità media dei PS ERS e Envisat.

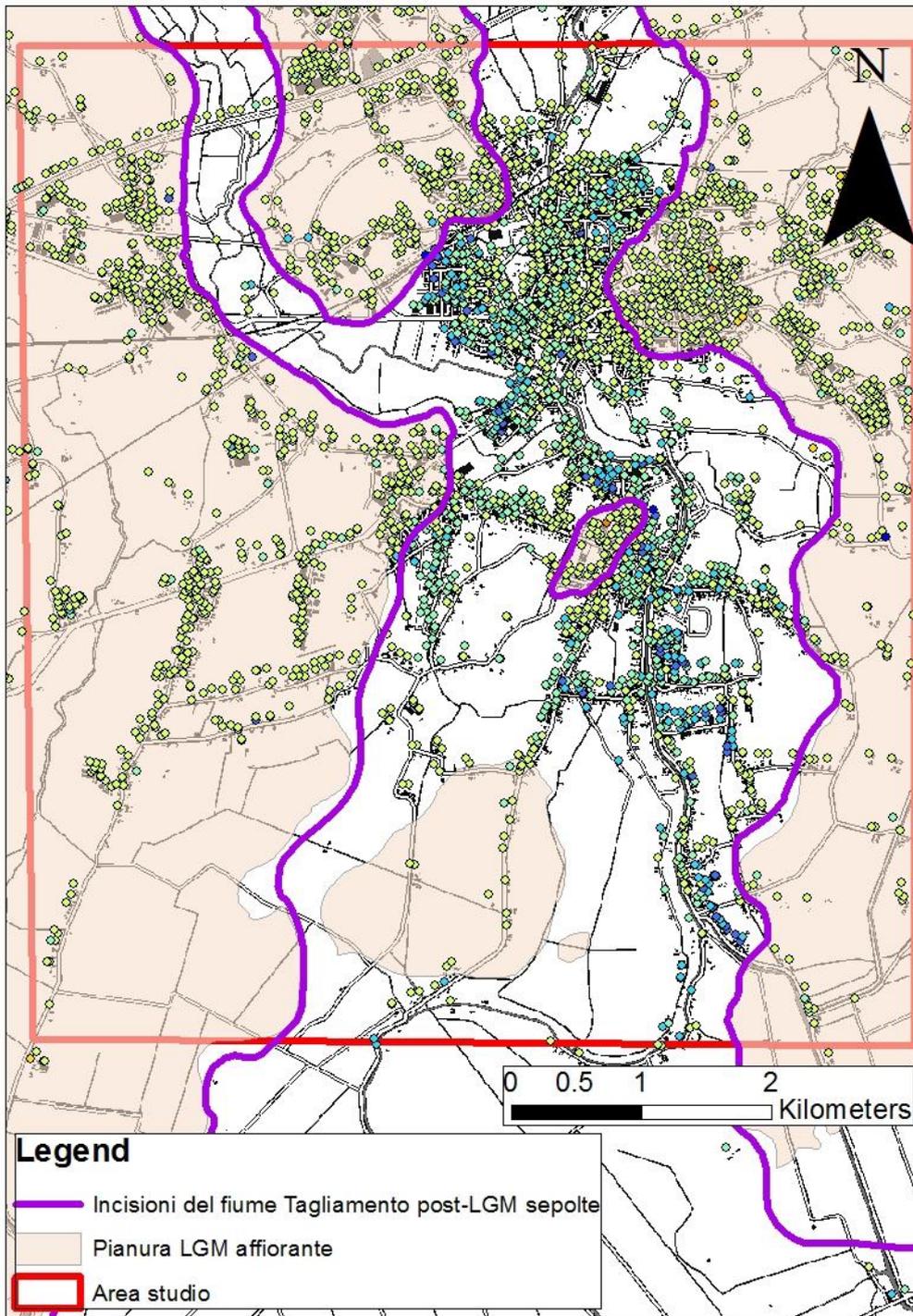


Figura 4.2 - Distribuzione di velocità dei PS ERS acquisiti con orbita ascendente (1995-2000).

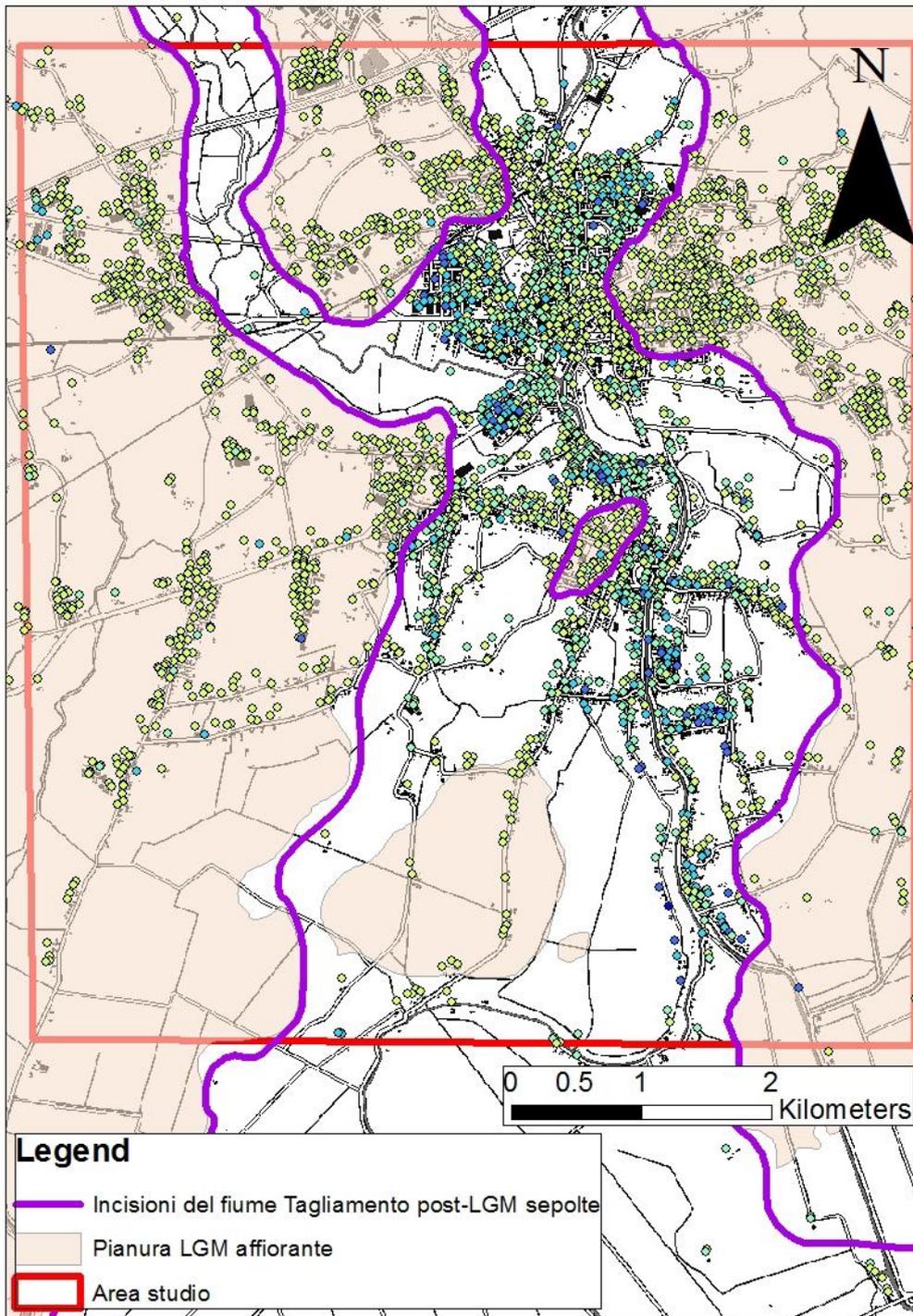


Figura 4.3 - Distribuzione di velocità dei PS ERS acquisiti con orbita discendente (1992-2000).

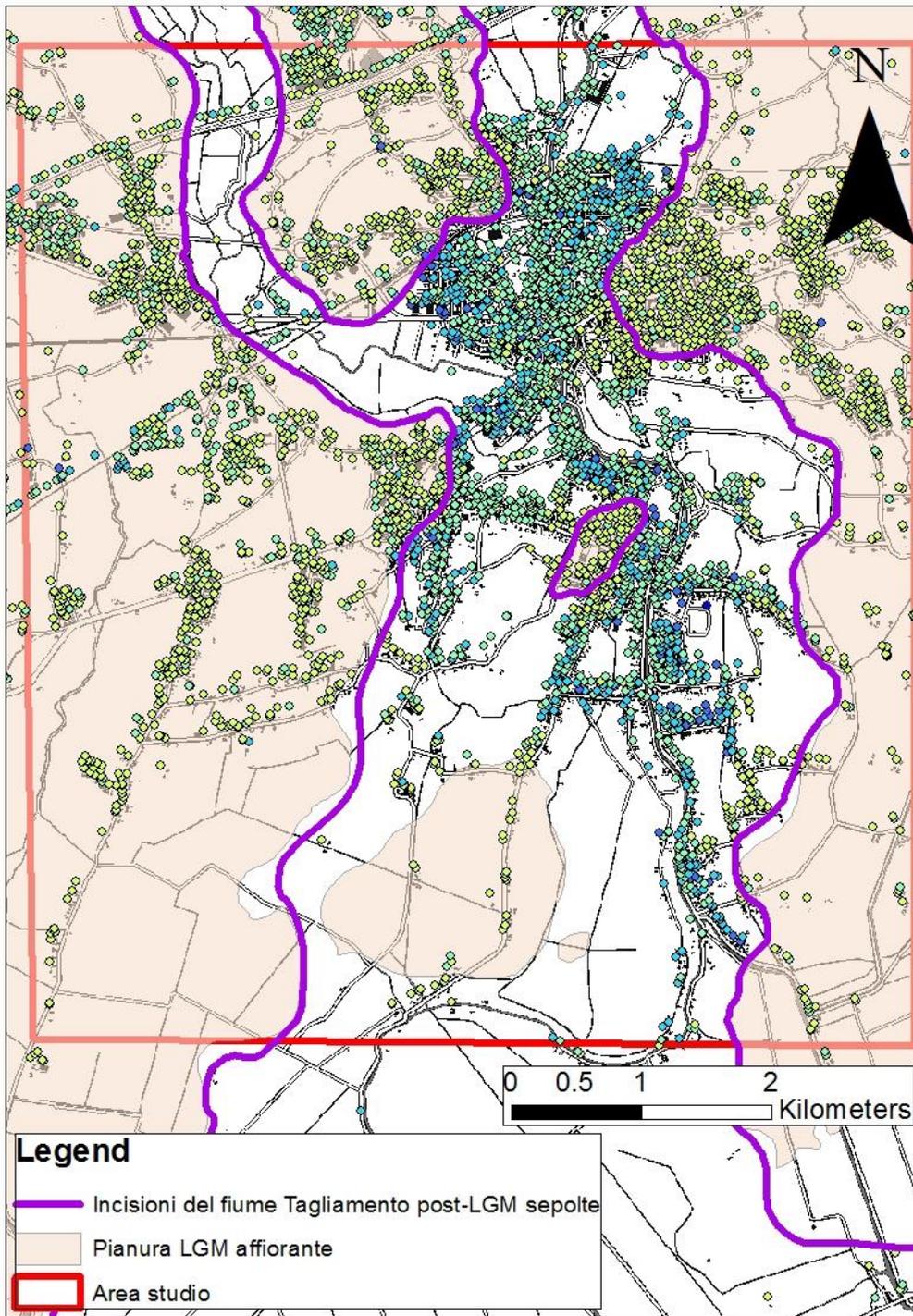


Figura 4.4 - Distribuzione di velocità dei PS Envisat acquisiti con orbita ascendente (2003-2010).

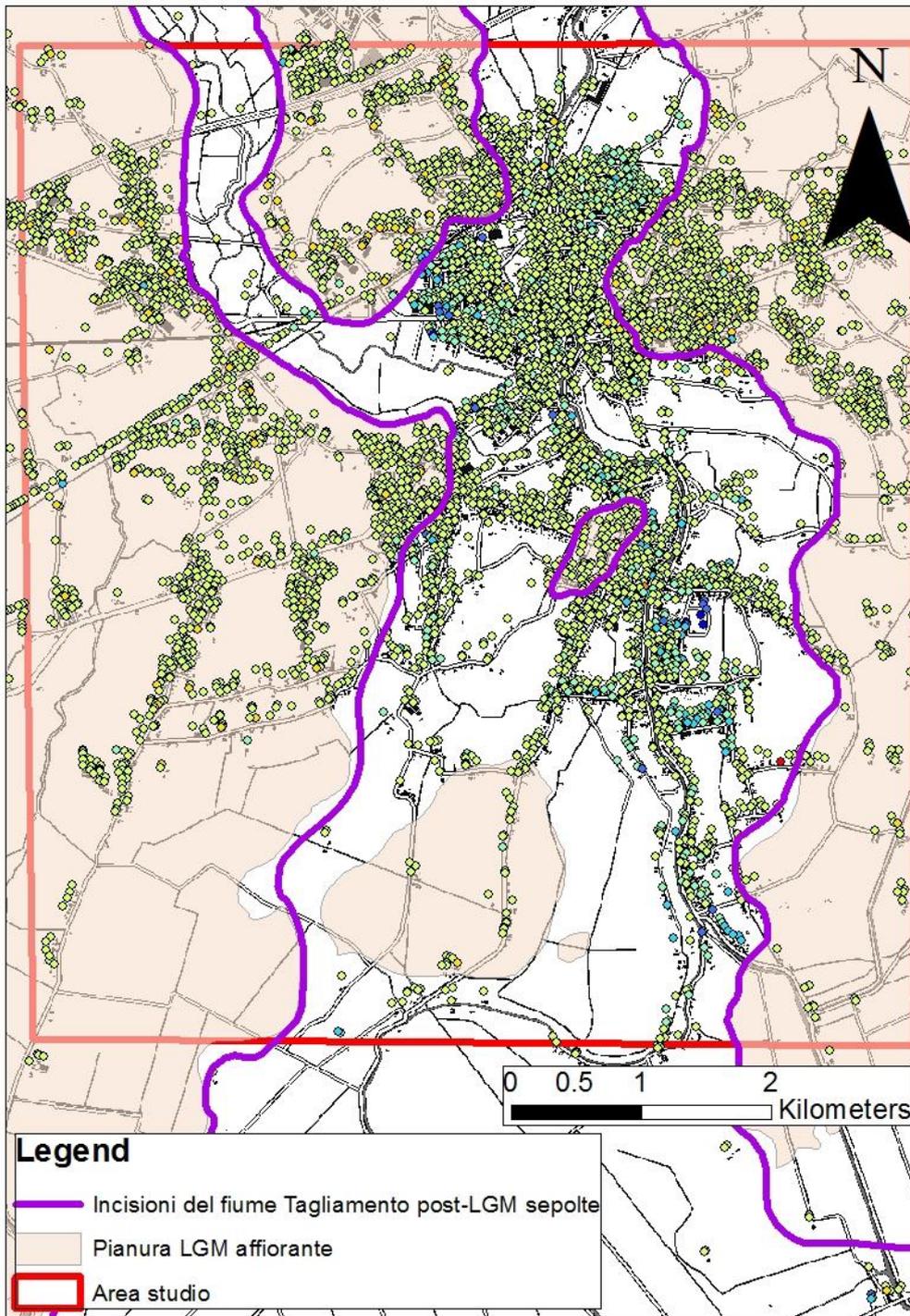


Figura 4.5 - Distribuzione di velocità dei PS Envisat acquisiti con orbita discendente (2003-2010).

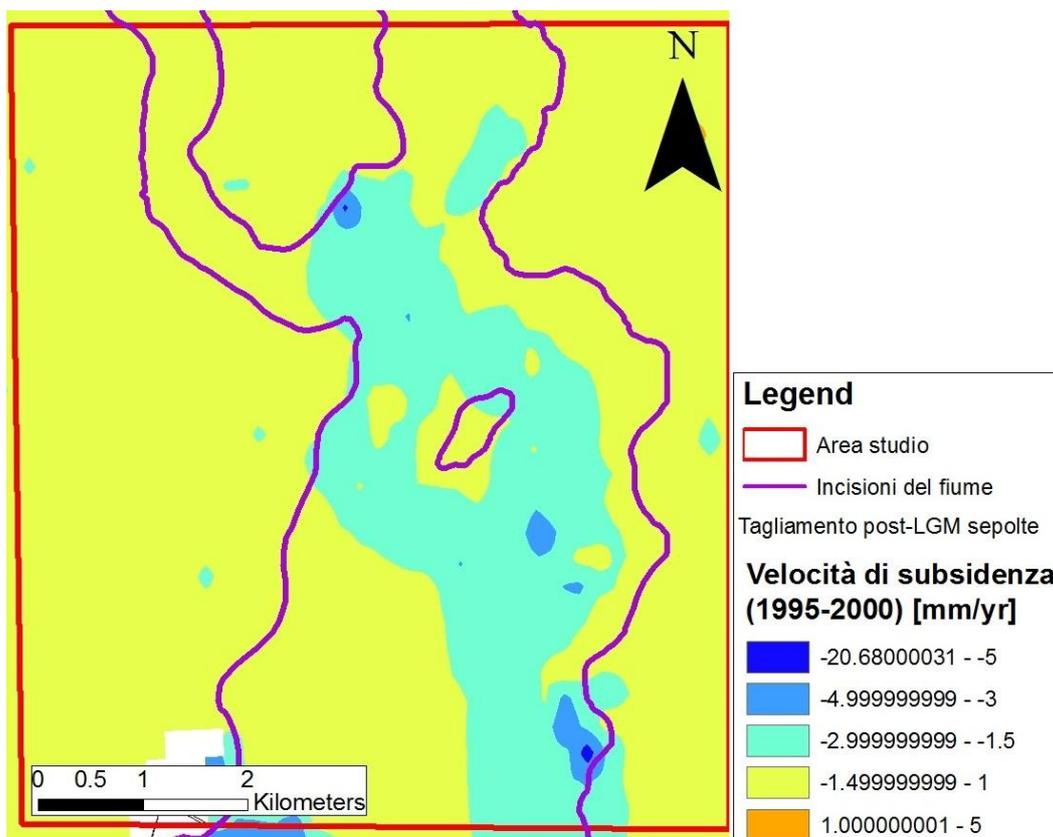


Figura 4.6 - Mappa di velocità di subsidenza ottenuta attraverso l'interpolazione dei PS ERS acquisiti con orbita ascendente

Considerando i PS ERS e Envisat acquisiti con orbita ascendente (Figure 4.2 e 4.4), già da una prima valutazione delle distribuzioni di velocità è possibile notare come i punti stabili (colore giallo) siano per lo più localizzati al di sopra della pianura LGM affiorante, mentre i punti subsidenti (colore azzurro/blu) sono concentrati all'interno del limite dell'incisione sepolta.

Attraverso lo strumento IDW disponibile sul software ArcMap è stata fatta un'interpolazione spaziale dei PS ERS e Envisat acquisiti con orbita ascendente al fine di ottenere le mappe di velocità di subsidenza (Figure 4.6 e 4.7).

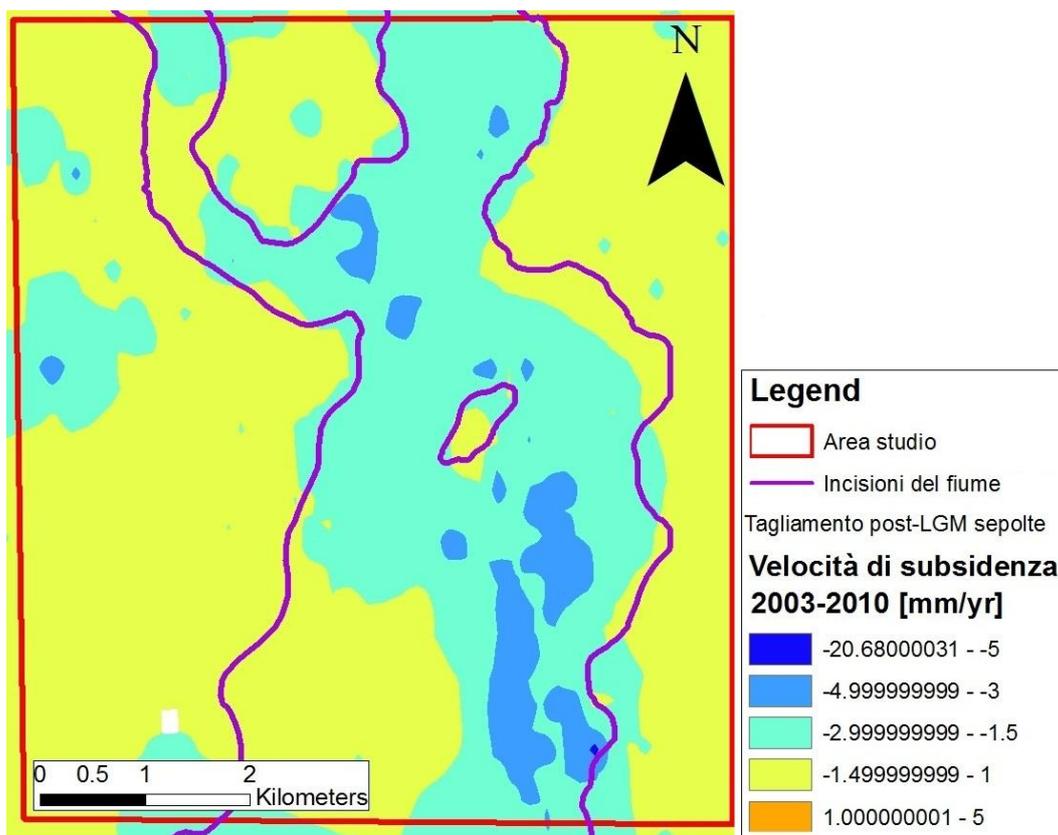


Figura 4.7 – Mappa di velocità di subsidenza ottenuta attraverso l'interpolazione dei PS Envisat acquisiti con orbita ascendente.

In entrambe le mappe di velocità di subsidenza (Figure 4.6 e 4.7) sono individuabili 3 unità interferometriche:

- unità di colore giallo (unità A), con spostamenti che avvengono con un tasso compreso tra +1 e -1.5 mm/anno;
- unità di colore azzurro chiaro (unità B), subsidente con velocità comprese tra -1.5 e -3 mm/anno;
- unità di colore azzurro scuro (unità C) con velocità di subsidenza maggiori di -3 mm/anno.

Considerando che l'intera area in studio ricade in quel settore della pianura veneto-friulana soggetta a subsidenza tettonica con un tasso medio di 0.5 mm/anno (Ferranti et al., 2006; Antonioli et al., 2009), l'unità A è stata

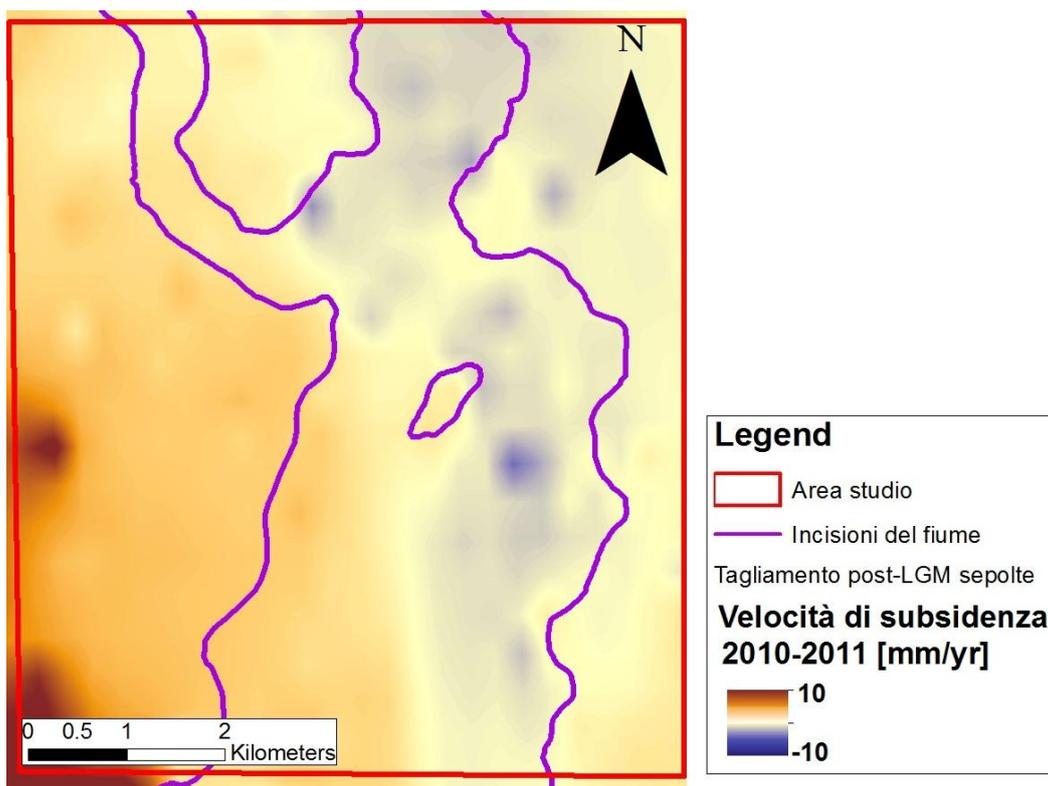


Figura 4.8 - Mappa di velocità di subsidenza ottenuta attraverso l'interpolazione dei PS COSMO Sky-Med acquisiti con orbita ascendente.

considerata stabile a scala della nostra area in studio, mentre l'unità B definisce l'area in subsidenza.

L'unità C, che ricade per lo più in aree localizzate, definisce invece le anomalie di velocità che verranno affrontate nella seconda parte della tesi per la definizione delle possibili cause della subsidenza.

In entrambe le mappe di subsidenza, soprattutto in quella ottenuta dai dati Envisat, è possibile osservare la corrispondenza tra il limite dell'incisione sepolta e il limite tra le unità interferometriche A e B.

Tale corrispondenza è stata ricercata anche nei dati COSMO Sky-Med e Sentinel-1, realizzando le mappe di velocità di subsidenza a partire dall'interpolazione dei PS (Figure 4.8, 4.9, 4.10).

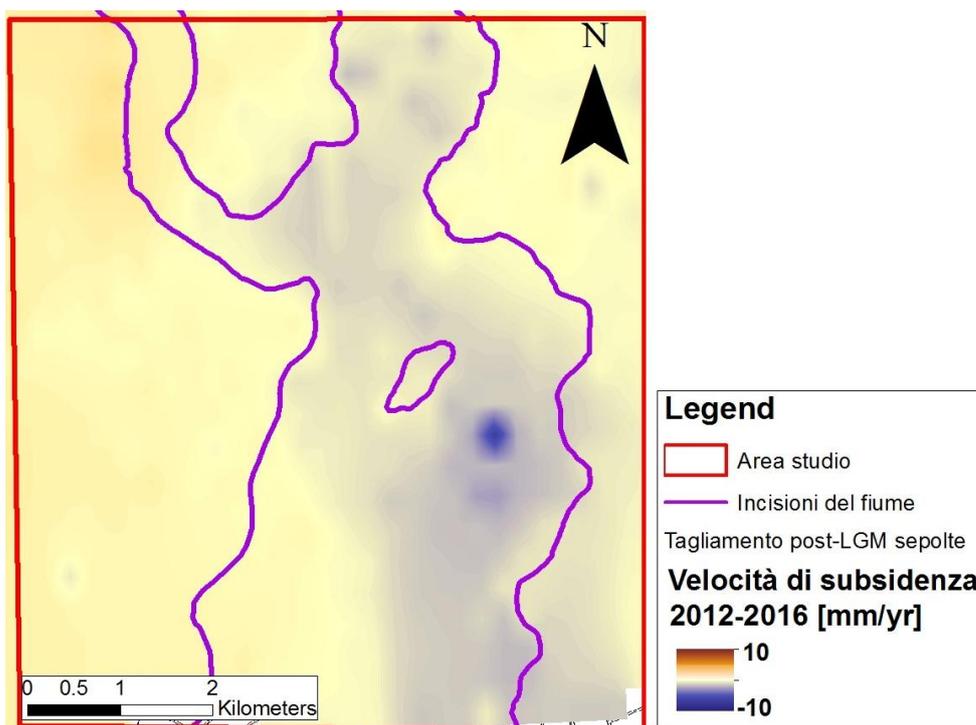


Figura 4.9 - Mappa di velocità di subsidenza ottenuta attraverso l'interpolazione dei PS COSMO Sky-Med acquisiti con orbita discendente.

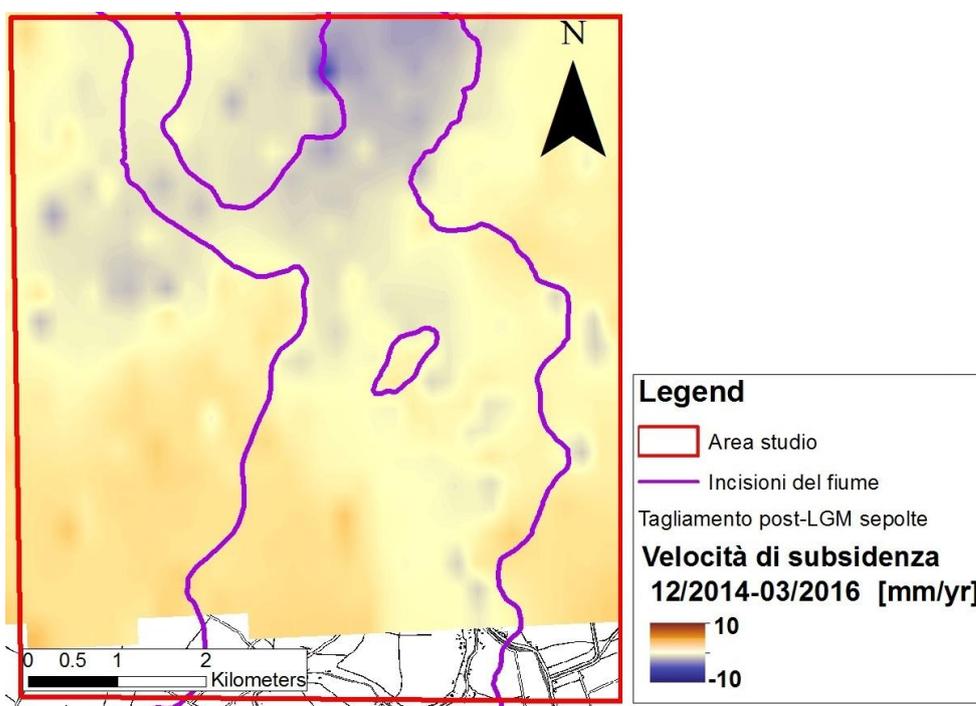


Figura 4.10 - Mappa di velocità di subsidenza ottenuta attraverso l'interpolazione dei PS Sentinel acquisiti con orbita discendente.

Dalle Figure 4.8 e 4.9 si può notare che, nelle mappe di velocità di subsidenza ottenute nei periodi di osservazione 2010-2011 e 2012-2016, i punti interni all'incisione sepolta abbiano velocità di subsidenza maggiore dei punti esterni ad essa. In particolare la mappa di velocità di subsidenza 2012-2016, coprendo un periodo di tempo maggiore della mappa 2010-2011, evidenzia meglio il limite tra il settore stabile e quello in subsidenza.

La corrispondenza tra il limite dell'incisione sepolta e il limite tra unità interferometriche con diverso tasso di subsidenza è comunque meno netta di quella individuata nelle mappe ERS e Envisat, probabilmente perché i dati COSMO Sky-Med, essendo stati acquisiti in banda X, risentono maggiormente del disturbo della vegetazione.

Infine, nella mappa di velocità di subsidenza 2014-2016 (Figura 4.10) non è stato possibile individuare del tutto il limite dell'incisione sepolta attraverso la distribuzione spaziale di velocità dei dati SAR. Ciò è probabilmente dovuto al breve intervallo di tempo coperto dai dati Sentinel-1, durante il quale emergono maggiormente gli effetti dovuti a cause legate alla realizzazione di nuove infrastrutture.

4.2. ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DEGLI SPOSTAMENTI

Per evidenziare il diverso comportamento deformativo dei PS interni ed esterni all'incisione, sono stati valutati gli spostamenti nel tempo di singoli PS localizzati sia all'interno che all'esterno dell'incisione e sono stati scelti in totale 4 punti campione (due interni e due esterni all'incisione, due nella città di Concordia Sagittaria e due a Portogruaro, Figura 4.11). Per ogni punto è stato considerato un PS ERS e uno Envisat (orbita ascendente) e sono stati realizzati i grafici delle serie temporali degli spostamenti.

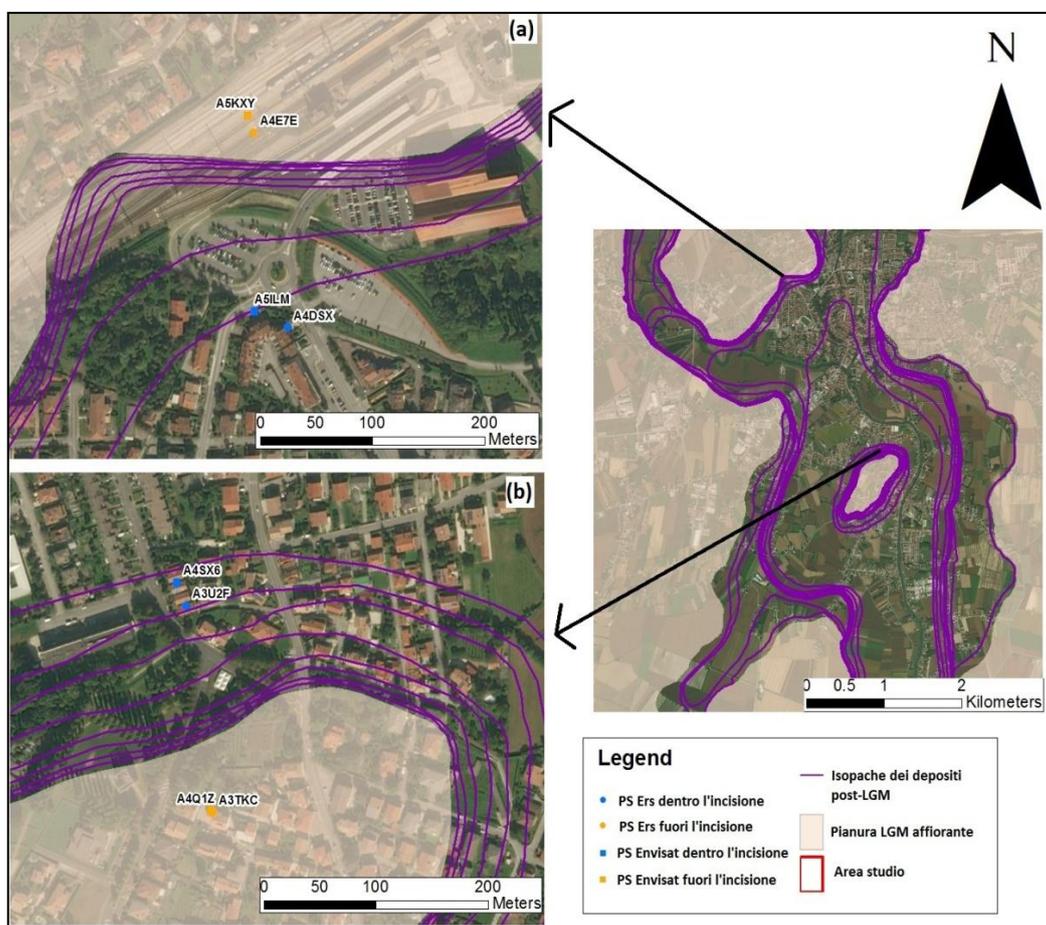


Figura 4.11 - Localizzazione dei punti di confronto delle serie temporali degli spostamenti dei PS: (a) PS ERS e Envisat, fuori e dentro l'incisione, a Portogruaro; (b) PS ERS e Envisat, fuori e dentro l'incisione, a Concordia Sagittaria.

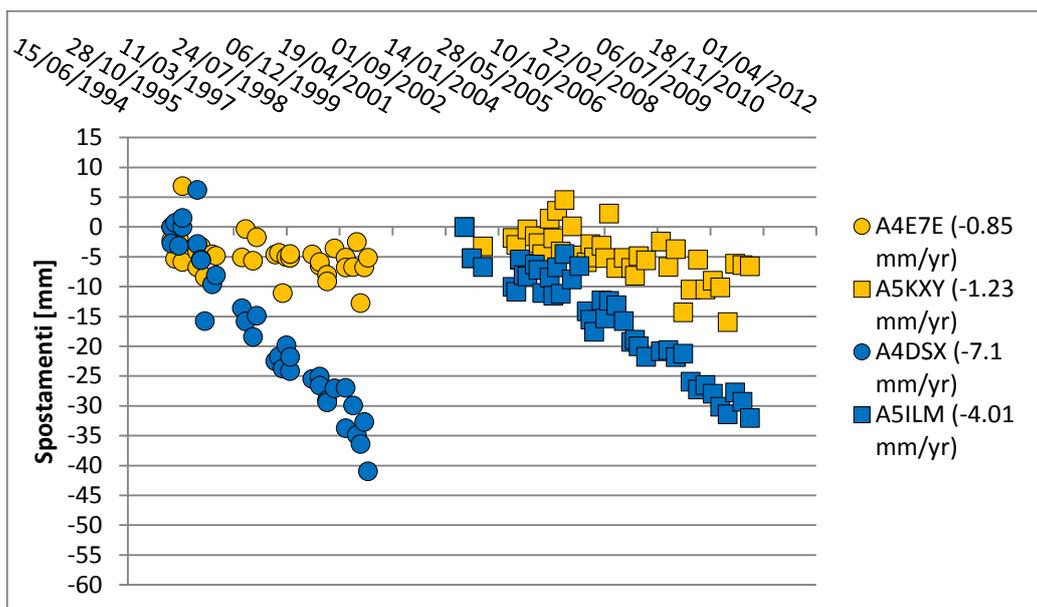


Figura 4.12 - Serie temporale degli spostamenti nei punti localizzati a Portogruaro, uno esterno (in giallo) e uno interno (in blu) all'incisione.

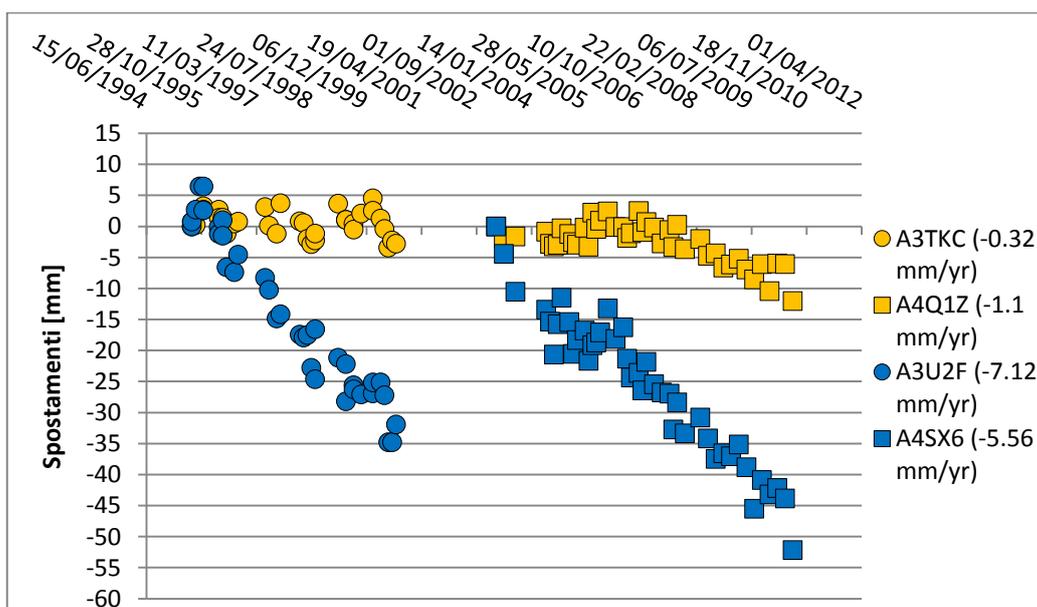


Figura 4.13 – Serie temporale degli spostamenti nei punti localizzati a Concordia Sagittaria, uno esterno (in giallo) e uno interno (in blu) all'incisione.

Lo spostamento dal 1995 al 2000 è definito dai PS ERS e quello dal 2003 al 2010 degli Envisat; i codici alfanumerici sono indicativi del singolo PS analizzato di cui, nella legenda dei grafici, è stata anche indicata la velocità media di subsidenza (Figure 4.12, 4.13).

Dal confronto degli spostamenti in atto fuori e dentro l'incisione, in entrambi i casi è possibile rilevare una netta differenza nello spostamento totale verificatosi dal 1995 al 2000 e dal 2003 al 2010 tra i punti fuori e dentro l'incisione, nonostante situati ad una distanza inferiore a 200 m:

- ✓ a Portogruaro nel punto esterno all'incisione si è verificato un abbassamento totale di -5.15 mm dal 1995 al 2000 e di -6.58 mm dal 2003 al 2010, nel punto interno all'incisione invece la subsidenza è stata di -40.96 mm dal 1995 al 2000 e di -32.02 mm dal 2003 al 2010;
- ✓ a Concordia Sagittaria nel punto esterno all'incisione si è verificato un abbassamento totale di -2.78 mm dal 1995 al 2000 e -12.02 mm dal 2003 al 2010, nel punto interno all'incisione invece la subsidenza è stata di -31.92 mm dal 1995 al 2000 e di -52.16 mm dal 2003 al 2010.

L'analisi delle serie temporali degli spostamenti di punti poco distanti tra loro ma posti fuori e dentro l'incisione, ha messo in evidenza il diverso comportamento dei terreni che costituiscono la pianura LGM affiorante e di quelli che hanno sepolto l'incisione post-LGM del Tagliamento.

4.3. NUOVI DATI STRATIGRAFICI

A partire dai sondaggi forniti dal database delle indagini sul sottosuolo dell'Area Metropolitana di Venezia (già Difesa Suolo della provincia di Venezia, resp. Valentina Bassan) e da quelli inediti raccolti dal relatore di questa tesi (Prof. Alessandro Fontana) è stata realizzata la sezione stratigrafica A-B (Figura 4.14) localizzata a Portogruaro, nel settore nord-est dell'area in studio. Tale sezione è stata confrontata con la sezione C-D (Figura 4.15) localizzata presso Concordia Sagittaria e che fa da riferimento stratigrafico per tutta l'area in studio (Fontana, 2006). La valutazione ed il confronto delle sezioni stratigrafiche A-B e C-D hanno permesso di definire la profondità dell'incisione sepolta post-LGM del Tagliamento, riconosciuta attraverso le ghiaie che ne caratterizzano la base.

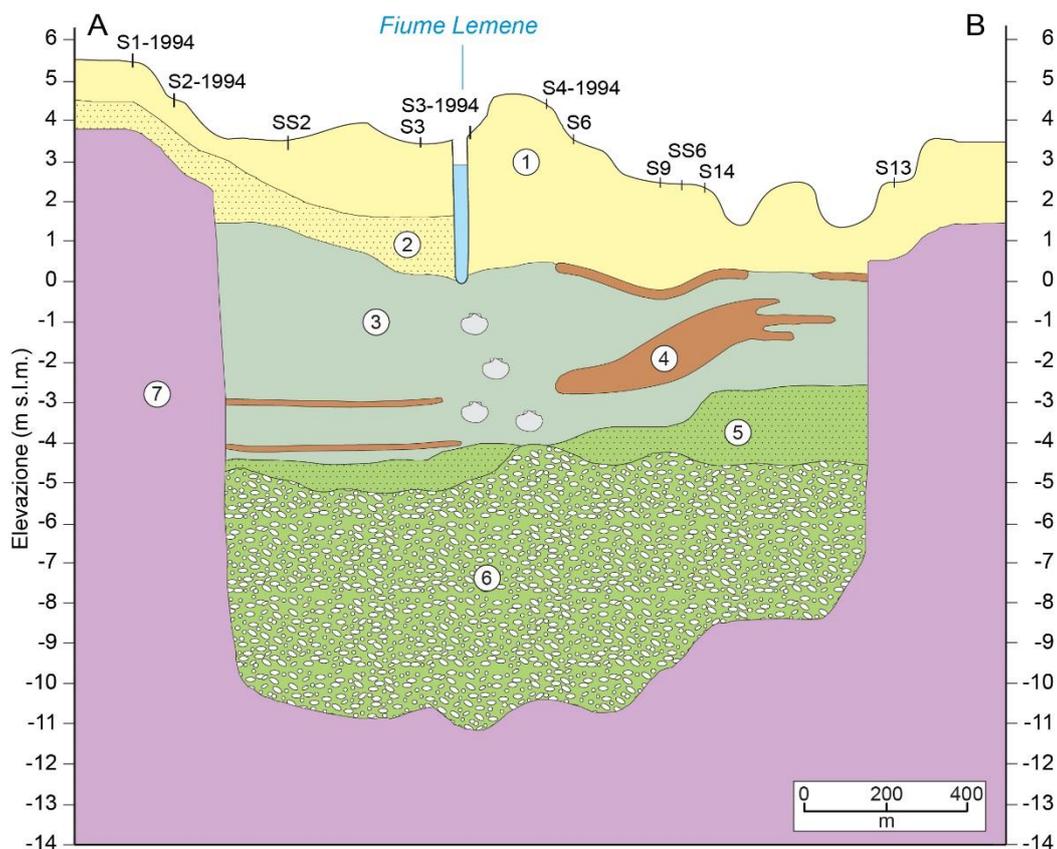


Figura 4.14 - Sezione stratigrafica A-B. Legenda: 1) Depositi fini del Tagliamento medievale; 2) Depositi sabbiosi del Tagliamento medievale; 3) Depositi lagunari e palustri del medio-tardo Olocene; 4) Torbe; 5) Depositi di sabbie e limi dell'Olocene iniziale; 6) Ghiaie del Tardoglaciale e dell'Olocene iniziale; 7) Limi e argille del LGM (per localizzazione della sezione vedi Figura 3.7).

I limi e limi argillosi, a spese dei quali si è formata l'incisione, corrispondono all'Unità di Lison e all'Unità di Torresella della carta delle unità geologiche della provincia di Venezia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008).

Dal confronto tra le due sezioni è stato confermato quanto noto dalla bibliografia ovvero che la base delle ghiaie si approfondisce procedendo da nord verso sud; infatti, nella sezione A-B (Figura 4.14) la base delle ghiaie si ha a 10-11 m, mentre nella sezione C-D (Figura 4.15), localizzata più a sud, le ghiaie raggiungono i 16-17 m di profondità.

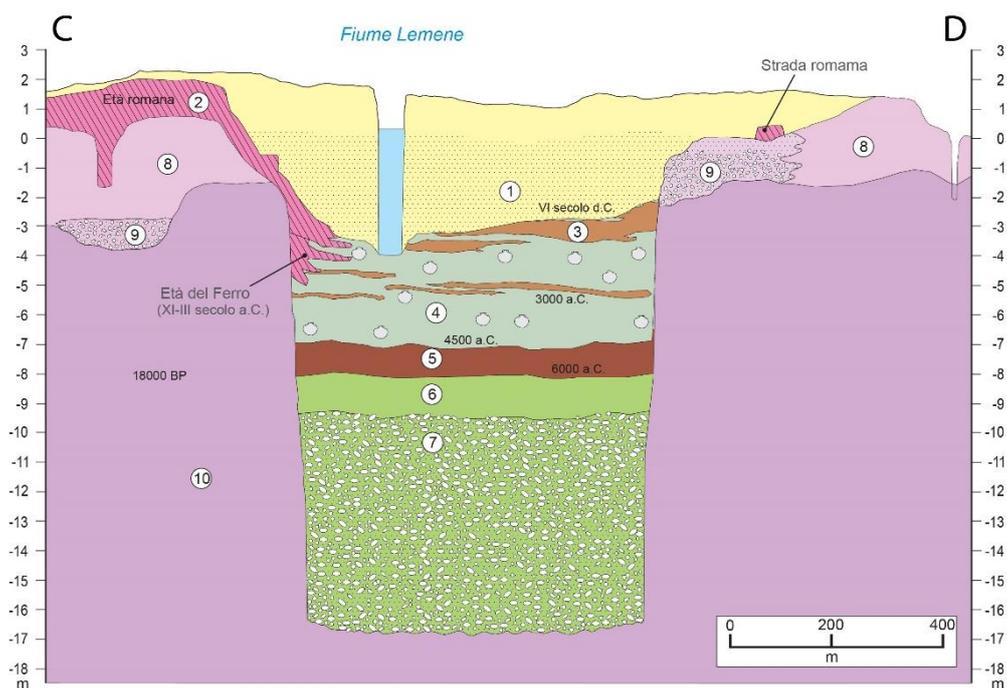


Figura 4.15 - Sezione stratigrafica dell'antica valle fluviale presente a est di Concordia (Fontana, 2006). Legenda: 1) Depositi sabbiosi del Tagliamento medievale; 2) Depositi archeologici; 3) Strati torbosi; 4) Depositi lagunari del medio-tardo Olocene; 5) Torbe; 6) Depositi di sabbie e limi dell'Olocene iniziale; 7) Ghiaie del Tardoglaciale e dell'Olocene iniziale; 8) Depositi di limi della fine del LGM; 9) Depositi di sabbie ghiaiose della fine del LGM; 10) Limi argillosi del LGM (per localizzazione della sezione vedi Figura 3.7).

Le ghiaie che costituiscono la base dell'incisione per uno spessore di circa 6-7 m, hanno un diametro medio di 2-5 cm e sono seguite da sabbie e limi legati alla sedimentazione fluviale del Tagliamento post-LGM. Quest'unità corrisponde all'Unità di Cinto Caomaggiore nella carta delle unità geologiche della provincia di Venezia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008). Per uno spessore di circa 5-6 m in entrambe le sezioni sono presenti depositi di limi argillosi, torbe, e limi corrispondenti all'Unità di Caorle (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008). Sopra questi depositi, nella sezione C-D, è stata datata la discontinuità del VI secolo d.C. indicativa della base dell'Unità di Concordia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008). I depositi sabbioso-limosi, presenti nei primi metri di profondità in entrambe le sezioni al di sopra dell'unità lagunare-palustre, sono associati, infatti, a tale unità. Il modello geologico, noto dalla bibliografia e verificato nell'area in studio attraverso la realizzazione della sezione stratigrafica A-B, ha trovato riscontro nella descrizione dei terreni prelevati nel carotaggio PRT1 (Figure 4.16, 4.17).

4.3.1. Carotaggio PRT1

Tra i rilievi di campagna è stato realizzato un carotaggio manuale in corrispondenza della sede di Portogruaro del Consorzio di Bonifica Veneto Orientale, dove è presente una stazione GPS della Rete della Regione Veneto.



Figura 4.16 – Aspetto delle carote prelevate nel carotaggio PRT1 (per localizzazione del punto PRT1 vedi Figura 3.7).

Su tali dati GPS, in acquisizione dal 2007, è prevista in futuro un'elaborazione in modo tale da fare un confronto tra gli spostamenti rilevati con l'interferometria e quelli rilevati dalla stazione GPS.

Il punto in cui è stato fatto il carotaggio si trova all'interno del terreno confinante con il lato meridionale del Consorzio, all'interno dell'Officina dei Fratelli Stromento (Via Ragazzi del '99, 1798024.066 5075481.368 Metri, quota +1.6 m slm).

Descrizione del carotaggio:

- 0 – 0.40 m: Orizzonte arativo costituito da limi argillosi rielaborati, colore 2.5Y 5/4, HCl 4.
- 0.40 – 0.9 m: sedimenti con evidenza di riporto artificiale costituiti da limi argillosi rielaborati (18%) di colore marrone chiaro (2.5Y 5/4), con screziature comuni di 1 mm di colore marrone rossastro (10YR 6/8). Presenza di ghiaie, frammenti di mattoni e talvolta lenti sabbiose corrispondenti al materiale di riporto, HCl 4. Terreno consolidato.
- 0.90 – 1.85 m: Alternanze decimetriche di limi, limi argillosi (max 25 % argilla) e limi sabbiosi, con lamine talvolta ben evidenti di sabbie molto fini o limi grossolani; la percentuale sabbiosa aumenta verso il fondo. Colore giallo marrone (2.5Y 6/4), HCl 4. Presenza di concrezioni carbonatiche dure e tenere di 1-2 mm in livelli decimetrici. Presenza di screziature comuni e abbondanti di colore marrone rossastro (10YR 6/8). Terreno consolidato.
- 1.85 – 2.95 m: Alternanze di sabbie molto fini e fini (90-140 µm) limose (max 30%) e limi debolmente argillosi (70% limo, 15-20% argilla). Strati sabbiosi a 1.85-1.90 m, 2.12-2.27 m, 2.38-2.74 m e 2.93-2.95 m. Da 1.85 a 2.37 m presenza di screziature di 2 mm, da rare a poco comuni; tra 2.40 e 2.60 m le sabbie presentano frustoli vegetali di 1 mm o meno (possibili resti fluitati dalle sabbie oppure accumulo di radici sub attuali). Colore grigio gley, HCl 4. Terreno addensato-consolidato.
- 2.95 – 3.60 m: Alternanze pluricentriche di limi argillosi debolmente sabbiosi, limi grossolani sabbiosi (40%) e limi argillosi, talvolta si riconoscono anche porzioni con stratificazione/laminazione subcentimetrica; colore grigio gley, HCl 4. Limite inferiore transizionale. Terreno mediamente consolidato.
- 3.60 – 4.25 m: Limi argillosi, colore grigio gley 6/10Y, HCl 4. Presenza comune di frustoli vegetali millimetrici. Terreno da mediamente a debolmente consolidato.

- 4.25 – 4.51 m: Limi argillosi (20%) con sostanza organica dispersa nella matrice, colore marrone grigiastro (2.5Y 3/2), HCl 2-3. Presenza da comune ad abbondante di macroresti vegetali che spesso evidenziano una laminazione e che aumentano in percentuale verso il fondo. Terreno mediamente consolidato. Limite inferiore graduale. A 4.45 m presenza di gasteropodi planorbidi di ambiente d'acqua dolce con diametro di 3–6 mm.
- 4.51 – 5.32 m: Limi organici passanti a torbe da 4.90 m con abbondanti macroresti vegetali e spesso fittamente stratificate; HCl 0. A 5.10-5.11 m orizzonte di limo grigio sterile intervallato alle torbe, HCl 0, con presenza di abbondanti resti vegetali (possibile evento di sommersione lagunare). Terreno mediamente consolidato. Limite inferiore netto.
- 5.32 – 6.20 m: Limi argillosi e argille limose dall'aspetto omogeneo, probabilmente dovuto a bioturbazione lagunare. Colore grigio gley scuro con presenza comune di frammenti di bioclasti lagunari (*Cerastoderma glaucum*, *Hydrobia* sp., *Abra* sp. e gasteropodi millimetrici con morfologia simile a naticidi); HCl 4. Terreno debolmente consolidato.
- 6.20 – 6.71 m: Torbe limose con presenza di macroresti vegetali. Durante il carotaggio campionato orizzonte identico a strato superiore (6.40-6.50 m), probabile disturbo di manovra, da eliminare. Terreno poco consolidato. HCl 0
- 6.71 – 6.84 m: Limi organici con presenza di macroresti vegetali anche centimetrici e frammenti di molluschi, probabilmente palustri.

Carotaggio PRT1, Portogruaro, Via Ragazzi del '99
 45°46'1.62"N - 12°50'2.10"E, quota terreno +1.6 m slm

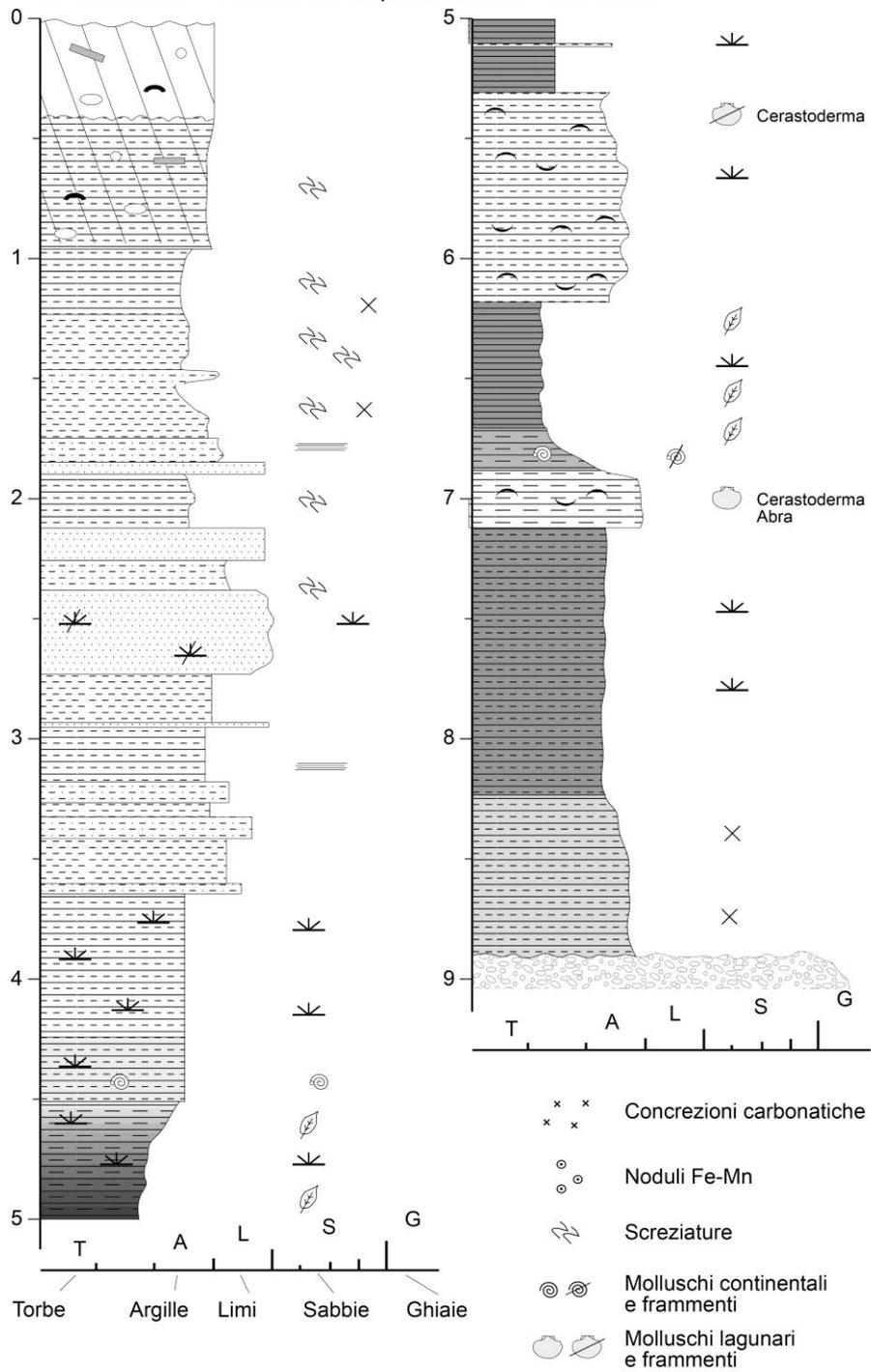


Figura 4.17 - Log stratigrafico del carotaggio PRT1.

Limite inferiore graduale (passaggio da lagunare a palustre). HCl graduale da 0 a 4 verso il fondo. Terreno poco consolidato.

- 6.84 – 7.12 m: Limi grigio verdastri lagunari, HCl 4, con presenza di resti di *Cerastoderma* a 7.05 m, *Abra* a 7.10 m. Terreno consolidato.
- 7.12 – 8.24 m: Limi torbosi, HCl 0, con macroresti legnosi centimetrici.
- 8.24 – 8.35 m: Argille limose organiche, colore marrone nerasto, HCl 1-2.
- 8.35 – 8.70 m: Limi argillosi debolmente organici, HCl 1-2, grigio-marrone. Presenza di rare concrezioni carbonatiche di 1–2 mm. Terreno debolmente consolidato.
- 8.70 – 8.85 m: campione disturbato dalla manovra di carotaggio. Probabile tetto delle ghiaie post-glaciali.

Il carotaggio PRT1 ha confermato:

- ✓ la presenza di limi, limi sabbiosi e sabbie da 0.90 a 3.60 m di profondità, che possono essere associati all'Unità di Concordia (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008);
- ✓ la presenza di argille, limi organici e torbe, poco o mediamente consolidati, da 3.60 a 8.70 m, corrispondenti all'Unità di Caorle (Figura 1.7a, Bondesan et al., 2008).

Infine è possibile che la resistenza alla penetrazione riscontrata a 8.85 m di profondità, che ha comportato la fine del carotaggio manuale, possa essere associata alla testa delle ghiaie che costituiscono il deposito di canale sedimentato tra il tardoglaciale e l'Olocene iniziale (Unità di Cinto Caomaggiore in Bondesan et al., 2008; Figura 1.7a).

4.4. CONFRONTO TRA IL MODELLO GEOLOGICO E INTERFEROMETRICO

Per valutare nel dettaglio la corrispondenza tra il limite dell'incisione sepolta ed il limite tra l'unità interferometrica stabile A e quella in subsidenza B, sono state selezionate due sezioni, A-B e C-D (per localizzazione vedi Figura 3.7) ed è stato fatto un confronto tra il modello geologico e quello interferometrico. Il modello geologico è rappresentato dalle sezioni stratigrafiche A-B e C-D (rispettivamente Figura 4.14 e 4.15), mentre quello interferometrico è stato ottenuto attraverso la realizzazione di sezioni di velocità di subsidenza (Figure 4.18, 4.19, 4.20, 4.21). Il confronto è stato fatto sia con le sezioni di velocità ottenute a partire dalla mappa di velocità di subsidenza del 1995-2000 sia con quelle ottenute dalla mappa di velocità subsidenza del 2003-2010.

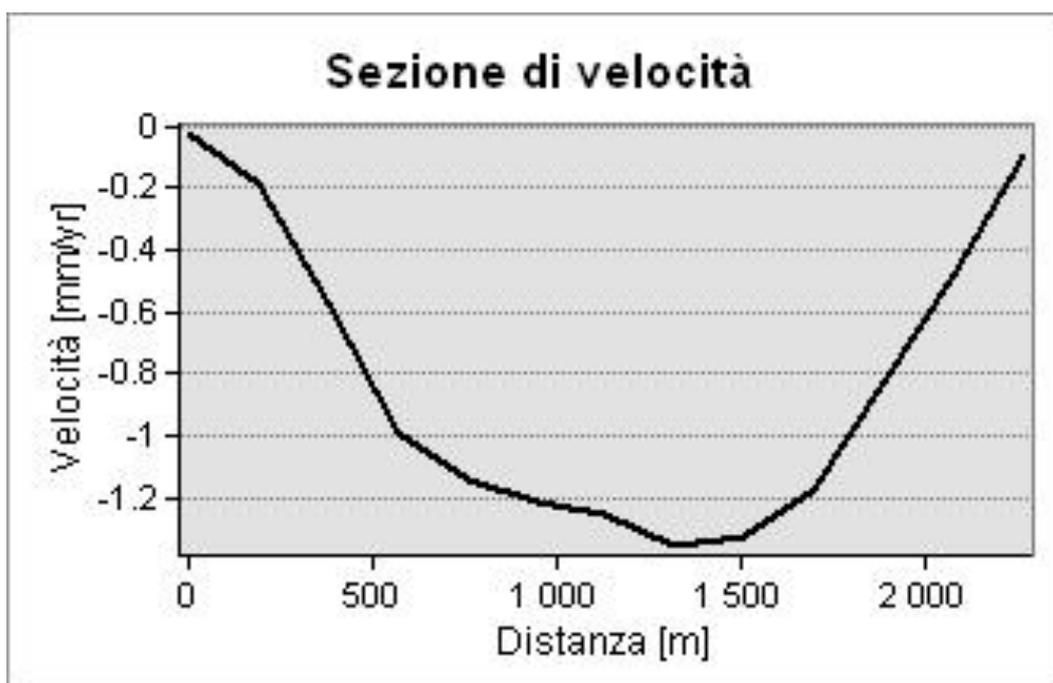


Figura 4.18 - Sezione di velocità A-B fatta sulla base della mappa di velocità di subsidenza 1995-2000 (per localizzazione della sezione vedi Figura 3.7).

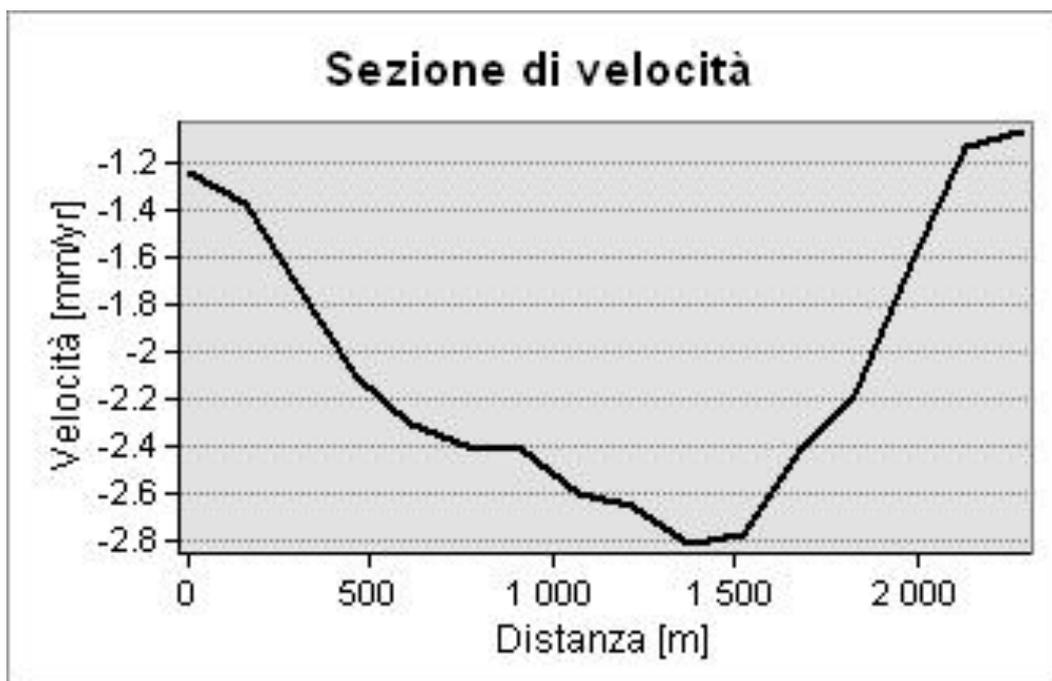


Figura 4.19 - Sezione di velocità A-B fatta sulla base della mappa di velocità di subsidenza 2003-2010 (per localizzazione della sezione vedi Figura 3.7).

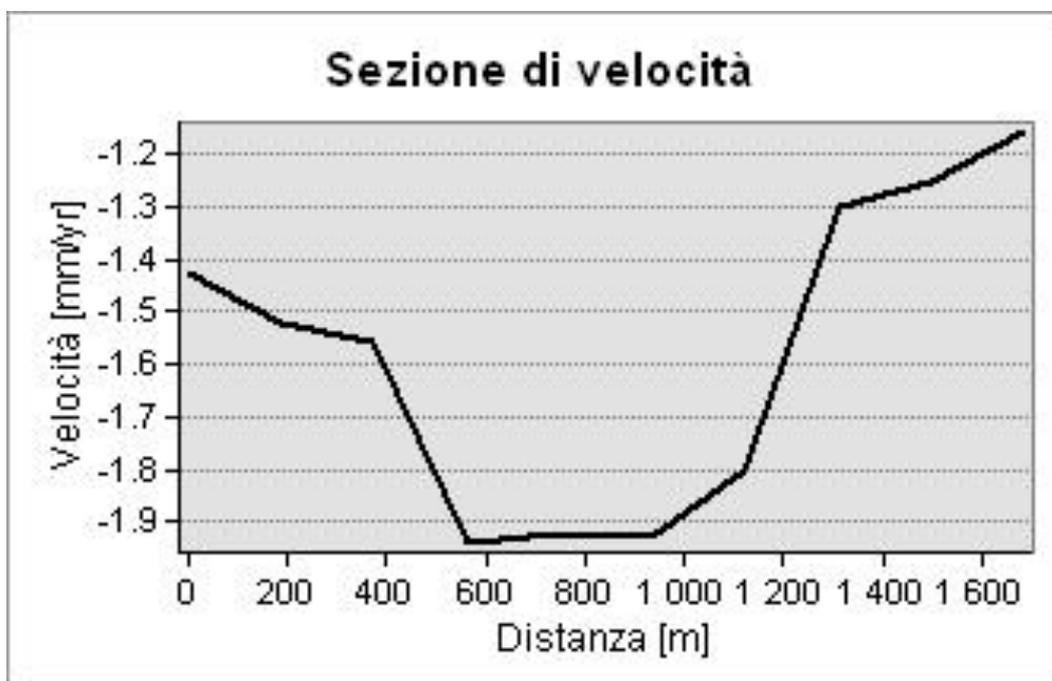


Figura 4.20 - Sezione di velocità C-D fatta sulla base della mappa di velocità di subsidenza 1995-2000 (per localizzazione della sezione vedi Figura 3.7).

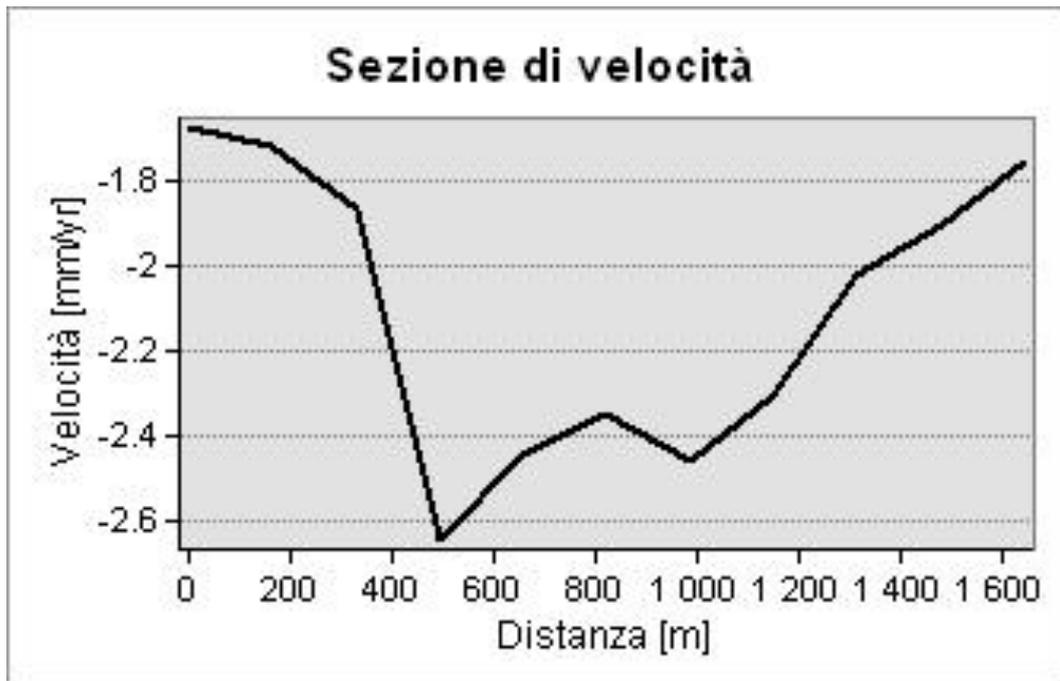


Figura 4.21 - Sezione di velocità C-D fatta sulla base della mappa di velocità di subsidenza 2003-2010 (per localizzazione della sezione vedi Figura 3.7).

Sia nella sezione A-B che nella C-D è possibile notare come esista una corrispondenza tra l'incisione sepolta e l'andamento delle velocità di subsidenza: maggiore è la profondità dell'incisione e maggiore è la velocità subsidenza, come se la sezione di velocità riproducesse la forma dell'incisione sepolta.

Successivamente lungo la sezione E-F (per localizzazione vedi figura 3.7) è stato valutato punto per punto il valore di velocità di ogni singolo PS Envisat e il valore dello spessore dei depositi post-LGM, definito nella Carta delle Isopache dei depositi post-LGM (Fontana, 2012).

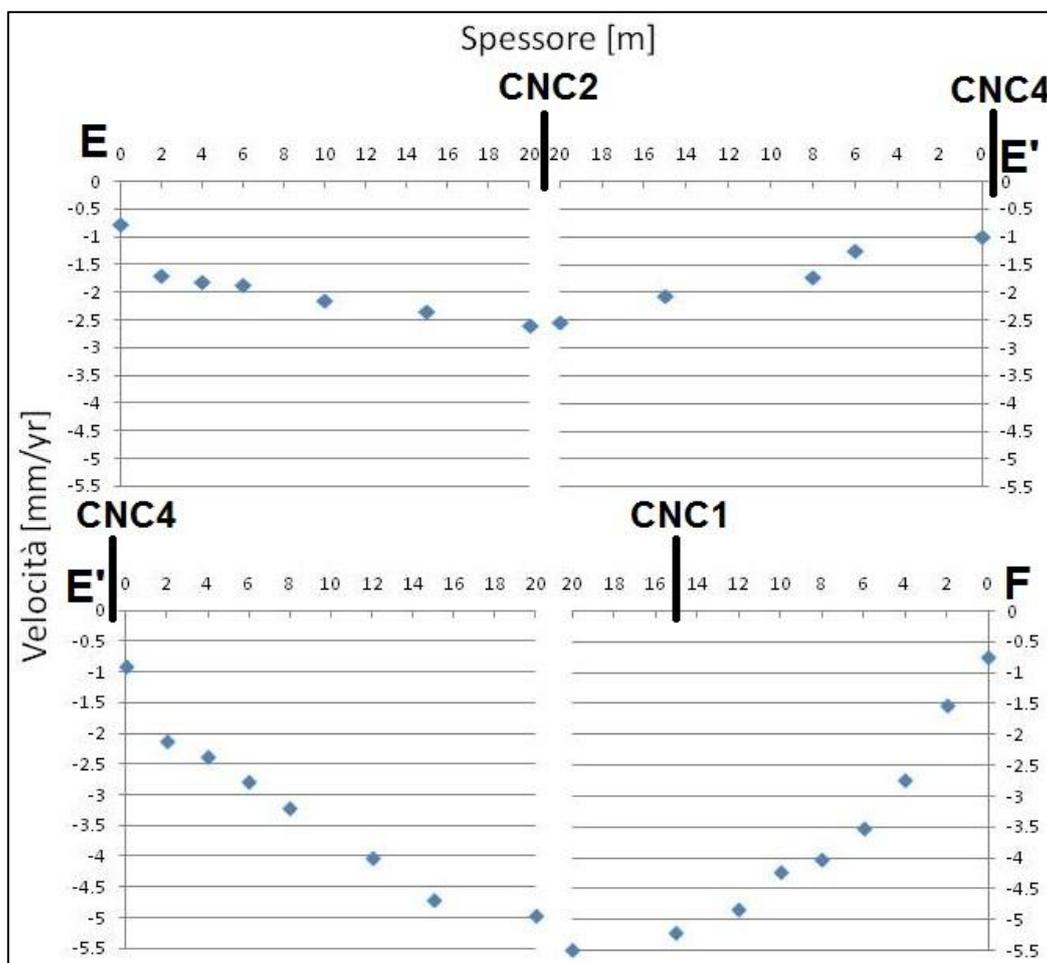


Figura 4.22 - Confronto dello spessore dei depositi post-LGM e della velocità dei PS Envisat nella sezione E-F, e localizzazione dei sondaggi stratigrafici (CNC1, CNC2, CNC4) disponibili in tale sezione (per localizzazione della sezione vedi Figura 3.7).

Dalla Figura 4.22 è possibile osservare che valori maggiori di velocità di subsidenza si hanno per uno spessore maggiore dei depositi post-LGM.

Quello che ci si aspetta è che a rendere subsidenti i depositi interni all'incisione siano le argille, limi organici e le torbe di ambiente lagunare-palustre, riscontrati mediamente-debolmente consolidati nel sondaggio PRT1 e nelle altre descrizioni disponibili per la zona. La presenza di questo tipo di depositi nella sezione E-F è stata confermata dai sondaggi CNC1, CNC2 e CNC4, realizzati da A. Fontana (Fontana, 2006; per descrizione stratigrafica dei sondaggi vedi APPENDICE A).

4.5. IPOTESI SULLE CAUSE DELLA SUBSIDENZA

4.5.1. Analisi delle anomalie di velocità

Dalla realizzazione delle mappe di velocità di subsidenza (attraverso l'interpolazione dei PS ERS, Envisat, COSMO Sky-Med e Sentinel-1) sono stati individuati dei punti anomali (Figure 4.23, 4.24, 4.25), ovvero con un valore di velocità di subsidenza maggiore rispetto al resto dell'area in studio, subsidente con un tasso compreso tra -1.5 e -3 mm/anno.

Per realizzare queste mappe di velocità è stata rifatta l'interpolazione dei PS riducendo di un ordine di grandezza la dimensione delle celle del raster di output, rispetto alle mappe di velocità di subsidenza riportate nel Paragrafo 4.1. In questo modo si è potuto ottenere un maggiore dettaglio nell'identificazione delle aree anomale.

Per ogni mappa di velocità di subsidenza sono state analizzate 6 aree anomale: le 6 anomalie riscontrate nella mappa di velocità di subsidenza Ers (1995-2000) sono state individuate anche in Envisat (2003-2010) con un tasso di subsidenza inferiore; nella maggior parte dei casi lo stesso comportamento è stato visto anche nelle anomalie delle mappe di velocità di subsidenza COSMO Sky-Med ascending e descending, ovvero ottenute dai PS acquisiti, rispettivamente, con orbita ascendente (2010-2011) e discendente (2012-2016); nella mappa di velocità di subsidenza Sentinel (12/2014-03/2016) sono state riscontrate le stesse anomalie, e in alcuni casi anche tassi di subsidenza simili, della mappa COSMO Sky-Med descending, poiché i periodi indagati dalle due missioni in parte coincidono.

La differenza sostanziale tra i dati COSMO e Sentinel riguarda la risoluzione spaziale, e quindi la distanza minima alla quale 2 oggetti vengono visti distintamente (3 m in COSMO e 25 metri in Sentinel), in relazione alla diversa banda RADAR usata (in COSMO viene usata la banda X con lunghezza d'onda di

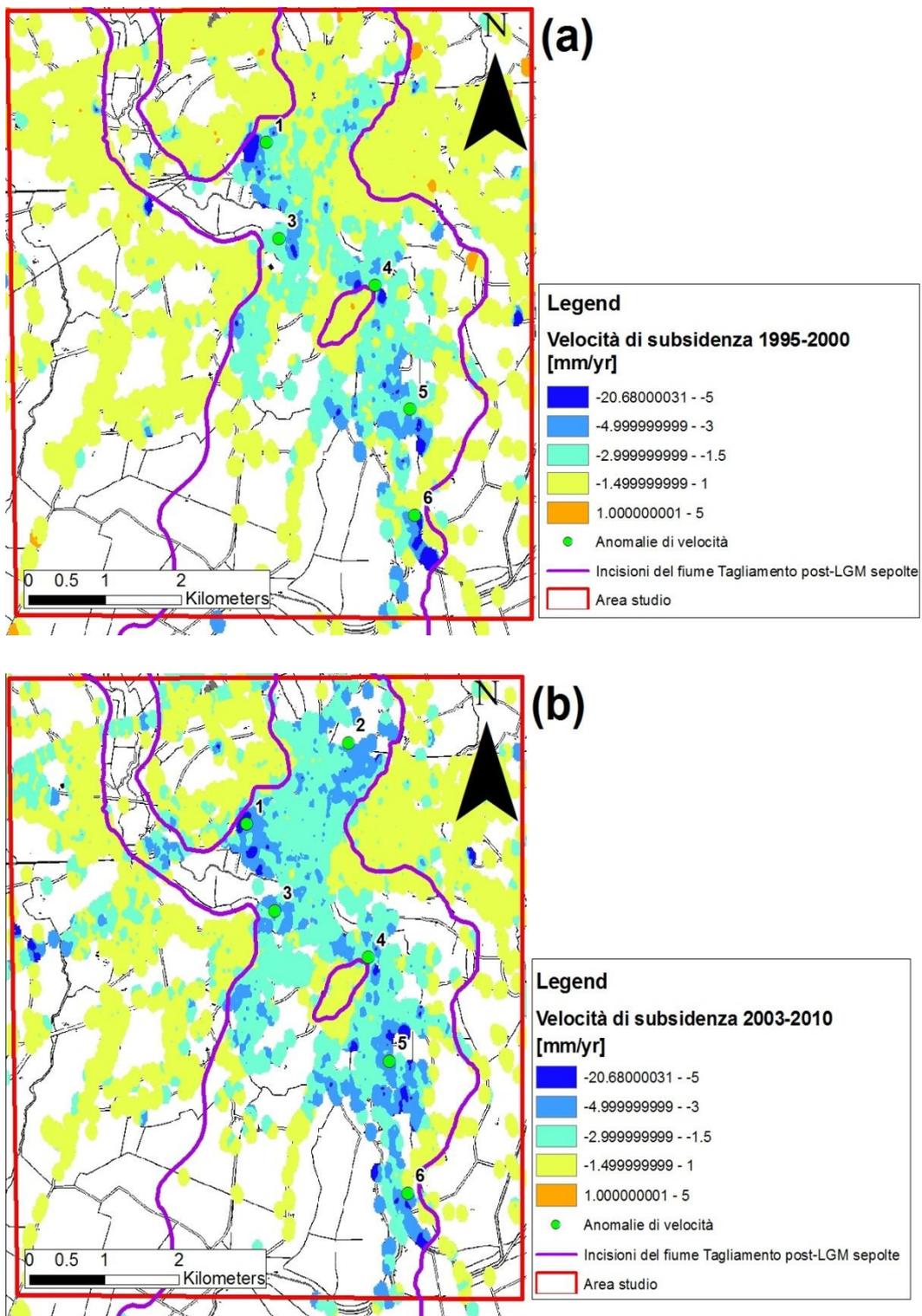


Figura 4.23 – (a) Mappa di velocità di subsidenza (ERS) dal 1995 al 2000 con localizzazione dei punti anomali; (b) Mappa di velocità di subsidenza (Envisat) dal 2003 al 2010 con localizzazione dei punti anomali.

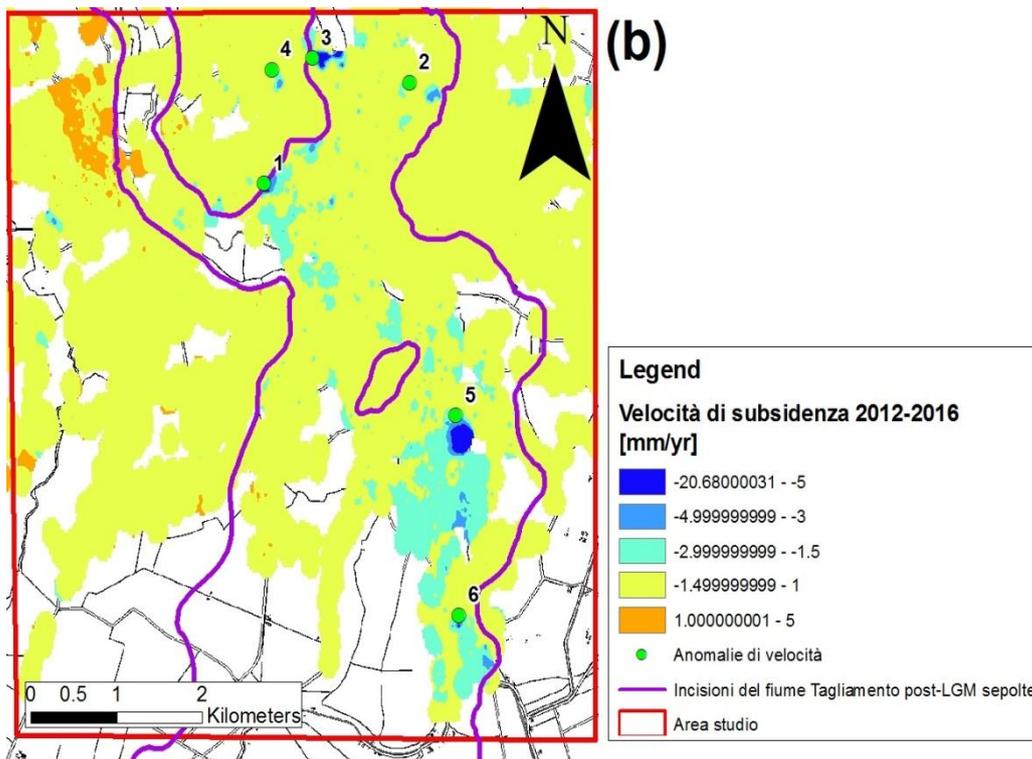
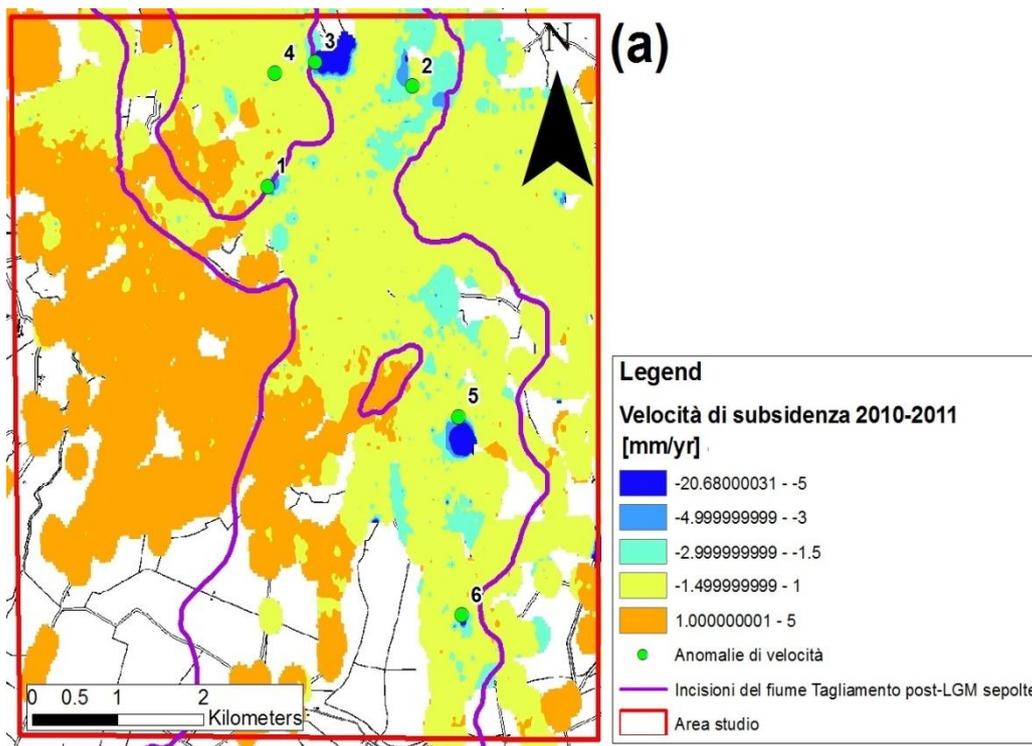


Figura 4.24 - (a) Mappa di velocità di subsidenza (COSMO Sky-Med ascending) dal 2010 al 2011 con localizzazione dei punti anomali; (b) Mappa di velocità di subsidenza (COSMO Sky-Med descending) dal 2012 al 2016 con localizzazione dei punti anomali.

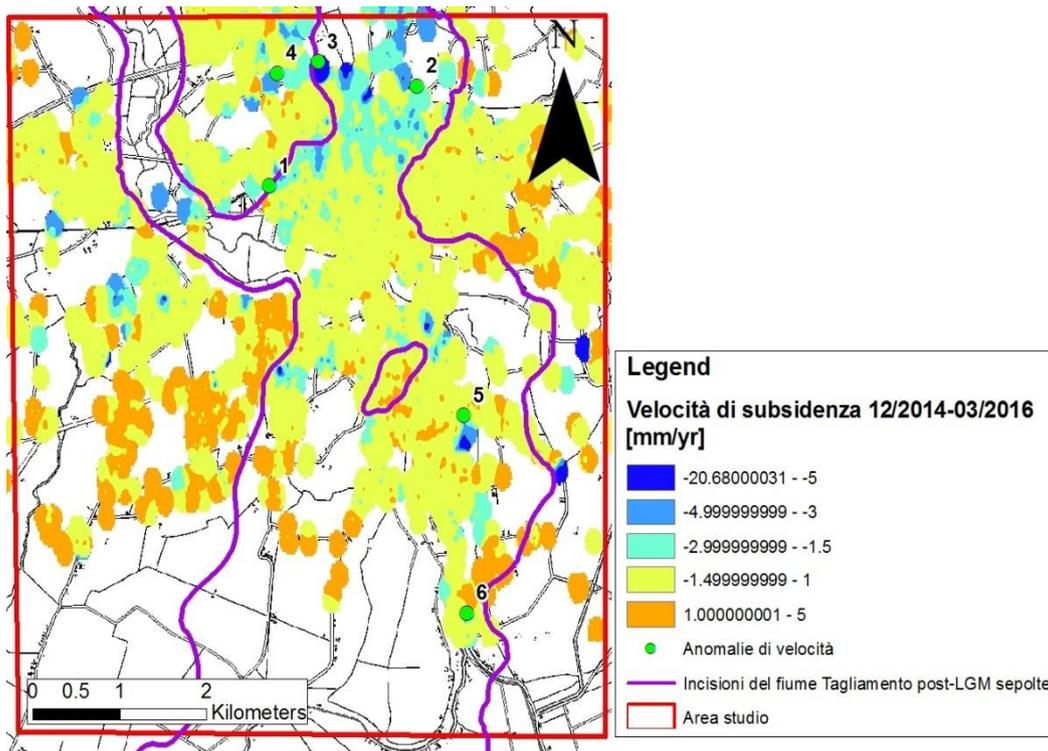


Figura 4.25 - Mappa di velocità di subsidenza (Sentinel) dal 12/2014 al 03/2016 con localizzazione dei punti anomali.

3.1 cm mentre in Sentinel-1 la banda usata è la C con una lunghezza d'onda di 5.6 cm).

Pertanto nonostante le immagini COSMO consentano di avere una maggiore risoluzione spaziale rispetto ai dati Sentinel, questi ultimi risentono meno della presenza della vegetazione. È possibile dunque che, nonostante il periodo indagato sia lo stesso, i tassi di subsidenza registrati dai sensori delle due missioni satellitari, COSMO Sky-Med e Sentinel, siano diversi.

In tutte le aree anomale individuate, attraverso l'analisi delle immagini storiche disponibili dal 1983 fino al 2015, è stato riscontrato che i tassi di velocità sono dovuti all'imposizione di carichi sul terreno per la costruzione di edifici e realizzazione di strade nel periodo immediatamente precedente all'intervallo di tempo indagato.

Di seguito vengono riportati due esempi di analisi delle immagini storiche relativi ad una stessa area, che è stata valutata anomala in tutte le mappe di subsidenza in quanto dal 1987 al 2015 sono stati realizzati numerosi edifici (per le serie

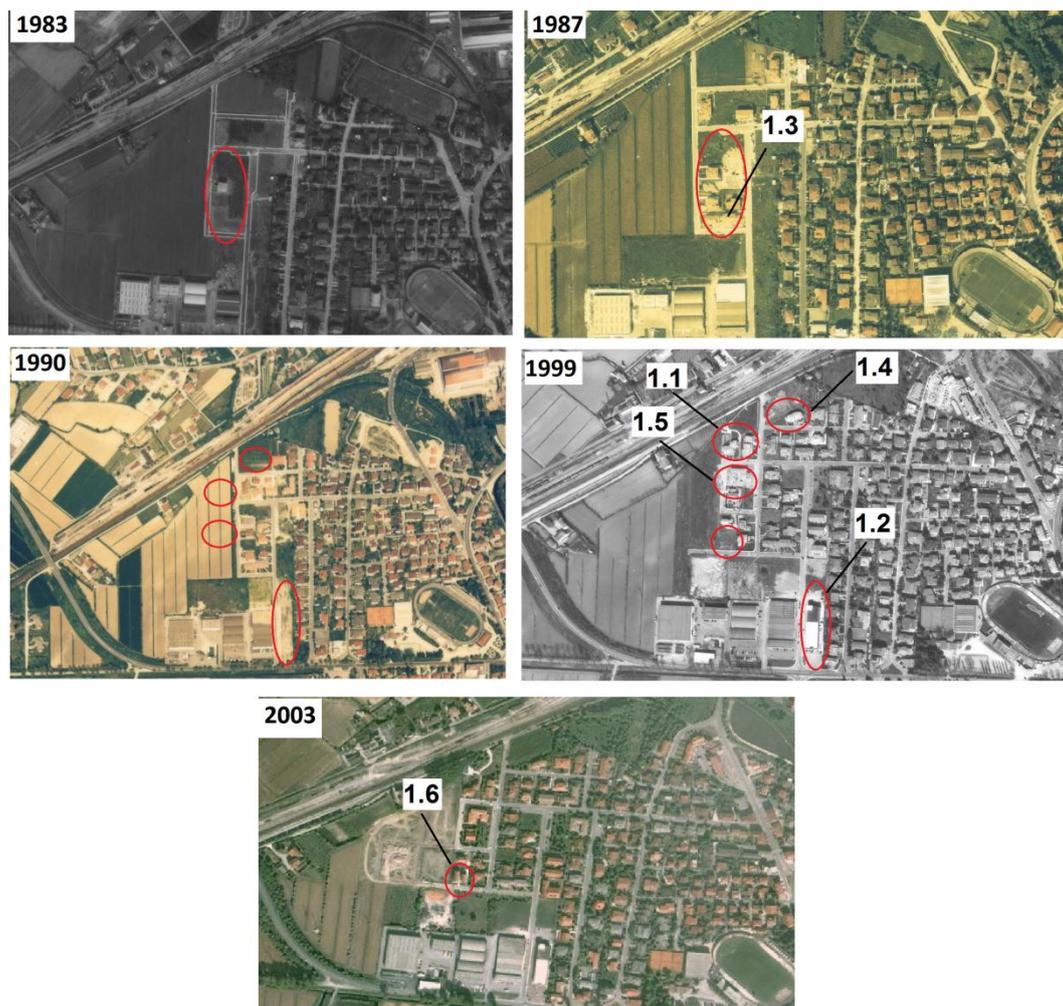
temporali delle immagini storiche relative a tutti i punti anomali vedi APPENDICE B):

- ✓ il primo esempio (Figura 4.26) si riferisce alle immagini storiche dal 1983 al 2003, confrontate con le velocità dei PS ERS e Envisat;
- ✓ il secondo esempio (Figura 4.27) riguarda le immagini storiche nel periodo 2003-2015, confrontate con le velocità dei PS COSMO Sky-Med e Sentinel.

In figura 4.26 e 4.27 sono stati localizzati i singoli PS e analizzati considerando la velocità media di subsidenza confrontata con l'età di realizzazione degli edifici, ricavata dalle immagini storiche:

- ✓ nei punti 1.1, 1.2, 1.4 della Figura 4.26, gli edifici sono assenti nel 1990 e compaiono nel 1999 ma, vista la presenza del PS dal 1995 al 2000 (ricordando che nelle città i riflettori permanenti sono spesso gli edifici ed il 1995. In tutti questi casi le velocità medie di subsidenza sono maggiori in ERS (1995-2000) e diminuiscono in Envisat (2003-2010);
- ✓ il punto 1.5 della Figura 4.26 non ha il PS in ERS e l'edificio compare nel 1999, dunque è possibile ipotizzare che sia stato costruito dal 1995 al 1999;
- ✓ il punto 1.3 della Figura 4.26 corrisponde ad un edificio già esistente nel 1987 ma si trova in una zona dove molte case sono state realizzate dal 1990 in poi;
- ✓ l'edificio 1.6 della Figura 4.26 compare nel 2003 giustificando l'assenza del punto PS nell'immagine ERS e la comparsa in quella Envisat;
- il punto 1.1 della Figura 4.27 coincide con un edificio che è stato costruito dal 2003 al 2007 e infatti mostra una velocità maggiore nella mappa del 2010-2011 rispetto a quella del periodo 2012-2016 ed inoltre la velocità registrata dai dati COSMO Sky-Med acquisiti con orbita discendente è simile a quella dei dati Sentinel;
- ✓ il punto 1.2 della Figura 4.27 riguarda, invece, un edificio costruito dal 2010 al 2015 ed infatti la velocità di subsidenza è di -9.9 mm/anno nel

biennio 2010-2011 (probabilmente associata alla costruzione degli edifici vicini dal 2003 al 2007) e aumenta nel periodo 2012 al 2016 per via della realizzazione dell'edificio stesso; anche in questo caso la velocità registrata dai dati COSMO Sky-Med acquisiti con orbita discendente è simile a quella dei dati Sentinel.



Velocità dei singoli PS [mm/yr]						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
1995-2000	-16.47	-5.87	-6.26	-5.8	/	/
2003-2010	-7.18	-3.89	-3.53	-5.1	-10.96	-5.92

Figura 4.26 – Serie temporale delle immagini storiche relative all'area anomala numero 1 individuata nelle mappe di subsidenza 1995-2000 e 2003-2010; la tabella in basso mostra le velocità medie dei singoli PS individuati.



Velocità dei singoli PS [mm/yr]		
	1.1	1.2
2010-2011	-5.14	-9.9
2012-2016	-1.22	-12.21
2014-2016	-1.02	-13

Figura 4.27 - Serie temporale delle immagini storiche relative all'area anomala numero 1 individuata nelle mappe di subsidenza dal 2010 al 2016; la tabella in basso mostra le velocità medie dei singoli PS individuati.

Un caso particolare riguarda i punti anomali numero 3 e 4 delle mappe di velocità di subsidenza COSMO Sky-Med e Sentinel: i due punti, distanti circa 500 m, coincidono con le due estremità di un ponte realizzato dal 2010 al 2015; il punto 3 è localizzato nell'estremità del ponte interna all'incisione, e presenta una velocità di subsidenza maggiore del punto 4, che è situato nell'estremità che ricade sulla pianura LGM affiorante.

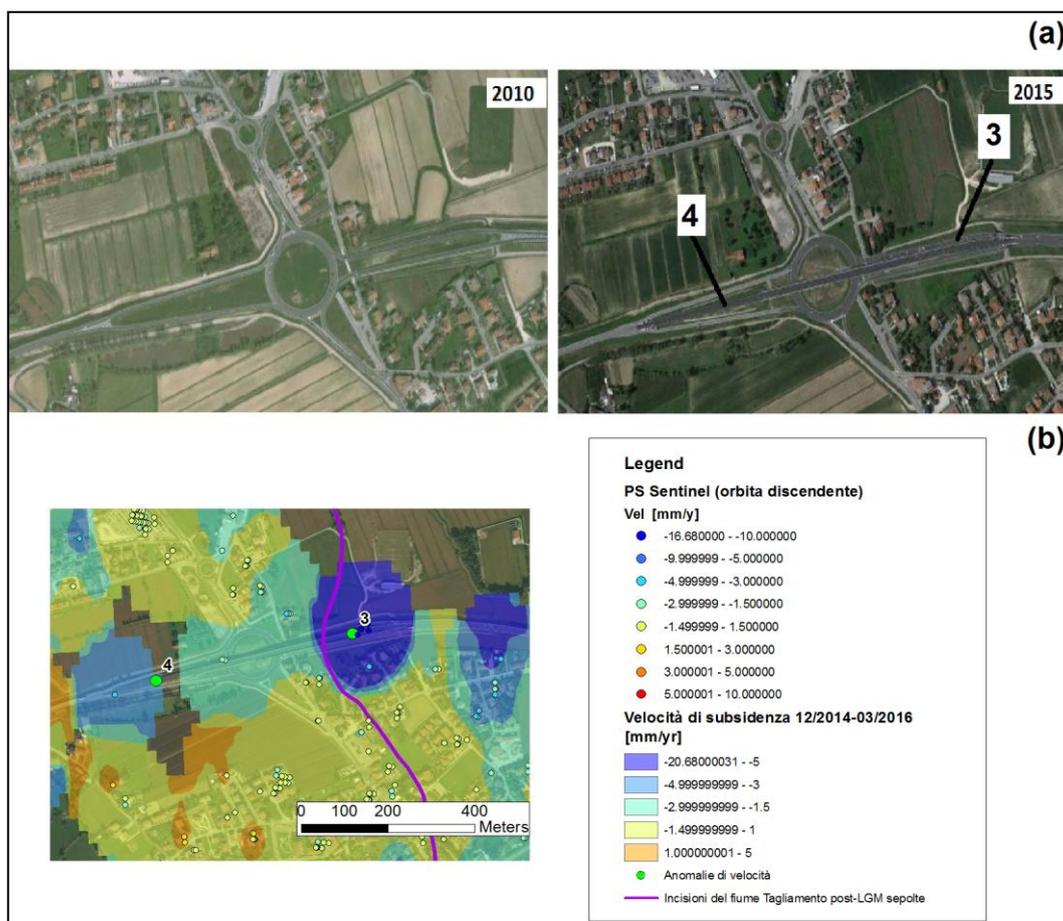


Figura 4.28 – (a) Serie temporale delle immagini storiche relative ai punti anomali 3 e 4 delle mappe di velocità di subsidenza dal 2010 al 2016; (b) Mappa di velocità di subsidenza e PS Sentinel nei punti anomali 3 e 4.

La figura 4.28a mostra che tra il 2010 e 2015 è stato realizzato un ponte, e alle due estremità dello stesso sono localizzati i punti 3 e 4: il punto 3, interno all'incisione sepolta, ha una velocità media di subsidenza di -15.05 mm/anno; il punto 4, esterno all'incisione, ha una velocità media di subsidenza di -5.84 mm/anno.

A parità di carico imposto dunque è diversa la risposta che i due punti danno in termini di deformazione perché nei primi 20 metri sono diversi i terreni che costituiscono il sottosuolo: all'interno dell'incisione si verifica un abbassamento del suolo con un tasso che risulta essere il triplo rispetto a quello che si osserva fuori dall'incisione, probabilmente per via della presenza di depositi fini organici, più compressibili delle sabbie e limi che costituiscono la pianura LGM.



Figura 4.29 – (a) Immagini storiche del centro storico di Portogruaro relative all'anno 1987 e 2015 dalle quali non emergono cambiamenti nell'edificato; (b) Valori di velocità di subsidenza dei singoli PS Envisat dal 2003 al 2010.

Dall'analisi delle anomalie di velocità è stato possibile individuare una prima causa di subsidenza vigente nell'area in studio, che è quella della consolidazione dei terreni indotta dall'applicazione di un carico. Inoltre è stato possibile valutare la diversa risposta deformazionale dei terreni che costituiscono i primi 20 m dell'incisione sepolta e della pianura LGM affiorante.

Tuttavia la consolidazione indotta dall'applicazione di un carico sul terreno non può essere la causa della subsidenza che interessa tutta l'area in studio nel settore interno all'incisione sepolta considerando che, sia a Concordia che a Portogruaro, sono presenti edifici risalenti al 1200 e tali punti presentano dal 2003 al 2010 tassi di subsidenza di $-3\div-4$ mm/anno, che di certo non possono essere dovuti alla

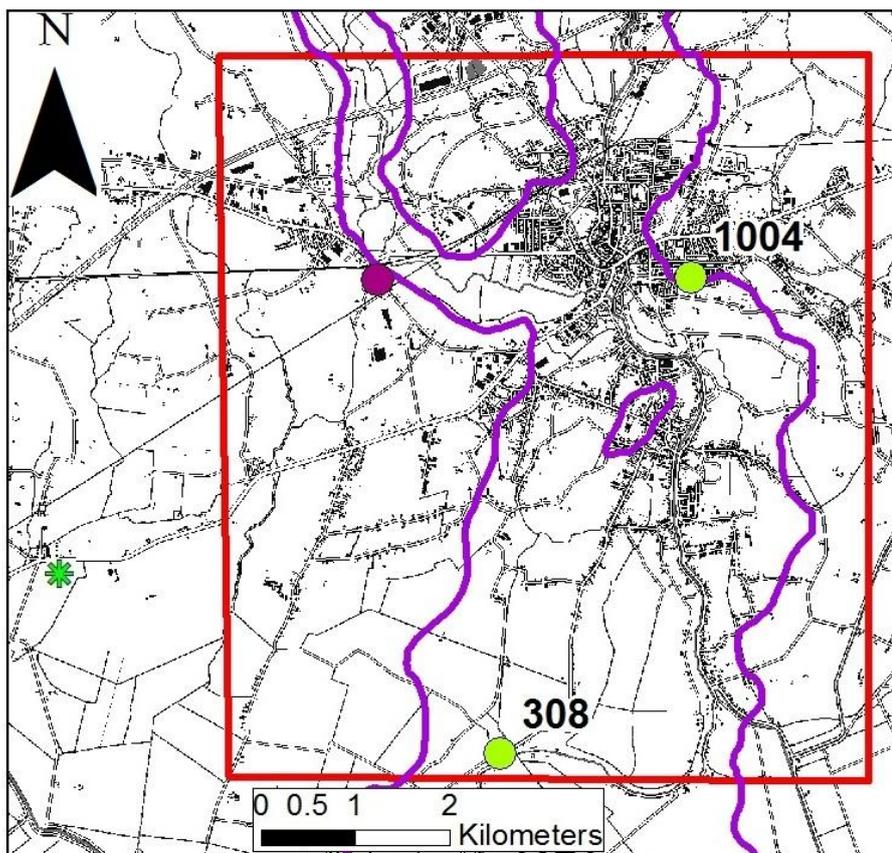
consolidazione del terreno indotta dalla costruzione delle strutture stesse (Figura 4.29).

4.5.2. Analisi dei dati idrogeologici

Nella ricerca delle possibili cause della subsidenza vigente su tutta l'area in studio si è proceduto con l'analisi dei dati idrogeologici e bibliografici.

Dall'analisi del livello piezometrico della falda superficiale, monitorato dalla regione Veneto nel pozzo 1004 che ricade nell'area in studio (Figura 4.30), è stato riscontrato che la falda superficiale:

- ✓ non presenta oscillazioni piezometriche maggiori di 1.5 metri, probabilmente in quanto soggetta alla rete di bonifica (Figura 4.32);
- ✓ risente parzialmente delle precipitazioni (Figure 4.31, 4.32);
- ✓ il livello piezometrico è soggetto ad oscillazioni più o meno periodiche (in calo da marzo in poi e in risalita da settembre in poi, Figura 4.32).



Legend

- Pozzi monitorati dalla regione Veneto
- Pozzo monitorato da Fabbri, 2013
- ✱ Stazione pluviometrica di Portogruaro
- Incisioni del fiume Tagliamento post-LGM sepolte
- Area studio

Figura 4.30 - Localizzazione dei pozzi monitorati dalla regione Veneto dal 1998 al 2014, del pozzo monitorato per il progetto IDRO dalla fine del 2011 a settembre 2012 (Fabbri et al., 2013), e della stazione pluviometrica di Portogruaro.

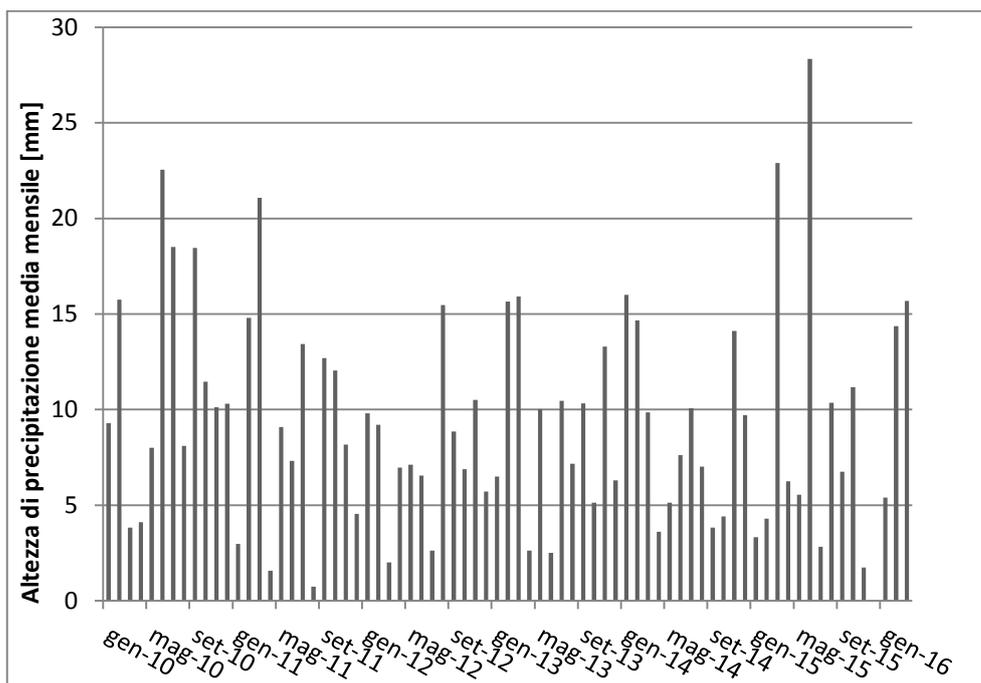


Figura 4.31 – Altezza di precipitazione media mensile rilevata nella stazione pluviometrica Portogruaro (per localizzazione vedi Figura 4.28) dal 2010 a marzo 2016 (www.arpa.veneto.it).

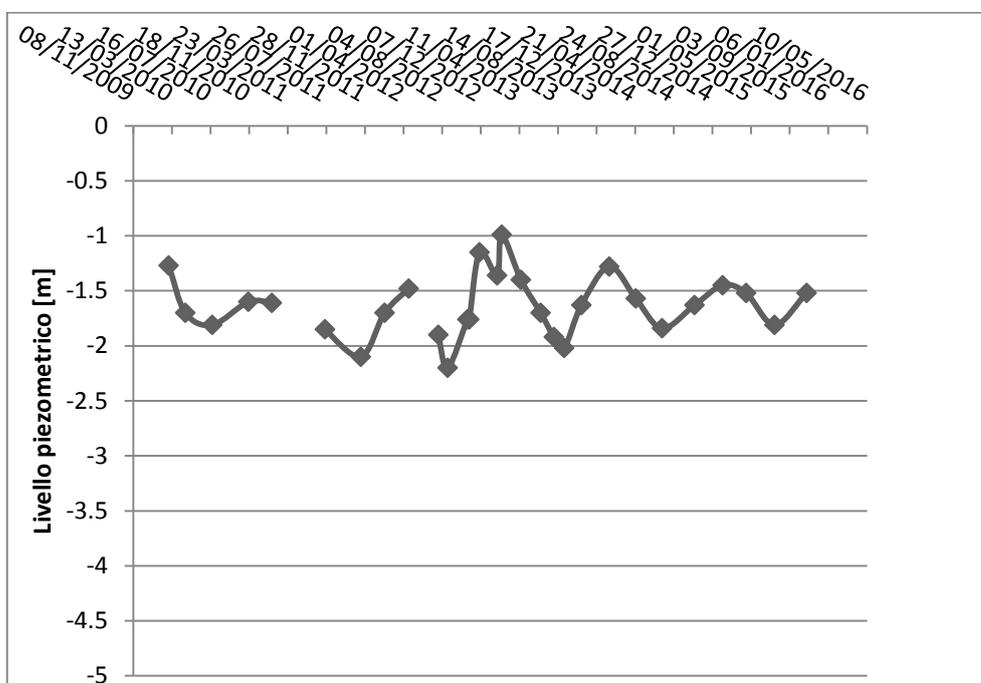


Figura 4.32 – Livello piezometrico rispetto al piano campagna della falda libera a 6 m di profondità (dati.veneto.it/dataset/acque-sotterranee-livello-piezometrico-delle-falde).

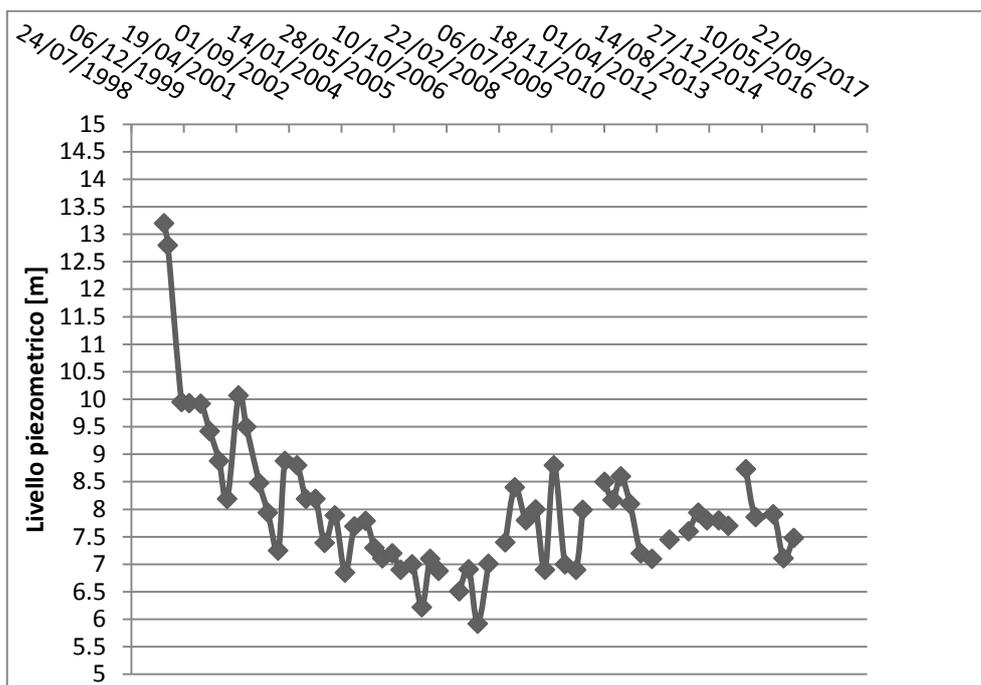


Figura 4.33 - Livello piezometrico rispetto al piano campagna della falda confinata a 530 m di profondità (dati.veneto.it/dataset/acque-sotterranee-livello-piezometrico-delle-falde).

Quanto osservato sul comportamento della falda superficiale in questo settore della pianura veneto-friulana è confermato dalla bibliografia: uno studio fatto nel 2013 sugli acquiferi superficiali della pianura veneto-friulana (progetto IDRO), attraverso il monitoraggio da novembre 2011 a settembre 2012 di un pozzo fenestrato nei primi 4 m di profondità e localizzato a nord-est nell'area in studio in questa tesi (Figura 4.30), conferma l'influenza della rete di bonifica e delle precipitazioni sulla falda superficiale e che le oscillazioni del livello piezometrico sono limitate a 1.5 metri (Fabbri et al., 2013).

Per quanto riguarda la falda profonda l'unico pozzo disponibile nell'area in studio, monitorato dalla regione Veneto, è il pozzo 308 (Figura 4.30) fenestrato nell'acquifero confinato a 530 metri di profondità.

Dalla Figura 4.33 si vede che dal 1998 al 2007 si è verificato un calo della prevalenza dell'acquifero sul piano campagna di circa 7 m (in media 70 cm circa all'anno).

Attraverso una ricerca bibliografica sull'area di Portogruaro si evince che:

- il Portogruarese è un'area della pianura veneto-friulana molto sfruttata in termini di prelievo di acque dalle falde profonde per uso domestico, irriguo e per le fontane pubbliche (Dal Prà et al., 2000);
- il numero di pozzi censiti dalla provincia di Venezia nel 1998 nel Portogruarese è di 1200, di cui 145 a Concordia e 130 a Portogruaro (Dal Prà et al., 2000);
- il prelievo di acque è favorito dalla prevalenza fino a 20 m degli acquiferi profondi per cui il 79% dei pozzi di prelievo sono ad erogazione spontanea e quindi le falde vengono sovrasfruttate (Dal Prà et al., 2000);
- la falda profonda più sfruttata è quella situata a 480-560 m di profondità (Dal Prà et al., 2000);
- con il tempo sono proliferati i pozzi profondi 500-600 m con conseguenti rischi ambientali legati alla depressurizzazione degli acquiferi (subsidenza), ancor più allarmanti in quelle aree soggette a una rete di bonifica poiché situate al di sotto del livello del mare (Dal Prà et al., 2000);
- attraverso il confronto tra volume degli acquiferi termali e portata emunta è stato confermato che la ricarica delle falde dall'acquifero indifferenziato di alta pianura è tale da non generare lo svuotamento degli acquiferi (Zangheri, 2011);
- dal 1997 al 2004 nei pozzi del Portogruarese è stato riscontrato un calo della prevalenza degli acquiferi profondi di 70 cm all'anno per cui la portata estraibile dovrebbe essere definita sulla base della depressurizzazione accettabile (Zangheri, 2011).

Dall'analisi bibliografica è stato riscontrato che Concordia e Portogruaro ricadono in quei settori del Portogruarese dove le falde profonde da 100 a 600 m vengono sfruttate in quanto ricadono nell'area in cui la risorsa è idropotabile e in quanto risentono dell'anomalia geotermica della dorsale di Cesarolo (Figura 4.34).

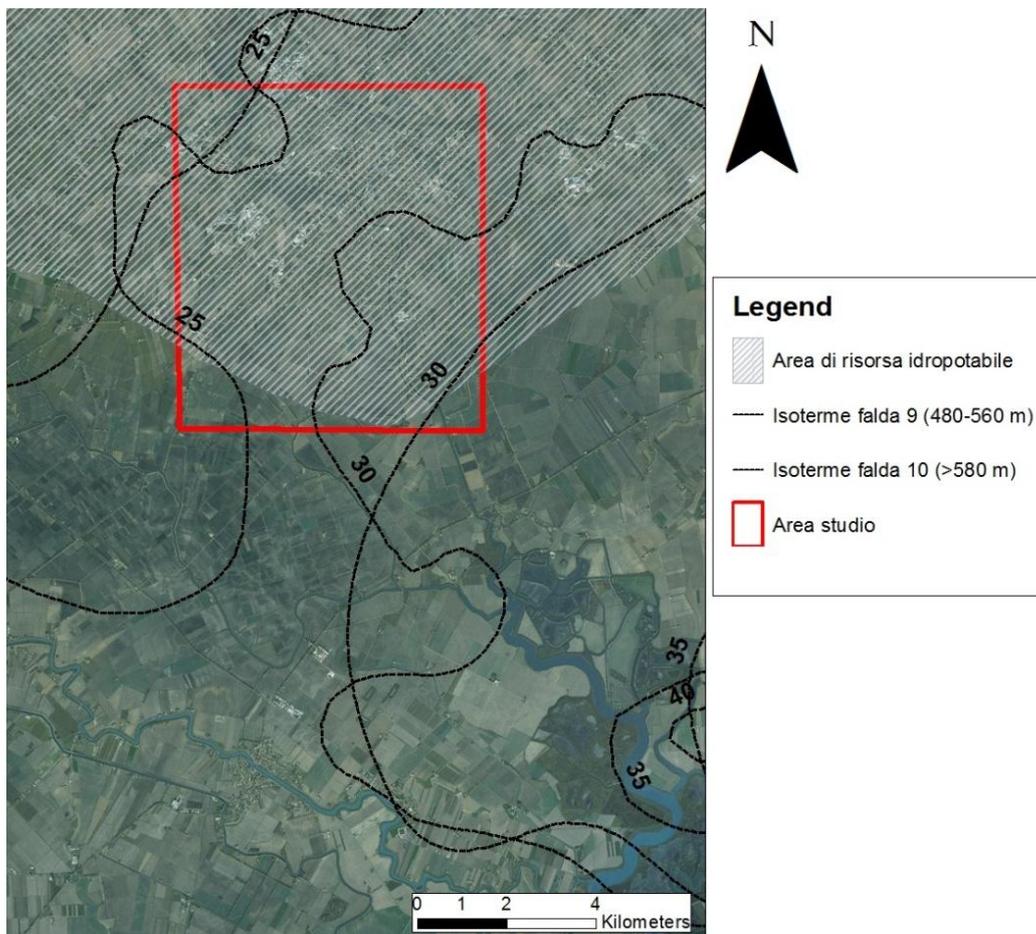


Figura 4.34 - Localizzazione dell'area in studio rispetto l'area di risorsa idropotabile e le isoterme delle falde termali profonde (Zangheri, 2011).

Dalla distribuzione dei pozzi censiti dalla provincia di Venezia nel 1998 (Dal Prà et al., 2000) è stato riscontrato che in tutta l'area in studio, soprattutto a sud di Concordia, sono presenti numerosi pozzi di prelievo delle acque sotterranee (Figura 4.35).

Il mantenimento delle pressioni negli acquiferi è un accorgimento che previene eventuali fenomeni di subsidenza correlati alla depressurizzazione degli acquiferi confinati (Zangheri, 2011).

Per cui una prima ipotesi, in merito alle cause della subsidenza, è che tutta l'area sia soggetta all'abbassamento legato al sovrasfruttamento delle falde profonde con conseguente depressurizzazione.

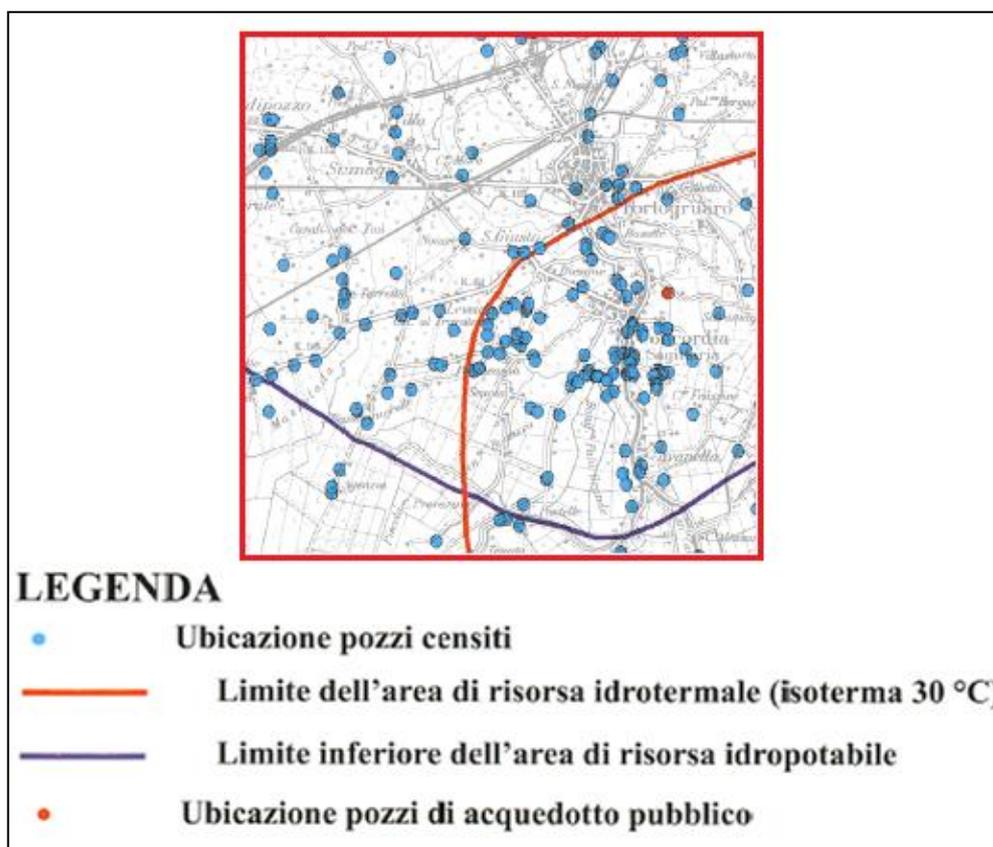


Figura 4.35 - Ubicazione dei pozzi censiti nel 1998 nell'area in studio, indicata dal riquadro rosso (Dal Prà et al., 2000).

La differenza nei tassi di subsidenza registrati tra i punti che insistono dentro e fuori l'incisione potrebbe essere associata al diverso comportamento deformativo dei terreni che costituiscono i primi 20 m del sottosuolo e ciò permette ai dati interferometrici di riprodurre, attraverso la distribuzione delle velocità di subsidenza dei PS, il limite dell'incisione sepolta presente nel sottosuolo di Portogruaro e Concordia.

Una seconda ipotesi è che si possa esser verificato un calo del livello piezometrico della falda superficiale e quindi si possa essere innescato il processo di consolidazione nei primi metri di profondità a causa di:

- 1) una variazione del livello della falda superficiale associata a una variazione nel regime di drenaggio delle acque;

2) la realizzazione di opere di deviazione dei fiumi risorgiva Lemene e Reghena, che costituiscono la fonte di alimentazione della falda superficiale;

3) la regimazione della falda superficiale per la realizzazione di opere di ingegneria civile, come ad esempio la costruzione di garage sotterranei.

La differenza dei tassi di subsidenza riscontrata fuori e dentro l'incisione è sempre da imputare a una differenza litologica dei terreni nei primi 20 m di profondità delle due aree.

5. CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi ha considerato il settore di pianura friulana compreso tra le città di Portogruaro e Concordia Sagittaria, investigando tramite tecniche d'interferometria differenziale SAR le velocità di subsidenza e confrontando queste con il modello geologico del sottosuolo e l'assetto geomorfologico. Grazie ai risultati delle elaborazioni dei dati SAR disponibili su tale area, ovvero i PS delle missioni ERS, Envisat, COSMO Sky-Med e Sentinel-1, si sono effettuate le seguenti attività:

- analisi della distribuzione spaziale delle velocità dei PS delle missioni ERS e Envisat;
- realizzazione di mappe di velocità di subsidenza attraverso l'interpolazione spaziale dei PS ERS, Envisat, COSMO Sky-Med e Sentinel-1 con lo strumento IDW disponibile nel software ArcMap;
- confronto delle serie temporali degli spostamenti in atto dal 1995 al 2000 e dal 2003 al 2010 in punti localizzati fuori e dentro l'incisione sepolta, distanti meno di 200 m;
- realizzazione di una sezione stratigrafica (A-B) poco a monte del centro storico di Portogruaro e confronto con la sezione di riferimento (C-D) ricostruita presso Concordia (Fontana, 2006);
- realizzazione e studio del carotaggio manuale PRT1 presso la sede di Portogruaro del Consorzio di Bonifica Veneto Orientale;
- confronto, nelle sezioni A-B e C-D, tra il modello geologico e il modello interferometrico, quest'ultimo definito dalle sezioni di velocità ottenute a partire dalle mappe di velocità di subsidenza ERS e Envisat;
- confronto, nella sezione E-F (presso Concordia), tra le velocità di subsidenza dei singoli PS Envisat e lo spessore dei depositi post-LGM, definito dalla carta delle Isopache dei depositi post-LGM.

L'analisi della distribuzione di velocità dei PS ERS (immagini dal 1995 al 2000) e Envisat (immagini dal 2003 al 2010) e la realizzazione delle mappe di velocità di

subsidenza hanno permesso di individuare nell'area in studio 3 unità interferometriche caratterizzate da diversi valori di velocità di subsidenza:

- l'unità A con valori di velocità di spostamento compresi tra -1.5 e +1 mm/anno, considerata stabile;
- l'unità B con velocità di subsidenza comprese tra -1.5 e -3 mm/anno;
- l'unità C con velocità di subsidenza superiori a -3 mm/anno.

L'elaborazione in ambiente GIS ha permesso di sovrapporre le mappe di subsidenza a quelle geologiche e, in particolare, di confrontare i dati interferometrici con i limiti dell'incisione sepolta. Da tale sovrapposizione è emerso che l'unità interferometrica stabile corrisponde alle zone dove la pianura LGM è affiorante o subaffiorante, mentre l'unità subsidente con tassi di -1.5÷-3 mm/anno si localizza al di sopra dei depositi che riempiono l'incisione sepolta.

La corrispondenza tra la distribuzione delle velocità di subsidenza e il limite dell'incisione sepolta è stata genericamente riscontrata anche nelle mappe di velocità di subsidenza ottenute dai dati COSMO Sky-Med (immagini 2010-2016), e solo in parte in quella ricavata dai dati della missione Sentinel-1 (immagini 12/2014 – 03/2016). Probabilmente la limitata corrispondenza con i dati Sentinel si deve al breve periodo di tempo coperto da tali dati SAR.

Il confronto tra dati geologici e interferometrici, fatto nelle sezioni A-B, C-D ed E-F, ha confermato che l'area in subsidenza ricade all'interno dell'incisione sepolta e che i tassi di subsidenza registrati dai PS sono legati allo spessore dei depositi degli ultimi 17000 anni. È stato osservato, infatti, che a valle di Portogruaro più l'incisione si approfondisce, maggiore è lo spessore dei depositi post-LGM, e maggiore è la velocità di subsidenza dei PS.

L'obiettivo della prima parte della tesi era quello di dimostrare la corrispondenza nell'area in studio tra l'assetto geologico e il modello interferometrico. Da quanto svolto e descritto in questo elaborato, tale obiettivo è stato raggiunto in quanto il limite dell'incisione sepolta, identificato con i sondaggi stratigrafici, viene

riprodotto nelle mappe di velocità di subsidenza, realizzate a partire da dati SAR, dal limite tra l'unità interferometrica stabile e quella in subsidenza.

L'obiettivo raggiunto in questa tesi di laurea pone le basi per una ricerca volta alla valutazione di un innovativo uso dell'interferometria come ausilio alla cartografia geologica di aree di piana costiera o di altre zone simili in cui vi sia la presenza di unità stratigrafiche con sviluppo allungato e caratterizzate da depositi soggetti a subsidenza con tassi differenti rispetto alle unità vicine. Un'analoga applicazione può essere efficace anche nelle aree fortemente urbanizzate, dove la visibilità della superficie naturale o l'accesso al sottosuolo spesso sono molto limitati. Sono queste ultime anche le zone in cui l'interferometria di dettaglio dei Persistent Scatterers dà i risultati migliori.

Nella seconda parte della tesi ci si è focalizzati sulla ricerca delle possibili cause della subsidenza. A partire dall'analisi delle anomalie di velocità, riscontrate nelle mappe dei tassi di subsidenza ERS, Envisat, COSMO Sky-Med e Sentinel, è stata definita la prima causa di subsidenza che riguarda quelle aree dove nuovi edifici e strade sono stati realizzati negli ultimi 15 anni circa. In queste aree i tassi di subsidenza anomali rispetto al resto dell'area sono da imputare alla consolidazione dei terreni indotta dall'applicazione di un carico sulla superficie.

Per quanto riguarda l'abbassamento che caratterizza il settore dell'incisione sepolta, attraverso i dati idrogeologici e l'indagine bibliografica, è emerso che l'intera area in studio ricade in quella parte della pianura veneto-friulana dove gli acquiferi termali profondi vengono sovrasfruttati. Di conseguenza si ipotizza che una prima causa del fenomeno potrebbe identificarsi con la depressurizzazione degli acquiferi profondi. Una seconda ipotesi è che negli ultimi decenni sia stato abbassato il livello della falda superficiale, con conseguente consolidazione dei terreni presenti nei primi metri di profondità.

La differenza dei tassi di subsidenza osservati nei punti interni ed esterni all'incisione sepolta potrebbe essere associata al diverso comportamento deformativo dei terreni nei primi 20 metri di profondità. La realizzazione del

sondaggio PRT1 ha inoltre confermato la presenza di terreni fini organici all'interno dell'incisione sepolta, debolmente consolidati.

Per poter avvalorare tali ipotesi sarebbe necessario:

- ✓ svolgere uno studio geotecnico-idrogeologico di dettaglio volto alla caratterizzazione geotecnica dei terreni che riempiono l'incisione e di quelli che costituiscono la pianura LGM, e al monitoraggio arealmente e temporalmente più esteso delle pressioni degli acquiferi profondi;
- ✓ indagare su quanto è stato realizzato nell'area in studio in termini di opere di ingegneria civile e di regimazione della falda superficiale.

BIBLIOGRAFIA

- Amato, A., Barnaba, P.F., Finetti, I., Groppi, G., Martinis, B., and Muzzin, A. (1976) Geodynamic outline and seismicity of Friuli Venetia Julia region. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 18, 217-256.
- Antonioli, F., Ferranti, L., Fontana, A., Amorosi, A., Bondesan, A., Braitenberg, C., Fontolan, G., Furlani, S., Mastronuzzi, G., Monaco, C., Spada, G., Stocchi, P. (2009) Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines. *Quaternary International*, 206, 101-133.
- Arnaud, A., Adam, N., Hanssen, R., Inglada, J., Duro, J., Closa, J., and Eineder, M. (2003) ASAR ERS interferometric phase continuity. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 2, 1133–1135, 21–25 July 2003.
- Barnaba, P. F. (1990) Considerazioni geologiche sul sottosuolo e sulle risorse idrotermali della zona di Latisana-Foce del Tagliamento. *Mem Sc. Geol. Univ. Padova*, 42, 343-359 pp.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E. (2002) A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *Ieee transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 40, no. 11.
- Blanco-Sanchez, P., Mallorquí, J.J., Duque, S., and Monells, D. (2008) The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring. *Pure Appl. Geophys.*, 165, 1167–1194.
- Bondesan, A., Bassan, V., Fontana, A., Meneghel, M., Mozzi, P., Abba, T., Bisazza, A. & Viturri, A. (2008a) Carta delle unità geologiche della provincia di Venezia, scala 1:50000. Cierre, Verona, 2 Fogli.
- Bondesan, A., Primon, S., Bassan, V. & Viturri, A. (2008b) Le unità geologiche della provincia di Venezia. Cierre, Verona, 184 pp.
- Branney, M. J. (1995) Downsag and extension at calderas: new perspectives on collapse geometries from icemelt, mining, and volcanic subsidence. *Bulletin of Volcanology*, Volume 57, Issue 5, 303- 318.
- Carbognin, L., Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Viturri, A., Mazzucato, A. (a cura di) (2011) Subsidenza - Atlante geologico della provincia di Venezia – note illustrative.
- Conesa-García, C., Tomás, R., Herrera, G., López-Bermúdez, F., Cano, M., Navarro-Hervás, F., and Pérez-Cutillas, P. (2016) Deformational behaviours of alluvial units detected by advanced radar interferometry in the Vega Media of

- the Segura River, southeast Spain. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 98, 15–38, DOI:10.1111/geoa.12121.
- Correggiari, A., Roveri, M., Trincardi, F. (1996) Late Pleistocene and Holocene evolution of the North Adriatic Sea. *Il Quaternario – Italian Journal of Quaternary Sciences*, 9, 697–704.
- Dal Prà, A., Gobbo, L., Vitturi, A., Zangheri, P. (2000) Indagine idrogeologica del territorio provinciale di Venezia.
- Dokka, R.K. (2006) Modern-day tectonic subsidence in coastal Louisiana. *Geology*, v.34, 281-284.
- Fabrizi, P., Zangheri, P., Bassan, V., Fagarazzi, E., Mazzucato, A., Primon, S., Zogno, C. (2013) Sistemi idrogeologici della provincia di Venezia – Acquiferi superficiali.
- Ferranti, L., Antonioli, F., Mauz, B., Amorosi, A., Dai Pra, G., Mastronuzzi, G., Monaco, C., Orrù, P., Pappalardo, M., Radtke, U., Renda, P., Romano, P., Sansò, P., and Verrubbi, V. (2006) Markers of the last interglacial sea-level high stand along the coast of Italy: Tectonic implications. *Quaternary International*, 145-146, 30-54.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001) Permanent Scatterers in SAR interferometry. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, NO. 1, 8 - 20.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., and Rucci, A. (2011) A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49(9), 3460-3470.
- Fontana, A., Mozzi, P., Bondesan, A. (2004) L'evoluzione geomorfologica della pianura veneto– friulana. In: Bondesan, A., Meneghel, M. (Eds.), *Geomorfologia della provincia di Venezia*. Esedra, Padova, 113–136.
- Fontana, A. (2006) Evoluzione geomorfologica della bassa pianura friulana e sue relazioni con le dinamiche insediative antiche. *Monografie Museo Friulano Storia Naturale* 47, Udine, 288. Inclusa mappa geomorfologica della bassa pianura friulana, scala 1:50000.
- Fontana, A., Mozzi, P., Bondesan, A. (2008) Alluvial megafans in the Venetian– Friulian Plain (north-eastern Italy): evidence of sedimentary and erosive phases during Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary International*, 189, 71–90.
- Fontana, A., Bondesan, A., Meneghel, M., Toffoletto, F., Vitturi, A., Bassan, V. (a cura di) (2012) *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - Foglio 107 Portogruaro e note illustrative*. Regione Veneto, Infocartografica, Piacenza, 2 fogli, 168 pp.

- Fontana, A., Mozzi, P., Marchetti, M. (2014) Alluvial fans and megafans along the southern side of the Alps. *Sedimentary Geology*, 301, 150-171.
- Hooper, A. (2008) A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16302, doi:10.1029/2008GL034654
- Klemm, H., Quseimi, I., Novali, F., Ferretti, A., and Tamburini, A. (2010) Monitoring horizontal and vertical surface deformation over a hydrocarbon reservoir by PSInSAR. *First break volume 28*.
- Manunta, M., Marsella, M., Zeni, G., Sciotti, M., Atzori, S., and Lanari, R. (2008) Two-scale surface deformation analysis using the SBAS-DInSAR technique: a case study of the city of Rome, Italy. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 6,1665-1684.
- Martinsons, D.G., Pias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C., and Shackleton, N.J. (1987) Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high resolution 0 to 300000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27, 1-29.
- Massari, F. (1990) The foredeep of the northern Adriatic margin: evidence of diachronicity in deformation of the Southern Alps. *Riv. It. Paleont. Strat.*, 96, 350-380.
- Massonnet, D., and Feigl, K.L. (1998) Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36, 441-500.
- Monegato, G., Ravazzi, C., Donegana, M., Pini, R., Calderoni, G., Wick, L. (2007) Evidence of a two-fold glacial advance during the last glacial maximum in the Tagliamento and moraine system (eastern Alps). *Quaternary Research*, 68, 284-302.
- Pellegrini, G.B., Albanese, D., Bertoldi, R., Surian, N. (2005) La deglaciazione nel Vallone Bellunese, Alpi Meridionali Orientali. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria (Suppl. 7)*, 271-280.
- Raspini, F., Loupasakis, C., Rozos, D., Adam, N., and Moretti, S. (2014) Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modelling and validation with Persistent Scatterer Interferometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 28, 78-89.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E., Goldstein, R.M. (2000) Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. I.E.E.E.*, 88 (3), 333-382.

- Sousa, J. J., Ruiz, A. M., Hanssen, R. F., Bastos, L., Gil, A. J., Galindo-Zaldivar, J. and Sanz De Galdeano, C. (2010) PSInSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation—Study of the Granada basin (Central Betic Cordilleras, southern Spain). *Journal of Geodynamics*, 49(3), 181–189.
- Sowter, A., Bateson, L., Strange, P., Amborse, K., and Fifik Syafiudin, M. (2013) DInSAR estimation of land motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfields. *Remote Sensing Letters*, 4(10), 979–987.
- Stramondo, S., Saroli, M., Tolomei, C., Moro, M., Doumaz, F., Pesci, A., Loddo, F., Baldi, P., Boschi, E. (2007) Surface movements in Bologna (Po Plain — Italy) detected by multitemporal DInSAR. *Remote Sensing of Environment*.
- Stramondo, S., Bozzano, F., Marra, F., Wegmuller, U., Cinti, F.R., Moro, M., Saroli, M. (2008) Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3160–3172.
- Takada, Y., and Fukushima, Y. (2013) Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan. *Nature Geoscience*, 6, 637–641.
- Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Wegmüller, U., Rizzetto, F. (2005) Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system.
- Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Cecconi, G., Rosselli, R., and Libardo, S. (2012) Resolving land subsidence within the Venice lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 40, 72–79.
- Terzaghi, K., Peck, R. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Edition. John Wiley, New York.
- Tomas, R., Marquez, Y., Lopez-Sanchez, J. M., Delgado, J., Blanco, P., Mallorquí, J. J., Martinez, M., Herrera, G., Mulas, J. (2005) Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment*, 98, 269 – 283.
- Tomas, R., Herrera, G., Lopez-Sanchez, J.M., Vicente, F., Cuenca, A., Mallorquí, J.J. (2010) Study of the land subsidence in the Orihuela city (SE Spain) using PSI data: distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors. *Engineering Geology*, 115, 105–121.
- Tosi, L., Da Lio, C., Strozzi, T., Teatini, P. (2016) Combining L- and X-Band SAR Interferometry to Assess Ground Displacements in Heterogeneous Coastal

- Environments: The Po River Delta and Venice Lagoon, Italy. *Remote Sens.*, 8, 308.
- Tovey, N., Paul, M. (2002) Modelling self-weight consolidation in holocene sediments. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 61, 21-33.
- Van Asselen, S. (2011) The contribution of peat compaction to total basin subsidence: implications for the provision of accommodation space in organic-rich deltas. *Basin Research*, 23, 239–255.
- Vituri, A. (a cura di) (2011) *Atlante geologico della provincia di Venezia – note illustrative*.
- Watts, A. B. (1982) Tectonic subsidence, flexure and global changes of sea level. *Nature*, 297, 469 - 474.
- Ye-Shuang Xu, Shui-Long Shen, Zheng-Yin Cai, Guo-Yun Zhou (2007) The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China.
- Zanferrari, A. (a cura di) (2012) *Inquadramento geologico e lineamenti strutturali - Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - Foglio 107 Portogruaro e note illustrative. Regione Veneto, Infocartografica, Piacenza, 2 fogli, 168 pp.*
- Zangheri, P. (a cura di) (2011) *Idrogeologia - Atlante geologico della provincia di Venezia – note illustrative*.
- Zangheri, P. (a cura di) (2012) *Aspetti idrogeologici - Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - Foglio 107 Portogruaro e note illustrative. Regione Veneto, Infocartografica, Piacenza, 2 fogli, 168 pp.*
- Zeitoun, D. G., Wakshal, E. (2013) *Land Subsidence Analysis in Urban Areas: The Bangkok Metropolitan Area Case Study. Springer Science & Business Media.*

Ringraziamenti

I primi ringraziamenti vanno al mio relatore Dr. Alessandro Fontana ed ai miei correlatori Dr. Mario Floris e Dr.ssa Giulia Tessari, per quanto fatto in questi 9 mesi di lavoro di tesi, per avermi spinto a fare sempre di più e per avermi aiutato a farlo con la vostra costante disponibilità, sapienza ed esperienza.

Grazie ai miei migliori amici, Anna, Angela e Vincenzo, per il supporto morale datomi sin dai tempi del liceo, per aver ascoltato i miei lunghi sfoghi in questi anni di studi e per essere riusciti a strapparmi un sorriso nei momenti più difficili.

Ringrazio le mie figliocce Katia e Noemi, e mia cugina Mariangela, perché, nonostante la distanza, non avete mai smesso di starmi accanto.

Grazie ai miei cugini Anna, Giuseppe, Alessio e Gabriele, per avermi regalato in questi due anni giorni di spensieratezza e di calore familiare.

Il ringraziamento principale va alla mia famiglia, Mamma, Papà e Giulia, per essere stati la colonna portante anche di questi ultimi due anni di studi, per avermi fornito le basi senza le quali non avrei potuto iniziare a costruire quello che si spera essere il mio futuro, e per avermi schermato da ogni tipo di preoccupazione permettendo che io mi concentrassi solo sul raggiungimento di questo obiettivo.

Infine ringrazio il mio fidanzato, per avermi dato il coraggio di continuare gli studi a Padova, per aver asciugato le mie lacrime ad ogni partenza, per aver sopportato i miei cali di umore, soprattutto in questi ultimi mesi di lavoro, e per avermi dato, ogni giorno, la serenità e la protezione senza le quali non avrei mai potuto raggiungere questo risultato.

A tutti voi, grazie...

APPENDICE A

Descrizione stratigrafica dei sondaggi usati per la realizzazione della sezione A-B

S1 (1797517.352 5077664.706 Metri)

0 – 0.35 m: terreno di riporto, ghiaia, sabbia e clasti bituminosi.

0.35 – 0.7 m: terreno di riporto, limo argilloso con rari clasti ghiaiosi e pezzi di cotto.

0.7 – 1.8 m: limo argilloso grigio nocciola, debolmente sabbioso; chiazze di ossidazione ocracee sparse.

1.8 – 3.4 m: argilla limosa grigio nocciola con R.V. nerastri e chiazze di ossidazione ocracee sparse.

3.4 – 12.4 m: argilla limosa grigia con alternati livelli di potenza max 10 cm di limo sabbioso e sabbia fine limosa grigia; da 5.3 a 5.45 m livelli di torba fibrosa marrone.

12.4 – 13.95 m: sabbia medio fine limosa grigia.

13.95 – 20 m: argilla limosa grigia, localmente torbosa marrone, con alternati livelletti, da centimetrici a pluricentimetrici, di limo sabbioso grigio e sabbia fine limosa grigia.

S1-1994 (1797650.702 5077677.406 Metri)

0 – 0.4 m: ghiaia arrotondata poligenica in matrice limoso-sabbiosa nocciola.

0.4 – 1 m: terreno vegetale limoso argilloso marrone.

1 – 1.6 m: sabbia molto limosa marrone nocciola poco argillosa.

1.6 – 2.8 m: limo argilloso marrone debolmente sabbioso.

2.8 – 5 m: limo argilloso marrone.

5 – 7.6 m: argilla limosa alternata a limi sabbiosi grigiastri inglobanti vari reperti organici con intervallati strati di limi sabbiosi e molto sabbiosi e sabbie limose potenti 20-30 cm.

7.6 – 8.2 m: limo molto sabbioso grigio.

8.2 – 9.7 m: sabbia limosa grigia.

9.7 – 10.5 m: limo sabbioso e argilloso grigio.

10.5 – 11.1 m: torba fogliettata marrone nerastra.

11.1 – 15.7 m: argilla limosa alternata a limi sabbiosi grigiastri inglobanti vari reperti organici con intervallati strati di limi sabbiosi e molto sabbiosi e sabbie limose potenti 20-30 cm.

15.7 – 16.4 m: argilla grigia.

16.4 – 18.4 m: limo argilloso grigio scarsamente sabbioso.

18.4 – 20 m: argilla limosa alternata a limi sabbiosi grigiastri inglobanti vari reperti organici con intervallati strati di limi sabbiosi e molto sabbiosi e sabbie limose potenti 20-30 cm.

S2-1994 (1797693.565 5077707.569 Metri)

0 – 1 m: terreno vegetale, limo debolmente sabbioso nocciola.

1 – 1.65 m: limo debolmente sabbioso nocciola, argilloso con macchie ocracee.

1.65 – 3.2 m: limo debolmente sabbioso grigio.

3.2 – 3.8 m: argilla limosa grigia con livelli torbosi nerastri.

3.8 – 7.5 m: argilla grigia debolmente limosa con livelletti sabbiosi.

7.5 – 14.5 m: argilla limosa grigia alternata a limi argillosi con livelli di sabbie fini limose e tracce di reperti organici con spessore di 10-30 cm. Alla base delle sabbie straterelli torbosi o di limi torbosi nerastri.

14.5 - 17.5 m: argilla limosa grigia alternata a limi argillosi con livelli di sabbie fini limose e tracce di reperti organici con spessore di 10-30 cm. Alla base delle sabbie presenti straterelli torbosi o di limi torbosi nerastri con spessore di 20-30 cm (quota 16.5).

17.5 – 18.6 m: limo debolmente argilloso grigio con tracce di sostanza organica.

18.6 – 20 m: argilla grigia limosa.

SS2 (1797965.028 5077717.094 Metri)

0 – 1.4 m: terreno di riporto, limo da sabbioso ad argilloso sabbioso nocciola; piccoli rari clasti ghiaiosi e pezzi di cotto sparsi.

1.4 – 2 m: alternanza di limo sabbioso grigio, limo argilloso; chiazze ocracee sparse.

2 – 4 m: argilla limosa grigia con livelletti centimetrici di limo sabbioso grigio e rari frammenti lignei.

S3 (1798319.200 5077677.406 Metri)

0 – 2 m: terreno costituito da argilla debolmente limosa nocciola passante a 1.6 m a limo sabbioso nocciola; fino a 0.2 m ciottoli sparsi e pezzi di calcestruzzo.

2 – 3.5 m: sabbia limosa grigia alternata a livelli centimetrici di limo argilloso grigio.

3.5 – 4.7 m: limo argilloso grigio; alternati livelletti centimetrici di limo sabbioso grigio.

4.7 – 8.1 m: argilla debolmente limosa grigia, passante gradualmente ad argilla debolmente limosa grigio scura organica; alternati livelli pluricentimetrici di torba fibrosa nerastra (6.4-6.5, 7.55-7.6 m).

8.1 – 8.5 m: limo argilloso debolmente sabbioso grigio.

8.5 – 14 m: ghiaia poligenica eterometrica, subangolosa, sabbiosa debolmente limosa grigia.

14 – 15.4 m: limo da argilloso debolmente sabbioso grigio a sabbioso grigio

15.4 – 16.2 m: sabbia limosa grigia.

16.2 – 19.5 m: argilla debolmente limosa grigia passante a 18.75 m a limo argilloso grigio chiaro.

19.5 – 20 m: alternanza di limo argilloso e limo debolmente sabbioso.

S3-1994 (1798439.850 5077637.719 Metri)

0 – 1.8 m: terreno di riporto, terreno vegetale con intervallati strati di ghiaia in matrice sabbiosa limosa marrone e limi sabbiosi marrone con sabbie limose alternate.

1.8 – 5.5 m: argilla limosa grigio scura con venature nocciola e tracce di resti vegetali.

5.5 – 6.1 m: argilla debolmente limosa grigia con abbondanti tracce di gusci di gasteropodi.

6.1 – 7.4 m: argilla limosa grigia.

7.4 – 8.3 m: limo argilloso grigiastro.

8.3 – 14.3 m: ghiaia poligenica gradata media e medio fine con sabbia e ghiaietto, arrotondata, ciottoli con Φ 5-7 cm, con stratificazioni più sabbiose a granulometria medio fine e senza ciottoli.

14.3 – 20 m: argilla limosa alternata a limi argillosi inglobanti reperti organici e straterelli di sabbie limose grigie potenti 10-30 cm con alla base livelli di torba marrone bruniccia.

S4-1994 (1798590.663 5077588.506 Metri)

0 – 2.2 m: terreno vegetale, limi argillosi marroni con intervallati strati di sabbie limose nocciola e marrone e limi sabbiosi marrone con livelli di argille.

2.2 – 6 m: limi sabbiosi grigiastri alternati a livelli di argille limose grigio-marroni spesso torbose o con livelli di torbe brunicce (20-30 cm).

6 – 7.4 m: argilla limosa grigia con resti vegetali; da 6.8 a 7.4 m presenti sabbia e clasti.

7.4 – 13.8 m: ghiaia poligenica medio e medio fine con sabbia e ghiaietto, arrotondata, ciottoli con Φ 7-10 cm con stratificazioni più sabbioso-limose e/o argilloso-limose inglobanti grani di ghiaia.

13.8 – 18.9 m: argilla limosa grigia alternata a limi argillosi e a straterelli di sabbie limose grigie con reperti organici e con alla base livelli di torbe marroni brunicce (10-20 cm).

18.9 – 20 m: argilla poco limosa grigia con torba marrone.

S6 (1798668.451 5077602.794 Metri)

0 – 0.2 m: terreno vegetale, limo sabbioso marrone.

0.2 – 2.5 m: limo sabbioso nocciola passante a 2.25 m a sabbia medio fine limosa nocciola.

2.5 – 7.2 m: limo sabbioso grigio passante a 2.8 m ad argilla limosa grigia, localmente torbosa marrone nerastra; verso la base l'argilla diventa limosa organica grigio scura con piccoli frammenti lignei.

7.2 – 7.7 m: limo sabbioso passante a sabbia medio fine limosa grigia.

7.7 – 14.1 m: ghiaia eterometrica, poligenica, da angolare a subarrotondata, sabbiosa debolmente limosa grigia che verso il basso diventa debolmente sabbiosa con tracce limose, grigia.

14.1 – 14.6 m: argilla limosa, localmente torbosa, grigia.

14.6 – 15.75 m: limo sabbioso grigio passante a 15 m a sabbia medio fine da con limo a limosa grigia.

15.75 – 20 m: argilla limosa, localmente debolmente torbosa, grigia; alternato (16.5-17, 17.05-17.15 m) livello di limo sabbioso grigio.

S9 (1798885.145 5077478.968 Metri)

0 – 2.5 m: limo argilloso nocciola passante a 1.6 m a argilla nocciola; chiazze ocracee sparse.

2.5 – 4.4 m: argilla limosa da grigio nocciola a grigia con R.V. e punti carboniosi nerastri.

4.4 – 5.2 m: torba fibrosa marrone.

5.2 – 6 m: argilla limosa organica grigio scuro.

6 – 6.65 m: limo sabbioso grigio passante a 6.2 m a sabbia fine limosa grigia.

6.65 – 12.2 m: ghiaia eterometrica, poligenica, per lo più subarrotondata, sabbiosa debolmente limosa grigia.

12.2 – 12.5 m: argilla limosa organica grigio scuro.

12.5 – 13.9 m: limo sabbioso passante a 12.6 m a sabbia medio fine limosa grigia.

13.9 – 14.7 m: argilla limosa grigia.

14.7 – 18.2 m: limo sabbioso passante a 15 m ad argilla limosa grigia; alternato (16.85-17.15 m) livello di limo sabbioso grigio.

18.2 – 18.6 m: limo sabbioso grigio.

18.6 – 19.9 m: sabbia medio fine limosa grigia passante a 19.8 m a limo sabbioso grigio.

19.9 – 20 m: argilla limosa grigia.

SS6 (1798958.170 5077467.856 Metri)

0 – 2.4 m: argilla limosa nocciola con chiazze ocracee.

2.4 – 4 m: argilla limosa grigia con punti carboniosi nerastri; alternato (2.7-2.85 m) livello di torba fibrosa marrone.

S14 (1799002.620 5077428.168 Metri)

0 – 1.8 m: argilla debolmente limosa da nocciola a grigio nocciola, vegetata fino a 0.1 m, con tracce di ossidazione e R.V. sparsi.

1.8 – 3.3 m: argilla organica debolmente limosa grigia con livello torboso (2.2-2.5 m).

3.3 – 5 m: torba fibrosa marrone nerastra, passante gradualmente ad argilla organica grigio scura con R.V. sparsi.

5 – 7 m: limo con sabbia fine grigia passante a 5.8 m a sabbia fine limosa grigia.

7 – 11 m: ghiaia eterometrica, poligenica, da subangolare a subarrotondata, sabbiosa debolmente limosa; alternato livelletto di ghiaia con sabbia fine grigia (7.9-8.1 m).

11 – 13.8 m: argilla debolmente limosa grigia; alternato livelletto di torba fibrosa marrone (12-12.18 m).

13.8 – 14.4 m: sabbia fine debolmente limosa grigia.

14.4 – 17.1 m: limo sabbioso grigio, passante a 15.4 m a sabbia fine limosa grigia; alternato livello di argilla debolmente limosa grigia (16.2-16.7 m).

17.1 – 17.7 m: limo sabbioso grigio con R.V.

17.7 – 17.8 m: sabbia limosa grigia con alla base torba fibrosa marrone.

17.8 – 20 m: limo da argilloso a con argilla grigio; alternato livelletto di limo sabbioso (17.85-17.95 m); presente livelletto pluricentrico di argilla organica con R.V. (19.55-19.8 m).

S13 (1799426.325 5077393.243 Metri)

0 – 1.6 m: terreno superficiale costituito da misto eterogeneo ed eterometrico di pezzi di calcestruzzo, cotto e clasti calcarei in matrice marrone; vegetato fino a 0.1 m.

1.6 – 7 m: argilla debolmente limosa marrone con R.V. sparsi e fasce rossicce; alternato livello fibroso di torba marrone con R.V. sparsi (3.8-4.2 m).

7 – 14.1 m: limo debolmente argilloso grigio a tratti debolmente sabbioso; alternati livelletti di torba fibrosa marrone (11.3-11.4, 11.7-11.75, 11.9-12, 12.8-12.9 m).

14.1 – 14.5 m: limo con sabbia grigio.

14.5 – 15 m: argilla limosa grigia; alternato livello centimetrico di torba fibrosa marrone (14.8 m).

15 – 17 m: limo da debolmente sabbioso a sabbioso grigio.

17 – 18.2 m: sabbia limosa grigia.

18.2 – 20 m: limo debolmente argilloso, a tratti debolmente sabbioso.

Descrizione stratigrafica dei sondaggi presenti nella sezione E-F.

CNC1 (1799634.298 5074224.613 Metri)

0 – 0,40 m: Strato arativo o smosso dalla costruzione della strada; limo con argilla (< 10%), marrone giallastro chiaro (2,5Y 6-5/4); effervescenza 4. Limite inferiore chiaro, erosivo, da ondulato a irregolare.

0,40 – 0,65 m: Limo sabbioso (40%, sabbia fina), grigio marrone (2,5Y 6-5/3), effervescenza 4 violenta; screziature 10YR 5/6, 2 mm, 20%. Presenza di resti di mattoni moderni, rari carboni e ciottolini. Limite inferiore abrupto.

0,65 – 0,80 m: Limo sabbioso (sabbia circa 30%, fina), marrone giallastro chiaro (2,5Y 6/4), effervescenza 4 violenta. Screziature da comuni a diffuse, 2,5Y 7/6, 2 mm, 15%. Assenza di reperti o altri indicatori. Limite inferiore abrupto.

0,80 – 1,0 m: Alternanze centimetriche di limi sabbiosi (sabbia circa 30%, fina) e limi; grigio giallastro chiaro (2,5Y 6/1-2), effervescenza 4 violenta; screziature 2,5Y 6/6, 2 mm, 10%. Condizioni di passaggio tra lo strato superiore e quello inferiore. Limite inferiore chiaro.

1,0 – 1,5 m: Limo, grigio giallastro chiaro (2,5Y 6/1-2), effervescenza 4 violenta; screziature 2,5Y 6/6, 15%, 2 mm. Limite inferiore abrupto.

1,5 – 1,55 m: Livello sabbioso (sabbia fina), grigio giallastro chiaro (2,5Y 6/1-2), effervescenza 4 violenta; screziature 2,5Y 6/6, 15% 2 mm. Limite inferiore chiaro.

1,55 – 1,65 m: Limo con sabbia (10%) e argilla (10%), grigio giallastro chiaro (2,5Y 6/1-2), effervescenza 4 violenta; screziature 2,5Y 6/6, 20%, 2 mm. Limite inferiore abrupto.

1,65 – 1,70 m: Limo con argilla (18%), grigio giallastro chiaro (2,5Y 6/1-2), effervescenza 4 violenta; screziature 2,5Y 6/6, 20%, 2 mm. Limite inferiore chiaro.

1,70 – 2,10 m: Limi sabbiosi (30%, sabbia fina) in alternanze centimetriche con sabbie limose, 2,5Y 5/3; effervescenza 2-3, screziature 2,5Y 5/6, 30%, 1-2 mm. Rari frammenti vegetali millimetrici. Limite inferiore netto.

2,10 – 2,23 m: Sabbie limose (limo 30%), 2,5Y 5/3, effervescenza 3; screziature 2,5Y 5/6, 30%, 1-2 mm; presenza di radici; limite inferiore netto.

2,23 – 2,36 m: Limi con sabbia (20%) e argilla (15%), 2,5Y 5/3, screziature 2,5Y 5/6, 30%, 2 mm. Effervescenza 3, limite inferiore abrupto.

2,36 – 2,67 m: Limi argillosi (20%) in laminazioni da subcentrimetriche a millimetriche 2,5Y 5/2 con screziature primarie 2,5Y 5/6, 20%, 2 mm e secondarie 2,5Y 5/3, 10%, 2 mm; effervescenza 3-4, limite inferiore chiaro, transizionale.

2,67 – 2,97 m: Limi argillosi (25% argilla), 2,5Y 6/1, effervescenza 4, presenza di laminazioni millimetriche poco evidenti, presenza di radici (Φ medio 3 mm, comuni), limite inferiore netto.

2,97 – 3,00 m: Limi argillosi (25%), 2,5Y 6/1, in laminazioni millimetriche con materiale più organico 2,5Y 5/2, effervescenza 4, limite inferiore chiaro.

3,00 – 3,03 m: Alternanze di limi argillosi e limi con argilla da 1 cm di spessore, colore primario 2,5Y 6/2 e secondario 2,5Y 7/1, effervescenza 4. Presenza di frammenti vegetali millimetrici. Limite inferiore netto.

3,03 – 3,18 m: Alternanze di limi argillosi e limi con sabbia (30%), 2,5Y 6/2 e secondario 2,5Y 7/1, effervescenza 4. Presenza di frammenti vegetali e forse radici. Limite inferiore chiaro.

3,18 – 3,45 m: Limi argillosi (30%), 6/10Y effervescenza 4, caratteri d'idromorfia. Presenza di frammenti vegetali e rari gasteropodi continentali piccoli (2-3 mm). Limite inferiore chiaro.

3,45 – 3,80 m: Limi argillosi (25%) con presenza di materia organica dispersa, più abbondante tra 3,70-3,80 m. Colore primario 2,5Y 7/1 e secondario 2,5Y 5/2; effervescenza 3. Probabile presenza di bioturbazioni forse dovute ad attività vegetale (?). Presenza comune di gasteropodi continentali più abbondanti tra 3,70-3,80 m. Limite inferiore netto, forse disturbato da bioturbazioni.

3,80 – 3,85 m: Limi argillosi (25%) organici, 2,5Y 4/2-3, effervescenza 2-3. Presenza di resti di radici e frammenti di gasteropodi continentali. Limite inferiore abrupto ma bioturbato.

3,85 – 3,95 m: Alternanze di limi argillosi 2,5Y 6/1, effervescenza 3 e limi argillosi organici 2,5Y 5-4/2, effervescenza 3. Presenza di bioturbazioni e resti di radice. Limite inferiore chiaro, in transizione allo strato di limi torbosi sottostanti

3,95 – 4,03 m: Limi argillosi e limi torbosi in laminazioni plurimillimetriche, colore primario 2,5Y 5/2 e secondario 2,5Y 4/3, effervescenza 3. Presenza di gasteropodi tipo polmonata interi e frammentati, frammenti vegetali. Limite inferiore netto.

4,03 – 4,19 m: Limi con argilla (20%) organici, 5-4/10Y, effervescenza 1-2. Presenza di frammenti di gasteropodi continentali, frammenti vegetali e resti di piante quasi interi, subcentimetrici. Limite inferiore abrupto.

4,19 – 4,24 m: Come sopra ma con abbondante frazione vegetale, quasi torboso; 2,5Y 3/3. Limite inferiore netto

4,24 – 4,25 m: Livello di limo grigio 7/N, effervescenza 3, bioturbato. Limite inferiore netto.

4,25 – 4,36 m: Da limi torbosi a limi organici 2,5Y 3/1, effervescenza 0-1. Presenza di resti di fusto di piante Poaceae. Limite inferiore chiaro.

4,36 – 4,40 m: Limi argillosi (argilla 20%) organici che divengono meno organici verso il fondo, 2,5Y 4/2 effervescenza 1-2. Presenza di frammenti vegetali e di gasteropodi. Limite inferiore abrupto.

4,40 – 4,47 m: Limi torbosi 2,5Y 3/1, presenza di macroresti vegetali. Limite inferiore abrupto.

4,60 – 4,70 m: Limi argillosi (argilla 30%) con rare laminazioni di limi organici 2,5Y 6/1, effervescenza 2-3. Presenza di resti vegetali millimetrici e a 4,64 m trovato un esemplare di Planorbis. Limite inferiore chiaro.

4,64 – 4,70 m: Limi argillosi (30%) con laminazioni rare di limi organici 2,5Y 6/1, effervescenza 2-3. presenza di resti vegetali millimetrici, limite inferiore chiaro.

4,70 – 4,72 m: Limi torbosi 2,5Y 3/1 con macroresti vegetali. Limite inferiore netto.

4,72 – 4,80 m: Limi argillosi (30%) gley 2,5Y 6/1, effervescenza 3, con laminazioni di limo organico millimetriche, nei primi 5 cm. Limite inferiore abrupto.

4,80 – 5,03 m: Limi argillosi (argilla 30%) 4/10Y, effervescenza 2-3, abbondante presenza di gasteropodi e molluschi in genere di ambiente salmastro, generalmente individui piccoli, millimetrici. Tra 4,87-4,89 m livello leggermente più chiaro, 5/10Y, con limite superiore ondulato e inferiore graduale. Tra 4,70-4,80 m forse presenza di bioturbazioni. Macroresti vegetali con presenza di fusti di Poaceae.

5,03 – 5,34 m: Limi argillosi (argilla 30%) con colore più scuro dello strato superiore, 4/10Y passante a 5/10Y; presenza molto abbondante di frammenti di gasteropodi, molluschi, bivalvi salmastri anche interi, Cerasoderma glaucum e Loripes lacteus. Forse al tetto faune di acqua dolce

(?) come Radex sp. Alternanze centimetriche con limi argillosi più scuri 4/10Y, effervescenza 2, limite inferiore chiaro.

5,34 – 5,42 m: Alternanze centimetriche di limi argillosi 5/10Y e 6/10Y chiari, bioturbate, poco evidenti. Abbondante presenza di molluschi lagunari, effervescenza 2-3; presenza di frammenti vegetali anche abbondanti, millimetrici. Limite inferiore chiaro.

5,42 – 5,78 m: Limi argillosi (argilla 30%) gley, 5/10Y, effervescenza 2-3; presenza molto abbondante (più che nello strato soprastante) di molluschi lagunari (*Cerastoderma glaucum*) interi e frammentati, al fondo fino al 20%. A 5,58 m livello millimetrico di limo argilloso 5/5GY, effervescenza 3. I molluschi sono abbondanti sotto i 5,59 m. Limite inferiore abrupto, ondulato.

5,78 – 5,94 m: Limi argillosi gley 4/10Y con abbondanti molluschi lagunari, limite inferiore graduale poco evidente; da 5,92 transizione a limi argillosi 5/10Y, limite inferiore chiaro.

5,94 – 5,97 m: Limi argillosi (30%) 4/10Y con rari frammenti di molluschi lagunari e abbondanti frammenti vegetali millimetrici, effervescenza 0; limite inferiore irregolare, bioturbato o erosivo sulle torbe sottostanti.

5,97 – 6,05 m: Limi torbosi addensati 2,5Y 3/1 con frammenti vegetali anche plurimillimetrici. Alternanza con livelli millimetrici di limo grigio. A 6,02 m incluso di limo grigio con effervescenza 0. Al fondo livello di 6 mm di limo organico 2,5Y 3/1, effervescenza 1. Limite inferiore netto con le torbe sottostanti.

6,05 – 6,13 m: Torbe molto belle con macroresti pluricentimetrici anche legnosi, compatti con stratificazione evidente, 10YR 2/1, limite inferiore abrupto, ondulato.

6,13 – 6,23 m: Limi torbosi - torbe limose, 2,5Y 2/2, con stratificazione centimetrica evidente e presenza di resti vegetali molto spessi, non legnosi; effervescenza 0, limite inferiore abrupto, probabilmente bioturbato.

6,23 – 6,32 m: Limi organici 5Y 3/2, effervescenza 0, con presenza di porzioni dello strato superiore probabilmente dovuto a bioturbazione. Rari frammenti vegetali millimetrici. Al fondo resti di gasteropodi forse lagunari; limite inferiore netto.

6,32 – 6,64 m: Limi argillosi (30%), 2,5Y 5/2, effervescenza 2, molto plastico con presenza di molluschi lagunari (*Cerastoderma glaucum*) da abbondanti a molto abbondanti soprattutto da 6,55 a 6,64 m (20%), presenza di piccoli gasteropodi 1-2 mm interi turricolati (*Setia* sp. e *Ovatella* sp.), limite inferiore graduale.

6,64 – 6,85 m: Limi argillosi (30%), 2,5Y 5/1, sembra più scuro dello strato soprastante, molto plastico con presenza di molluschi lagunari (*Cerastoderma glaucum*), effervescenza 2-3, limite inferiore chiaro.

6,85 – 7,90 m: Limi argillosi (30%), effervescenza 2, 5Y 5-4/1 con presenza di molluschi lagunari. Livello con 4 *Cerastoderma glaucum* tra 6,86 e 6,89. In genere presenza di molluschi lagunari (*Cerastoderma glaucum* e *Loripes lacteus*) di dimensioni anche 3-4 cm; in vari casi con valve ancora in connessione; dall'aspetto delle faune e del sedimento sembrerebbe una facies più salmastra di quelle soprastanti. Presenza di alcuni bivalvi con fenomeni di degradazione della parte esterna della valva (tipo annerimento). Livello più ricco di frammenti a 7,28-7,34 m. Nei primi 70 cm abbondante presenza di bivalvi tipo (*Loripes lacteus*). A 7,29 frammento di gasteropode tipo *Cerithium raeticulatum*.

7,90 – 8,15 m: Limi argillosi (25-30%), 5/10Y con abbondanti frammenti vegetali millimetrici e molluschi lagunari (*Cerastoderma glaucum*), effervescenza 2-3; verso il fondo presenza di inclusi di torba appartenenti allo strato sottostante. Limite inferiore netto.

8,15 – 8,25 m: Limi torbosi e torbe stratificate con macroresti vegetali, 10YR 2/1. A 8,19 m livello di limo argilloso con caratteri uguali allo strato soprastante, effervescenza 0-1; limite inferiore chiaro.

8,25 – 8,36 m: Torbe con macroresti vegetali e resti di legno. A 8,36 m frammento legnoso subcentimetrico. Limite inferiore chiaro.

8,36 – 8,46 m: Limi torbosi con presenza di laminazione poco evidente e livelli più ricchi in sostanza organica, 10YR 2/1, effervescenza 0. Presenza di rari macroresti vegetali, limite inferiore chiaro.

8,46 – 8,60 m: Torbe limose, 10YR 2/1 con evidente stratificazione marcata anche da macroresti vegetali disposti orizzontalmente; limite inferiore chiaro.

8,60 – 9,15 m: Torbe con evidente stratificazione millimetrica a centimetrica data da alternanza di strati chiari 2,5Y 3/1 e scuri 2,5Y 2,5/1; presenza di macroresti vegetali. A 9,0 m possibile resto di insetto; a 9,1 m frammento legnoso. Limite inferiore chiaro.

9,15 – 9,18 m: Torbe stratificate con resti legnosi molto resistenti, 2,5Y 3/1.

9,18 – 9,26 m: Limi argillosi fortemente organici, 2,5Y 2,5/1, effervescenza 0, presenza di macroresti vegetali; la facies sembra passaggio da suolo torboso a terreno non organico. Limite inferiore non noto per problemi di manovra del carotaggio

9,26 – 9,55 m: Probabile testa della manovra del carotaggio con rimaneggiamento del sedimento campionato. Limi sabbiosi e sabbie limose fini (Φ medio 200 μ m), effervescenza 3; forse presenza di bioturbazioni con limi sabbiosi organici, potrebbe trattarsi di attività biologica legata a piante e animali dello strato torboso soprastante. Limite inferiore netto, probabilmente per manovra.

9,55 – 9,70 m: Alternanze centimetriche di sabbie e sabbie limose, effervescenza 3-4 (Φ medio 200 μ m), clasti poligenici, molti di colore scuro, probabilmente appartenenti al bacino del Tagliamento. Tracce di radici e bioturbazioni simili a quelle descritte superiormente; limite inferiore abrupto.

9,70 – 9,87 m: Alternanze centimetriche e millimetriche di limi con sabbie (15%) e argilla (20%); 7/N, effervescenza 4 quasi violenta, screziature 8/N 20% 1-2 mm (forse non sono screziature, ma veli di limo). Probabile presenza di concrezioni carbonatiche soffici < 5%. Limite inferiore abrupto, ondulato

9,87 – 10,08 m: Da limi sabbiosi (30%) a limi con argilla (20%), 2,5Y 5/1 con laminazioni 7/N, effervescenza 3-4. A 10 m un ciottolino arrotondato di calcare con Φ medio 1,5 cm. Presenza di concrezioni carbonatiche dure con Φ max 1 cm e Φ medio circa 2 mm, 15 %. Frammenti millimetrici di gasteropode a guscio sottile, probabilmente continentale. Limite inferiore chiaro.

10,08 – 10,23 m: Limi argillosi (15%), 2,5Y 4/1, effervescenza 2-3. Presenza di concrezioni carbonatiche dure fino a 1 cm di Φ medio e presenza di frustoli carboniosi 1 mm. Limite inferiore chiaro.

10,23 – 10,31 m: Come sopra, ma presenza di concrezioni carbonatiche dure e soffici (20%), effervescenza della matrice 3, limite inferiore chiaro.

10,31 – 10,48 m: Alternanze centimetriche con argille 2,5Y 6/2 e limi con argilla 2,5Y5/2. Effervescenza 3-4; presenza di concrezioni carbonatiche 2-3 mm, 5% dure. Limite inferiore chiaro.

10,48 – 10,61 m: Da limi sabbiosi a sabbie limose, 2,5Y 6-5/1, effervescenza 4, laminazioni centimetriche; clasti poligenici con Φ medio inferiore a 200 μ m. Limite inferiore netto, erosivo.

10,61 – 10,80 m: Ghiaie poligeniche ben arrotondate con Φ_{\max} 2,5 cm in matrice limoso sabbiosa (30%) consolidate e forse leggermente cementate, effervescenza 4 violenta. Limite inferiore abrupto.

10,80 – 11,00 m: Sabbie medio grossolane con laminazione centimetrica, 2,5Y 6-5/1, completamente rimaneggiate dal sondaggio, effervescenza 4. Limite inferiore abrupto.

11,0 – 11,50 m: Ghiaie in matrice sabbiosa medio-fine con limo (20%); Φ_{medio} dei clasti 1 cm e Φ_{\max} 2,5 cm. Litologie poligeniche principalmente calcari, probabile bacino del Tagliamento. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

11,50 – 11,60 m: Ghiaie in matrice limosa consolidata con Φ_{medio} 1 cm. Rimaneggiato dal carotaggio. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

11,60 – 12,0 m : Ghiaie in matrice sabbiosa con Φ_{medio} 1,5 cm e Φ_{\max} 3-4 cm. Rimaneggiato da manovra. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

12,0 – 12,70 m: Ghiaie fini con Φ_{medio} 0,5 cm, probabilmente lavate della matrice durante il carotaggio. Presenza di granulo di quarzo a 12,20 m. Rimaneggiato da carotaggio. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

12,70 – 13,50 m: Limi sabbiosi con ghiaie (40%), probabile testa di manovra a 13,05. Clasti fino a 2-3 cm di Φ_{medio} . Al fondo limo consolidato con ghiaie aventi Φ_{medio} di 0,5 cm,. A 13,30 m granulo di quarzo. Rimaneggiato da carotaggio. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

13,50 – 13,90 m: Ghiaie sciolte con matrice limoso-sabbiosa. Φ_{medio} dei clasti circa 1 cm; Φ_{\max} 2-3 cm. Rimaneggiato da carotaggio. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

13,90 – 14,0 m: Ghiaie in matrice limosa debolmente addensate, 2,5Y 7/1 con Φ_{medio} 0,5 cm e Φ_{\max} 2,5 cm. Rimaneggiato da manovra. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

14,0 – 15,75 m: Ghiaie eterometriche con Φ_{medio} 0,5-1 cm e Φ_{\max} 5 cm; 20% di matrice data da limo con argilla (10%) biancastra. Litologie varie soprattutto calcari; clasto di arenaria fine con muscovite (roccia tipo Formazione di Werfen del periodo Triassico della Carnia). A 14,80 m un clasto di arenaria media grigio-verdastra (formazioni della molassa o permo-triassiche ??). Carota rimaneggiata da carotaggio. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

15,75 – 16,0 m: Sabbie medie Φ_{medio} 350 μm , probabilmente rimaneggiato da manovra, con alcuni clasti di 3-5 cm all'interno. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

16,0 – 16,45 m: Ghiaie sciolte in matrice limoso-sabbiosa grigio biancastra con clasti medi di 1 cm, Φ_{\max} 1,5 cm. Al fondo limo consolidato con ghiaie 1 cm. Limite inferiore abrupto.

16,45 – 17,0 m: Sabbie ghiaiose (30% ghiaie); sabbia grossolana al limite con le ghiaie. Limite inferiore non noto per problemi carotaggio.

17,0 – 17,12 m: Ghiaie in matrice sabbiosa mediamente consolidate, 7/N, effervescenza 4, limite inferiore erosivo.

17,12 – 17,62 m: Ghiaie sciolte in matrice sabbiosa (30%), clasti arrotondati con Φ_{medio} 1-1,5 cm, Φ_{\max} 5 cm. Limite inferiore abrupto, erosivo.

17,62 – 17,67 m: Ghiaie in matrice sabbiosa limosa, mediamente addensate, limite inferiore irregolare, erosivo.

17,67 – 17,75 m: Limi con argilla (20%), 2,5Y 5/2 e 2,5Y 6/3 di spessore subcentimetrico alternati a ghiaie in matrice sabbiosa con Φ medio 0,8 cm; effervescenza 2. Limite inferiore non noto per problemi di manovra.

17,75 – 18,00 m: Testa della manovra con rimaneggiamento del campione. Limi con argilla (15%), presenza di ciottoli isolati con Φ medio 1-1,5 cm, forse laminazioni di argilla; effervescenza 2-3. Limite inferiore probabilmente chiaro.

18,0 – 18,23 m: Limi con argilla (20%) con presenza di ciottoli isolati con Φ max 1 cm (5%), laminazioni millimetriche poco evidenti, colore 2,5Y 6/1. Forse frammenti millimetrici di gasteropodi continentali, effervescenza 3. Limite inferiore netto.

18,23 – 18,32 m: Alternanze centimetriche di limi con sabbie e limi argillosi, 2,5Y 7/1, effervescenza 3-4. Il Φ medio delle sabbie è di circa 200 μ m; il limite inferiore è netto.

18,32 – 18,50 m: Alternanze centimetriche di sabbie fini e limi con sabbie, effervescenza 3-4, 2,5Y 7/1.

18,50 – 18,63 m: Limi con argilla (15%) laminati in livelli di 5-6 mm con vari livelli limoso-sabbiosi millimetrici, limite inferiore netto.

18,63 – 18,83 m: Alternanze centimetriche di sabbie limose, sabbie (200 μ m) e limi con sabbie, 2,5Y 7/1, effervescenza 3-4. Tra 18,78-18,80 m presenza di frammenti vegetali millimetrici nelle sabbie. Limite inferiore netto, erosivo.

18,83 – 19,05 m: Limi con argilla (15%) debolmente organici, 2,5Y 5/1-2 in laminazioni millimetriche; le la mine scure 2,5Y 4/1, effervescenza 3-4; al tetto frustoli carboniosi millimetrici, limite inferiore netto.

19,05 – 19,21 m: Limi con argilla (15%), 5Y 6/1 in laminazioni millimetriche, effervescenza 4 con presenza di screziature 5Y 7/4 10%. Presenza di frammenti vegetali e gasteropodi continentali millimetrici molto rari; tracce di radici asfittiche; limite inferiore erosivo.

19,21 – 19,26 m: Limi con argille debolmente organici, 5Y 5/2, effervescenza 3. Al tetto è presente una lamina millimetrica scura, 5Y 4/1, forse data da accumulo di sostanza organica; limite inferiore chiaro.

19,26 – 19,32 m: Alternanze centimetriche di limi e limi con argille 5Y 6/1, effervescenza 3-4. Limite inferiore abrupto, erosivo.

19,32 – 19,53 m: Alternanze centimetriche di limi con sabbia e argille e sabbie limose, 5Y 5/1, effervescenza 4. Tracce di radici asfittiche e screziature 5Y 6/3 10% 2 mm negli ultimi 10 cm. Limite inferiore non noto.

CNC2 (1797769.616 5074255.250 Metri)

0,0 – 0,26 m: Strada di campagna – strato arativo. Limo con argilla (18%) e sabbia (15%), 2,5Y 5/3-4, effervescenza violenta. Limite inferiore netto. Probabilmente si tratta di materiale riportato.

0,26 – 0,33 m: Limo con argilla (15%) e sabbia (20%), 2,5Y 5/2, effervescenza 4, screziature 5%, 2,5Y 6/8 2 mm. Laminazione millimetrica e presenza di frammenti di carbone e conchiglie tipo Polmonata. Limite inferiore abrupto, struttura planare (tipo Blady structure) probabilmente creata dal passaggio sulla strada di carichi pesanti.

0,33 – 0,43 m: Limi con argilla (15%) e con sabbia (10%) in laminazioni millimetriche 2,5Y 5/3 con screziature 2,5Y 6/4 30% 2 mm e 2,5Y 5/1, 10% 1 mm. Resti vegetali e carbone millimetrici; effervescenza 4. Limite inferiore da netto ad abrupto.

0,43 – 0,49 m: Limi con argilla (15%) e sabbia (15%), 2,5Y 5/1, effervescenza 4, limite inferiore netto.

0,49 – 0,57 m: Limi con sabbia (15%) in laminazioni millimetriche 2,5Y 6-5/4 e secondariamente 2,5Y 5/1 e 2,5Y 4/3; effervescenza 4, presenza di livelli millimetrici a carbone. Al fondo lamine con spessore crescente fino a 3 mm. Limite inferiore netto

0,57 – 0,59 m: Limi con sabbia (20%) gialli 2,5Y 5/4, effervescenza 4; limite inferiore erosivo.

0,59 – 1,10 m: Limi con sabbia (10%) e argilla (15%), effervescenza 4, 2,5Y 6/3 con screziature 2,5Y 6/6, 25%, 1-2 mm; laminazioni centimetriche e millimetriche. Verso il fondo lo strato diviene più sabbioso; limite inferiore chiaro.

1,1 – 1,2 m: Limi con sabbia (10%) e argilla (15%), effervescenza 4; colore 2,5Y 6/3 con screziature 2,5Y 6/6, 25%, 1-2 mm; laminazioni centimetriche e millimetriche sabbiose (Φ medio 200 μ m). Limite inferiore abrupto.

1,2 – 1,35 m: Sabbia con limo (25%) gialla 2,5Y 6/3, effervescenza 4. Limite inferiore chiaro.

1,35 – 1,50 m: Sabbia limosa (limo 30%) in laminazioni millimetriche e subcentimetriche; effervescenza 4 e limite inferiore chiaro.

1,50 – 1,77 m: Sabbia limosa (limo 30%) omogenea effervescenza 4 e limite inferiore chiaro.

1,77 – 2,0 m: Sabbia incoerente con Φ medio 200 μ m. Gialla, 2,5Y 7/2-3, effervescenza 4, limite inferiore chiaro.

2,0 – 2,3 m: Alternanze centimetriche di limi con sabbie e limi sabbiosi, 2,5Y 6-5/3. Effervescenza 3-4, screziature 2,5Y 6/8, 5%, 1 mm; limite inferiore chiaro.

2,3 – 2,42 m: Limi sabbiosi alternati a sabbie con limo, effervescenza 3-4, 2,5Y 6/2-3, screziature 2,5Y 7/6, 20%, 2 mm; limite inferiore chiaro.

2,42 – 2,80 m: Sabbia medio-fina grigia, sciolta, Φ medio 300-400 μ m, effervescenza 4; fluidificata da manovra, limite inferiore non noto.

2,8 – 3,0 m: Sabbia media con Φ medio 400 μ m, addensata, effervescenza 4, colore biancastro, clasti poligenici, probabile bacino del Tagliamento; limite inferiore chiaro.

3,0 – 3,45 m: Alternanze di limi sabbiosi (sabbia 30%) e limi con sabbie (20%), effervescenza 3-4, 2,5Y 5/1. Tra 3,12-3,23 m livelli ricchi in frammenti vegetali fluitati; limite inferiore chiaro.

3,45 – 3,65 m: Limi con sabbia (20%) e argilla (15%) in alternanze centimetriche, 2,5Y 5/1, effervescenza 3-4; limite inferiore chiaro.

3,65 – 4,12 m: Alternanze di limi sabbiosi, sabbie limose e limi con argilla, 2,5Y 6/1, effervescenza 3. Rare tracce di radici, limite inferiore graduale.

4,12 – 4,3 m: Alternanze subcentimetriche di limi con argilla e limi con sabbie, 2,5Y 6/1, effervescenza 3-4; radici ben conservate con screziature lungo di esse 2,5Y 7/6, 1 mm; limite inferiore abrupto, ondulato forse per bioturbazioni.

4,3 – 4,33 m: Limi argillosi (20%) debolmente organici, 2,5Y 6-5/1, effervescenza 3, presenza di bioturbazioni; intervallo forse parzialmente rielaborato dalla manovra, come il limite inferiore abrupto che appare ondulato.

4,33 – 4,57 m: Limi con argilla, 2,5Y 6/1, effervescenza 4, abbondanti frammenti di radici (probabilmente cannuccia d'acqua) e laminazioni subcentimetriche poco evidenti. Limite inferiore chiaro.

4,57 – 4,68 m: Transizione da limi argillosi 2,5Y 6/1 a limi argillosi organici 2,5Y 4/1, evidenti tracce di bioturbazione e frammenti di limo dello strato superiore inglobati. Resti vegetali millimetrici ben conservati, effervescenza 2. Alla base livello millimetrico di torboso. Limite inferiore chiaro.

4,68 – 5,0 m: Limi fortemente organici 2,5Y 3/1, effervescenza 0; limite inferiore chiaro.

5,0 – 5,43 m: Intervallo rielaborato dalla manovra. Sabbie medio-fini (Φ medio 300 μ m) con limo (10-20%), scarsamente addensate, 2,5Y 6/2; clasti poligenici probabilmente appartenenti al bacino del Tagliamento. Presenza di inclusi di terreno limoso organico. Limite inferiore probabilmente abrupto.

5,43 – 5,45 m: Limi grigiastri chiari 2,5Y 6/2, con probabile laminazione centimetrica, effervescenza 4. Al letto passaggio alla torba sottostante abrupto, incurvato da operazioni di carotaggio.

5,45 – 5,52 m: Limi organici, 10YR 3/2 con presenza di frammenti vegetali, effervescenza 2. Inclusi di torba forse per bioturbazione provenienti dallo strato inferiore.

5,52 – 5,64 m: Torbe con limo fortemente organico, 10YR 3/2, effervescenza 0; abbondante presenza di macroresti, probabilmente fusti di *Phragmites*. Evidente stratificazione da millimetrica a centimetrica; limite inferiore abrupto.

5,64 – 5,79 m: Torbe fittamente stratificate e formate da macroresti di cannuccia d'acqua, 2,5Y 3/2; i fusti delle piante sono disposti orizzontalmente. Effervescenza 0. Molto addensate. Limite inferiore chiaro.

5,79 – 5,88 m: Limi argillosi (25%), caratteri gley 5/10Y, effervescenza 0, presenza di frammenti vegetali. Presenza di tracce molto scure, 5/N, subparallele e ad andamento suborizzontale, larghe 1 mm e forse legate ad attività biologica. Limite inferiore chiaro.

5,88 – 6,16 m: Limi argillosi (25%), 3-4/10Y, con presenza di frammenti di molluschi lagunari; abbondante presenza di tracce scure, 4/N, tipo bioturbazioni dello strato superiore 2-3 mm; potrebbe anche trattarsi di fatturazione del campione per carotaggio (?). I molluschi lagunari sono più abbondanti tra 6,06-6,12 m e a 6,1 m trovato esemplare tipo *Teodoxus fluviatilis*. Limite inferiore ondulato irregolare.

6,16 – 6,77 m: Limi argillosi e argille limose (30% e oltre), effervescenza 2-1 con abbondanti resti di molluschi lagunari, 5/10Y – 2,5Y 5/2; tra 6,18-6,27 colore leggermente più chiaro. Tra 6,22-6,42 m presenza massiccia di gasteropodi millimetrici bianchi turricolati (*Setia* sp.). Tra 6,42-6,55 m frammenti e molluschi interi più abbondanti, *Cerastoderma glaucum*. Limite inferiore da netto a chiaro, con andamento ondulato.

6,77 – 6,95 m: Limi argillosi (25%) 4/10Y, con abundantissimi resti (fino al 10-20% del campione) di molluschi lagunari interi e loro frammenti (*Cerastoderma glaucum* e *Loripes lacteus*); molti sono gasteropodi turrulari millimetrici (*Setia* sp.). Effervescenza 2; limite inferiore abrupto.

6,95 – 7,10 m: Limi argillosi (30%), effervescenza 2, 4/10Y con presenza di molluschi lagunari e frammenti (*Cerastoderma glaucum*, *Loripes lacteus*) anche se notevolmente meno abbondanti che nello strato soprastante. Limite inferiore ondulato.

7,10 – 7,18 m: Limi argillosi (30%), 5-4/10Y, effervescenza 2-3. Presenza scarsa di molluschi lagunari (*Cerastoderma glaucum* e *Loripes lacteus*). Limite inferiore graduale.

7,18 – 7,30 m: Limi argillosi, 4/N-10Y, effervescenza 2 con abbondante presenza di molluschi lagunari interi e frammentati (*Cerastoderma glaucum* e *Loripes lacteus*). Incluse alcune porzioni delle torbe sottostanti forse per contatto erosivo o bioturbazione. Frammenti vegetali microscopici comuni. A 7,20 m grande bivalve. Limite inferiore abrupto ondulato, erosivo

7,30 – 7,40 m: Torbe e limi organici alternati e ben stratificati in livelli di spessore 1cm, 10YR 2/1. Presenza di macroresti vegetali anche centimetrici. Limite inferiore chiaro.

7,40 – 7,53 m: Transizione tra torbe soprastanti e limi argillosi inferiori; colore da 5Y 3/2 a 5Y 5/2, effervescenza 1-2. Presenza di resti vegetali; verso il fondo rari frammenti millimetrici di molluschi lagunari. Limite inferiore chiaro.

7,53 – 7,70 m: Limi argillosi (20%) 5Y 5/1, effervescenza 2-3, presenza di pochi molluschi lagunari. Limite inferiore abrupto.

7,70 – 7,79 m: Limi argillosi-argille limose (30-40%) 5Y 5/1, con molluschi lagunari e frammenti; molti gasteropodi millimetrici, effervescenza 2-3. Limite inferiore abrupto.

7,79 – 8,20 m: Limi argillosi-argille limose (30-40%) 5Y 5/1, con molluschi lagunari e frammenti (*Cerastoderma glaucum* e *Loripes lacteus*); molti gasteropodi millimetrici (*Setia* sp.), effervescenza 2-3. Presenza di tracce più scure forse per attività biologica, larghezza 3 mm; tracce di radici con colore 5-4/10Y; lo strato è un po' più scuro tra 7,90-8,10 m. Limite inferiore chiaro.

8,20 – 8,36 m: Limi argillosi 5-6/10Y con presenza di molluschi e frammenti molto abbondanti quasi 30% (*Cerastoderma glaucum* e *Loripes lacteus*); effervescenza 2. Limite inferiore da chiaro ad abrupto.

8,36 – 8,40 m: Limi argillosi 5-6/10Y con presenza di molluschi e frammenti (5%) (*Cerastoderma glaucum* e *Loripes lacteus*); effervescenza 2. Limite inferiore da chiaro ad abrupto, ondulato.

8,40 – 8,45 m: Limi argillosi 4/10Y, effervescenza 2-3; presenza di pochi molluschi. Si riconosce dagli strati soprastanti e sottostanti per il colore più scuro con limiti inferiore e superiore ondulati.

8,45 – 8,58 m: Limi argillosi 5-6/10Y con presenza di molluschi e frammenti (5%) (*Cerastoderma glaucum* e *Loripes lacteus*); effervescenza 2. Limite inferiore chiaro.

8,58 – 8,90 m: Limi argillosi 4/10Y, effervescenza 2. Presenza di frammenti e molluschi interi; a 8,75 livello con 3 *Cerastoderma glaucum* centimetrici. Tra 8,80-8,90 m minor presenza di fauna; limite inferiore chiaro ondulato.

8,90 – 9,22 m: Limi argillosi 4/10Y-5Y 4/2, effervescenza 1-2; presenza comune di molluschi (riconoscibili *Cerastoderma glaucum*) e frammenti vegetali millimetrici. Il colore sembra più scuro dello strato soprastante. Tra 9,10-9,22 m presenza di tracce più chiare e più scure tipo bioturbazione (?). Presenza di frammenti vegetali e radici tra 9,05-9,10 m. Limite inferiore ondulato con maggior presenza di molluschi al fondo.

9,22 – 9,55 m: Limi argillosi (30%), effervescenza 2, più chiari dello strato soprastante e sottostante; 5Y 4/1-2. Presenza comune di molluschi interi e frammenti fino a 9,40 m che diminuiscono verso il fondo. Presenza di frammenti vegetali millimetrici. A 9,22 m presenza di 2 *Cerastoderma glaucum* (Ø medio 3 cm). Limite inferiore da abrupto a chiaro, ondulato.

9,55 – 9,80 m: Limi argillosi (30%), effervescenza 2, 5Y 4/1, sembra più scuro dello strato soprastante, effervescenza 2; presenza di tracce scure, forse bioturbazioni subverticali e suborizzontali ondulate. Presenza comune di molluschi interi e frammenti; limite inferiore graduale.

9,80 – 10,18 m: Limi argillosi, 5Y 4/1-2, effervescenza 2. Presenza di tracce scure, forse bioturbazioni subverticali e suborizzontali ondulate. Tra 10,00-10,18 m presenza comune di frammenti di molluschi salmastri; livello di Cerastoderma glaucum alla base e limite inferiore chiaro, basato sulla maggior presenza di argilla nello strato sottostante.

10,18 – 10,36 m: Argilla limosa (> 40%), 4/10Y-10YG, effervescenza 2. Presenza di frammenti di molluschi millimetrici, negli ultimi 4 cm tracce scure 4-3/N, 3-4 mm: probabili bioturbazioni. Accumulo di frammenti di molluschi, limite inferiore con andamento ondulato per bioturbazioni.

10,36 – 10,41 m: Alternanze tra lo strato soprastante e le torbe sottostanti: alternanze di argilla limosa (argilla > 40%), 4/10Y-10YG, effervescenza 2 e torbe, effervescenza 0, 10YR 2/1. Le torbe sembrano inclusi tipo intraclasti per effetto erosivo sullo strato sottostante. Frammenti millimetrici di molluschi. Limite inferiore probabilmente erosivo.

10,41 – 10,70 m: Torbe e limi fortemente organici, in fitte stratificazioni millimetriche con macroresti, 10YR 2/1. Si riconoscono fusti di Poaceae. Limite inferiore graduale.

10,70 – 10,90 m: Torbe parzialmente digerite con macroresti 10YR 2/1, presenza di stratificazione ma aspetto “granulare”.

10,90 – 11,05 m: Rimaneggiamento da carotaggio.

11,05 – 11,17 m: Torbe parzialmente digerite con macroresti 10YR 2/1, presenza di stratificazione ma aspetto “granulare”; limite inferiore chiaro, ondulato per effetto di bioturbazioni.

11,17 – 11,28 m: Limi argillosi (25%), 5Y 4/1, effervescenza 1-2. Presenza di abbondanti frammenti vegetali e tracce di radici parzialmente, frammenti di molluschi a guscio fine. E' l'orizzonte A, di transizione alle torbe presenti superiormente. Limite inferiore chiaro e lineare.

11,28 – 11,40 m: Limi argillosi (25%), 5Y 4/1, effervescenza 1-2. Orizzonte B del suolo sepolto. Limite inferiore chiaro e lineare.

11,40 – 11,52 m: Limi argillosi (25%), 5Y 4/1, effervescenza 1-2. Presenza di concrezioni carbonatiche, dure 2 mm, 3%, sono presenti fino a 11,98 in alcuni livelli per effetto della diversità tessiturale tra piccoli interstrati; è l'orizzonte Bk del suolo sepolto limite inferiore graduale.

11,52 – 11,70 m: Limi argillosi (20%), 2,5Y 5/1, concrezioni carbonatiche dure 2-3 mm 8%; limite inferiore graduale, effervescenza 2-3. Al fondo tracce scure, probabili bioturbazioni; screziature biancastre 2,5Y 6/1 20% al fondo. Presenza di molluschi a guscio fine, probabilmente continentali. A 11,40 Pulmonata fluviale. Limite inferiore chiaro.

11,70 – 11,80 m: Limi con argille e sabbia (10%) grigio chiari 2,5Y 6/1, con abbondanti concrezioni carboniche dure, 2-4 mm 20%. Forse presenza di laminazione centimetrica, effervescenza 3; limite inferiore chiaro.

11,80 – 11,98 m: Limi con argilla (15%) in laminazioni da millimetriche a centimetriche, 2,5Y 6/1, con abbondanti concrezioni carbonatiche dure, 1 cm, 20%; effervescenza 3. Screziature, 2,5Y 7/1, 5%, 1 mm. Limite inferiore chiaro.

11,98 – 12,20 m: Alternanza di limi e limi con sabbia (15%) centimetriche, 2,5Y 6/1, effervescenza 2-3. Presenza di concrezioni soffici di carbonato di colore 5Y 7/1. Limite inferiore chiaro.

12,20 – 12,46 m: Alternanze centimetriche di limi con sabbia e limi sabbiosi (40%, sabbie fini), 2,5Y 6/1, effervescenza 3; clasti poligenici presenza abbondante di muscovite. Presenza di concrezioni carbonatiche dure, 10% 2-3 mm, più abbondanti al fondo; presenza di radici; limite inferiore abrupto.

12,46 – 12,62 m: Da 12,46 m suolo sepolto evoluto in ambiente umido fino a 12,72. Limi argillosi (20%) organici, 2,5Y 4/1, effervescenza 2, presenza di concrezioni carbonatiche dure 1-2 mm 3%, tracce di radici e frammenti vegetali di gasteropodi probabilmente continentali; bioturbazioni subverticali. Limite inferiore chiaro.

12,62 – 12,72 m: Limi con argilla (20%), 2,5Y 5-6/1, effervescenza 3 con abbondanti concrezioni carbonatiche dure, 3-5 mm, 15%; frammenti di gasteropodi di ambiente continentale; limite inferiore abrupto.

12,72 – 13,15 m: Alternanze di sabbie con limo e limo sabbioso centimetriche, 2,5Y 6/1 effervescenza 3-4; limite inferiore graduale, presenza di frammenti vegetali, rare tracce di radici. Limite inferiore abrupto.

13,15 – 13,54 m : Alternanze centimetriche di limi argillosi e limi con sabbia, tracce di radici e frammenti di gasteropode continentali; 2,5Y 6/1-2, effervescenza 3-4. Limite inferiore abrupto.

13,54 – 13,56 m: Livello centimetrico di limi organici 10YR 4/2, effervescenza 2-3, con presenza comune di resti vegetali, probabilmente fluitati. Limite inferiore netto.

13,56 – 13,57 m: Limo argilloso biancastro, 2,5Y 7-6/1, effervescenza 3-4; limite inferiore netto.

13,57 – 13,62 m: Sabbie medie (Φ medio 400 μ m), clasti poligenici (forse bacino del Tagliamento), presenza di tracce di radici; limite inferiore erosivo, ondulato.

13,62 – 13,63 m: Limi organici come 13,56-13,58 m. Limite inferiore ondulato.

13,63 – 13,90 m: Alternanze centimetriche di limi, limi argillosi, 2,5Y 6/1-2, effervescenza 3-4, con rari frammenti di molluschi continentali e radici parzialmente decomposte, limite inferiore non noto per problema di manovra.

13,90 – 14,0 m: Assenza di campione per disturbo di manovra.

14,0 – 14,44 m: Alternanze centimetriche di limi argillosi e limi sabbiosi, 2,5Y 6/1, effervescenza 3-4, limite inferiore chiaro.

14,44 – 14,60 m: Alternanze centimetriche di limi e limi con argilla, 2,5Y 6/1, con screziature 2,5Y 5/1, 2 mm planari 10% (?). Rare tracce di frammenti vegetali e di radici. Effervescenza 3-4, limite inferiore chiaro.

14,60 – 14,94 m: Alternanze centimetriche di limi argillosi, 2,5Y 6/1, effervescenza 4. Da 14,86 lamine millimetriche di sabbie limose. Presenza di tracce di radici. Limite inferiore abrupto ondulato forse per effetto da carico.

14,94 – 15,00 m: Sabbie con limo (300 μ m di Φ medio dei clasti), 2,5Y 5/1, effervescenza 4 violenta. Presenza di laminazioni e tracce di radici. Limite inferiore abrupto.

15,00 – 15,15 m: Alternanze di sabbie e sabbie limose di colore scuro 5/N, Φ medio 250 μ m, effervescenza 3-4, presenza di radici, frammenti vegetali fluitati e frammenti di legni. Limite inferiore abrupto.

15,15 – 15,31 m: Sabbie medie laminate, clasti poligenici 4/N, effervescenza 4, violenta. A 15,20 m frammenti vegetali fluitati, anche a 15,28 m. Limite inferiore erosivo con presenza di ghiaie fini al fondo, Φ medio 3 mm. Al fondo problemi di manovra.

15,31 – 15,90 m: Limi argillosi (20%) in laminazioni millimetriche; colore primario 2,5Y 6/1 e secondario 2,5Y 7/1, effervescenza 3-4; limite inferiore chiaro. A 15,45 e 15,65 m livello di sabbie grossolane con ghiaie sottili, clasti moderatamente arrotondati (per le litologie forse appartenenti al bacino del Tagliamento); Φ max 6 mm.

15,90 – 16,0 m: Alternanze di limi sabbiosi 2,5Y 7/1, effervescenza 4-3, limite inferiore chiaro.

16,0 – 16,37 m: Alternanze centimetriche di limi argillosi e limi con sabbie. Colore primario 2,5Y 7/1, secondario 2,5Y 6/1, effervescenza 4-3. Presenza di rari frammenti vegetali, limite inferiore netto.

16,37 – 16,75 m: Sabbie e sabbie limose laminate, alternanze centimetriche 2,5Y 6/1, effervescenza 4. Presenza di frammenti vegetali fluitati talvolta abbondanti tra le sabbie. Limite inferiore abrupto.

16,75 – 16,76 m: Sabbie limose con abbondanti frammenti vegetali, livello vegetato; limite inferiore chiaro, passante a ghiaie in matrice limosa, ma disturbato da problemi di manovra.

16,76 – 17,15 m: Ghiaie eterometriche sciolte con Φ medio 1 cm e Φ max 2 cm, probabilmente del bacino del Tagliamento. Matrice limosa 2,5Y 6/1, effervescenza 4; al tetto sono piuttosto addensate. Limite inferiore non noto per disturbo dovuto al carotaggio.

17,15 – 17,72 m: Al tetto problemi di manovra fino a 17,25. Argille limose 6-5/10Y, effervescenza 4. Presenza di lamine 5Y/4 millimetriche, verosimilmente di argilla organica, presenza di frammenti vegetali in laminazione e frammenti di gasteropode continentale; livello ricco a 17,56 m. Livello organico a 17,48 m e 17,64 m (campionato per carbonio). Laminazione spesso incurvata probabilmente per figure da carico o rielaborazione dovuta al sondaggio Limite inferiore chiaro.

17,72 – 17,92 m: Limi argillosi con caratteristiche come sopra, effervescenza 3; limite inferiore abrupto.

17,92 – 18,16 m: Limi argillosi 6/10Y effervescenza 4, sembra più scuro dello strato superiore, laminazione millimetrica, presenza di clasti con Φ medio 1 mm in livelli orizzontali, che arrivano fino al 10%. Limite inferiore non noto per rimaneggiamento di manovra.

18,16 – 18,95 m: Probabili problemi di manovra. Da 18,16-18,50 come sopra: Limi argillosi 6/10Y effervescenza 4, probabilmente solo leggermente "stirato" per carotaggio. Da 18,16 a 18,95 evidenti problemi di manovra, ma si tratta sempre di limi argillosi. A 18,53 con livello argilloso sciolto con presenza di ghiaie (20%). Limite inferiore non noto.

18,95 – 19,06 m: Argille limose 6/5GY, effervescenza 2 con laminazione millimetrica; screziature 5Y 7/6 2 mm, 5%. A 19,05 presenza di un achene. Limite inferiore chiaro.

19,06 – 19,12 m: Alternanze millimetriche di limi argillosi 6/5GY e limi organici 2,5Y 3/1, presenza di resti vegetali, effervescenza 2. Limite inferiore abrupto

19,12 – 19,13 m: Limi fortemente organici con torbe. Limite inferiore chiaro.

19,13 – 19,47 m: Limi argillosi 7/10Y effervescenza 3 con presenza di livello a limo organico a 19,15-19,35 m anche con macroresti (Muschi bruni). A 19,27 gasteropode terrestre di grandi dimensione con guscio esterno marrone scuro (simile a Helix); limite inferiore abrupto.

19,47 – 19,63 m: Alternanze centimetriche di limi torbosi marrone verdastri 5Y 4-3/2 e limi argillosi 6/10Y con presenza di macroresti vegetali. A 19,49 m presenza di foglioline di Briofite (Muschi bruni), gasteropodi continentali. Verso il fondo diminuisce la quantità di torbe 5Y 5-4/2, effervescenza 3. Limite inferiore ondulato.

19,63 – 19,65 m: Limi con argilla con effetto gley scuro, 4/N, effervescenza 3-4. Passaggio graduale a colore 2,5Y 6/3.

19,65 – 19,70 m: Limi argillosi alternati a limi con sabbie 7/10Y, effervescenza 3-4, limite inferiore graduale. A 19,70 livello millimetrico con frammenti vegetali.

19,70 – 19,78 m: Limi con argille in laminazioni millimetriche 2,5Y 6/1, effervescenza 4.

CNC4 (1798748.576 5074519.834 Metri)

0 – 1,14 m: Materiale sciolto, probabilmente di riporto, formato da laterizi e frammenti di laterizi e materiale archeologico. Limite inferiore graduale, irregolare.

1,14 – 1,50 m: Limo con argilla con colore primario 2,5Y 4/3-4 e secondario 2,5Y 6-5/4, effervescenza 4. Abbondanti frammenti di materiale archeologico e ciottoli, carboni. Probabile riporto. Limite inferiore chiaro, ondulato di natura erosiva.

1,50 – 2,15 m: Limi argillosi probabilmente ricchi di sostanza organica 2,5Y 4/2-3 effervescenza 3-4. Abbondantissimi frammenti di vasi di epoca romana, laterizi, muratura romana, carboni spigolosi subcentimetrici. Probabile riporto, forse d'epoca antica. Limite inferiore chiaro.

2,15 – 3,08 m: Limi con sabbia grossolana 2,5Y 5/2-3 effervescenza 4. Presenza di frammenti archeologici (laterizi, vasi, denti animali), carboni subcentimetrici, incluso di limo sabbioso 10YR 7/3 a 2,6 m. Tra le ceramiche si riconoscono impasti di tipo romano e probabilmente un frammento protostorico al fondo. Strato scarsamente coerente probabilmente riporto di origine antropica. Al fondo accumulo di frammenti di laterizi 2-3 cm.

3,08 – 3,15 m: Limi con argilla e sabbia moderatamente consolidati, 2,5Y 4/2-3 effervescenza 4, limite inferiore chiaro, irregolare di origine erosiva.

3,15 – 3,38 m: Limi sabbiosi (sabbie grosse) 2,5Y 5/2 effervescenza 4. Abbondante presenza di frammenti di laterizi e ciottoli. Limite inferiore abrupto, a tasche, di tipo erosivo.

3,38 – 3,49 m: Limi con argilla e sabbia con sostanza organica dispersa, 2,5Y 5/1 effervescenza 4. Con presenza di ghiaie con Φ_{max} 4 cm, soprattutto al tetto, presenza di frammenti di laterizi. Limite inferiore chiaro.

3,49 – 3,76 m: Limi con sabbia e argilla 5Y 6-5/1 effervescenza 4, fortemente consolidati. Lo strato ha una struttura interna formata da aggregati che si fratturano in poliedri di 1 cm di lato. Assenza di reperti archeologici. Limite inferiore netto.

3,76 – 4,19 m: Limi con argilla (15%) e sabbia (15%), 2,5Y 4-3/1 effervescenza 3-4. Presenza di ciottoli, carboni e frammenti di vasi protostorici. Lo strato è ben addensato. Presenza di legni. A 4,0 m grosso blocco calcinato, probabilmente di origine antropica. A 4,1 m ciottolone calcinato con Φ_{medio} 4 cm, al fondo frammento ligneo ben conservato. Presenza di frammenti ossei, lignei e ciottolini abbondanti. Limite inferiore erosivo. A 4,13 nocciolo probabilmente di oliva. Al limite forse accumulo di fosfati indicato dal colore leggermente verdino della matrice, 5Y 5/3. Accumulo di noccioli probabilmente di oliva, 3 esemplari, a 4,13 m.

4,19 – 4,23 m: Limi con sabbia, 5Y 5/3, effervescenza 3-4. Limite inferiore ondulato. Presenza di probabili noccioli di oliva. A 4,21 frammento di ceramica protostorica. Presenza di carboni, legno decomposto, ossa e ciottolini; concrezioni carbonatiche.

4,23 – 4,36 m: Limi con argilla (15%) e sabbia, 5Y 4/1, effervescenza 3-4. Limite inferiore netto, al fondo ricco di sostanza organica dispersa e presenza al fondo di frammento di legno carbonizzato (6x1 cm). Frammenti di ossa, legno, piccoli ciottoli con $\Phi_{\text{medio}} < 1$ cm. Presenza di concrezioni carbonatiche rimaneggiate fino a 4,30 m. Da 4,30 concrezioni carbonatiche in situ (15%).

4,36 – 4,47 m: Limo con argilla (20%), 7-6/10Y, effervescenza 3-4.. Presenza di concrezioni carbonatiche dure 1 cm, $\Phi_{\text{max}} 1,5$ cm 20% soprattutto al fondo. Limite inferiore chiaro.

4,47 – 4,75 m: Limo argilloso (25%), 5Y 7/2, effervescenza 3; screziature 2,5Y 6/6, 20%, 2 mm. Concrezioni carbonatiche dure, 6 mm $\Phi_{\text{max}} 1,5$ cm al tetto 20% al fondo 5 %, con concentrazioni legate a laminazioni di limo sabbioso. Limite inferiore chiaro. Tra 4,65-4,75 m disturbo per manovra con presenza di materiale archeologico proveniente dagli strati soprastanti incoerenti (sia reperti romani che protostorici).

4,75 – 4,93 m: Alternanze di limi con argilla (15%) e limi con sabbia (fino al 30%), 2,5Y 6/1, effervescenza 4. Screziature 2,5Y 6-5/6, 40%, 2 mm. Concrezioni carbonatiche dure 1-2 mm, 3% ; probabile presenza di concrezioni carbonatiche soffici. Limite inferiore chiaro.

4,93 – 5,04 m: Limi argillosi (20%) 2,5Y 6/4, effervescenza 4. Screziature 5Y 6/8, 40%, 1-2 mm. Presenza di concrezioni dure 1 mm 2%. Limite inferiore abrupto.

5,04 – 5,16 m: Limi argillosi (20%) con livelli subcentimetrici di sabbie fini a 5,07 e 5,14 m, 2,5Y 6-5/4, effervescenza 4-3. Lo strato è completamente screziato 5Y 6/8, 1-2 mm. Tracce di radici tipo crotovina. Limite inferiore chiaro.

5,16 – 5,51 m: Alternanze centimetriche di limi argillosi (argilla 20%) e limi sabbiosi (sabbia 20%); livelli millimetrici di sabbie fini limose a 5,33, 5,38, 5,45 m; colore 2,5Y 6/2, effervescenza 4. Screziature 2,5Y 5/6, 2-3 mm, fino al 50%. Livelli con concrezioni carbonatiche dure 1mm 5% a 5,16, 5,22, 5,29, 5,41, 5,49 m. Limite inferiore abrupto, ondulato.

5,51 – 5,82 m: Sabbie limose e sabbie fini ($\Phi_{\text{medio}} 200-300 \mu\text{m}$) in livelli di 3-5 cm con laminazioni di limo e argilla, 2,5Y 6/2-3, effervescenza 4. Screziature 2,5Y 6/8 1 mm 10% al fondo. A 5,75 m nelle sabbie presenza di frammenti vegetali fluitati millimetrici. Limite inferiore abrupto ondulato, forse erosivo.

5,82 – 5,88 m: Limo con sabbia (15%), 2,5Y 6/3, screziature 2,5Y 6/8 5% 1 mm. Tracce di radici, limite inferiore abrupto ondulato, erosivo.

5,88 – 6,38 m: Da sabbie medio-fini nei primi 5 cm a sabbie molto grossolane con ciottolini 2-3 mm. Presenza di livelli sabbioso-limosi a 6,05-6,10 m e 6,35-6,38 m. Tra 6,06-6,14 m limi grigi laminati, effervescenza 3-4 7-6/10Y, rimaneggiato per manovra. Tra 6,15-6,38 sabbie grossolane con ghiaie clasti fino a 3 mm; litologie poligeniche con clasti anche rossi e verdi, quarzo (probabilmente appartenenti al bacino del Tagliamento), clasti leggermente spigolosi. Abbondanti frammenti vegetali e legnosi fluitati, probabilmente disposti in laminazioni. Limite inferiore chiaro.

6,38 – 6,85 m: Sabbie con limo (20%) ($\Phi_{\text{medio}} 300-400 \mu\text{m}$), bianco grigiastro con livello di radici tra 6,41-6,46 m e probabili laminazioni. A 6,56 sabbie medio grossolane in laminazioni centimetriche rare intercalazioni di sabbie con limo. Presenza di screziature 5Y 6/4, 15%, 1 mm; presenza di frammenti vegetali e legnosi fluitati talora abbondanti. Limite inferiore netto, forse erosivo.

6,85 – 7,05 m: Alternanze millimetriche di limi argillosi e limi con sabbie, 2,5Y 6/1 effervescenza 4. Presenza di rari frammenti vegetali soprattutto al tetto. Limite inferiore netto.

7,05 – 7,15 m: Alternanze millimetriche di limi argillosi e limi con sabbie, colore 5Y 6-5/1, più scuro dello strato soprastante. tracce di radici decomposte, effervescenza 3-4. Limite inferiore abrupto.

7,15 – 7,40 m: Sabbie medio fini (Φ medio 300 μ m) in livelli 2-3 cm alternati a lamine di limo con sabbia e limo con argilla. Effervescenza 3-4, tracce di radici decomposte, limite inferiore netto ondulato, erosivo.

7,40 – 7,58 m: Alternanze di limi con sabbia 5Y 7/1 e 5Y 6/1, effervescenza 3-4. Limite inferiore chiaro.

7,58 – 7,61 m: Limi sabbiosi, limite inferiore abrupto, probabilmente erosivo.

7,61 – 7,76 m: Alternanze subcentimetriche di limi argillosi e limi con argilla e sabbia, 5Y 7/1 e 5Y 6/1, effervescenza 4. Tracce di radici talvolta ben conservate; limite inferiore abrupto con tasche, forse erosivo.

7,76 – 7,78 m: Sabbie medie con limo 10%, 5Y 5/1; limite inferiore abrupto con tasche, forse erosivo.

7,78 – 7,90 m: Alternanze subcentimetriche di limi e limi con sabbie (15%), 5Y 6/2, effervescenza 3-2. Rari frammenti vegetali millimetrici. Limite inferiore netto.

7,90 – 8,0 m: Alternanze subcentimetriche e millimetriche di limi argillosi (30%) e limi con sabbia (<30%), 5Y 6/1, effervescenza 3-4. Al tetto tracce di radici di spessore millimetrico. Limite inferiore non noto per problemi di manovra.

8,0 – 8,46 m: Alternanze millimetriche di limi argillosi e limi con argilla, 5Y 7-6/1, effervescenza 3-4. Tracce di radici. A 8,33 livello millimetrico di limo sabbioso. A 8,20 m concrezioni carbonatiche dure <1 mm 3%. Limite inferiore chiaro.

8,46 – 8,60 m: Alternanze millimetriche di limi argillosi (25%) e limi, 5Y 7-6/1, effervescenza 3-2. Limite inferiore chiaro.

8,60 – 8,93 m: Alternanze millimetriche di argilla limosa e limi argillosi molto coesivi, 2,5Y 7-6/1, effervescenza 3-2. Da 8,70 m presenza di lamine millimetriche scure 2,5Y 5/1, talvolta anche di colore più marroncino, più abbondanti tra 8,83-8,86 m. Tra 8,90-8,99 m testa di manovra e probabile rimaneggiamento. Limite inferiore non noto per problemi di manovra.

8,93 – 9,18 m: Alternanze di limi con sabbia (15%) e argilla (20%) e limi argillosi, 5Y 6/1, effervescenza 4. Limite inferiore abrupto, ondulato forse per manovra.

9,18 – 9,28 m: Alternanze millimetriche di limi con argilla (15%) e limi argillosi (25%), 5Y 6/1, effervescenza 4. Rare tracce di radici e frammenti vegetali millimetrici decomposti. Limite inferiore chiaro.

9,28 – 9,56 m: Limi in laminazioni da millimetriche a subcentimetriche, 5Y 6/1 effervescenza 4. Limite inferiore chiaro.

9,50 – 9,62 m: Argille e argille limose 5Y 6/1 effervescenza 4. Tracce di radici e frammenti vegetali millimetrici decomposti. Limite inferiore chiaro.

9,62 – 9,78 m: Alternanze subcentimetriche di argille limose (argilla 40%) e limi con argilla (30%), 5Y 6/1 effervescenza 4. Limite inferiore chiaro.

9,78 – 9,85 m: Argille limose (argilla 40%) 5Y 6/1, effervescenza 4. Presenza comune di frammenti vegetali decomposti e radici di spessore 2 mm.

9,85 – 9,89 m: Alternanze di limi con sabbia (15%) e argilla (15%) e limi argillosi (20%), 5Y 6/1, effervescenza 4. Presenza di frammenti vegetali millimetrici decomposti, abbondanti a 9,87 m. Limite inferiore erosivo.

9,89 – 9,92 m: Sabbie fini (<200 µm), 5Y 5/1, effervescenza 4. Limite inferiore abrupto, ondulato.

9,92 – 10,26 m: Argille limose 5Y 6/1, effervescenza 3. Al fondo manovra limite inferiore non noto.

10,26 – 10,43 m: Problemi di manovra da 10,36 a 10,43 m, anche se probabilmente carota poco disturbato, sabbie fini con limo (10%), 5Y 5/1, effervescenza 4. Limite inferiore chiaro.

10,43 – 10,52 m: Alternanze di limi grossolani e limi argillosi, 5Y 6/1 effervescenza 3. Presenza talvolta abbondante di frammenti vegetali e tracce di radici decomposte (5Y 4/1. Limite inferiore abrupto, ondulato.

10,52 – 10,60 m: Alternanze millimetriche di limi argillosi e limi grossolani, 5Y 7-6/1, effervescenza 4. Limite inferiore abrupto, forse erosivo.

10,60 – 11,05 m: Limi argillosi (25%) in alternanze con argille limose (30-40% argilla) nei primi 15 cm, passanti ad argille limose, 6/10Y effervescenza 3-4. Presenza di tracce di frammenti vegetali. Limite inferiore graduale irregolare, erosivo con probabili bioturbazioni e frammenti di limi organici inglobati.

11,05 – 11,12 m: Limi organici nei primi 2 cm passanti a limi torbosi 2,5Y 3/2, passanti al fondo a 2,5Y 3/1, effervescenza 0. Limite inferiore abrupto ondulato.

11,12 – 11,17 m: Argille limose (30-40% argilla) 6/10Y effervescenza 3. Nei primi 2 cm laminazioni con sostanza organica decomposta (frammenti vegetali). Limite inferiore non noto per manovra, ma carota probabilmente in continuità con lo strato inferiore.

11,17 – 11,46 m: Argille limose (30-40%) in laminazione con frammenti vegetali millimetrici decomposti tra 1,32-11,34. Rari resti vegetali decomposti effervescenza 3. Limite inferiore chiaro.

11,46 – 11,49 m: Argille limose (30-40%) con sostanza organica diffusa, 5/5GY, effervescenza 3, frammenti vegetali millimetrici decomposti. Limite inferiore abrupto.

11,49 – 1,70 m: Alternanze di argille limose (30-40%) e limi argillosi (argilla 25%), 2,5Y 6-5/1, effervescenza 4. Presenza di radici decomposte, limite inferiore chiaro.

12,19 – 12,34 m: Argille limose (30-40%) con alternanze subcentimetriche di limo grossolano 5Y 6/1 effervescenza 3-4. Limite inferiore chiaro.

12,34 – 12,39 m: Argille (>40%) con limo, 5Y 6/1 effervescenza 4. Limite inferiore netto.

12,39 – 12,61 m: Alternanze millimetriche di argille limose (30% argilla) e limi con argilla (20%), 5Y 6/1, effervescenza 4. Tra 12,50-12,54 m laminazioni di sostanza organica decomposta. Limite inferiore chiaro.

12,61 – 12,93 m: Argille limose (limo 60%) in strati di 2-4 cm alternati a livelli plurimillimetrici di limi con argilla, 5Y 6/1, effervescenza 4. A 12,87 m livello lievemente organico. Limite inferiore chiaro.

12,93 – 13,28 m: Argille limose (limo 60%) in laminazioni millimetriche; talvolta laminazioni millimetriche di sostanza organica più frequenti da 13,10-13,15 m. Colore 6/10Y passante a 5Y

5/1 sotto a 13,20 m; effervescenza 3. Limite inferiore chiaro, da ondulato a irregolare, forse erosivo.

13,28 – 13,32 m: Limi fortemente organici quasi limi torbosi 5Y 3/2, effervescenza 0. Presenza di resti vegetali, evidente stratificazione. Limite inferiore chiaro da ondulato a irregolare, forse erosivo.

13,32 – 13,41 m: Limi argillosi che divengono limi argillosi organici al fondo; da 5Y 6/1-2 a 5Y 4/2, effervescenza 3. Abbondante presenza di resti vegetali anche plurimillimetrici che demarcano la stratificazione. Limite inferiore chiaro da ondulato a irregolare, forse disturbato da carotaggio.

13,41 – 13,48 m: Limi argillosi 5Y 4/2 effervescenza 1-2. Al letto livello torboso 1 cm, presenza di foglioline di briofite (muschi bruni). Limite inferiore netto, forse erosivo.

13,48 – 13,51 m: Torbe limose passanti a limi torbosi 2,5Y 3/1, con evidente stratificazione e presenza di foglioline di briofite (muschi bruni), effervescenza 0. Limite inferiore chiaro.

13,51 – 13,55 m: Limi organici 5Y 3/2 effervescenza 3, forse strato bioturbato. Limite inferiore chiaro, irregolare forse anche per operazioni di carotaggio.

13,55 – 13,67 m: Limi 5Y 6/2-1, effervescenza 4, probabilmente disturbato da manovra. Limite inferiore non noto.

13,67 – 13,78 m: Testa della manovra, campione rielaborato.

13,78 – 14,83 m: Sabbie medie (300 µm) sciolte gialle 2,5Y 6/3, effervescenza 4. Forse presenza di resti vegetali millimetrici. Sotto 14,0 m sono grigio biancastre 2,5Y 7/1, effervescenza 4. Da 14,40 m presenza di intraclasti di limo consolidato molto resistenti (detti clay chip) biancastri 2,5Y 7/1 effervescenza 3. Al fondo frammenti vegetali anche centimetrici. Limite inferiore abrupto ondulato, probabilmente erosivo. Durante le operazioni di carotaggio questo strato era molto resistente e presentava caratteristiche simili a quelle delle ghiaie. Probabilmente i clasti di fango simulavano il rumore dei ciottoli nel carotiere (??).

14,83 – 15,16 m: Alternanze millimetriche e subcentimetriche di limi con argilla (25%) 5Y 7-6/1, effervescenza 4. Limite inferiore netto.

15,16 – 15,21 m: Alternanze millimetriche di argille limose (argilla 30%) e limi con sabbia (40%), effervescenza 3. limite inferiore netto, forse erosivo.

15,21 – 15,30 m: Alternanze millimetriche di argille limose (argilla 30%) e limi grossolani con sabbie molto fini (20%) 5Y 7-6/1 effervescenza 3. Limite inferiore chiaro.

15,30 – 15,35 m: Argille limose 5Y 7-6/1 effervescenza 3. Limite inferiore abrupto con tasche da bioturbazione (??).

15,35 – 15,42 m: Limi argillosi ricchi di sostanza organica dispersa 5Y 5/1, effervescenza 3. Presenza di vuoti disposti suborizzontalmente ma con apofisi anche verticali sia verso l'alto che verso il basso riempiti con il materiale dello strato soprastante. Possibile orizzonte bioturbato. Limite inferiore chiaro, con tasche forse per bioturbazione.

15,42 – 15,49 m: Limi argillosi ricchi di sostanza organica dispersa 5Y 5/1, effervescenza 3. Rispetto allo strato soprastante non si riconoscono bioturbazioni evidenti, limite inferiore chiaro, ondulato.

15,49 – 15,55 m: Limi con argilla (15%) laminati e ricchi di sostanza organica tra 15,52 – 15,53 m, 5Y 5/2 effervescenza 3. A 15,53-15,54 m livello di argille limose 5Y6-7/1. Limite inferiore non noto per manovra.

15,55 – 15,90 m: Limi con sabbie (20-30%) e sabbie limose fortemente rimaneggiate da carotaggio, 5Y 6-5/1 effervescenza 3-4.

15,90 – 16,05 m: Limi e limi con sabbia (10%) in alternanze subcentimetriche 5Y 5/1, effervescenza 4 violenta; probabilmente un po' rimaneggiato dalle operazioni di carotaggio.

16,05 – 16,18 m: Limi grossolani in laminazioni millimetriche 5Y 6-7/1, effervescenza 4 violenta. Limite inferiore netto, forse rimaneggiato parzialmente dal carotaggio.

16,18 – 16,27 m: Argille limose (argilla 40%), 5Y 6/1, con laminazioni di materia organica fino a 4 mm di spessore (5Y 5/1-2), effervescenza 3. Presenza di frammenti vegetali decomposti. Tra 16,25-16,27 limi fortemente organici 5Y 3/2, con presenza di resti vegetali indecomposti e rari frammenti millimetrici di gasteropode e molluschi. Limite inferiore chiaro, irregolare.

16,27 – 16,33 m: Alternanze di argille limose e limi argillosi 5Y 6/1, effervescenza 3. Presenza di frammenti di gasteropodi continentali; limite inferiore abrupto, ondulato.

16,33 – 16,38 m: Limi grossolani 5Y 5/1, effervescenza 4 violenta. Presenza di frammenti vegetali decomposti. Limite inferiore chiaro.

16,38 – 16,58 m: Argille limose (30-40%) passanti a limi argillosi (25%) 5Y 6/1, effervescenza 3. Limite inferiore graduale.

16,58 – 16,67 m: Limi con argilla (15%), 5Y 6/1 effervescenza 3. Presenza di frammenti vegetali indecomposti. Limite inferiore netto.

16,78 – 17,10 m: Alternanze millimetriche e subcentimetriche di limi con argilla e sabbia e limi argillosi (25%), 5Y 6/1, effervescenza 3. Tra 16,84-16,86 m livello di argille limose con frammenti vegetali millimetrici decomposti.

17,10 – 17,32 m: Alternanze di limi argillosi e limi con argilla 6/10Y, effervescenza 3. Presenza di frammenti vegetali decomposti, limite inferiore graduale.

17,32 – 17,76 m: Alternanze da centimetriche a millimetriche di limi grossolani con argilla (15%) e argilla limosa (argilla 30-40%), 6/10Y, effervescenza 4. Frammenti vegetali decomposti. A 17,44 m gasteropode continentale. Più argilloso fino a 17,53 e poi anche da 17,67-17,71 m. Limite inferiore chiaro.

17,76 – 18,09 m: Alternanze di limi argillosi (25%) e argille limose (30-40%), 6/10Y effervescenza 3. Livello ricco in frammenti vegetali a 17,91 m (2 mm). Laminazioni evidenti tra 18,0-18,09 m. Limite inferiore abrupto ondulato.

18,09 – 18,16 m: Limo grossolano passante a limo sabbioso (20%), 6/10Y effervescenza 3. Limite inferiore netto.

18,16 – 18,22 m: Limo con argilla (20%), effervescenza 4, 6/10Y. Presenza di concrezioni carbonatiche molto grandi (Φ_{max} 2 cm) 20%. Limite inferiore chiaro.

18,36 – 18,41 m: Limi grossolani con argilla (20%), effervescenza 4, 6/10Y. Al letto concrezioni carbonatiche dure 5 mm 5%. Limite inferiore netto.

18,41 – 18,72 m: Alternanze di limi sabbiosi e sabbie limose 5/10Y effervescenza 3-4. Abbondante presenza di resti di radici con Φ_{medio} 1-2 mm; tracce di frammenti organici decomposti. Limite inferiore abrupto, ondulato, forse di natura erosiva.

18,72 – 18,76 m: Limi con argilla (10%) 6/10Y, effervescenza 4. Concrezioni carbonatiche dura 6 mm 5%. Limite inferiore abrupto ondulato, forse erosivo.

18,76 – 18,82 m: Limi con argilla (15%) più scuri degli strati superiori forse per presenza di sostanza organica dispersa, 5/10Y, effervescenza 3. Al letto frammenti vegetali millimetrici e frammenti di molluschi continentali. Limite inferiore chiaro.

18,82 – 19,01 m: Limi con argille (20%), 6/10Y, effervescenza 3. Concrezioni carbonatiche dure 6 mm 5%. Limite inferiore chiaro

19,01 – 19,08 m: Alternanze millimetriche di limi con argilla (20%), limi grossolani con sabbia (15%) 6/10Y, effervescenza 4. A 19,05 3 concrezioni carbonatiche dure 10 % 8 mm. Limite inferiore netto.

19,08 – 19,12 m: Limi sabbiosi 6/10Y effervescenza 4, limite inferiore netto.

19,12 – 19,19 m: Limi grossolani con argilla (15%) e sabbia (20%), 6/10Y, effervescenza 4. Limite inferiore non noto per manovra.

19,19 – 19,39 m: Campione disturbato da manovra, limi grossolani e limi argillosi alternati.

19,39 – 19,45 m: Limi argillosi (25%), 6/10Y, effervescenza 4. Limite inferiore chiaro irregolare, forse disturbato dalla manovra.

19,45 – 19,70 m: Limi con argille (15%) alternanti a limi argillosi (20%) con sostanza organica decomposta e frammenti vegetali millimetrici talvolta in laminazioni; 5Y 4/2 effervescenza 4. Tra 19,54-19,56 m livello ricco di foglioline di muschi bruni associate con gasteropodi continentali turricolati 2-3 mm. Limite inferiore chiaro.

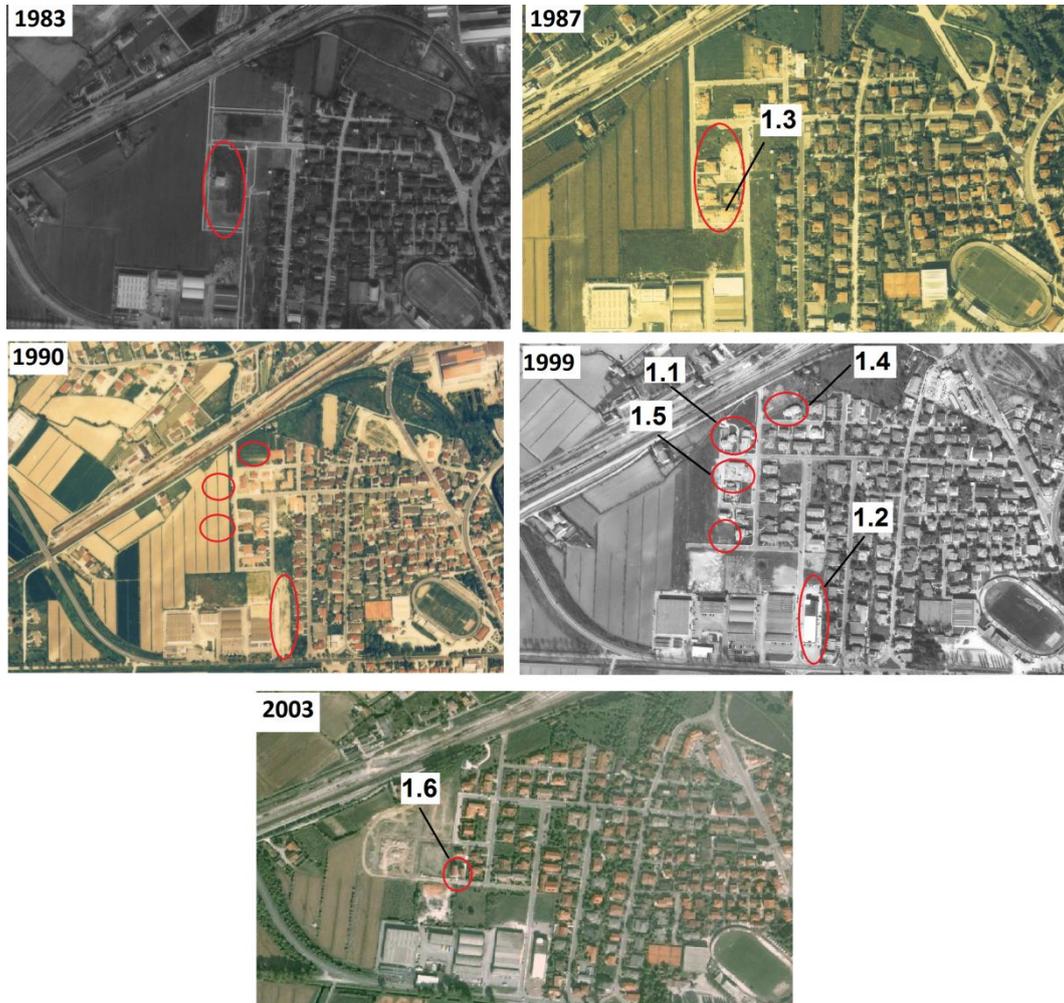
19,70 – 19,80 m: Limi argillosi (20%) e limi con argille (15%) molto ricchi in frammenti vegetali plurimillimetrici (muschi bruni). Aspetto torboso, effervescenza 3, 5Y 5-6/2, presenza di frammenti di gasteropodi continentali.

19,80 – 20,07 m: Da limo argilloso a limo con argilla ricco in frammenti vegetali millimetrici disposti in livelli, 5Y 6/1-2, effervescenza 3. Limite inferiore graduale.

APPENDICE B

Serie temporali delle immagini storiche relative ai punti anomali

Anomalia 1 (Ers-Envisat)



Velocità dei singoli PS [mm/yr]						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
1995-2000	-16.47	-5.87	-6.26	-5.8	/	/
2003-2010	-7.18	-3.89	-3.53	-5.1	-10.96	-5.92

Anomalia 2 (Envisat)



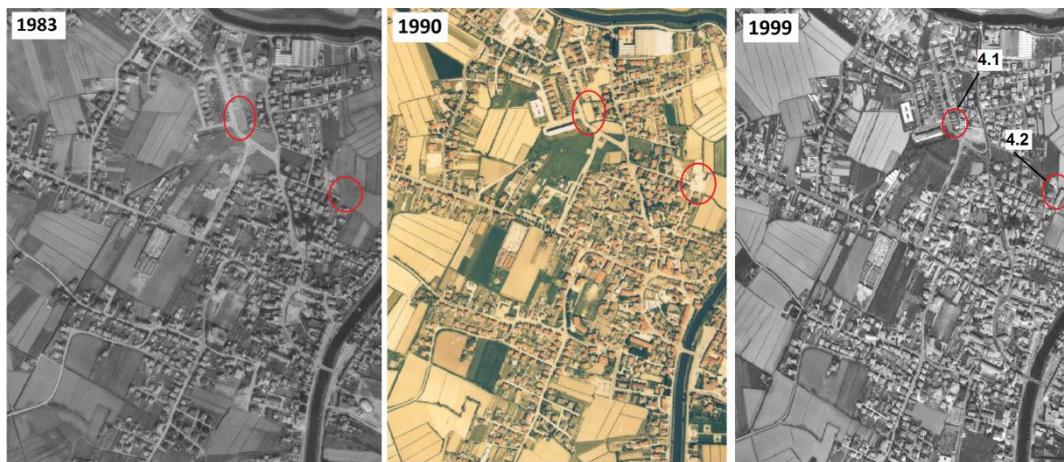
Velocità media dei PS [mm/yr]	
	2
1995-2000	/
2003-2010	-3.68

Anomalia 3 (Ers-Envisat)



Velocità dei singoli PS [mm/yr]				
	3.1	3.2	3.3	3.4
1995-2000	/	/	-5.73	-6.05
2003-2010	-5.5	-7.58	-3.99	-5.4

Anomalia 4 (Ers-Envisat)



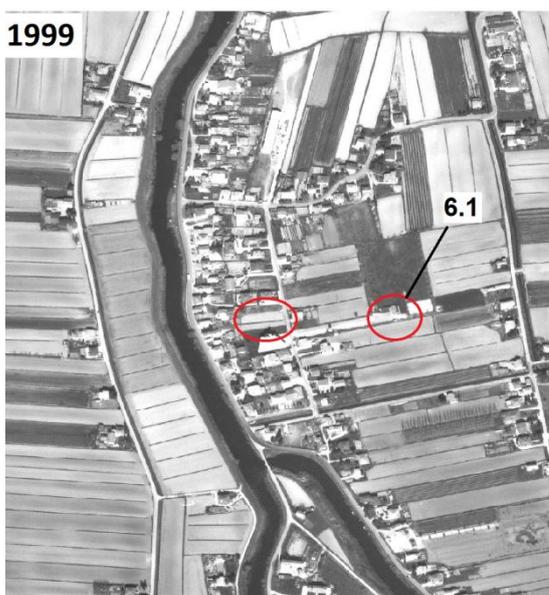
Velocità dei singoli PS [mm/yr]		
	4.1	4.2
1995-2000	-10.15	-10.26
2003-2010	-5.56	-5.65

Anomalia 5 (Ers-Envisat)



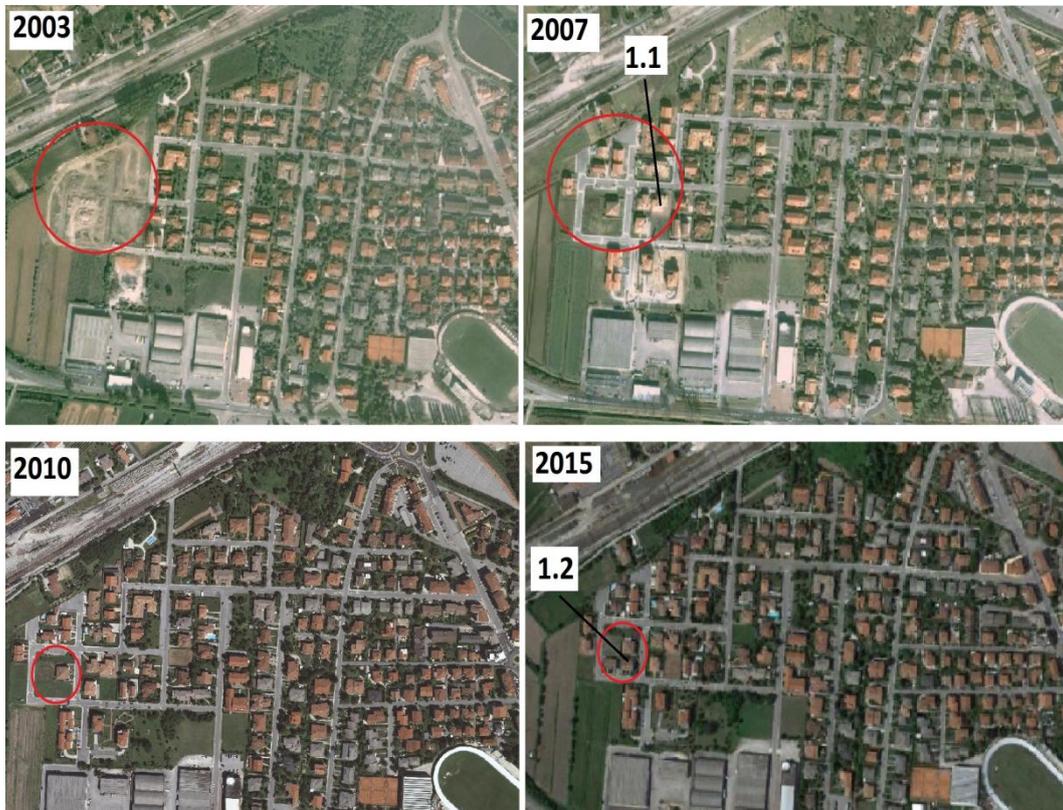
Velocità dei singoli PS [mm/yr]						
	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
1995-2000	-7.53	-7.2	/	-5.14	6.99	/
2003-2010	-5.51	-4.81	-5.3	-6.98	-5.89	-5.63

Anomalia 6 (Ers-Envisat)



Velocità dei singoli PS [mm/yr]		
	6.1	6.2
1995-2000	-6.4	/
2003-2010	-4.12	-9.94

Anomalia 1 (COSMO-Sentinel)



Velocità dei singoli PS [mm/yr]		
	1.1	1.2
2010-2011	-5.14	-9.9
2012-2016	-1.22	-12.21
2014-2016	-1.02	-13

Anomalia 2 (COSMO-Sentinel)



Velocità media PS [mm/yr]		
	2.1	2.2
2010-2011	-6.68	/
2012-2016	/	/
2014-2016	-3.46	-17.4

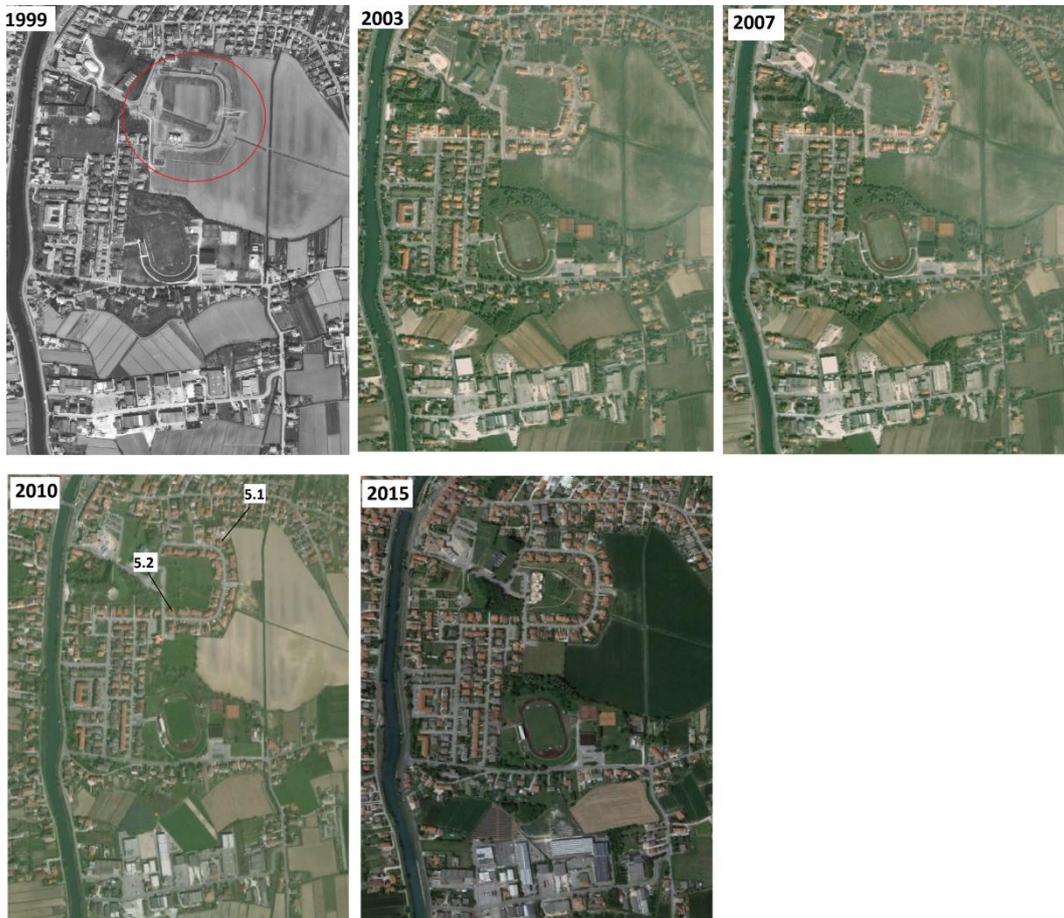
Il segno “/” indica l’assenza che non è stato riscontrato il PS in corrispondenza del punto considerato.

Anomalie 3-4 (COSMO-Sentinel)



Velocità media PS [mm/yr]		
	3	4
2010-2011	-13.28	-0.1
2012-2016	-7.89	-0.15
2014-2016	-14.2	-4.39

Anomalia 5 (COSMO-Sentinel)



Velocità media PS [mm/yr]		
	5.1	5.2
2010-2011	-6.62	-7.76
2012-2016	-5.71	-5.55
2014-2016	-3.45	-3.43

Anomalia 6 (COSMO-Sentinel)



Velocità media PS [mm/yr]		
	6.1	6.2
2010-2011	-8	-14.5
2012-2016	/	-8.67
2014-2016	-10.5	-7.1

Il segno “/” indica l’assenza che non è stato riscontrato il PS in corrispondenza del punto considerato.