

2. INQUADRAMENTO GENERALE

2.1 Ubicazione dell'area di studio

L'area oggetto del presente studio, la pianura costiera di Follonica-Scarlino, si estende per circa 50 Km² ed è situata nella parte occidentale della Toscana meridionale, in prossimità del Golfo di Follonica (**Fig.1**).

E' delimitata a Nord-Ovest dalle colline del Parco di Montioni, che proseguono a Nord verso Montebamboli, Monte Arsentì e Monte Pergolo, a Nord-Est dai rilievi di Massa Marittima e a Sud-Est dalle colline di Gavorrano e Scarlino.

La piana è solcata, da nord a sud, dal fiume Pecora il cui corso è stato più volte modificato al fine di bonificare l'antico lago di Scarlino.

Nella parte costiera, si sviluppa la città di Follonica, che rappresenta il più grosso centro abitato della piana, e ad est di questa si colloca la zona industriale del Casone.

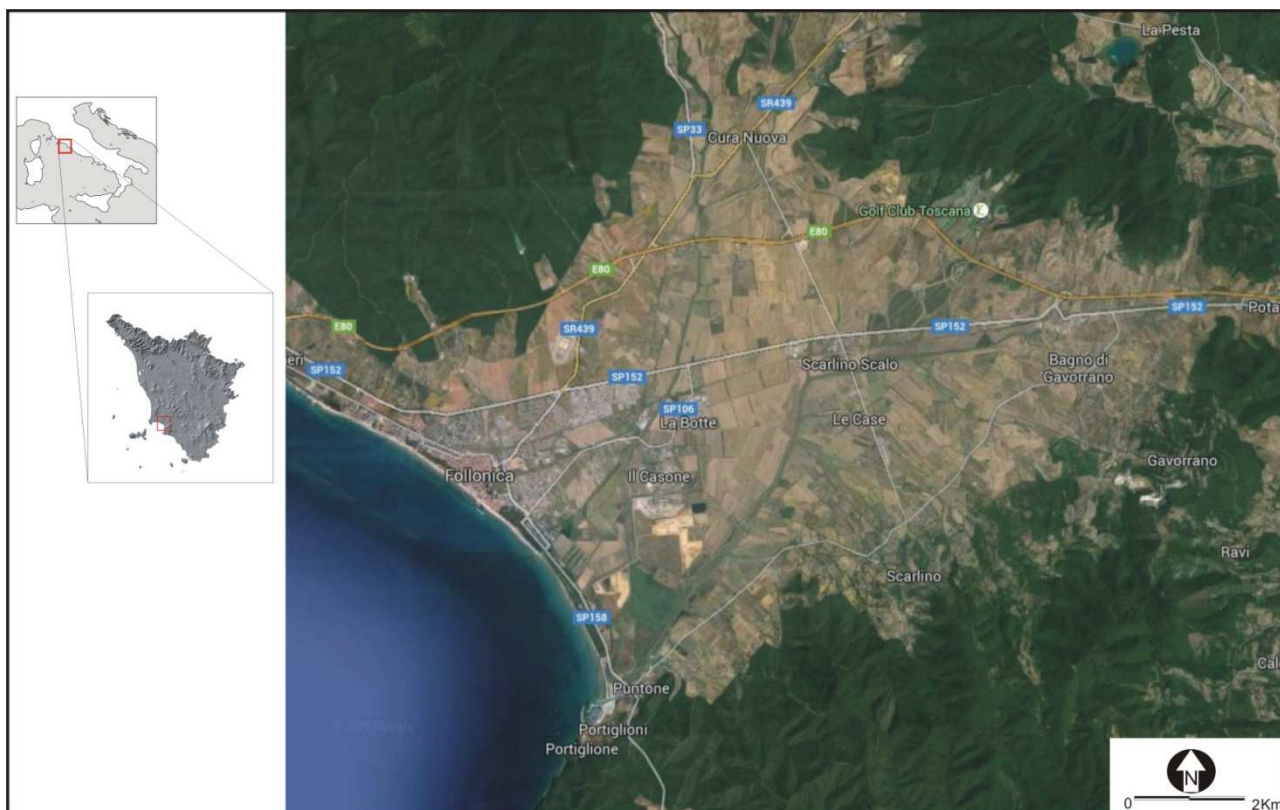


Figura 1: Inquadramento dell'area di studio-Pianura di Follonica-Scarlino. Immagine tratta da GoogleEarth, 2016.

2.2 *Inquadramento Geologico*

L'assetto stratigrafico e strutturale delle formazioni geologiche presenti nell'area di studio, riflette l'evoluzione Tettonica e Geodinamica che ha contraddistinto tutta la Toscana meridionale.

La Piana di Follonica ricade in una fossa tettonica orientata SW-NE, formatasi durante gli eventi distensivi che hanno seguito l'orogenesi appenninica.

Rappresenta, quindi, un tratto della catena appenninica, la quale viene considerata un "thrust-and fold belt" derivato dalla collisione tra la Placca Europea (micro-placca Briançonnais) e la Placca Africana (micro-placca Adria) (CARMIGNANI et al., 2004).

La progressiva migrazione verso est del fronte compressivo, si è protratta sino al Miocene superiore e ha determinato la costruzione della catena appenninica, mediante la sovrapposizione di falde tettoniche est vergenti.

A partire dal Miocene medio, dopo un periodo caratterizzato da regimi compressivi, ha inizio una prima fase con regimi estensionali, caratterizzata dallo sviluppo di faglie a basso angolo che provocano la laminazione tettonica della litosfera e la formazione della così detta "Serie ridotta".

Nel Miocene superiore, si instaura un'ulteriore fase con regimi estensionali, che ha come risultato la formazione di bacini sedimentari che verranno progressivamente colmati da sedimenti neogenico-quadernari.

I profili sismici indicano che i bacini sedimentari, associati a strutture tettoniche di tipo *Horst* e *Graben*, risultano delimitati da faglie dirette, a direzione appenninica, e da faglie trasversi anti-appenniniche con direzione NE-SW (**Fig.2**) (MARIANI & PRATO, 1988; PASCUCCHI, 2005).

La sedimentazione all'interno di questi bacini è governata da una progressiva subsidenza e dalle fluttuazioni della curva relativa del livello del mare (AMOROSI et al., 2004).

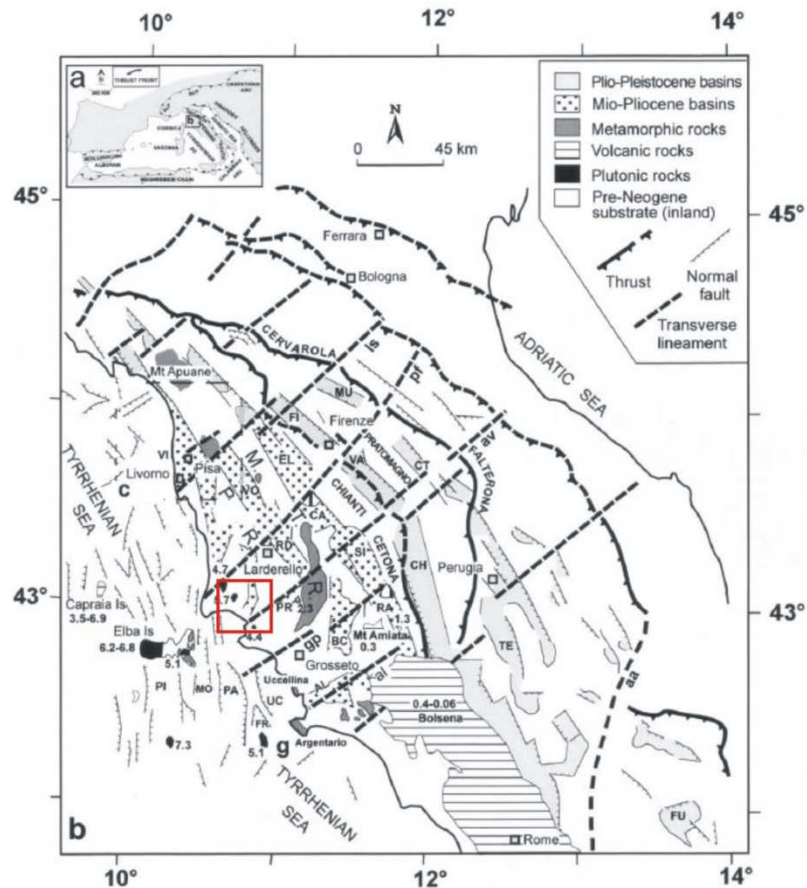


Figura 2: Mappa strutturale dei bacini Neogenico-Quaternari degli Appennini settentrionali. Immagine tratta da Pascucci (2005).

La successione sedimentaria definita da BOSSIO et al., (1998) e riscontrabile in diversi bacini toscani, fra cui quello di Follonica, si può scomporre in unità deposizionali limitate da superfici di *unconformity regionali*. Queste successioni sono state ricostruite sia grazie ai profili sismici disponibili, sia mediante sezioni stratigrafiche affioranti, sia attraverso lo studio di sondaggi profondi (BOSCHIAN et al., 2006; MAZZANTI et al., 1980). Di seguito vengono riportate sinteticamente le unità deposizionali descritte da (BOSSIO et al., 1998):

- Q1 – Unità Chiani – Tevere – Montescudaio
- P3 – Unità Pliocene III
- P2 – Unità Pliocene II
- P1 – Unità Pliocene I
- M3 – Unità di Lago-Mare
- M2 – Unità di Castelnuovo
- M1 – Unità di Acquabona-Spicchiola
- T – Unità Lignifera

Una osservazione importante è che lo spessore delle unità mioceniche e plioceniche varia, spostandosi da bacini occidentali verso quelli orientali. Nei bacini occidentali gli spessori di queste unità risultano maggiori rispetto a quelle plioceniche; fattore che si inverte nei bacini orientali, a ridosso della catena appenninica. Spostandosi internamente, verso est, i depositi miocenici risultano quasi assenti, mentre quelli pliocenici raggiungono spessori di circa 1000 m sotto le vulcaniti. Ciò dimostra chiaramente come la sedimentazione sia migrata nel tempo secondo la direzione WSW-ENE (**Fig.3**) (BOSSIO et al., 1998):

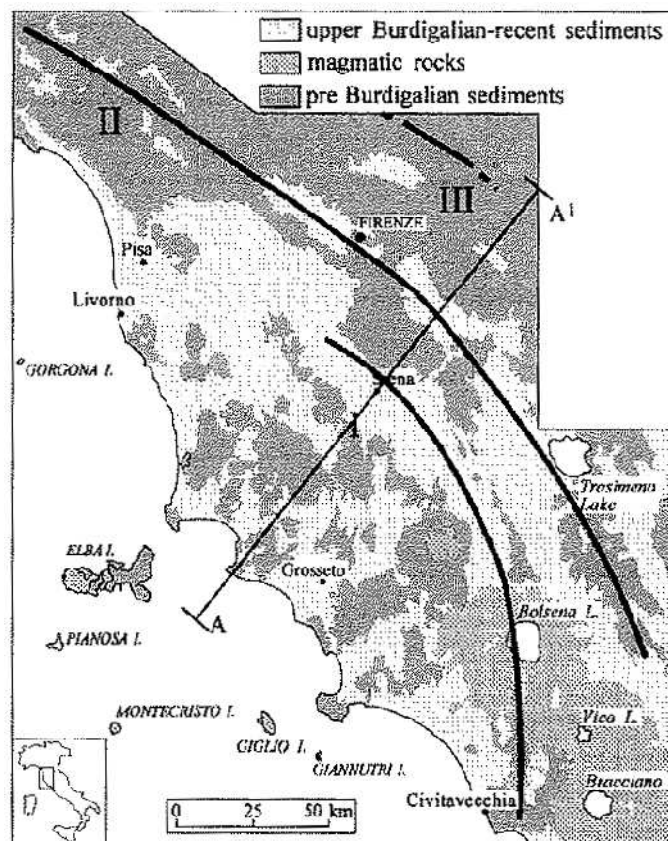


Figura 3: Sviluppo dei tre intervalli neogenici di sedimentazione. I numeri romani rappresentano i confini delle aree collegate a questi intervalli temporali. I) tardo Burdigaliano-tardo Tortoniano; II) tardo Tortoniano-Pliocene medio; III) Pleistocene inferiore. Immagine tratta da Bossio et al., (1998).

Per spiegare gli spessori delle successioni sedimentarie nei diversi bacini, non sono sufficienti le sole variazioni eustatiche positive. Una forte attività tettonica è infatti necessaria a permettere la subsidenza dei sedimenti. Esaurimenti o inversioni di questa subsidenza tettonica o variazioni eustatiche, sarebbero la causa dei limiti riconosciuti fra le unità. Di questi, quattro sono unconformity regionali associate ad uplift tettonici e hiatus sedimentari (**Fig.4**) (BOSSIO et al., 1998):

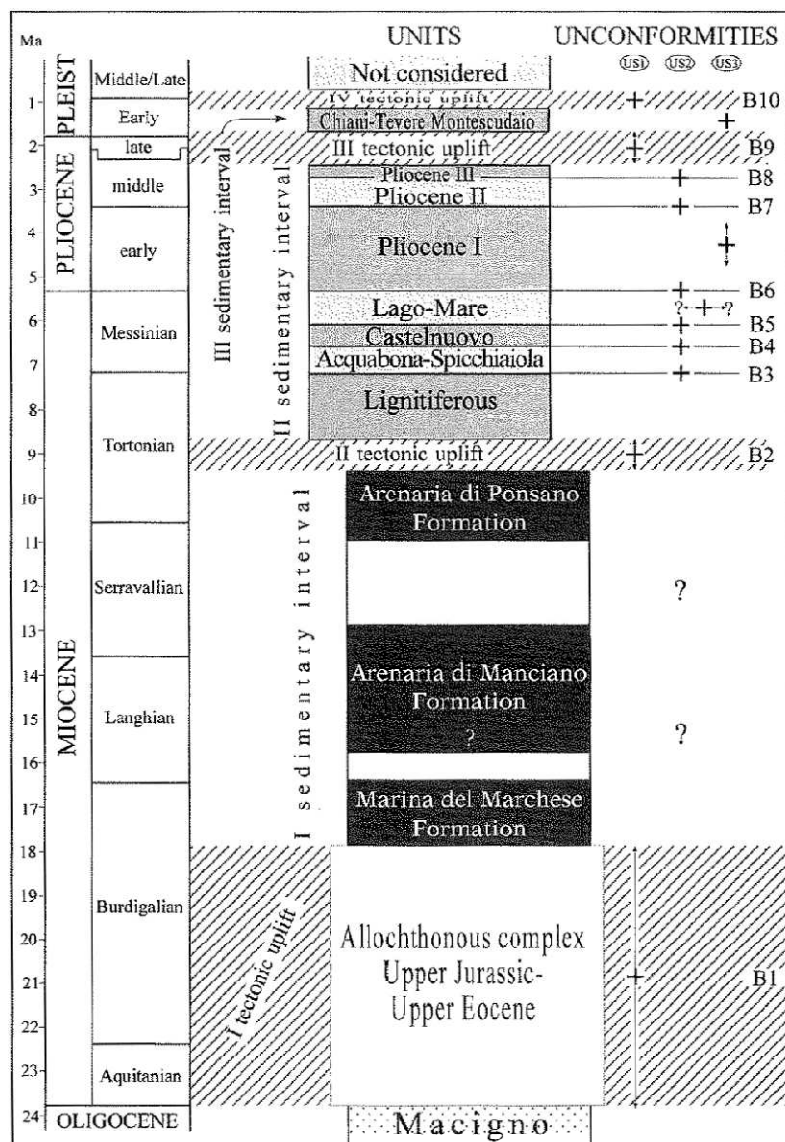


Figura 4: Distribuzione cronostratigrafica delle unità deposizionali e loro limiti (B1, B2 ecc.), formazioni epiliguri e discordanze (+) negli Appennini Settentrionali occidentali. US1) unconformity localizzata in tutti gli Appennini Settentrionali occidentali; US2) unconformity localizzata soltanto in alcune aree, ma con corrispettive conformity sempre riconoscibili alla base di sedimentazione importante; US3) unconformity localizzata solo in alcune aree, senza le corrispettive conformity regionali. Le lacune stratigrafiche sono indicate dalle linee diagonali. (Bossio et al., 1998).

2.2.1 La geologia dell'area

Analizzando la carta geologica regionale (**Fig. 5**), è possibile verificare che, nel margine settentrionale della pianura di Follonica, affiora la formazione delle Argille e Calcari a Palombini (APA) del Cretaceo Inferiore. Questa formazione, appartenente al Dominio Ligure, è costituita da argilliti con intercalazioni di calcilutiti silicee.

Nella porzione meridionale, in corrispondenza dei rilievi di Gavorrano e Scarlino, affiorano le unità appartenenti al Dominio Subligure e al Dominio Toscano.

In particolare il Dominio Subligure è rappresentato dall'Unità di Canetolo che comprende i Calcari di Groppo del Vescovo (CGV) e le Argille e Calcari di Canetolo (ACC) (CERRINA FERONI et al., 2009).

Il Dominio Toscano, è rappresentato dalla formazione torbiditico-arenacea del Macigno (MAC) (Oligocene sup. - Miocene inf.), affiorante nel settore compreso tra Scarlino e Portiglioni, mentre nei pressi di Gavorrano, è invece rappresentato dai termini della successione carbonatica mesozoica, costituiti dal Calcare Massiccio (MAS), dal Calcare Cavernoso (CCA) e dai Calcari a *Rhaetavicula contorta* (RET); questi sono stati intrusi da Graniti pliocenici affioranti a Gavorrano (GRA).

La Formazione delle Argille a Palombini e quella del Macigno, costituiscono il substrato pre-neogenico che raggiunge le maggiori profondità nella zona compresa tra l'area industriale di Follonica e quella del Casone, dove lo spessore del neoautoctono risulta superiore a 200m (TANELLI et al., 2003).

I depositi del Neoautoctono, che comprendono depositi neogenici e quaternari, si distribuiscono su tutta la pianura. In particolare, i depositi olocenici sono rappresentati dai Depositi Alluvionali Attuali (b) e Recenti (bna), entrambi costituiti da ghiaie, sabbie e limi dei terrazzi fluviali, dai Depositi di Spiaggia (g2a) costituiti da sabbie litorali, e dai Depositi Eolici (da) costituiti prevalentemente da sabbie. Per quanto riguarda la successione Pleistocenica, essa viene rappresentata dai Depositi Alluvionali Terrazzati (bnb), costituiti da ghiaie, sabbie e limi, dalle Sabbie di Donoratico (VILe), costituite da calcareniti sabbiose e da sabbie rosso-arancio e dal Conglomerato del Pod. S. Luigi (VILa), che affiora attorno ai rilievi di Montioni.

Lungo i margini più interni del fiume Pecora, invece, affiorano depositi costituiti da sabbie e sabbie argillose di colore giallo, travertini e sedimenti di conoide, compresi nella Fm. del Fiume Pecora, attribuita in parte al Pleistocene Medio e Superiore (BOSSIO et al., 1993). Infine, la successione neogenica, è rappresentata dai Conglomerati marini poligenici (Pliocene) (PLIb), affioranti nella porzione di Nord-Est, e dal Conglomerato di Montebamboli riferito al Miocene Superiore (MESb) e affiorante nei rilievi a nord di Follonica.

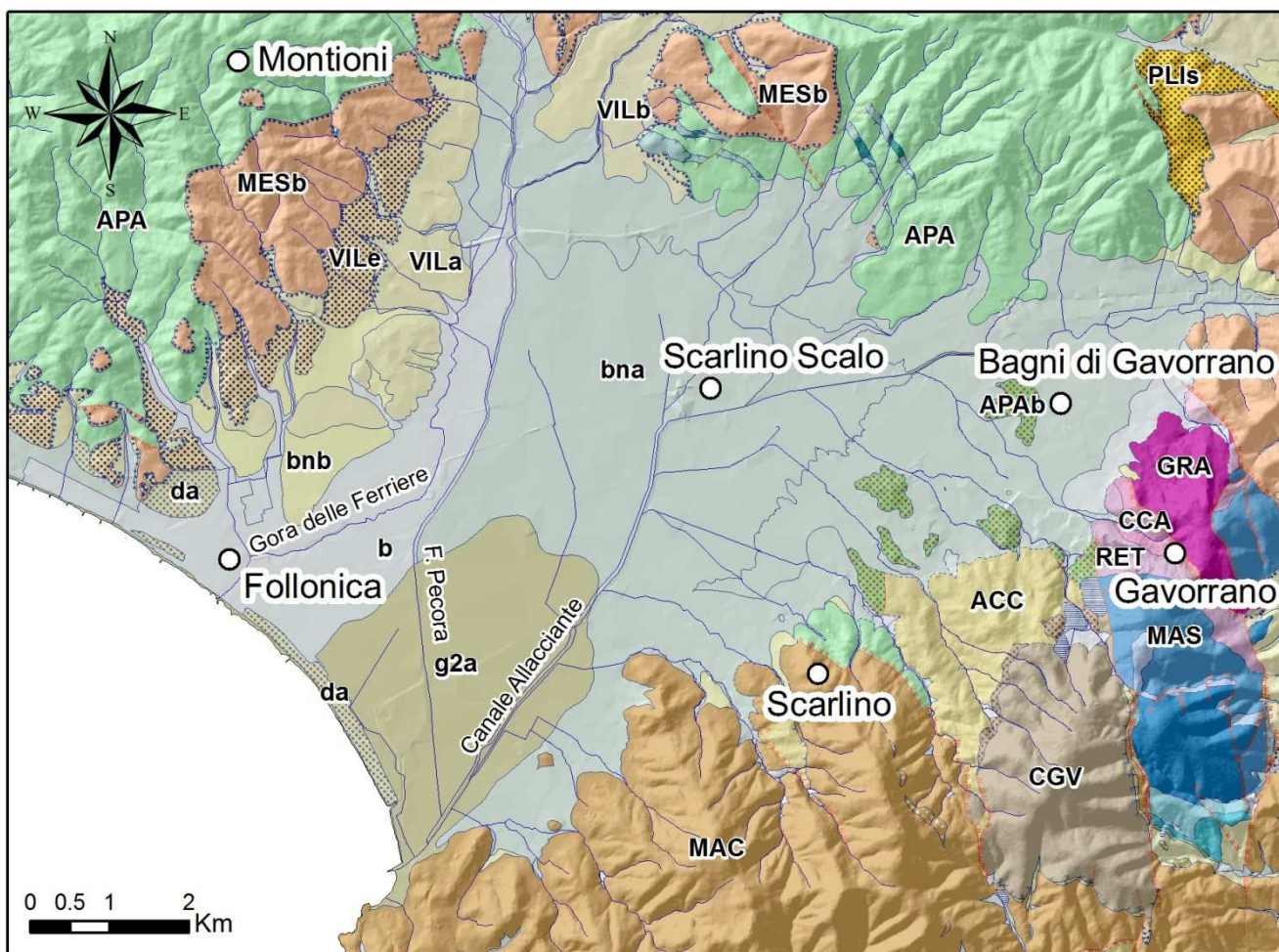


Figura 5: Carta geologica della pianura di Follonica-Scarlino, in scala 1:10000, modificata da Rapporto Interno N.10973 IGG-CNR 2015. Tratta dalla Carta Geologica e Geomorfologica della Regione Toscana. La legenda viene riportata di seguito.

Legenda Geologica e Geomorfologica

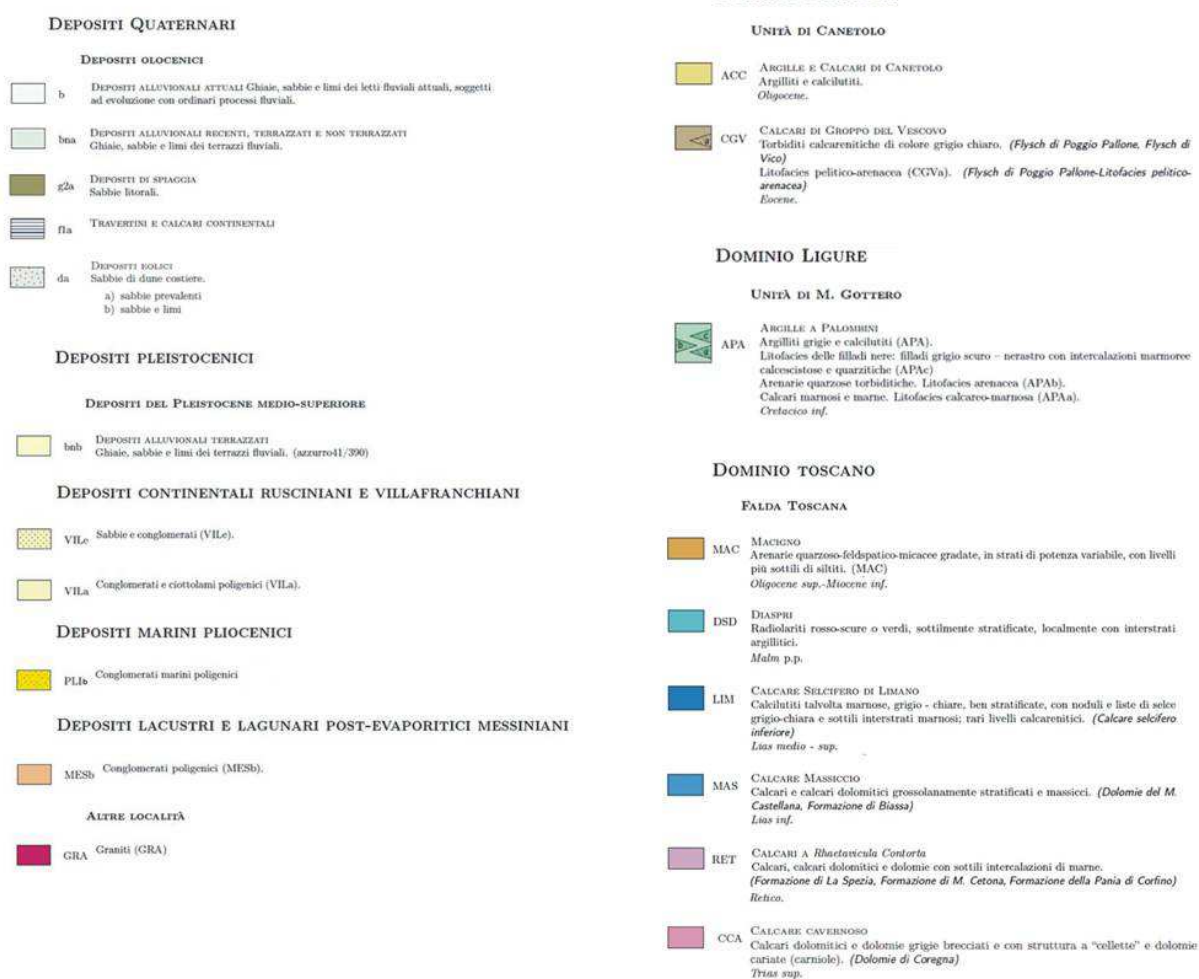


Figura 6: Legenda modificata tratta dalla Carta Geologica e Geomorfologica, in scala 1:10000, della Regione Toscana.

Alcuni autori considerano la Piana di Follonica e l'adiacente Piana del Cornia, come appartenenti ad un unico bacino di sprofondamento tettonico ad asse appenninico (BOSSIO et al., 1993; BOSCHIAN et al., 2006). Il lavoro condotto da (AMOROSI et al., 2004), attraverso un approccio multidisciplinare, sedimentologico e micropaleontologico, riporta lo studio di un sondaggio a carotaggio continuo, ubicato a Vignarca (circa 15 Km a nord-ovest di Follonica) e profondo 105 metri. I risultati ottenuti in questo studio hanno permesso il riconoscimento di una successione monotona di depositi di piana alluvionale, interrotta da un caratteristico livello di sedimenti lagunari, posti ad una profondità compresa fra 18 e 21 m. Una datazione al radiocarbonio effettuata con tecnica AMS, su materia organica riferita a questo livello stratigrafico (20,80 m d.p.c.), ha restituito un'età maggiore di 43 mila anni (AMOROSI et al., 2004). Questi risultati sono importanti sia perché restituiscono un tasso di subsidenza dell'area, sia perché aiutano a comprendere le dinamiche de posizionali dei bacini sedimentari limitrofi.

2.2.2 Inquadramento Geomorfologico

Dal punto di vista geomorfologico, è possibile distinguere una zona collinare, che comprende i rilievi a nord di Follonica e quelli di Scarlino a sud, e una zona pianeggiante, prevalentemente occupata dalla pianura alluvionale del Fiume Pecora.

La zona litorale, è caratterizzata da una costa bassa e sabbiosa che si estende dal Puntone fino a Follonica, ed alta e rocciosa tra la foce dell'Alma e Portiglioni (TANELLI et al., 2003). Nella costa bassa è presente un cordone di dune, fissate dalla vegetazione, formato nel Pleistocene da sedimenti fluviali e marini (BARTOLINI et al., 1977), e costituisce la divisione fra la spiaggia e la piana retrostante.

In quest'area interna, rispetto alla barriera dunare, oggi è presente una zona palustre denominata *Padule di Scarlino*, in cui vengono raccolte le acque del F. Pecora che non possiede energia sufficiente per giungere al mare (BARAZZUOLI et al., 2006).

L'assetto geomorfologico dell'area di studio, quindi, è il risultato sia di processi geologici sin e post-orogenici, sia dell'intensa attività di modificazione del territorio esercitata dall'uomo, negli ultimi secoli.

Un esempio di modificazione antropica è il *Padule di Scarlino*, che rappresenta i resti di un lago salato comunicante con il mare. Diversi autori indicano che la sua estensione, nel corso delle epoche storiche, è andata progressivamente riducendosi, fino alle bonifiche lorenese che lo hanno interamente colmato (BARAZZUOLI et al., 2006).

L'intervento antropico si è fatto sentire pesantemente anche lungo la costa, tra le più colpite dall'erosione in toscana (BARTOLINI et al., 1989); a questo proposito (BARTOLINI et al., 1977), evidenziano il ruolo non trascurabile svolto proprio dai processi di bonifica per colmata, per quanto riguarda la diminuzione del trasporto solido.

2.3 *Aspetti Climatici*

La Toscana, dal punto di vista climatico, in ragione della sua particolare conformazione orografica, può essere suddivisa in due macro aree, l'alta Toscana e la Toscana centro-meridionale.

L'alta Toscana, presenta un regime di precipitazioni superiore, rispetto alla porzione centro-meridionale, con la massima concentrazione di precipitazioni che si raggiunge nel periodo autunno-inverno.

Inoltre, la particolare distribuzione dei rilievi montuosi, protegge i settori meridionali dalle masse di aria fredda provenienti dai Balcani.

La Toscana centro-meridionale, ha un regime di precipitazioni mediamente inferiore, e la vicinanza al mare riesce a mitigare il clima, soprattutto le temperature minime.

Le aree più meridionali sono contraddistinte da fenomeni di aridità strutturale, dove è solito il ricorso all'irrigazione nelle pratiche agricole.

La porzione orientale della Toscana, è caratterizzata dal cosiddetto effetto "valle interna", dove possono verificarsi fenomeni legati all'inversione termica, quali nebbie e gelate (<http://www.lamma.rete.toscana.it/clima-e-energia/climachecambia>).

L'area di studio, quindi, inserita in questo contesto climatico, presenta un clima tipicamente mediterraneo, con estati caldo-moderate ed inverni non particolarmente freddi.

Sulla base dei dati pluviometrici registrati dalle stazioni meteorologiche presenti nell'area in studio (Scarlinò, Follonica e Tesorino, **fig.7**), con una serie temporale di dati dal 1951 ad oggi (disponibili sul sito: www.sir.toscana.it) è stato possibile calcolare un valore medio di 645 mm annui.

I dati di temperatura rilevati dalle stazioni di Casotto Pescatori e San Vincenzo (**fig.7**), uniche stazioni ubicate nei bacini limitrofi a quote confrontabili con l'area in studio e con una serie di dati temporali continua dal 2005 ad oggi, indicano un valore medio annuo pari a circa 15 °C.

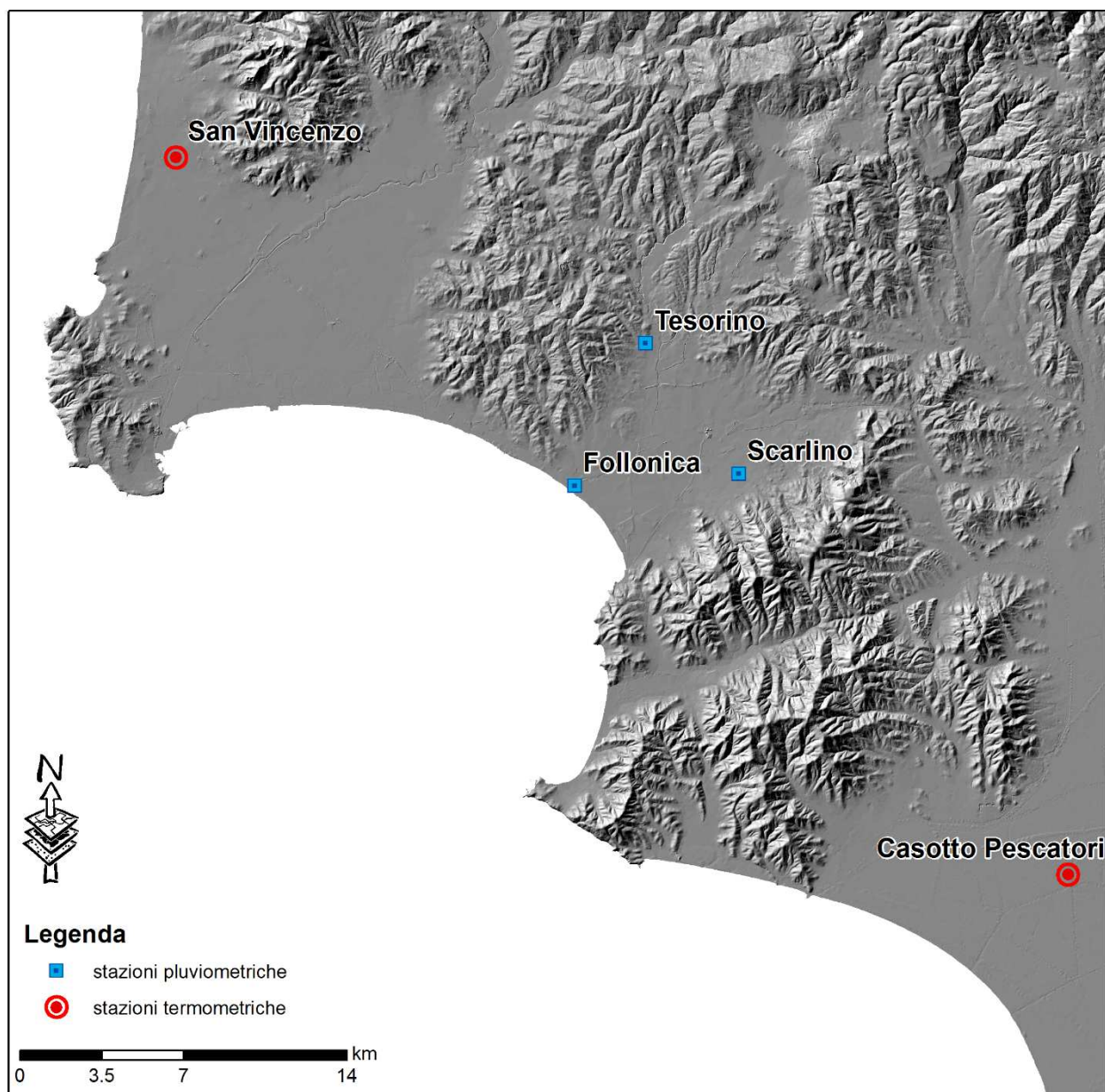


Figura 7: Stazioni meteoclimatiche presenti nell'area in studio.

I valori di piovosità e temperatura comportano periodi sensibilmente aridi nei mesi estivi. In accordo alla classificazione climatica di Thornthwaite ed agli studi di (BARAZZUOLI et al., 2006), essa può essere considerata subarida C_1 (indice di umidità globale compreso tra -33,3 e 0) (**Fig.8**).

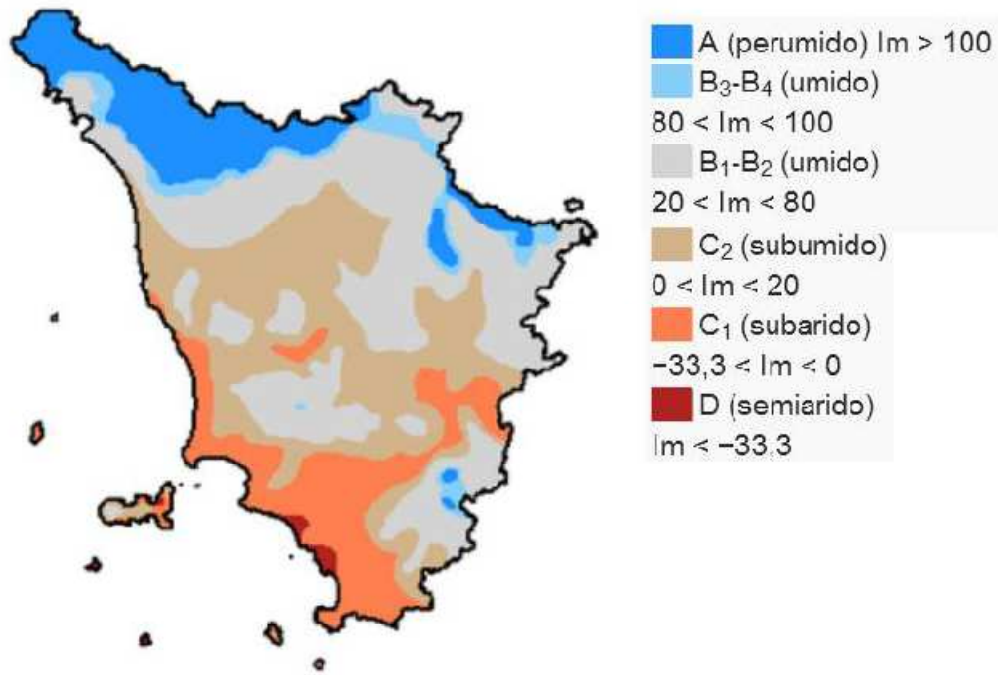


Figura 8: Classificazione climatica della Toscana. Immagine trattata da *Atlante Geoambientale della Toscana* (Regione Toscana). $Im = (P-ETP/ETP)*100$; Im (Indice globale di umidità) P= precipitazioni annue; ETP= evapotraspirazione potenziale media annua.

Considerando i 3 mesi antecedenti al periodo di campionamento svolto nell'ambito di questa tesi (Aprile, Maggio e Giugno 2014), sono stati inoltre reperiti i report idrologici resi disponibili dal Servizio Idrologico Regionale della Toscana (<http://www.sir.toscana.it/index.php?IDS=4&IDSS=321>).

I valori medi mensili delle precipitazioni per i mesi di Aprile, Maggio e Giugno 2014 sono rispettivamente di 70, 30 e 50 mm. Il confronto tra queste piogge e quelle medie di analoghi periodi ma riferite al trentennio 1984-2013, mostra una piovosità superiore nel 2014 (**Fig.9**).

Il 2014, infatti, è risultato l'anno più caldo degli ultimi 60 anni, insieme al 2003, e il secondo anno più piovoso dal 1955, dopo il 1960, in particolare grazie al contributo di mesi come Gennaio e Luglio (<http://www.lamma.rete.toscana.it/news/clima-2014-toscana-anomalie-record-e-curiosit%C3%A0>).

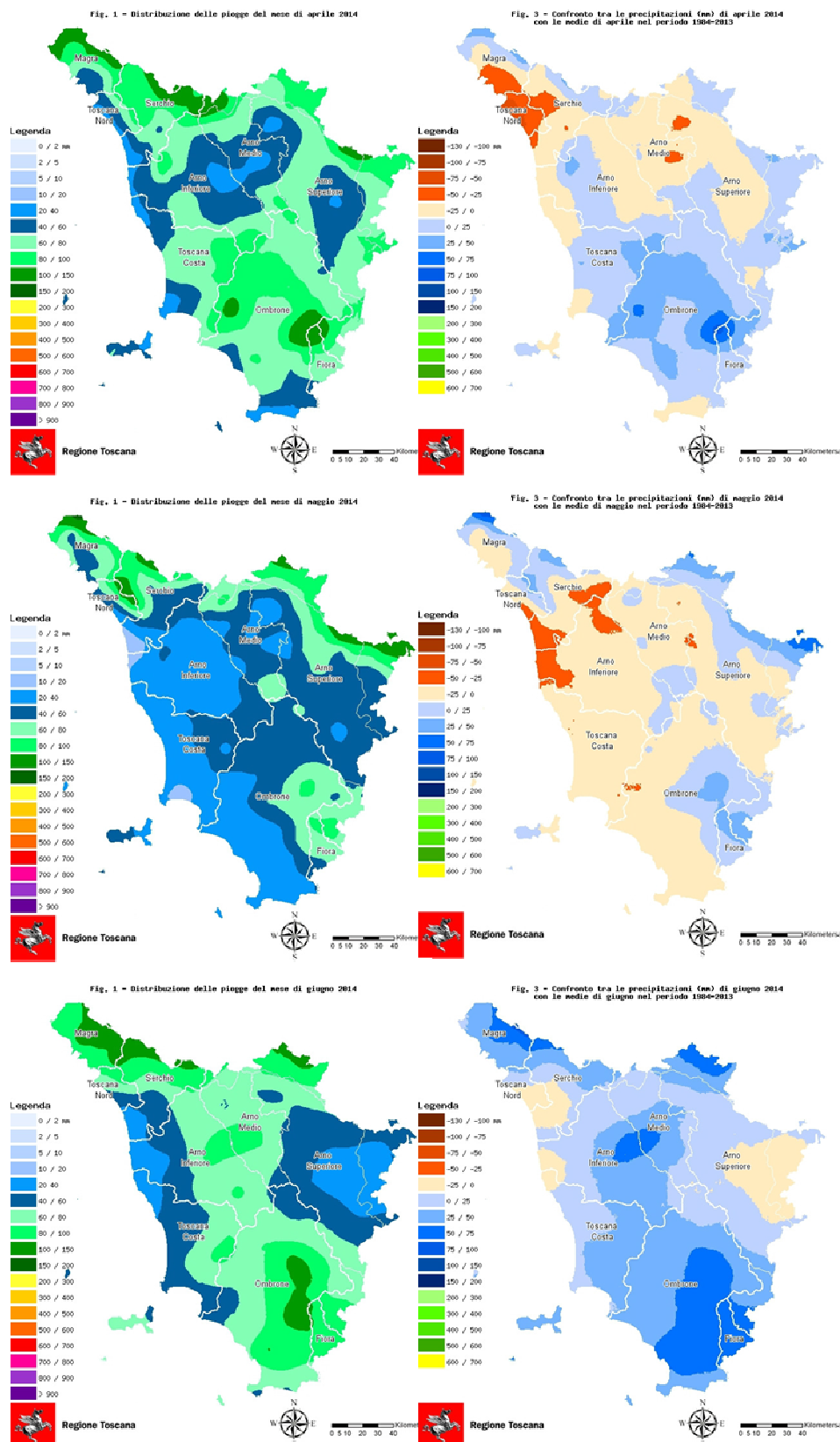


Figura 9: Distribuzione delle piogge nei mesi di Aprile Maggio e Giugno 2014 (a sinistra). Distribuzione delle piogge nei mesi di Aprile Maggio e Giugno relative al trentennio 1984-2013 (a destra). I valori delle precipitazioni in legenda rappresentano le precipitazioni totali espresse in mm. Immagini tratte dal SIR Toscana.

2.4 Idrografia e Idrogeologia

Il Fiume Pecora nasce dal M. Arseniti ad una quota di circa 400 m s.l.m (**Fig.10**), sfocia all'interno del Padule di Scarlino, per poi defluire nel Mar Tirreno, grazie ad una serie di canali artificiali, presso la località del Puntone.

Altri corsi d'acqua importanti sono, il Canale Allacciante, che raccoglie le acque dell'ex-complexo minerario di Gavorrano e sfocia in mare presso la località Puntone, e il Torrente Gora delle Ferriere che si forma dalla confluenza dei torrenti Fosso Venelle e Fosso Aronna, sfociando in mare a Follonica.

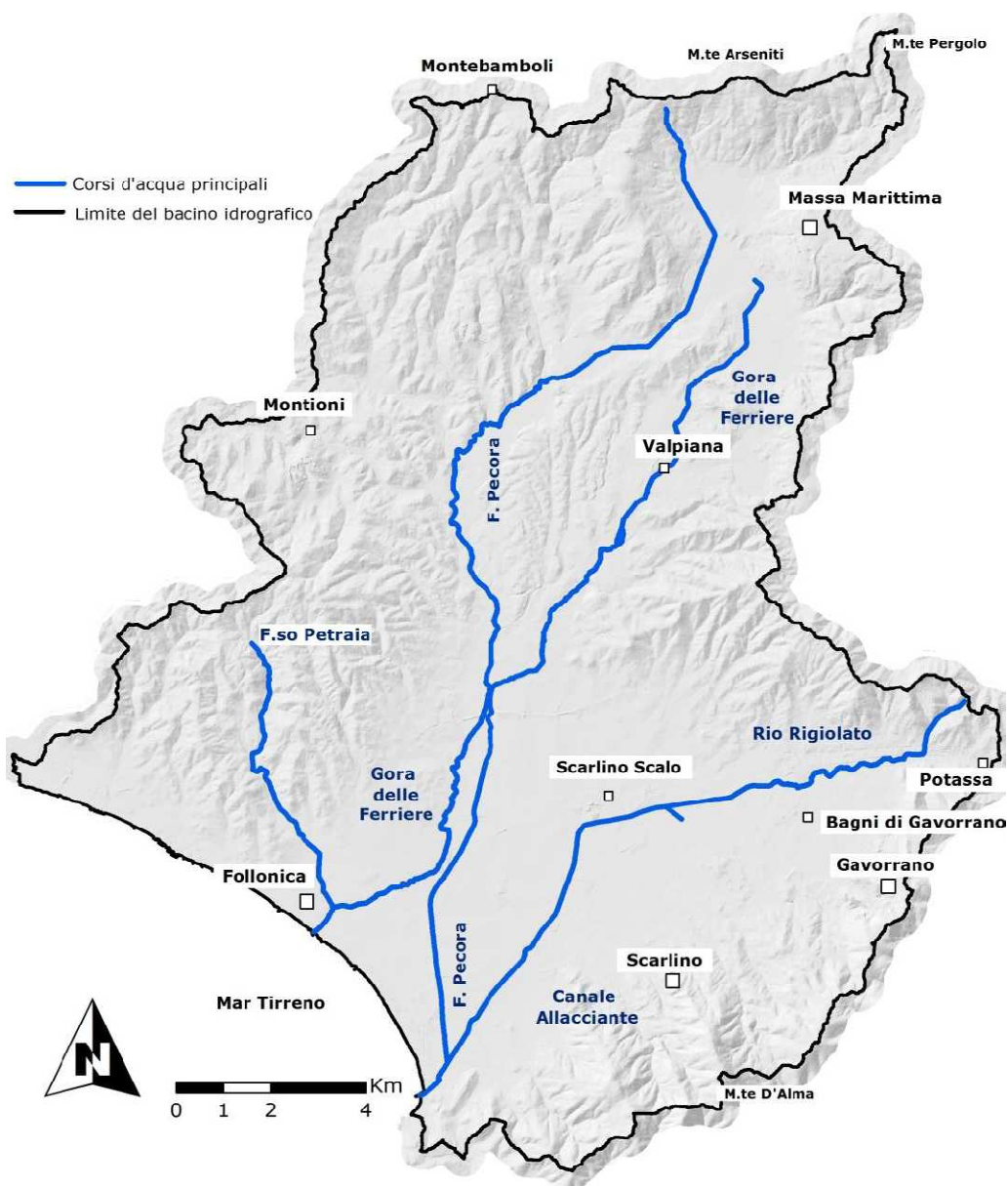


Figura 10: Bacino Idrografico del Fiume Pecora. Sono elencate le principali località d'interesse ed i nomi dei corsi d'acqua.

Il Fiume Pecora è caratterizzato da portate minime nel corso dell'anno, e l'unico importante sostegno alle portate di magra erano le acque scaturite dalle sorgenti Venelle, Aronna e Carrareccia. I dati bibliografici per queste sorgenti, indicano una portata media, rispettivamente di 0, 160 e 42 l/s (LIBERATI, 2001), inferiore ai valori riferiti da altri autori (DEFERRARI & LOTTI, 1886), che variavano in un range 672-1000 l/s solo per la sorgente Aronna. E' probabile che tale riduzione di portata sia legata al drenaggio delle cavità minerarie ed anche alla diminuzione della ricarica naturale, legata al calo delle precipitazioni meteoriche registrato negli ultimi decenni nella toscana meridionale, a causa dell'evoluzione climatica recente della penisola italiana (BARAZZUOLI et al., 2003a; 2003b).

La piana di Follonica-Scarlino, nel corso degli anni, è stata oggetto di vari studi, alcuni dei quali hanno permesso di definire le caratteristiche idrogeologiche dell'area, grazie anche alla presenza di numerosi pozzi destinati ad uso idropotabile, industriale ed agricolo.

Secondo (TANELLI et al., 2003), il numero degli acquiferi profondi nella Piana, risulta variabile, in considerazione della variabilità dello spessore della sequenza neoautoctona e della presenza di frequenti eteropie di facies.

La presenza di eteropie di facies, favorisce in diversi casi l'interscambio fra gli acquiferi. Tale interconnessione, da un punto di vista idraulico, è accentuata dalle numerose perforazioni di pozzi che, captando diversi livelli acquiferi in maniera indifferenziata, ne mettono in comunicazione le acque.

Sempre secondo questi autori, i terreni della piana presentano un diverso grado di permeabilità, come sotto specificato:

- **Complesso quaternario**, costituito da depositi sciolti o scarsamente cementati, a prevalente permeabilità primaria, per porosità interstiziale.

I depositi olocenici, con un andamento frequentemente lenticolare, possono essere suddivisi tra quelli a permeabilità medio-alta (sabbie e dune costiere, coperture detritiche, conoidi di deiezione) e quelli a permeabilità da bassa a praticamente nulla (terreni di bonifica, alluvioni recenti ed attuali, depositi palustri) (BARAZZUOLI et al., 2006).

I depositi Pleistocenici, rappresentati dal Conglomerato di Podere San Luigi e le Sabbie rosso-arancio di Donoratico, presentano un alto grado di permeabilità.

- **Complesso pre-quaternario**, costituito da formazioni diagenizzate, a prevalente permeabilità secondaria, per fratturazione, o mista.

I depositi neogenici (Conglomerati marini poligenici, Conglomerato di Montebamboli), presentano una permeabilità medio-bassa, così come la formazione del Macigno. Mentre presentano permeabilità scarsa o nulla le Argille e Calcari a Palombini.

Inoltre, in un lavoro più recente eseguito da (ARPAT, Gennaio 2014), viene mostrato come all'interno del Complesso Neoautoctono, che comprende depositi neogenici e quaternari, si possono distinguere due sistemi acquiferi principali (**Fig.11-12**):

- un acquifero superiore monostrato, a carattere freatico, in equilibrio con le acque del Pecora, dell'Allacciante e del Padule, che si sviluppa dalla superficie fino a pochi metri di profondità.
- un acquifero inferiore multistrato e multifalda, a carattere artesiano, dal quale attingono i pozzi idropotabili ed i principali pozzi industriali ed agricoli della zona. I livelli più superficiali e più sfruttati si trovano ad una profondità compresa tra 12 e 30 m dal piano campagna.

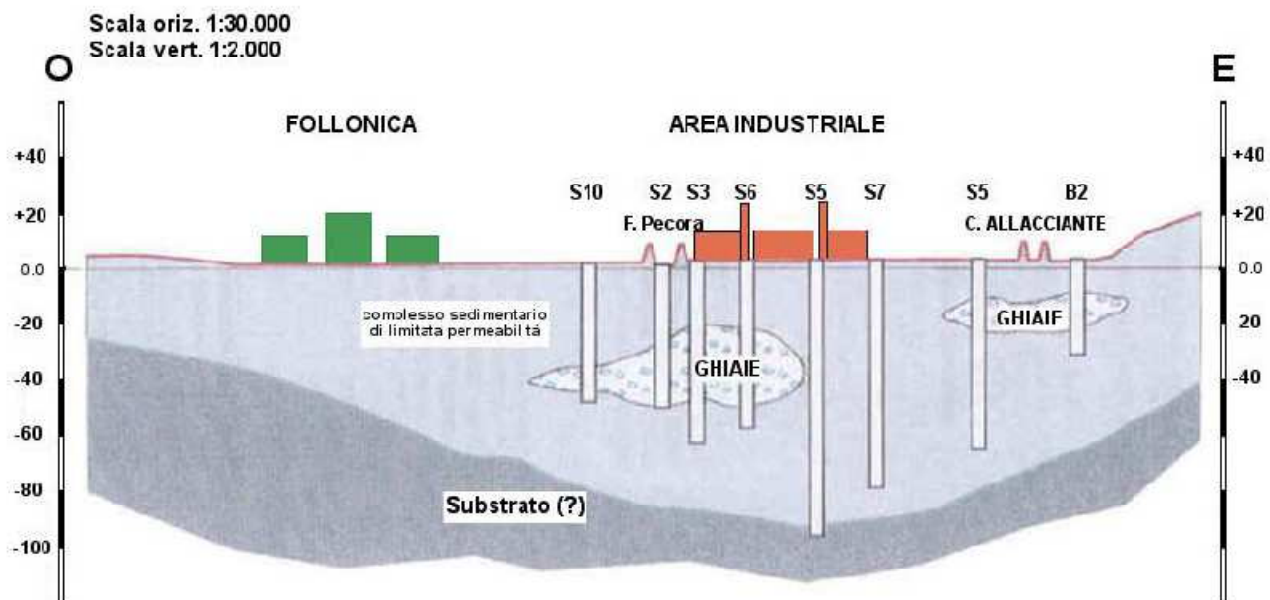


Figura 11: Sezione geologica schematica della piana di Follonica-Scarlino. Tratta da NUOVA SOLMINE, (2002).

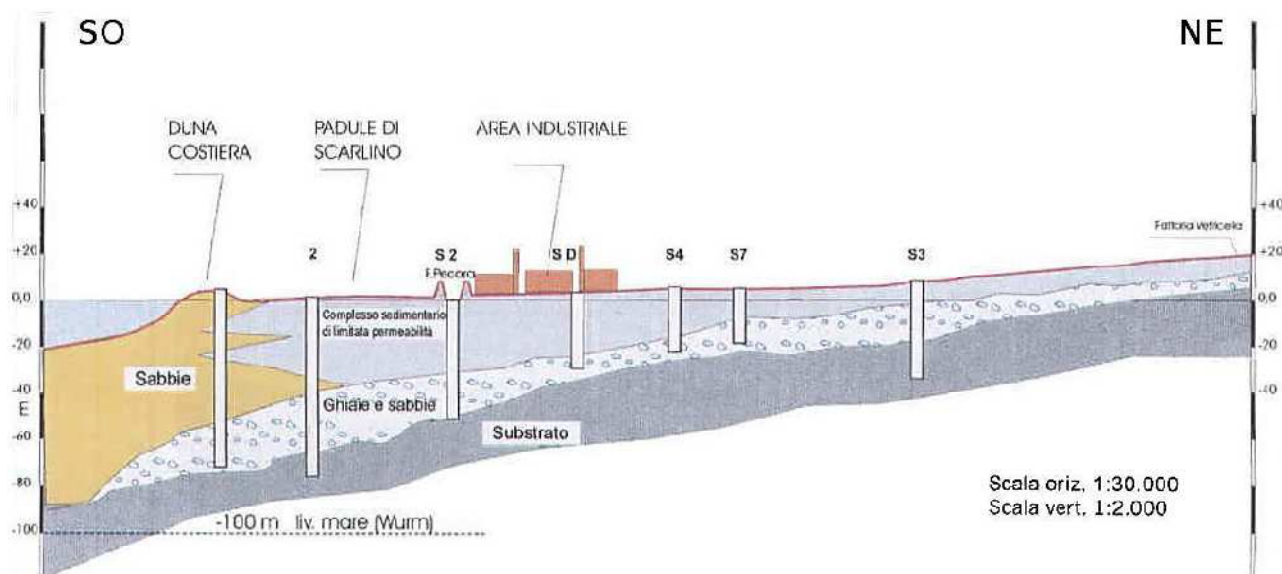


Figura 12: Sezione geologica schematica della piana di Follonica-Scarlino. Tratta da NUOVA SOLMINE, (2002).

Altri studi, eseguiti sui pozzi più profondi nella zona di Scarlino, denominati la Botte (ARPAT-DST/UNIFI, 2006) e Vetricella (ARPAT-DST/UNIFI, 2008) (**Fig.13**), evidenziano la presenza rispettivamente di otto orizzonti acquiferi nel primo pozzo (compresi fra 17 e 140 m d.p.c.) e quattro orizzonti acquiferi nel secondo (fra 25 e 83 m d.p.c.). Le due perforazioni corredate da analisi chimico-isotopiche e mineralogico-petrografiche, hanno evidenziato inoltre concentrazioni rilevanti di arsenico, sia nei livelli acquiferi, sia nei terreni profondi non influenzati da attività antropiche. I contenuti di arsenico sono riferibili alla presenza, nel bacino del Fiume Pecora, di giacimenti di varia origine, polimetallici e mineralizzazioni a pirite e solfuri misti.

In questi due sondaggi, nelle porzioni più profonde, è stata rilevata una brusca diminuzione delle concentrazioni di arsenico, che può essere attribuita a due fattori principali: 1) i sedimenti polimetallici non si erano ancora formati; 2) pur essendo presenti si trovavano a profondità tali che non erano ancora in grado d'interagire con gli acquiferi (TANELLI et al., 2003; ARPAT-DST/UNIFI, 2005).

Infine, le analisi isotopiche di ossigeno e deuterio effettuate nei due sondaggi (la Botte e Vetricella), indicano che le falde sembrano essere alimentate da acque meteoriche, con un'altitudine di ricarica di circa 250 m s.l.m. L'età delle acque freatiche e di quelle artesiane più superficiali risulta inferiore ai 10 anni, mentre per quelle più profonde l'età è compresa fra i 10 e i 50 anni (ARPAT-DST/UNIFI, 2006; ARPAT-DST/UNIFI, 2008).

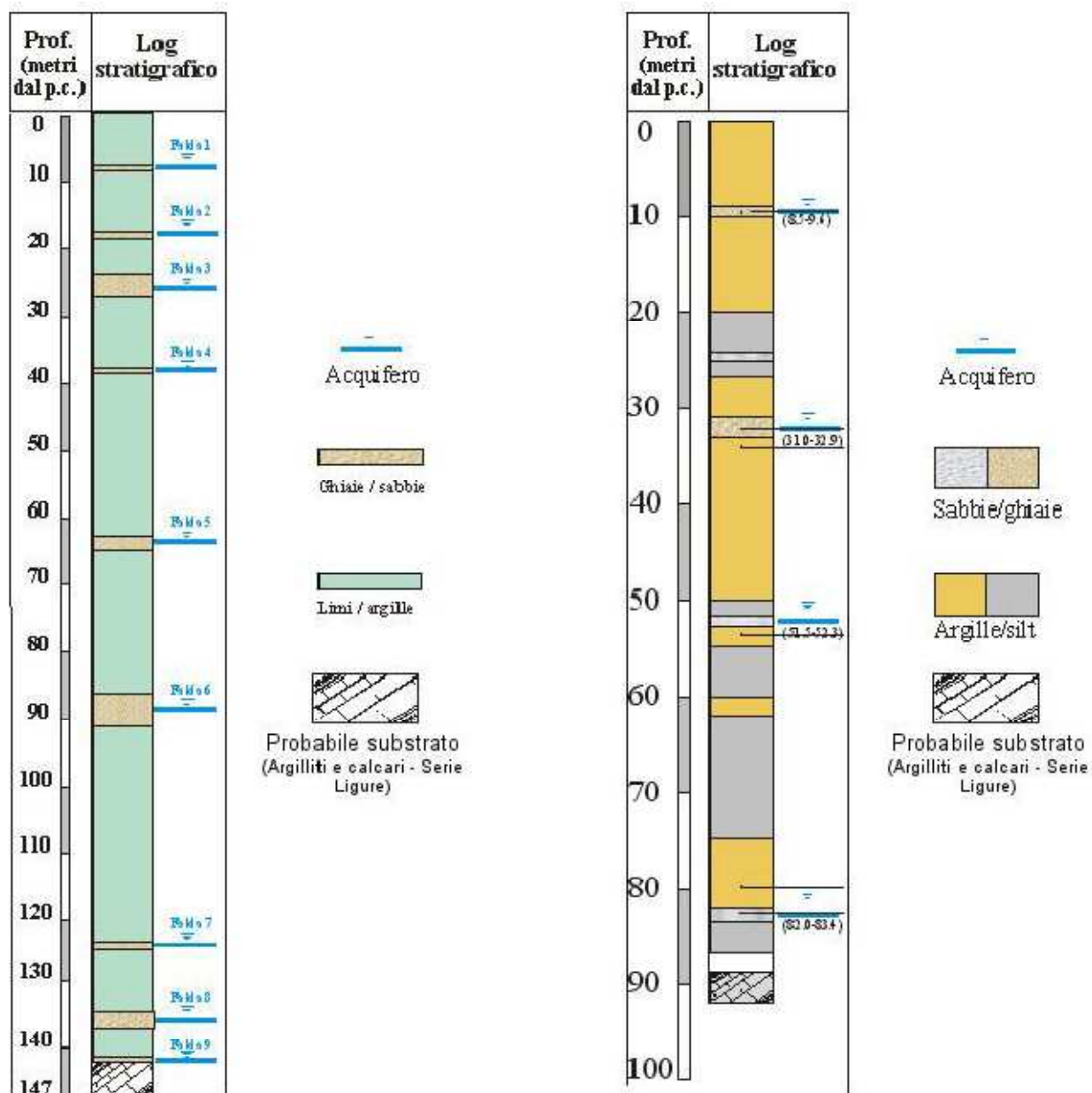


Figura 13: Immagine dei pozzi La Botte (a sinistra) e Vetricella (a destra). In legenda sono riportate le litologie rappresentate e i simboli usati per indicare gli orizzonti acquiferi ed il possibile substrato (modificata da “Report ARPAT”, Gennaio 2014).

2.5 Inquadramento Storico

2.5.1 Attività Paleo – industriale

Il territorio delle Colline Metallifere è stato interessato da coltivazioni minerarie ed attività metallurgica fin da tempi antichi, ed in particolare durante i periodi etrusco – romano e medievale, sono state prodotte notevoli quantità di scorie di lavorazione metallurgica (CIPRIANI & TANELLI, 1983; TANELLI, 1989).

Il ritrovamento di scorie di pirite, testimonia l'intensa attività di estrazione mineraria e di lavorazione del materiale estratto.

Sulla base dei rilevamenti archeologici si possono distinguere due aree (BADII, 1931; BAIOTTO et al., 1990; CUCINI & TIZZONI, 1992):

- una zona della metallurgia del rame, del piombo e dell'argento, corrispondente all'alto e medio bacino del Pecora (Marsiliana, Pian delle Gore, Torre dei Botricoli, Schiantapetto – Aialla).

- una zona della metallurgia del ferro, corrispondente alla bassa Valle del Pecora, dove si rinvenivano scorie ferifere sia lungo i fossi che scendono dal versante orientale e occidentale della valle, sia lungo la costa (Poggio Butelli).

2.5.2 Attività Industriale

Lo sfruttamento delle risorse minerarie della Maremma, riprese nella prima metà del XIX secolo e fino ai primi anni del XX secolo, quando fu avviata la coltivazione dei giacimenti di pirite di Gavorrano, Niccioleta e Boccheggiano.

Negli anni '80 fu avviata, la coltivazione del giacimento di Campiano (CIPRIANI & TANELLI, 1983; TANELLI, 1983; TANELLI & LATTANZI, 1983). Il principale centro di stoccaggio e spedizione della pirite, estratta nei giacimenti maremmani fra il 1905 e la metà degli anni '60, fu la località di Scarlino Scalo.

Nei primi anni '60, la Montecatini realizzò nella Piana di Scarlino lo stabilimento del Casone per la produzione, dalla lavorazione della pirite, di acido solforico, pellets di ossidi di ferro ed energia. Il minerale che proveniva direttamente dalle miniere di Gavorrano-Ravi, Boccheggiano e Niccioleta, subiva negli impianti del Casone, un processo di arrostitimento con decomposizione in ossidi di ferro (ceneri di pirite) e SO₂. Da quest'ultima si otteneva per ossidazione SO₃ e H₂SO₄.

Le ceneri di pirite, sottoposte a un processo di arricchimento, andavano ad alimentare l'impianto siderurgico di Piombino. Il materiale ultimo di scarto denominato "sterili di pirite", utilizzato diffusamente in loco per scopi geotecnici, conteneva tenori di As ancora nell'ordine delle centinaia di ppm.

Nel 1972 fu attivato da Montedison, ancora nella zona industriale del Casone, l'impianto industriale, oggi denominato Huntsman Tioxide, che utilizza l'acido solforico prodotto in loco, per sintetizzare il biossido di titanio.

Con l'entrata in produzione della nuova miniera di Campiano, con annesso stabilimento per la frantumazione e l'arricchimento del minerale grezzo, furono chiuse, nella prima metà degli anni '80, le miniere storiche di Gavorrano, Boccheggiano e Niccioleta, ma gli elevati contenuti in metalli quali lo zinco nel minerale di Campiano, impedirono l'impiego delle ceneri di pirite come materie prime per la produzione di ferro.

Negli anni 1984-85, venne interrotto il processo di arricchimento delle ceneri di pirite, che iniziarono ad essere stoccate in loco e solo in parte commercializzate nei cementifici.

Negli anni 1994-95 la Nuova Solmine, sotto il controllo di ENI, procedette alla chiusura della miniera di Campiano e ad una conversione dell'impianto annesso per la produzione di acido solforico, utilizzando lo zolfo di raffineria come materia prima. Nel 1997 la Nuova Solmine, è stata privatizzata ed assorbita dal gruppo SOLMAR SpA. Il ciclo produttivo della pirite, espletato dal 1962 al 1995, prevedeva la formazione di materiali reflui (acque, torbide, fanghi, gas, fini, sterili e ceneri di pirite), che in varia forma e misura avrebbero dovuto subire idonei processi di controllo, purificazione e smaltimento, ai fini della tutela ambientale.

Tra le problematiche ambientali legate all'attività industriale dell'area, si deve citare anche lo stabilimento Huntsman-Tioxide che, per la produzione di biossido di titanio dalla lavorazione del minerale ilmenite (FeTiO_3), ha prodotto scorie costituite principalmente da solfato ferroso eptaidrato (solferro).

Il materiale di scarto, che veniva prima sciolto negli effluenti forti e scaricato in mare, successivamente è stato stoccato a terra in bacini impermeabilizzati. Dal 1979 il processo produttivo è stato modificato, con l'utilizzo di scorie titanifere al posto dell'ilmenite, eliminando la produzione di solferro.

Attualmente, le scorie di lavorazione sono rappresentate da "fanghi di chiarifica" e dai "gessi rossi", derivati dal trattamento degli effluenti forti con calcare e calce.

Inoltre dal 2001, nelle aree di stoccaggio, è in esercizio un impianto per la trasformazione dei gessi rossi in "gessi bianchi" da utilizzare in cartiere (MURRATZU et al., 2015).

2.5.3 *Bonifica del Padule di Scarlino*

Il *Padule di Scarlino* è una zona paludosa che, nel corso del tempo, ha subito importanti modificazioni antropiche per evitare il ristagno delle acque e quindi l'impaludamento di tutta l'area circostante.

Le modifiche iniziarono già alla fine del '500, ad opera dei Medici, ma solo nella prima metà del '700, con i Lorena, vennero avviati i primi interventi di bonifica.

Granduca Leopoldo II (1831), successivamente, diede seguito alle bonifiche, sia per ottenere nuovi terreni per l'agricoltura e per l'industria, sia per debellare la malaria.

La bonifica, inizialmente, venne attuata utilizzando la tecnica della colmata, quindi eseguendo opere atte a favorire la naturale deposizione dei sedimenti trasportati dai corsi d'acqua, ma successivamente fu integrata utilizzando vari materiali, comprese scorie ferri-ferre antiche, vista la lentezza con la quale si andava sviluppando il processo di innalzamento dei terreni mediante la sola colmata.

Nel complesso, è stato stimato che il processo di bonifica abbia portato ad una deposizione di materiali, sopra il fondo del padule, che al massimo raggiunse gli 8- 9 m di spessore.

Le opere più importanti, eseguite durante la bonifica del padule di Scarlino, (BAIOCCO et al., 1990; FRANCOVICH, 1984), sono:

- La chiusura del Puntone di Scarlino (1832-36). Il padule comunicava col mare, per mezzo di una foce di circa 150 m di larghezza e 9 m di profondità, nella zona del Puntone. Per impedire il mescolamento delle acque marine con quelle dolci, fu costruito un argine divisorio, per il quale vennero impiegate le scorie di ferro accumulate a Poggio Butelli, le cosiddette "Loppe".
- Il distaccamento della Gora delle Ferriere dal F. Pecora (1830-31). Nei pressi di Cura Nuova-Vado all'Arancio, dove avviene la confluenza dei due fiumi, la Gora delle Ferriere è stata fatta passare al di sopra del Pecora, attraverso la costruzione di un canale-ponte. Quest'opera permetteva di mantenere indipendenti i due corsi d'acqua, consentendo al fiume Pecora di essere utilizzato per effettuare le colmate, e alla Gora delle Ferriere di fornire l'energia idraulica alle fonderie di Follonica. Inoltre il fiume Pecora, che fino ad allora per interrimento del proprio alveo straripava nel padule, fu arginato ed immesso in colmata nella parte occidentale del padule. Questo ha comportato uno spostamento verso ovest del suo corso, rispetto alla sua posizione originaria.

- La costruzione del Canale Allacciante (1832-36). Tutti i fossi e torrenti del settore orientale del padule e del territorio di Scarlino (il Rigiolato, la Vetricella, l'Alioppa, il Fontino, la Sorgente), furono canalizzati in un unico fosso, per consentire il deflusso delle acque stagnanti e per impedire che tali corsi d'acqua continuassero a straripare nel palude durante le piogge intense. Anche il Canale Allacciante fu utilizzato per eseguire le colmate.

Ulteriori interventi di bonifica, tutt'ora in corso, hanno interessato quest'area paludosa della pianura e ciò che rimane oggi del vecchio padule, è un Sito di Interesse Comunitario (S.I.C.), parte integrante di un sistema di aree protette, che si sviluppa nelle zone meridionali del golfo di Follonica (Oasi faunistica del Padule di Scarlino e Area Protetta di Interesse Locale di Cala Violina).

2.5.4 Bonifiche attuali

Tenendo conto di quanto previsto dal Testo Unico Ambientale D.Lgs. 152/06, a seguito della Conferenza dei Servizi del 29/04/2014 e della riunione tecnica tenutasi presso Arpat Toscana il 17/11/2014, è stato approvato il progetto operativo di bonifica delle acque di falda della piana di Follonica-Scarlino.

In questo progetto sono state valutate e definite le opere di bonifica da realizzare, in relazione alle tipologie di inquinanti e alla matrice ambientale interessata dalla contaminazione.

Secondo lo studio di (MURRATZU et al., 2015), la tecnica di bonifica che offre maggiore applicabilità, dal punto di vista tecnico, operativo ed economico, è il pump&treat, che prevede la captazione e l'estrazione dell'acqua di falda contaminata tramite pozzi di presa disposti a valle della sorgente di contaminazione e lungo la direzione di flusso dell'acquifero, in maniera tale da costituire un sistema di barriera dinamica.

La soluzione progettuale individuata prevede inoltre il completo riutilizzo delle acque emunte, previo trattamento biologico o tramite processi chimico-fisici, all'interno dei cicli produttivi degli stabilimenti di Nuova Solmine e Scarlino Energia.

In **figura 14** viene mostrata la barriera idraulica attualmente presente nella zona del Casone, che verrà modificata in funzione di quanto previsto nel nuovo progetto operativo di bonifica.



Figura 14: Attuale barriera idraulica presente nella zona del Casone.

I nuovi interventi di bonifica, sono stati suddivisi in 2 fasi distinte:

➤ FASE 1:

- Rimodulazione delle attuali barriere presenti sul sito;
- Realizzazione di una rete piezometrica di monitoraggio che, oltre a sfruttare gli attuali pozzi/piezometri esistenti, verrà integrata da una serie di nuovi piezometri;
- Campagna di monitoraggio delle acque di falda;
- Censimento di tutti i pozzi presenti nella piana, utilizzati a scopo industriale ed irriguo;

- Esecuzione di una video ispezione di tutti i pozzi per i quali non risultano note le caratteristiche costruttive;
- Individuazione e chiusura dei pozzi con caratteristiche costruttive non idonee, che potrebbero rappresentare dei veicoli della contaminazione, dai livelli acquiferi superficiali verso quelli profondi;

➤ FASE 2:

- Eventuale incremento del sistema di barrieramento;
- Eventuale progettazione e realizzazione di interventi integrativi di bonifica;
- Aggiornamento/calibrazione del modello idrogeologico;
- Eventuale progettazione e realizzazione di interventi di mitigazione dell'ingressione del cuneo salino;

In accordo con quanto discusso in fase di riunioni tecniche svolte presso Arpat, sono stati effettuati una serie di calcoli e simulazioni che hanno stimato dei tempi di rigenerazione completa delle acque sotterranee, pari a circa 22 anni.

Va comunque ricordato che le tempistiche riportate, sono basate su calcoli matematici e quindi del tutto teoriche, non rispecchiando le reali condizioni del flusso di contaminanti.

Queste infatti, potrebbero essere diverse sia per le incertezze sui parametri chimici utilizzati, sia perché non tengono conto ad esempio, di eventuali apporti ancora attivi, dovuti a lisciviazione di strati litologici, in passato interessati dalle frange capillari delle falde, che favorivano la deposizione o la rimozione degli inquinanti.

Tuttavia il modello di trasporto dei contaminanti potrà servire come base di partenza per le successive fasi di calibrazione degli interventi, a seguito di monitoraggi e studi specifici previsti dal progetto operativo di bonifica del comune di Scarlino (MURRATZU et al., 2015).

Risulta quindi evidente come le fasi di controllo e monitoraggio, rivestano fondamentale importanza per verificare l'andamento dell'intervento di bonifica nel tempo, sia in termini di efficacia che di tempistica.

Per quanto riguarda gli obiettivi di bonifica da raggiungere, in assenza di studi di settore relativi a possibili valori di fondo naturale, generalmente ci si attiene al

rispetto delle Concentrazione Soglia Contaminazione (CSC) specifiche per ogni contaminante, in accordo con il D.Lgs. 152/06.

In ottemperanza all'indicazione ricevuta nel verbale della Conferenza dei Servizi da parte di Arpat e alle indicazioni ricevute dagli enti, nel corso delle riunioni tecniche di agosto/settembre 2014, i valori da assumere come nuovi obiettivi di bonifica sono i cosiddetti Valori di Fondo Naturale (VFN) di seguito riportati (**Tabella1**):

PARAMETRO	CSC Dlgs 152/06	VALORE DI FONDO NATURALE (VFN)	U.M.
ARSENICO	10	5.5	µg/L
FERRO	200	460	µg/L
MANGANESE	50	177	µg/L
SOLFATI	250	235	µg/L

Tabella 1: Tabella dei valori di fondo naturale per gli analiti traccianti della contaminazione nell'area della piana di Follonica-Scarlino (fonte ARPAT, 2014).

Infine per quanto riguarda le aree ancora da bonificare e sottoposte a misure di messa in sicurezza, va ricordata quella in cui è presente il cosiddetto “Panettone”, un cumulo formato da circa 700.000 tonnellate di ceneri di pirite (**fig.15**). Questo deposito ha subito, nel corso degli anni, intensi fenomeni di subsidenza locale, fino a 6 m, ponendo a contatto i materiali di scarto con le acque della falda superficiale.



Figura 15: Cumulo di ceneri di pirite detto “Panettone”.