

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi idrogeologica e di stabilità di alcuni
siti in frana in Piemonte**

Relatori:

Prof. Vigna Bartolmeo

Prof. Barbero Monica

Candidato:

Lomagistro Francesco

*Alla mia famiglia, per avermi
indicato la strada quando
mi sono perso.*

Sommario

1. Premessa	10
2. Introduzione all'argomento.....	10
3. Informazioni generali sui siti oggetto di studio	14
4. Analisi dei dati pluviometrici e delle temperature minime e medie dai database della Regione Piemonte.....	31
4.1 Introduzione all'argomento	31
4.2 Analisi dei dati reperiti.....	39
5. Relazioni tra le piogge e il livello di falda	43
5.1 Inquadramento del problema.....	43
5.2 Valutazione delle relazioni piogge – livello di falda in Bardonecchia Tre Croci	43
5.3 Valutazione delle relazioni piogge – livello di falda in Bardonecchia Granges la Rho.....	45
5.4 Valutazione delle relazioni piogge – livello di falda in Sestriere Borgata	46
6. Relazioni tra livello della falda e spostamenti inclinometrici	47
6.1 Introduzione all'argomento	47
6.2 Valutazione delle relazioni spostamenti – livello di falda in Bardonecchia Tre Croci	50
6.3 Valutazione delle relazioni spostamenti – livello di falda in Bardonecchia Rho	58
6.4 Valutazione delle relazioni spostamenti – livello di falda in Sestriere Borgata	64
7. Modellazione geotecnica agli elementi finiti del sito di Bardonecchia Rho.....	70
7.1 Introduzione all'argomento	70
7.2 Reperimento dei parametri geotecnici da inserire nel modello	74
1.1.1. Introduzione	74
1.1.2. Analisi delle prove in sito realizzate.....	78
7.3 Geometria del modello.....	84
7.4 Back Analysis.....	91
7.5 Analisi previsionali.....	96
8. Conclusioni	99
9. Bibliografia.....	100
10. Allegati.....	102
10.1 Allegato I: dati pluviometrici e di temperatura relativi al sito di Bardonecchia	102
10.2 Allegato II: dati pluviometrici e di temperatura relativi al sito di Sestriere.....	108
10.3 Allegato III: distinzione tra piogge fluide e nevose relative al sito di Bardonecchia	112
10.4 Allegato IV: distinzione tra piogge fluide e nevose relative al sito di Sestriere	118
10.5 Allegato V: relazioni tra le piogge e il livello di falda per il sito di Bardonecchia località Tre Croci	122

10.6	Allegato VI: relazioni tra le piogge e il livello di falda per il sito di Bardonecchia località Granges la Rho	124
10.7	Allegato VII: relazioni tra le piogge e il livello di falda per il sito di Sestriere località Borgata127
10.8	Allegato VIII: relazioni tra gli spostamenti e il livello di falda per il sito di Bardonecchia Tre Croci	130
10.9	Allegato IX: relazioni tra gli spostamenti e il livello di falda per il sito di Bardonecchia Rho132
10.10	Allegato X: relazioni tra gli spostamenti e il livello di falda per il sito di Sestriere Borgata136
10.11	Allegato XI: Sondaggio e prova penetrometrica dinamica continua legati al sito di Sauze d'Oulx	142
10.12	Allegato XII: Screenshot dal software Rockscience dei parametri utilizzati nel modello150
11.	Ringraziamenti155

Indice delle figure

Figura 2.1: Nomenclatura degli elementi che caratterizzano un movimento franoso complesso (da: Fenomeni di dissesto geologico – idraulico sui versanti – APAT, Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici – Novembre 2006).....	11
Figura 2.2: Classificazione riguardante il volume di una frana (Fell, 1994).....	12
Figura 2.3: Classificazione riguardante la velocità di una frana (Cruden & Varnes, 1996).....	12
Figura 2.4: Elenco non esaustivo che riporta diverse classificazioni dei fenomeni franosi presenti in letteratura (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017).....	13
Figura 2.5: Classificazione di Varnes, 1978 (da: Materiale didattico corso Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017).....	13
Figura 3.1: Individuazione del sito di Bardonecchia - Tre Croci (da: Google Earth).....	14
Figura 3.2: Individuazione dettagliata del sito con relative curve di livello (da: Schede SIFRAP)...	15
Figura 3.3: Individuazione della strumentazione presente in sito (da: Schede SIFRAP).....	16
Figura 3.4: Recenti attivazioni del fenomeno nel settore superiore, fianco sinistro, a quota 1750 m (in prossimità dell’inclinometro S11) (da: Schede SIFRAP).....	18
Figura 3.5: Recenti attivazioni del fenomeno nel settore superiore, fianco sinistro, a quota 1750 m (in prossimità dell’inclinometro S11) (da: Schede SIFRAP).....	18
Figura 3.6: Panoramica dal versante opposto (da: Schede SIFRAP).....	19
Figura 3.7: Individuazione del sito di Bardonecchia – Granges la Rho (da: Google Earth).....	20
Figura 3.8: Individuazione dettagliata del sito con relative curve di livello (da: Schede SIFRAP)...	21
Figura 3.9: Individuazione della strumentazione presente in sito (da: Schede SIFRAP).....	22
Figura 3.10: Vista frontale della frana. Ripresa del 11/06/2009 dal versante opposto – Cima Tre Croci (quota 2230) (da: Schede SIFRAP).....	24
Figura 3.11: Vista frontale della frana. Ripresa del 11/06/2009 dal versante opposto – Cima Tre Croci (quota 2115) (da: Schede SIFRAP).....	25
Figura 3.12: Dettaglio piede frana. Ripresa del 11/06/2009 dal versante opposto - Cima Tre Croci (quota 2230) (da: Schede SIFRAP).....	25
Figura 3.13: Individuazione del sito di Sestriere – Borgata (da: Google Earth).....	26
Figura 3.14: Individuazione dettagliata del sito con relative curve di livello (da: Schede SIFRAP).	27
Figura 3.15: Individuazione della strumentazione presente in sito (da: Schede SIFRAP).....	28
Figura 3.16: Panoramica del versante oggetto di interventi di drenaggio (da: Schede SIFRAP)....	30
Figura 3.17: Ulteriore panoramica del versante oggetto degli interventi di drenaggio (da: Schede SIFRAP).....	30
Figura 4.1: Schema di un pluviometro (da: Materiale didattico corso di Idrologia – Claps P. – 2015).....	31
Figura 4.2: Schema di un pluviografo a bascula (da: Materiale didattico corso di Idrologia – Claps P. – 2015).....	32
Figura 4.3: Altro schema del pluviografo a bascula (da: Materiale didattico corso di Idrologia – Claps P. – 2015).....	32
Figura 4.4: Mappa CTR della stazione di Bardonecchia Pian Del Sole (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte).....	34
Figura 4.5: Visualizzazione fotografica della stazione di Bardonecchia Pian Del Sole (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte).....	34
Figura 4.6: Ulteriore visualizzazione fotografica della stazione di Bardonecchia Pian Del Sole (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte).....	35

Figura 4.7: Mappa CTR della stazione di Sestriere Alpette (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte).....	36
Figura 4.8: Visualizzazione fotografica della stazione di Sestriere Alpette (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte).....	37
Figura 4.9: Ulteriore visualizzazione fotografica della stazione di Sestriere Alpette (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte).....	37
Figura 4.10: Dettaglio della stazione di Sestriere Alpette (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte)	38
Figura 4.11: Relazione Precipitazione - Temp. Minima e Media - Anno 2015.....	39
Figura 4.12: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2015.....	40
Figura 4.13: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2015.....	41
Figura 4.14: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2015.....	42
Figura 5.1: Relazione tra precipitazione e livello falda – Anno 2010.....	43
Figura 5.2: Relazione tra precipitazione e livello falda – Anno 2015.....	44
Figura 5.3: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2016.....	45
Figura 5.4: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2014.....	46
Figura 6.1: Sezione trasversale del tubo inclinometrico (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017).....	47
Figura 6.2: A sx sezione trasversale del tubo inclinometrico con sonda inserita; a dx foto dimostrativa (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017).....	47
Figura 6.3: Metodo per ottenere il modulo dello spostamento (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017).....	48
Figura 6.4: A sx la testa di un tubo inclinometrico attrezzato con sonde fisse – A dx lo schema di una sonda inclinometrica fissa biassiale per il controllo dei movimenti profondi (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017).....	49
Figura 6.5: Risultato sonda inclinometrica manuale	50
Figura 6.6: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda – Anno 2015	51
Figura 6.7: Relazione globale tra sonda inclinometrica fissa posta a 26,5 m e livello di falda.....	52
Figura 6.8: Dettaglio dei risultati dal 2009 al 2012 forniti dalla sonda fissa posta a 13,5 m.....	53
Figura 6.9: Dettaglio dei risultati dal 2013 al 2016 forniti dalla sonda fissa posta a 13,5 m.....	54
Figura 6.10: Dettaglio dei risultati dal 2009 al 2012 forniti dalla sonda fissa posta a 26,5 m.....	55
Figura 6.11: Dettaglio dei risultati dal 2013 al 2016 forniti dalla sonda fissa posta a 26,5 m.....	56
Figura 6.12: Andamento globale della quota piezometrica	57
Figura 6.13: Risultato sonda inclinometrica manuale	58
Figura 6.14: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2009	59
Figura 6.15: Relazione globale tra sonda inclinometrica fissa posta a 24,0 m e livello di falda.....	60
Figura 6.16: Dettaglio dei risultati dal 2005 al 2016 forniti dalla sonda fissa posta a 10,0 m.....	61
Figura 6.17: Dettaglio dei risultati dal 2005 al 2016 forniti dalla sonda fissa posta a 24,0 m.....	62
Figura 6.18: Andamento globale della quota piezometrica	63
Figura 6.19: Risultato sonda inclinometrica manuale	64
Figura 6.20: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2013	65
Figura 6.21: Relazione globale tra sonda inclinometrica fissa posta a 16,8 m e livello di falda.....	66
Figura 6.22: Dettaglio dei risultati dal 2004 al 2015 forniti dalla sonda fissa posta a 16,8 m.....	67
Figura 6.23: Dettaglio dei risultati dal 2007 al 2015 forniti dalla sonda fissa posta a 32,5 m.....	68
Figura 6.24: Andamento globale della quota piezometrica	69
Figura 7.1: Differenza tra un approccio al continuo (a) e uno al discontinuo (b) (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017).....	71

Figura 7.2: Metodi numerici utilizzati in un approccio al continuo (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017)	71
Figura 7.3: Elenco dei software maggiormente utilizzati in relazione al tipo di modello necessario	72
Figura 7.4: Schema dell'attrezzatura tipo per prove penetrometriche dinamiche (da: Prove geotecniche in sito – Ferruccio Cestari – Editore Geo Graph – Edizione 3 – Luglio 2005)	74
Figura 7.5: Zona di esecuzione delle prove penetrometriche e sondaggi superficiali (da: Geoportale Arpa Piemonte).....	78
Figura 7.6: Zona di esecuzione delle prove penetrometriche e sondaggi superficiali e relative curve di livello (da: Geoportale Arpa Piemonte).....	79
Figura 7.7: Zoom dell'area e denominazione dei sondaggi e delle prove eseguite (da: Geoportale Arpa Piemonte).....	79
Figura 7.8: Risultati della prova penetrometrica dinamica denominata ppd3	80
Figura 7.9: Risultato del sondaggio denominato P1	81
Figura 7.10: Relazione tra la prova penetrometrica ppd3 e la stratigrafia P1.....	81
Figura 7.11: Relazioni scelte tra il sondaggio P1 di Sauze d'Oulx e il sondaggio 5 di Bardonecchia Rho	82
Figura 7.12: Evidenza della linea di massima pendenza	84
Figura 7.13: Posizione della sezione scelta.....	85
Figura 7.14: Sezione ricavata considerando la linea di massima pendenza	85
Figura 7.15: Informazioni sulla tipologia di mesh utilizzata	87
Figura 7.16: Stage 1 del modello ovvero quello caratterizzato dal dominio scatolare	87
Figura 7.17: Stage 2 del modello ovvero quello caratterizzato dalla prima fase di scarico	88
Figura 7.18: Stage 3 del modello ovvero quello caratterizzato dalla seconda fase di scarico	88
Figura 7.19: Stage 4 del modello ovvero quello caratterizzato dalla terza ed ultima fase di scarico	89
Figura 7.20: Stage 5 del modello ovvero quello in cui si ha il passaggio ad un modello elasto-plastico perfetto	89
Figura 7.21: Stage 6 del modello ovvero quello caratterizzato dalla presenza della falda	90
Figura 7.22: Posizione dell'inclinometro di riferimento	91
Figura 7.23: Variazione delle σ_1 nel modello	92
Figura 7.24: Variazione delle σ_3 nel modello	92
Figura 7.25: Variazione delle massime deformazioni di taglio	93
Figura 7.26: Plot relativo alle deformazioni di taglio provenienti dal modello	93
Figura 7.27: Porzione superficiale del modello che registra i massimi spostamenti.....	94
Figura 7.28: Plot relativo ai massimi spostamenti provenienti dal modello	94
Figura 7.29: Zona plasticizzata e valore del fattore di sicurezza ottenuto	95
Figura 7.30: Zona plasticizzata e valore del fattore di sicurezza ottenuto a seguito dell'innalzamento della falda	96
Figura 7.31: Plot relativo ai massimi spostamenti provenienti dal modello	97
Figura 7.32: Zona plasticizzata e valore del fattore di sicurezza ottenuto a seguito dell'innalzamento della falda	98
Figura 7.33: Plot relativo ai massimi spostamenti provenienti dal modello	98
Figura 10.1: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2004	102
Figura 10.2: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2005	102
Figura 10.3: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2006	103
Figura 10.4: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2009	103
Figura 10.5: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2010	104
Figura 10.6: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2011	104

Figura 10.7: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2012	105
Figura 10.8: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2013	105
Figura 10.9: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2014	106
Figura 10.10: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2015	106
Figura 10.11: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2016	107
Figura 10.12: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2004	108
Figura 10.13: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2005	108
Figura 10.14: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2006	109
Figura 10.15: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2007	109
Figura 10.16: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2013	110
Figura 10.17: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2014	110
Figura 10.18: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2015	111
Figura 10.19: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2016	111
Figura 10.20: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2004.....	112
Figura 10.21: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2005.....	112
Figura 10.22: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2006.....	113
Figura 10.23: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2009.....	113
Figura 10.24: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2010.....	114
Figura 10.25: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2011.....	114
Figura 10.26: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2012.....	115
Figura 10.27: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2013.....	115
Figura 10.28: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2014.....	116
Figura 10.29: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2015.....	116
Figura 10.30: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2016.....	117
Figura 10.31: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2004.....	118
Figura 10.32: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2005.....	118
Figura 10.33: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2006.....	119
Figura 10.34: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2007.....	119
Figura 10.35: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2013.....	120
Figura 10.36: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2014.....	120
Figura 10.37: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2015.....	121
Figura 10.38: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2016.....	121
Figura 10.39: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2010	122
Figura 10.40: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2011	122
Figura 10.41: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2015	123
Figura 10.42: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2004	124
Figura 10.43: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2009	124
Figura 10.44: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2014	125
Figura 10.45: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2015	125
Figura 10.46: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2016	126
Figura 10.47: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2006	127
Figura 10.48: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2007	127
Figura 10.49: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2013	128
Figura 10.50: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2014	128
Figura 10.51: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2015	129
Figura 10.52: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2010	130
Figura 10.53: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2011	130
Figura 10.54: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2012	131

Figura 10.55: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2015	131
Figura 10.56: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2005	132
Figura 10.57: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2006	132
Figura 10.58: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2008	133
Figura 10.59: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2009	133
Figura 10.60: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2014	134
Figura 10.61: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2015	134
Figura 10.62: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2016	135
Figura 10.63: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2005	136
Figura 10.64: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2006	136
Figura 10.65: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2007	137
Figura 10.66: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2008	137
Figura 10.67: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2010	138
Figura 10.68: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2011	138
Figura 10.69: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2012	139
Figura 10.70: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2013	139
Figura 10.71: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2014	140
Figura 10.72: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2015	140
Figura 10.73: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2016	141
Figura 10.74: Sondaggio P1 relativo alla zona di Sauze d'Oulx	142
Figura 10.75: Risultato della prova penetrometrica dinamica continua relativa alla zona di Sauze d'Oulx	143
Figura 10.76: Sondaggio 5 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 1/2	144
Figura 10.77: Sondaggio 5 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 2/2	145
Figura 10.78: Sondaggio 4 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 1/1	146
Figura 10.79: Sondaggio 6 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 1/3	147
Figura 10.80: Sondaggio 6 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 2/3	148
Figura 10.81: Sondaggio 6 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 3/3	149
Figura 10.82: Parametri relativi allo Strato 1 (fase elastica del materiale)	150
Figura 10.83: Parametri relativi allo Strato 2 (fase elastica del materiale)	150
Figura 10.84: Parametri relativi allo Strato 3 (fase elastica del materiale)	151
Figura 10.85: Parametri relativi allo Strato 4 (fase elastica del materiale)	151
Figura 10.86: Parametri relativi allo Strato 5 (fase elastica del materiale)	152
Figura 10.87: Parametri relativi allo Strato 1 (fase elastica perfettamente plastica del materiale)	152
Figura 10.88: Parametri relativi allo Strato 2 (fase elastica perfettamente plastica del materiale)	153
Figura 10.89: Parametri relativi allo Strato 3 (fase elastica perfettamente plastica del materiale)	153
Figura 10.90: Parametri relativi allo Strato 4 (fase elastica perfettamente plastica del materiale)	154

Indice delle tabelle

Tabella 7.1: Dimensioni dei componenti delle differenti attrezzature standard	75
Tabella 7.2: Raffronto tra le dimensioni dei componenti DPL, DPM e 30-20 italiano	76
Tabella 7.3: Parametri ottenuti a seguito della taratura del modello	91

1. Premessa

L'obiettivo della presente Tesi di Laurea è stato quello di condurre un'analisi idrogeologica e di stabilità di alcuni siti piemontesi, sedi di fenomeni franosi.

In particolare, i siti studiati sono stati: Bardonecchia località Tre Croci, Bardonecchia località Granges la Rho e Sestriere località Borgata, tutti in provincia di Torino.

I dati disponibili relativi al monitoraggio ed ai sondaggi effettuati nelle aree di studio, sono stati resi disponibili da Arpa Piemonte.

Inizialmente si sono reperiti i dati pluviometrici dei siti oggetti di studio ed analizzati opportunamente al fine di individuare delle relazioni con le letture dei piezometri.

Successivamente si sono analizzati gli spostamenti registrati dagli inclinometri manuali e si sono poi trovate delle relazioni tra i dati piezometrici e quelli provenienti dagli inclinometri fissi, in modo da individuare l'influenza della variazione del livello della falda nella stabilità dei versanti.

Si è proceduto poi alla modellazione agli elementi finiti del sito di Bardonecchia località Granges la Rho, con l'obiettivo di fare alcune osservazioni previsionali sul comportamento dei versanti analizzati.

Il modello numerico realizzato è stato tarato mediante un procedimento di analisi a ritroso, sulla base degli spostamenti misurati dagli inclinometri.

Sono stati infine realizzati due modelli previsionali in cui si è simulata l'escursione del livello della falda e si sono valutati gli spostamenti totali registrati e il fattore di sicurezza corrispondenti.

2. Introduzione all'argomento

In generale un pendio si definisce instabile quando è potenzialmente soggetto a qualsiasi forma di movimento di terreni o rocce, dovuto essenzialmente all'azione della gravità o al regime delle acque superficiali e sotterranee.

Lo schema di analisi si articola in diverse fasi che insieme concorrono a definire il processo di mitigazione del rischio idrogeologico. In Italia i fenomeni franosi sono profondamente monitorati in quanto l'evento disastroso del 5 maggio 1998 che ha colpito severamente alcuni comuni appartenenti alle province di Salerno, Avellino e Caserta, ha determinato un nuovo impulso alle attività di conoscenza, pianificazione territoriale e riduzione del rischio idrogeologico, coinvolgendo tutte le strutture dello Stato nazionali e locali con competenze nel campo della difesa del suolo.

Nacque così il Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) con i seguenti scopi:

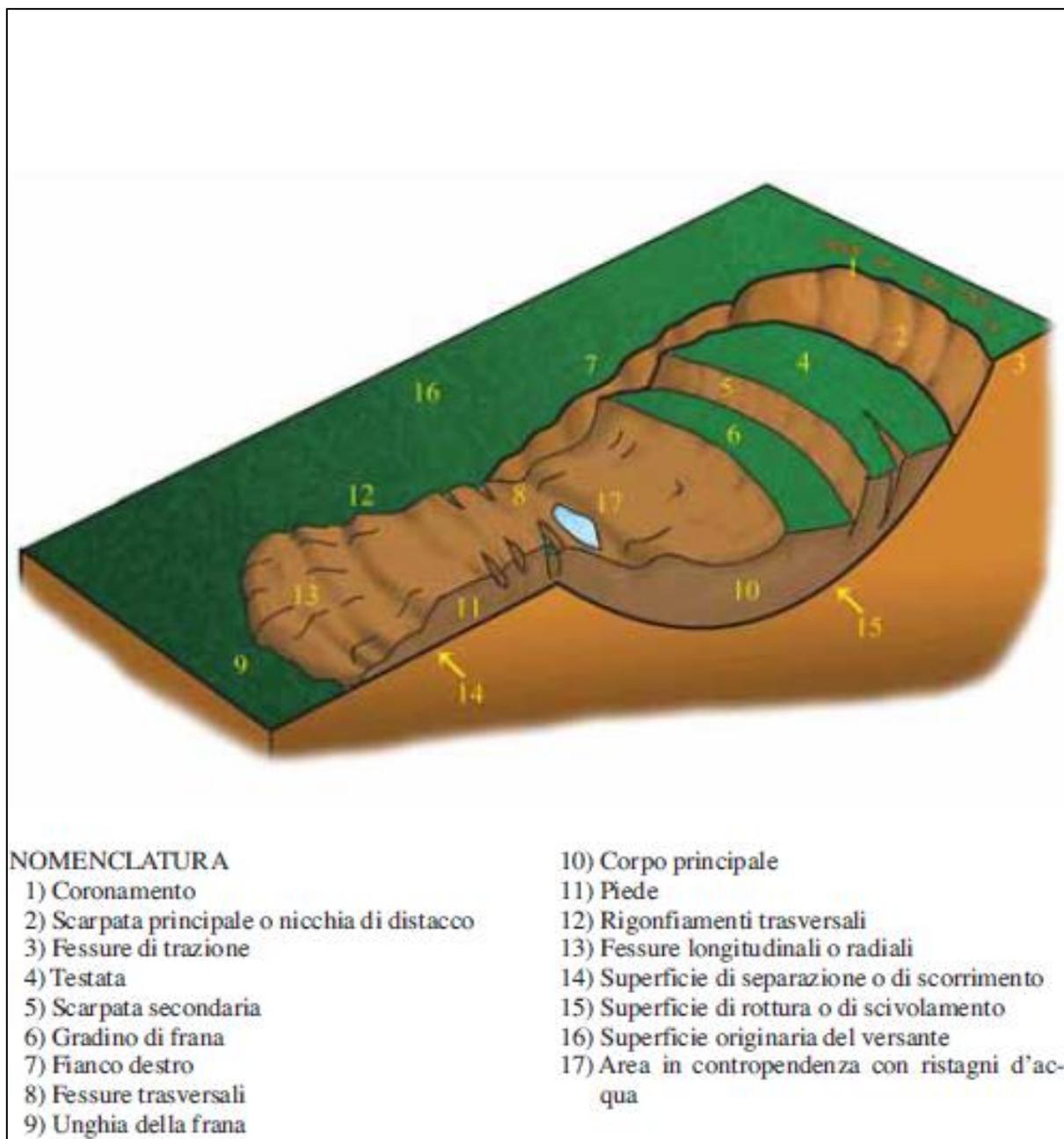
- fornire un quadro aggiornato della distribuzione dei fenomeni di dissesto gravitativo sull'intero territorio nazionale attraverso la continua revisione e omogeneizzazione dei dati già disponibili e la loro integrazione nelle aree scarsamente indagate;
- realizzare un Sistema Informativo Territoriale Nazionale costituito da una cartografia informatizzata alla scala 1:25000 ed il relativo database alfanumerico e iconografico, contenente tutti i dati censiti sulle frane in Italia;
- fornire uno strumento conoscitivo di base da utilizzare nel quadro più ampio degli strumenti necessari nella valutazione qualitativa, quantitativa e tipologica della pericolosità e del rischio da frana, per la programmazione degli interventi di difesa del suolo e per la pianificazione territoriale.

Ogni evento franoso viene così censito mediante la compilazione di schede che contengono le informazioni di base (ubicazione, tipologia del movimento, stato di attività) e che raccolgono i parametri di morfometria, geologia, litologia, uso del suolo, attivazioni precedenti e infine si riportano inoltre tutte le informazioni relative alle indagini e agli interventi di sistemazione.

Come già specificato, il movimento di un versante, movimento franoso o semplicemente frana, è il movimento di una massa di roccia, detrito o terra lungo un pendio.

Di seguito, in Figura 2.1, si riporta un'immagine contenente la nomenclatura degli elementi che caratterizzano un movimento franoso complesso.

Figura 2.1: Nomenclatura degli elementi che caratterizzano un movimento franoso complesso (da: Fenomeni di dissesto geologico – idraulico sui versanti – APAT, Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici – Novembre 2006)



In generale, gli stati di attività di una frana possono essere differenti e cambiare nel tempo. La distinzione che generalmente si utilizza è la seguente:

- frana attiva ovvero attualmente in movimento;
- frana riattivata ovvero di nuovo attiva dopo essere stata inattiva;
- frana sospesa ovvero in movimento nell'ultimo ciclo stagionale ma attualmente inattiva;
- frana inattiva ovvero non in movimento nell'ultimo ciclo stagionale.

Un'altra importante informazione è quella riportata in Figura 2.2 ovvero il volume di una frana cioè il volume della massa spostata (Fell, 1994).

Figura 2.2: Classificazione riguardante il volume di una frana (Fell, 1994)

Descrizione	Volume (m ³)
Estrem. grande	$> 5 \cdot 10^6$
Molto grande	$1 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$
Da media a grande	$2.5 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^6$
Media	$5 \cdot 10^4 \div 2.5 \cdot 10^5$
Piccola	$5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$
Molto piccola	$5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^3$
Estrem. piccola	$< 5 \cdot 10^2$

Si può considerare anche la velocità di una frana, la quale va pensata come un'informazione locale e dunque spaziale. La classificazione generalmente più utilizzata è la seguente (Cruden & Varnes, 1996), riportata in Figura 2.3.

Figura 2.3: Classificazione riguardante la velocità di una frana (Cruden & Varnes, 1996)

Velocity Class	Description	Velocity (mm/sec)
7	Estremamente rapida	5×10^3
6	Molto rapida	5×10^1
5	Rapida	5×10^{-1}
4	Moderata	5×10^{-3}
3	Lenta	5×10^{-5}
2	Molto lenta	5×10^{-7}
	Estremamente lenta	

Per quanto riguarda le classificazioni dei fenomeni franosi, ci sono differenti tipologie, come si evidenzia in Figura 2.4. Il fatto stesso che vi siano diversi approcci di analisi in letteratura, sottolinea il fatto che il fenomeno è in generale molto complesso e può essere considerato sotto diversi punti di vista. La classificazione più usata è quella di Varnes (1978) che considera il tipo di movimento e il tipo di materiale. Il singolo evento è dunque, secondo Varnes, una combinazione di queste due informazioni, come riportato in Figura 2.5.

Bisogna comunque considerare che vi sono movimenti più tipici nei materiali rocciosi e altri movimenti più tipici nei terreni.

Figura 2.4: Elenco non esaustivo che riporta diverse classificazioni dei fenomeni franosi presenti in letteratura (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017)

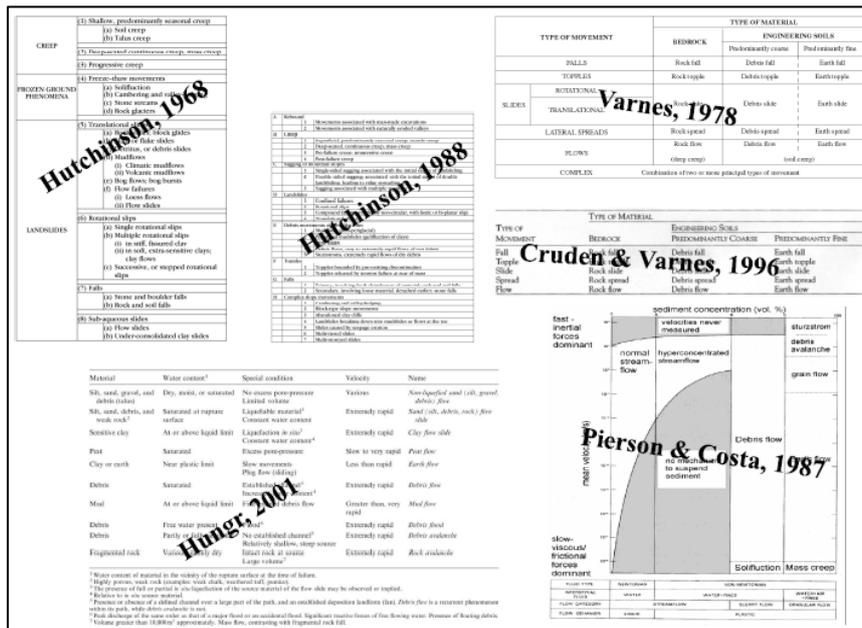


Figura 2.5: Classificazione di Varnes, 1978 (da: Materiale didattico corso Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017)

TIPO DI MOVIMENTO	TIPO DI MATERIALE		
	ROCCIA (ROCK)	DETRITO (DEBRIS)	TERRENO (EARTH)
CROLLI (FALLS)	Crollo in roccia (Rock fall)	Crollo di detrito (Debris fall)	Crollo di terra (Earth fall)
RIBALTAMENTI (TOPPLES)	Ribaltamento in roccia (Rock topple)	Ribaltamento di detrito (Debris topple)	Ribaltamento di terra (Earth topple)
SCORRIMENTI o SCIVOLAMENTI	Scorrimento di roccia (Rock slide)	Scorrimento di detrito (Debris slide)	Scorrimento di terra (Earth slide-slump)
ESPANDIMENTO (SPREADING)	Espandimento in roccia (Rock spread)	Espandimento di detrito (Debris spread)	Espandimento di terra (Earth spread)
COLATE o FLUSSI (FLOWS)	Colata in roccia (Rock flow)	Colata di detrito (Debris flow)	Colata di terra (Earth flow)
COMPLESSE (COMPLEX)	Combinazione di due o più tipi principali di movimento		

- detrito: 20 ÷ 80% grana grossa (> 2mm)
- terreno: > 80% grana fine (< 2 mm)

3. Informazioni generali sui siti oggetto di studio

I siti che saranno oggetto di studio nella presente tesi, ubicati nell'Italia Settentrionale e precisamente in Piemonte, sono tre in particolare: Bardonecchia località Tre Croci; Bardonecchia località Granges la Rho e Sestriere località Borgata.

Il sito di Bardonecchia in località Tre Croci è individuato, attraverso le schede SIFRAP (Sistema Informativo Fenomeni Franosi in Piemonte), dal codice frana 001-00034-00.

E' una frana storica di tipo complesso che coinvolge l'intero versante esposto a est alle pendici del Monte Tre Croci. L'attivazione più significativa risalirebbe al Secolo XVI, infatti, in letteratura vi sono alcuni documenti redatti tra il XIX° e il XX° secolo che riportano la notizia di una grande frana che seppellì Bardonecchia e che costrinse a spostare l'abitato. Ancora oggi sono ben evidenti la nicchia di distacco e la zona di accumulo.

Questo grande fenomeno è allo stato attuale monitorato da Arpa Piemonte e risulta essere una frana attiva.

In Figura 3.1, Figura 3.2 e in Figura 3.3 vengono riportate delle immagini che permettono una migliore comprensione del sito analizzato dal punto di vista geografico e in particolare si riporta la tipologia di strumenti che Arpa Piemonte utilizza per il monitoraggio.

Figura 3.1: Individuazione del sito di Bardonecchia - Tre Croci (da: Google Earth)

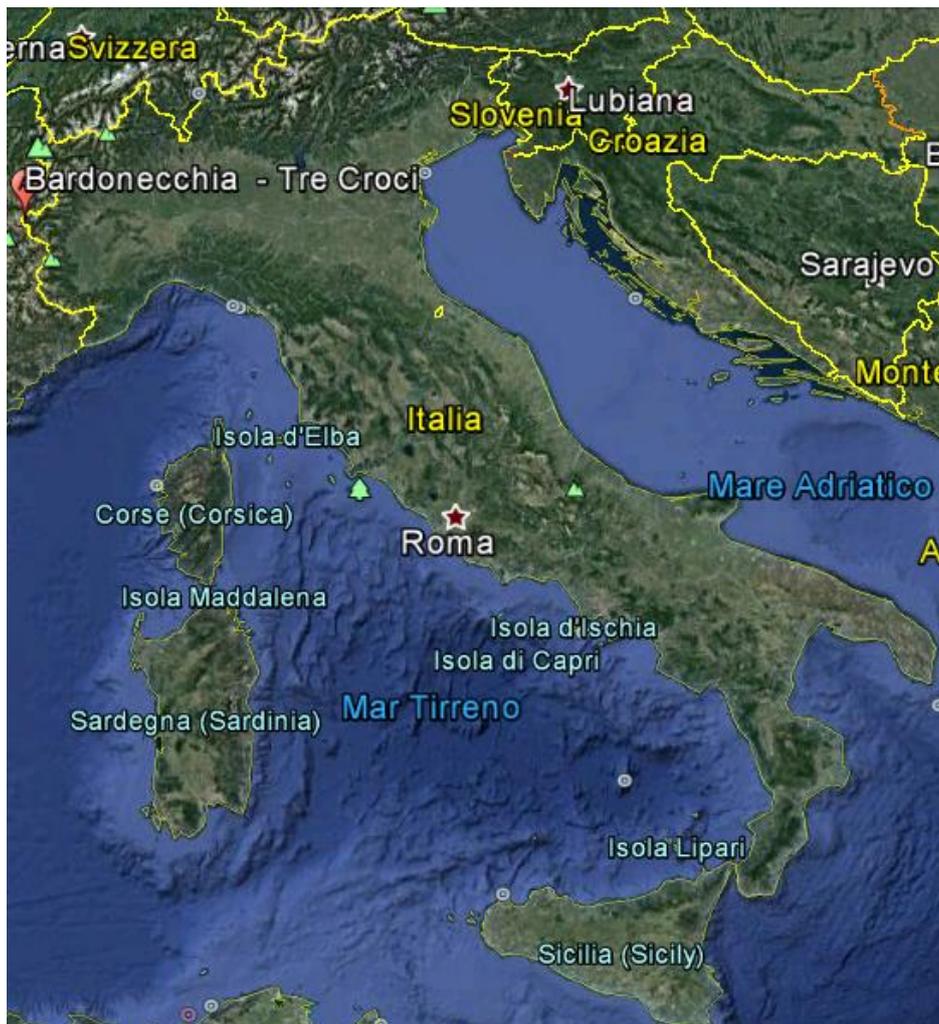


Figura 3.2: Individuazione dettagliata del sito con relative curve di livello (da: Schede SIFRAP)

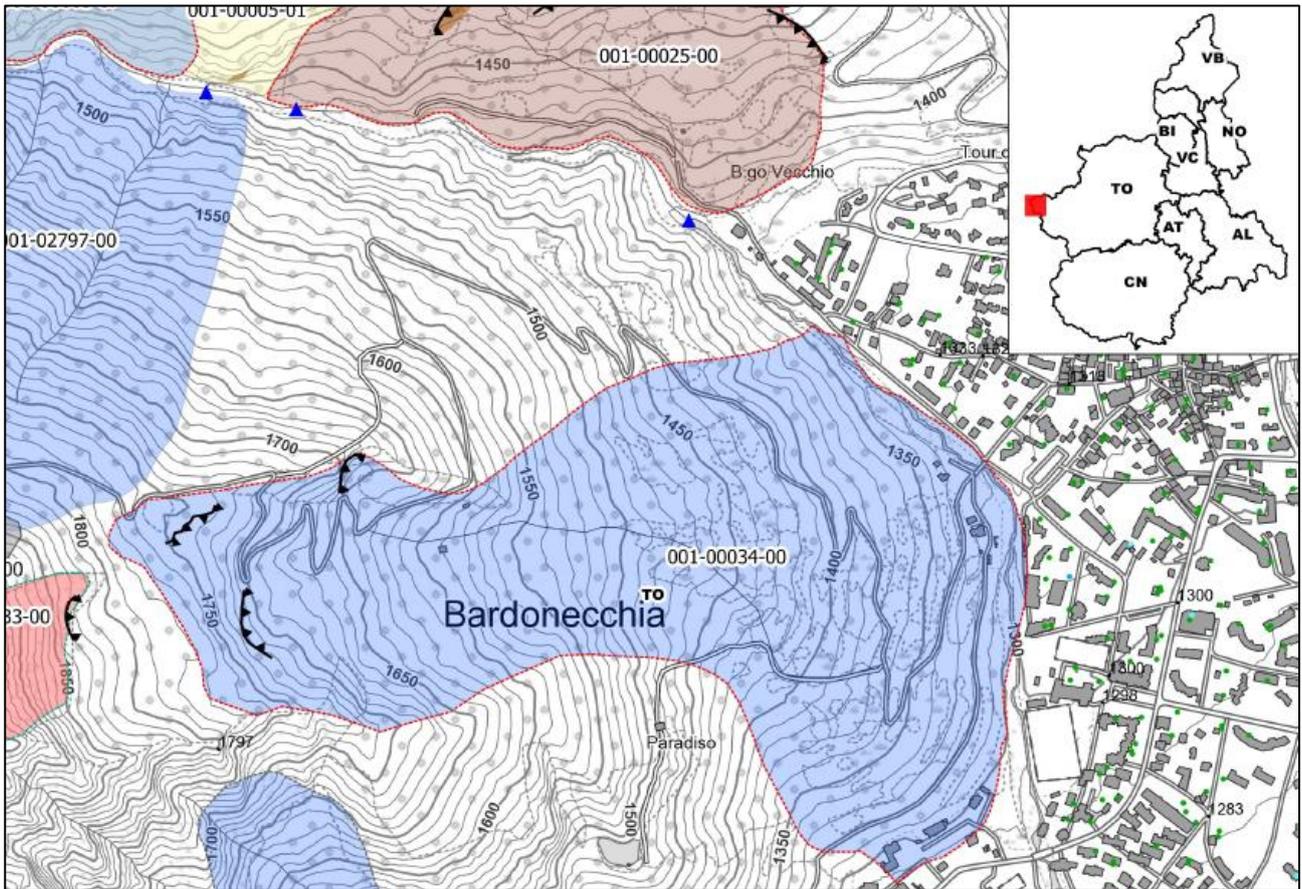
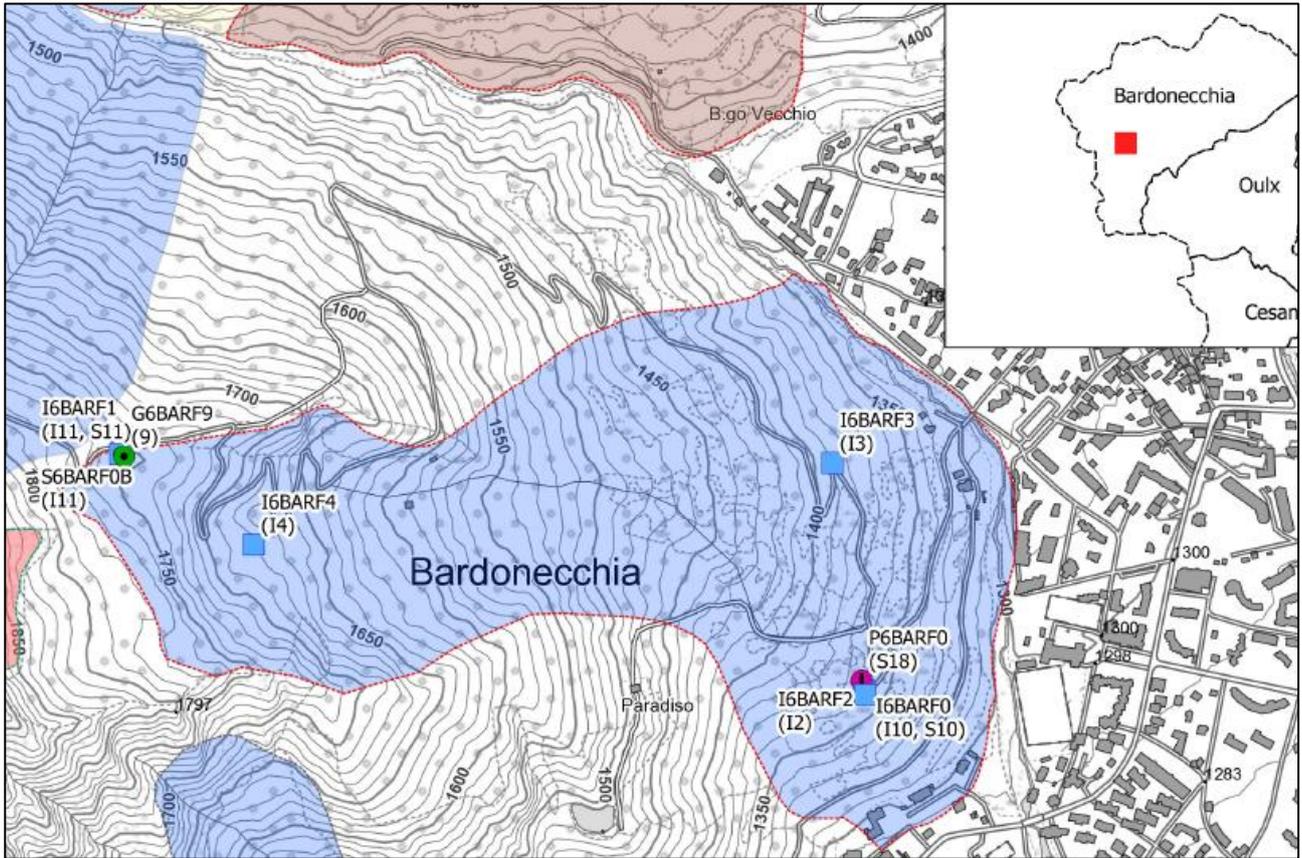


Figura 3.3: Individuazione della strumentazione presente in sito (da: Schede SIFRAP)



Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio

Strumentazione

- Caposaldo GPS
- Caposaldo topografico convenzionale
- Distometro a nastro
- Distometro laser
- Estensimetro a filo
- Inclinometro
- Misuratore di giunti
- Piezometro
- Spia fessurimetrica

Frane

- n.d.
- Crollo/Ribaltamento
- Scivolamento rotazionale/traslativo
- Espansione
- Colamento lento
- Colamento rapido
- Sprofondamento
- Complesso
- DGPV
- Aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi
- Aree soggette a sprofondamenti diffusi
- Aree soggette a frane superficiali diffuse
- Settore CARG

Stato Attività

- stabilizzato/relitto
- attivo
- quiescente

Aggiornamento: 02/2017
Scala: 1: 10000

Per quanto riguarda la morfometria della frana, i dati sono i seguenti:

- Quota corona: 1950 m;
- Quota unghia: 1300 m;
- Lunghezza orizzontale: 1525 m;
- Dislivello: 650 m;
- Pendenza: 23.1°
- Azimut movimento: 80°
- Area totale: 644520 m²;
- Larghezza: 400 m;
- Profondità della superficie di scivolamento: 45 m.

Per quanto riguarda invece la descrizione geomorfologica, subito a valle dell'inclinometro S11 (verso est, quota 1750 m) si evidenziano una serie di fratture e contropendenze, con lunghezza di alcune decine di metri. A tali fratture ne sono collegate altre di minore entità, caratterizzate da un sistema di fratturazione tale da essere evidente sulla coltre superficiale.

Tali evidenze sono l'espressione superficiale di movimenti più profondi (verso est), come registrato anche dallo stesso inclinometro.

Il fenomeno di instabilità è monitorato da Arpa Piemonte mediante un sistema di inclinometri e mediante un caposaldo GPS. I primi sono attivi dal 2002 invece il secondo è entrato in funzione nel 2004.

L'inclinometro denominato I6BARF0 ha individuato un movimento alla profondità di 45.5 metri. Rispetto alla lettura di origine (ottobre 2002) in corrispondenza della testa del tubo si è registrato uno spostamento in direzione SE di entità pari a circa 3.5 cm (lettura in novembre 2010), con accelerazione del movimento nel periodo 2008 – 2010.

Si segnala che a causa della deformazione subita dal tubo le misure sono state condotte solamente su due delle quattro guide originariamente previste.

L'inclinometro denominato I6BARF1 ha manifestato un notevole incremento delle deformazioni alla profondità di 26.5 metri.

Si registrano dunque movimenti in atto (attraverso l'analisi dei dati inclinometrici) a profondità variabili tra 26.5 m (quota 1750 m s.l.m.) e 46.0 m (quota 1350 m s.l.m.) dal piano campagna.

Nel periodo 2002 – 2008 le velocità medie sono variate da 4 mm/anno (quota 1750 m s.l.m.) a 2 mm/anno (quota 1350 m s.l.m.) mentre nel periodo 2008 – 2010 si è assistito ad un significativo incremento delle velocità medie di movimento che sono variate da 1.3 cm/anno (quota 1750 m s.l.m.) a 1.0 cm/anno (quota 1350 m s.l.m.).

La velocità media di movimento messa in luce dal sistema GPS (quota 1750 m s.l.m.) è stata pari a 2.6 cm/anno nel periodo compreso tra settembre 2008 – giugno 2009.

Di seguito, in Figura 3.4, Figura 3.5 e in Figura 3.6, vengono riportate immagini del sito tali da permettere una comprensione morfologicamente evidente del fenomeno.

Figura 3.4: Recenti attivazioni del fenomeno nel settore superiore, fianco sinistro, a quota 1750 m (in prossimità dell'inclinometro S11) (da: Schede SIFRAP)



Figura 3.5: Recenti attivazioni del fenomeno nel settore superiore, fianco sinistro, a quota 1750 m (in prossimità dell'inclinometro S11) (da: Schede SIFRAP)



Figura 3.6: Panoramica dal versante opposto (da: Schede SIFRAP)



Il sito di Bardonecchia in località Granges la Rho è individuato, attraverso le schede SIFRAP (Sistema Informativo Fenomeni Franosi in Piemonte), dal codice frana 001-00005-07.

E' un fenomeno complesso, compreso all'interno della DGPV e che interessa il versante sinistro della valle della Rho. Le deformazioni gravitative profonde di versante sono fenomeni che si manifestano attraverso lenti e continui meccanismi deformativi dell'ammasso roccioso a carico di estese e profonde porzioni di versante.

Il dissesto si sviluppa prevalentemente per colamento lento della coltre detritica superficiale e dell'ammasso roccioso disarticolato. Nella porzione di versante altimetricamente più alta sono presenti inoltre dei movimenti per scivolamento traslativo – rotazionale.

Di seguito, in Figura 3.7, Figura 3.8 e in Figura 3.9 vengono riportate delle immagini che permettono una migliore comprensione del sito analizzato dal punto di vista geografico e in particolare si riporta la tipologia di strumenti che Arpa Piemonte utilizza per il monitoraggio.

Figura 3.7: Individuazione del sito di Bardonecchia – Granges la Rho (da: Google Earth)

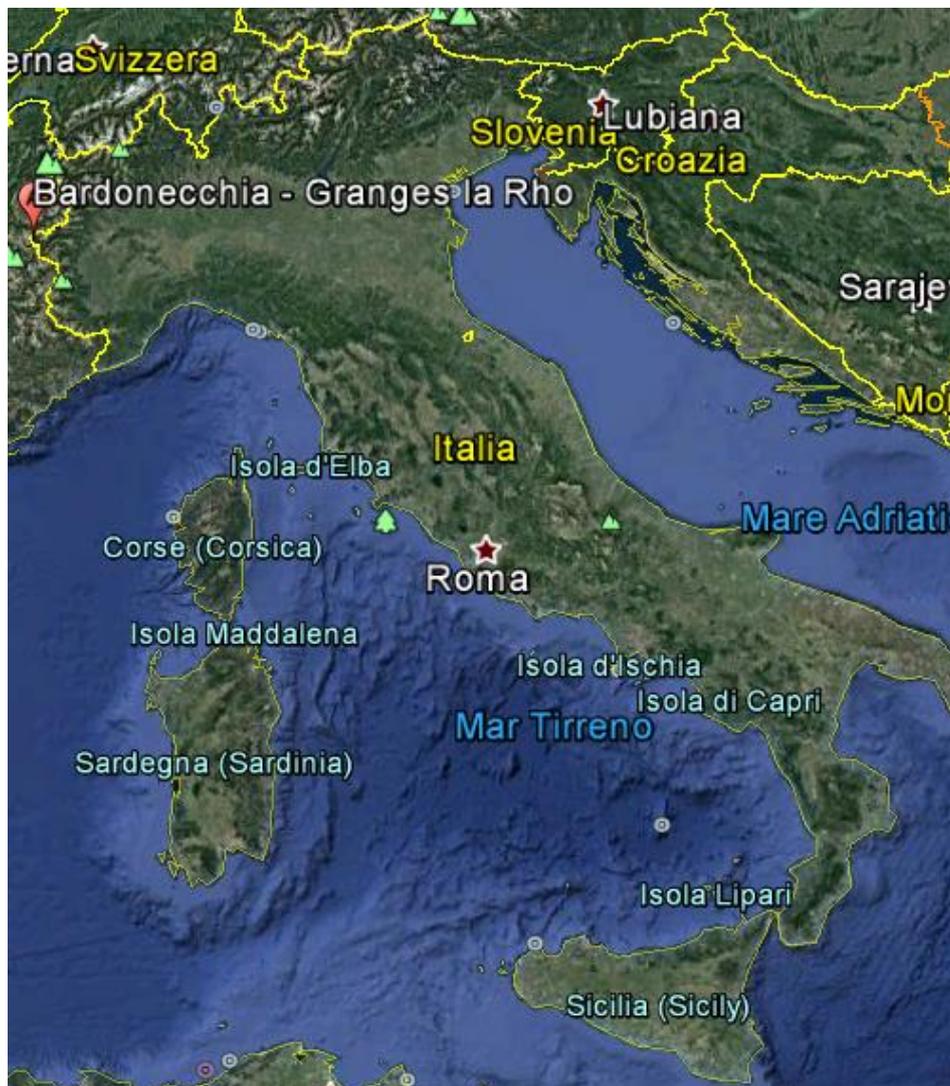


Figura 3.8: Individuazione dettagliata del sito con relative curve di livello (da: Schede SIFRAP)

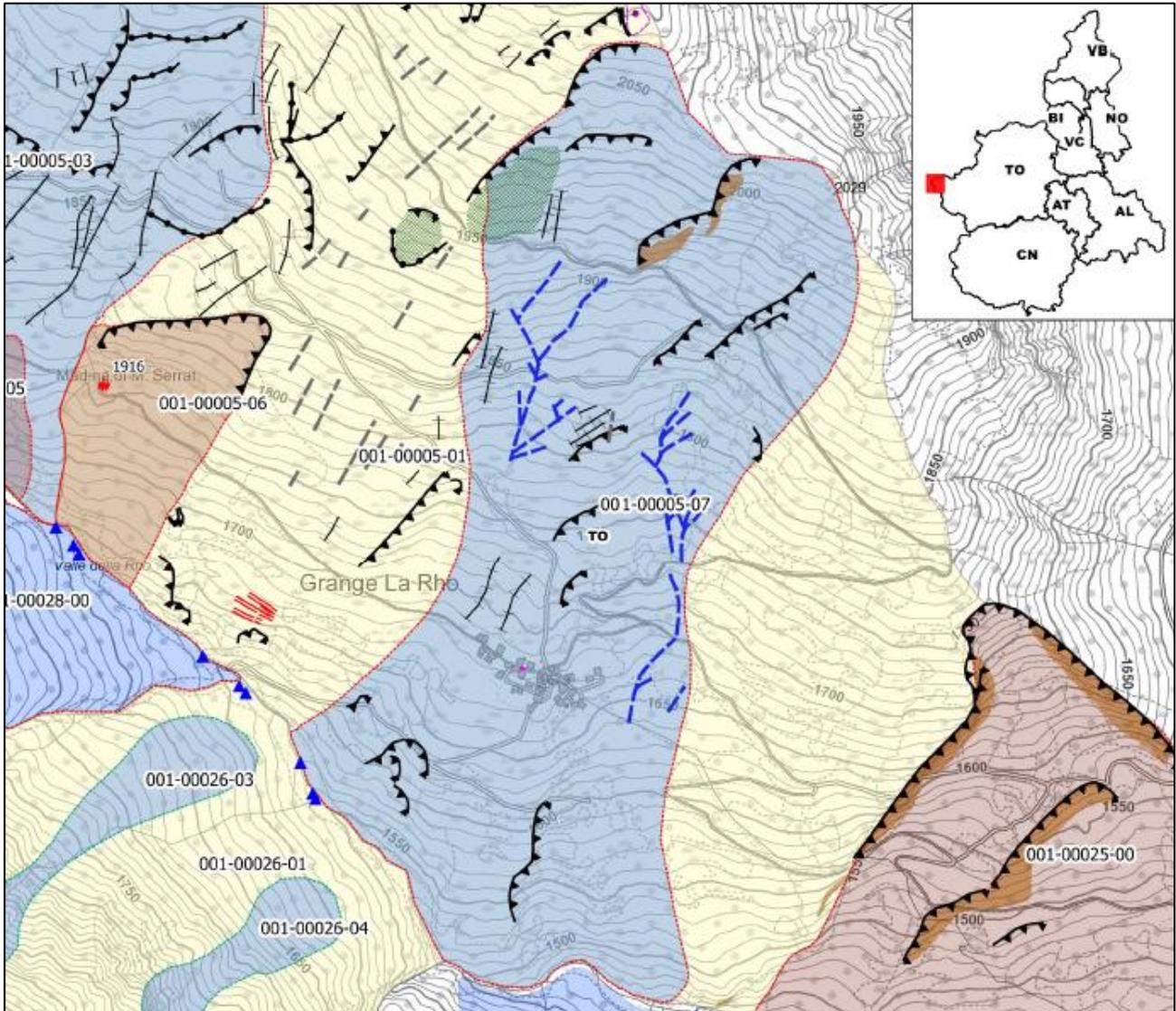
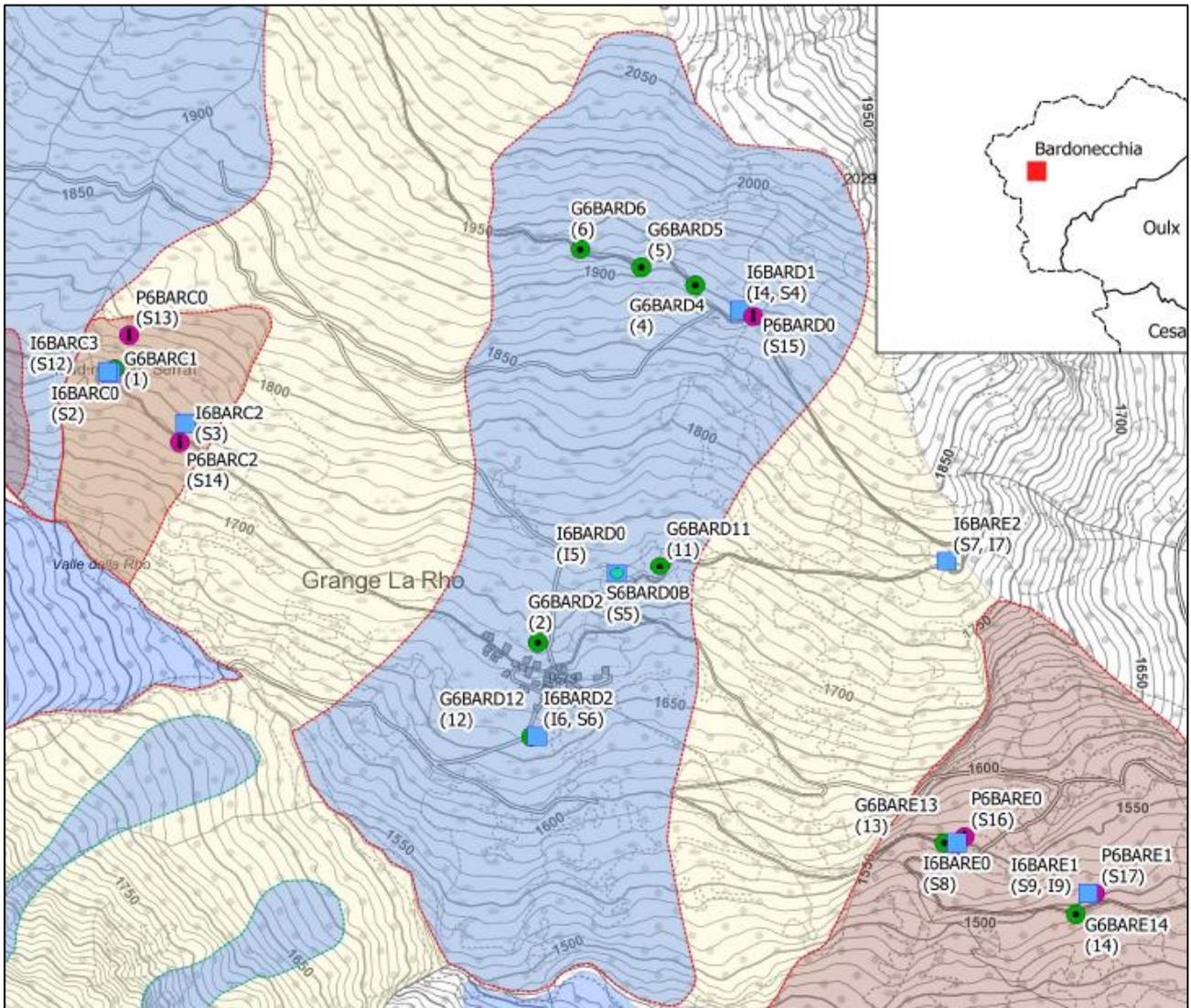


Figura 3.9: Individuazione della strumentazione presente in sito (da: Schede SIFRAP)



Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio

Strumentazione

- Caposaldo GPS
- Caposaldo topografico convenzionale
- Distometro a nastro
- Distometro laser
- Estensimetro a filo
- Inclinometro
- Misuratore di giunti
- Piezometro
- Spia fessurimetrica

Frane

- n.d.
- Crollo/Ribaltamento
- Scivolamento rotazionale/traslativo
- Espansione
- Colamento lento
- Colamento rapido
- Sprofondamento
- Complesso
- DGPV
- Aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi
- Aree soggette a sprofondamenti diffusi
- Aree soggette a frane superficiali diffuse
- Settore CARG

Stato Attività

- stabilizzato/relitto
- attivo
- quiescente

Aggiornamento: 02/2017

Scala: 1: 10000

Per quanto riguarda la morfometria della frana, i dati sono i seguenti:

- Quota corona: 2090 m;
- Quota unghia: 1470 m;
- Lunghezza orizzontale: 1525 m;
- Dislivello: 620 m;
- Pendenza: 22.1°
- Azimut movimento: 200°
- Area totale: 696425 m²;
- Larghezza: 630 m;
- Profondità della superficie di scivolamento: 24 m.

Il margine occidentale della frana è delimitato da una scarpata principale molto evidente, con direzione N20 nella zona di cresta e che continua fino a ovest dell'abitato di Grande della Rho. Diverse scarpate minori sono presenti all'interno di tutto il corpo di frana ed in particolare nella zona altimetricamente più elevata, conferendo alla zona una tipica morfologia a gradini. La porzione centrale del versante, da quota 1800 m circa fino all'abitato di Grande della Rho, è caratterizzata dalla presenza di numerose discontinuità morfologiche, principalmente fratture e depressioni allungate che si presentano generalmente orientazione verso N-NO. Tali depressioni, sviluppate longitudinalmente rispetto al versante, tendono ad essere fortemente rimodellate ed approfondite dall'azione delle acque meteoriche. Non è tuttavia possibile identificare un reticolo idrografico organizzato e gerarchizzato in quanto le depressioni, anche quando raggiungono profondità considerevoli, si interrompono bruscamente all'interno del versante.

Le evidenze morfologiche del fenomeno di instabilità tendono a diventare più scarse nella porzione di versante al di sotto del centro abitato, infatti, in questa zona vi sono sforzi di tipo compressivo che portano ad avere un profilo che si presenta convesso e rigonfiato. Il fondovalle risulta stretto ed incassato a causa della progressiva chiusura dovuta al lento movimento del versante.

Alcune nette scarpate, presenti circa un centinaio di metri al di sopra del fondovalle, testimoniano come l'azione di approfondimento del torrente sia responsabile dell'attivazione di frane di dimensioni più ridotte per erosione al piede (tale fenomeno è confermato anche da alcune informazioni d'archivio, che riportano l'attivazione di una frana di dimensioni di circa 50 metri di fronte e 100 metri di lunghezza).

Nel suo insieme il fenomeno è caratterizzato da un'evoluzione di tipo composito, ovvero costituito dalla presenza di diverse tipologie di meccanismi di movimento che avvengono in parti diverse della massa spostata e talora in periodi temporali differenti.

Nella porzione altimetricamente più elevata prevalgono i meccanismi di scivolamento roto-traslativo mentre nella porzione mediana prevalgono i meccanismi di tipo visco-plastico per colamento lento. Le forme legate alla dinamica del versante si presentano generalmente poco rimodellate e perciò ben identificabili sia da fotointerpretazione sia da terreno. Tali caratteri sono indicativi della generale attività del versante che, pur presentando movimenti di modesta entità, si protrae in modo continuo nel tempo.

Attualmente il fenomeno è monitorato da Arpa Piemonte, mediante due inclinometri a lettura manuale, 1 piezometro e 6 capisaldi GPS. Gli inclinometri sono attivi dal 2002 mentre il sistema GPS è attivo dal 2004.

I dati inclinometrici hanno evidenziato, attraverso l'analisi dei dati provenienti dall'inclinometro I6BARD2, per la zona immediatamente a valle della frazione Grange della Rho, movimenti cumulati in testa tubo di quasi 10 cm nel periodo compreso tra il 2002 ed il 2008 ma essi si concentrano alla profondità di 68 m dal piano campagna e la velocità media per il periodo 2002 – 2010 è di circa 1.7 cm/anno.

Nella zona a monte della frazione, attraverso l'inclinometro I6BARD0, si è registrato un movimento a 25 m di profondità con velocità medie per il periodo 2001 – 2010 di 1.6 cm/anno.

In corrispondenza della zona di testata (quota 1900 m s.l.m.) l'inclinometro I6BARD1, presumibilmente poco approfondito, ha registrato movimenti alla profondità di 7 m dal piano campagna con velocità corrispondenti di circa 8 mm/anno nel periodo 2002 – 2010.

In tutti i casi, comunque, il movimento risulta concentrato lungo una superficie ben definita.

Sulla base dei dati topografici (periodo 2004 – 2010), le velocità medie di movimento sono variate tra 1.5 cm/anno in corrispondenza di Granges la Rho e 4.5 cm/anno nella porzione di monte (intorno ai 1900 m di quota s.l.m.). A partire dal 2008 si è assistito ad un incremento delle velocità medie di movimento, variabili tra 2.1 cm/anno (Granges la Rho) a 6.8 cm/anno (quota 1900 m s.l.m.).

Di seguito in Figura 3.10, Figura 3.11 e in Figura 3.12 vengono riportate delle immagini tali da permettere una comprensione morfologicamente evidente del fenomeno.

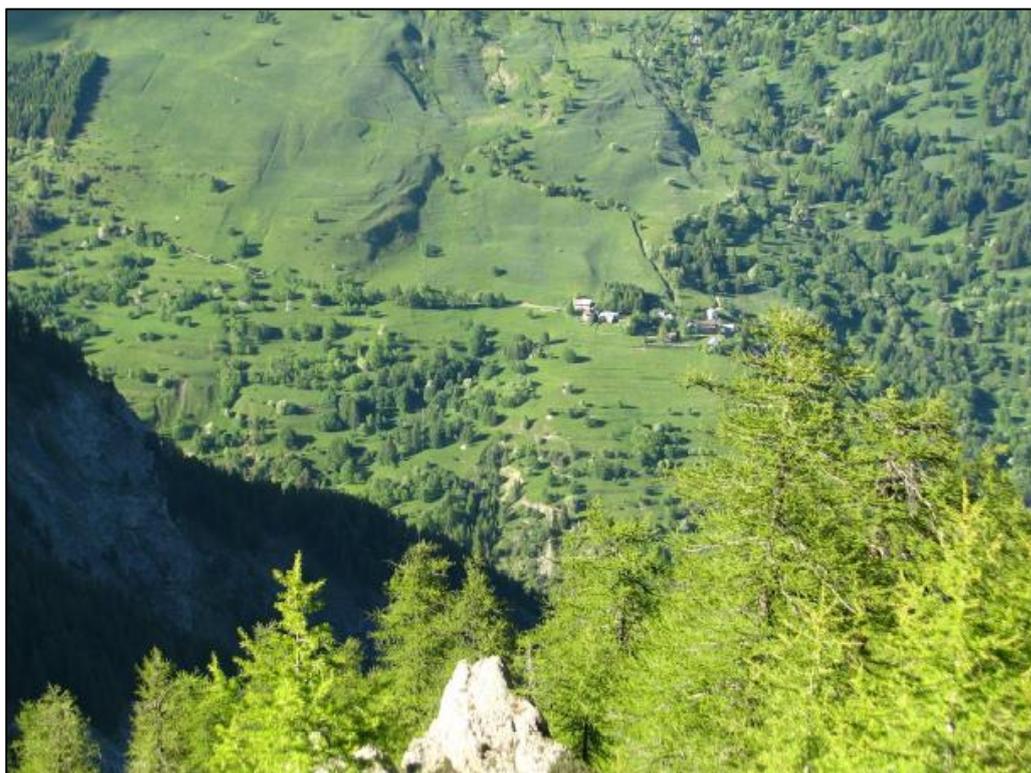
Figura 3.10: Vista frontale della frana. Ripresa del 11/06/2009 dal versante opposto – Cima Tre Croci (quota 2230) (da: Schede SIFRAP)



**Figura 3.11: Vista frontale della frana. Ripresa del 11/06/2009 dal versante opposto – Cima Tre Croci (quota 2115)
(da: Schede SIFRAP)**



**Figura 3.12: Dettaglio piede frana. Ripresa del 11/06/2009 dal versante opposto - Cima Tre Croci (quota 2230)
(da: Schede SIFRAP)**



Il sito di Sestriere località Borgata è individuato, attraverso le schede SIFRAP (Sistema Informativo Fenomeni Franosi in Piemonte), dal codice frana 001-75390-00.

E' un fenomeno di tipo complesso e compreso all'interno di una più ampia area in DGPV (come precedentemente espresso, si vuole ricordare che le deformazioni gravitative profonde di versante sono fenomeni che si manifestano attraverso lenti e continui meccanismi deformativi dell'ammasso roccioso a carico di estese e profonde porzioni di versante). Dal 1999 la Regione Piemonte ha effettuato alcune indagini geognostiche ed ha installato un sistema di monitoraggio composto da inclinometri e piezometri. In seguito, nel periodo 1999 – 2000 sono stati effettuati nuovi sondaggi e la messa in opera di un nuovo sistema di monitoraggio in sostituzione del precedente reso inservibile a causa degli alti tassi di movimento. Negli anni successivi sono stati resi necessari ulteriori interventi di manutenzione sul sistema di monitoraggio.

Si fa presente che nell'autunno del 2004 sono stati effettuati interventi di drenaggio mediante la realizzazione di canalette di scolo, trincee drenanti, pannelli drenanti e dreni sub-orizzontali.

In generale il fenomeno ha un'evoluzione di tipo complesso per scivolamento e colamento lento.

Di seguito in Figura 3.13, Figura 3.14 e in Figura 3.15 vengono riportate delle immagini che permettono una migliore comprensione del sito analizzato dal punto di vista geografico e in particolare si riporta la tipologia di strumenti che Arpa Piemonte utilizza per il monitoraggio.

Figura 3.13: Individuazione del sito di Sestriere – Borgata (da: Google Earth)

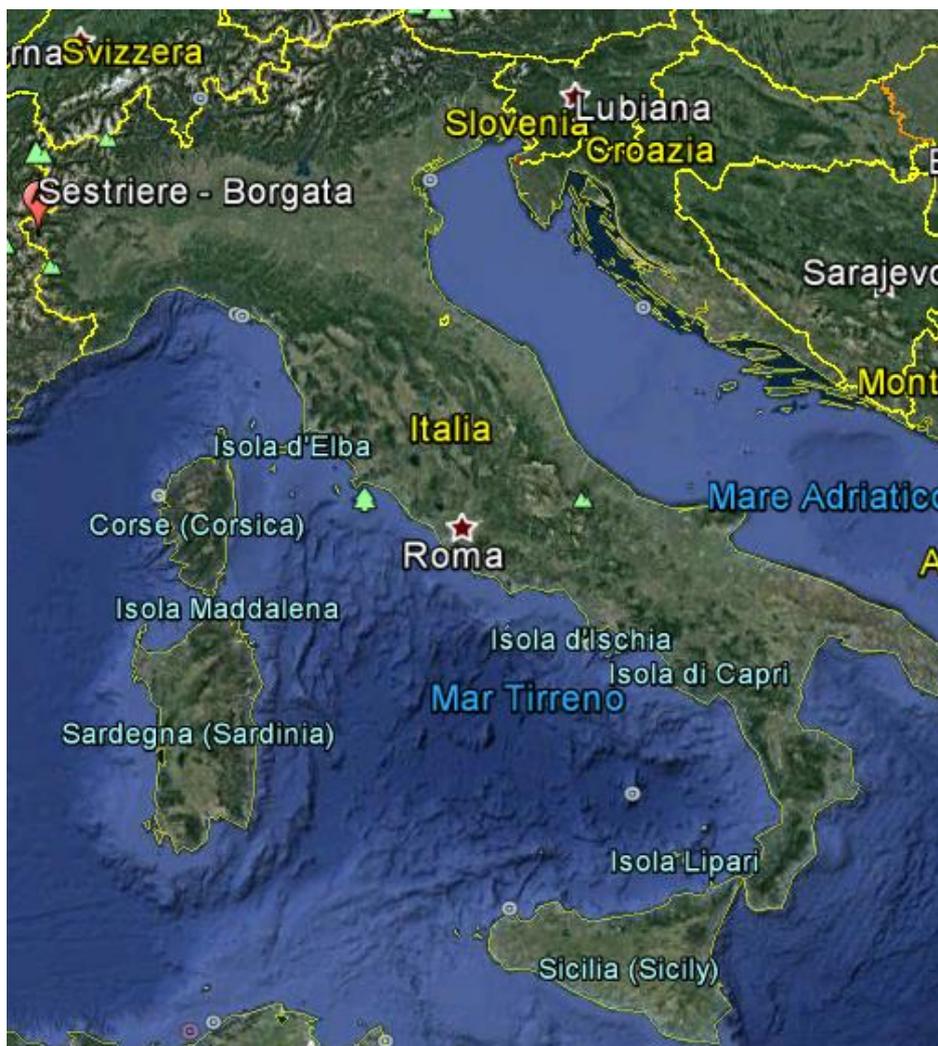


Figura 3.14: Individuazione dettagliata del sito con relative curve di livello (da: Schede SIFRAP)

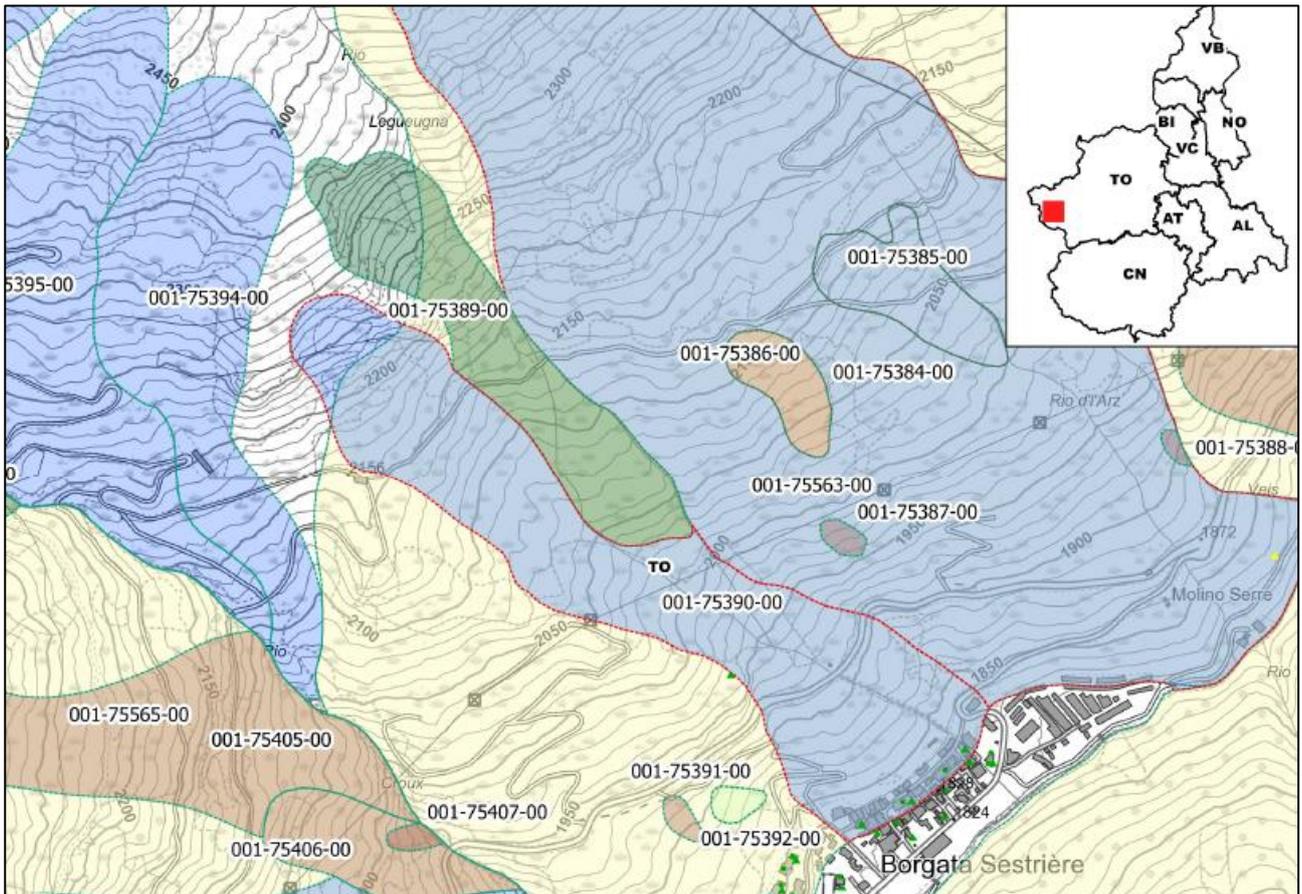
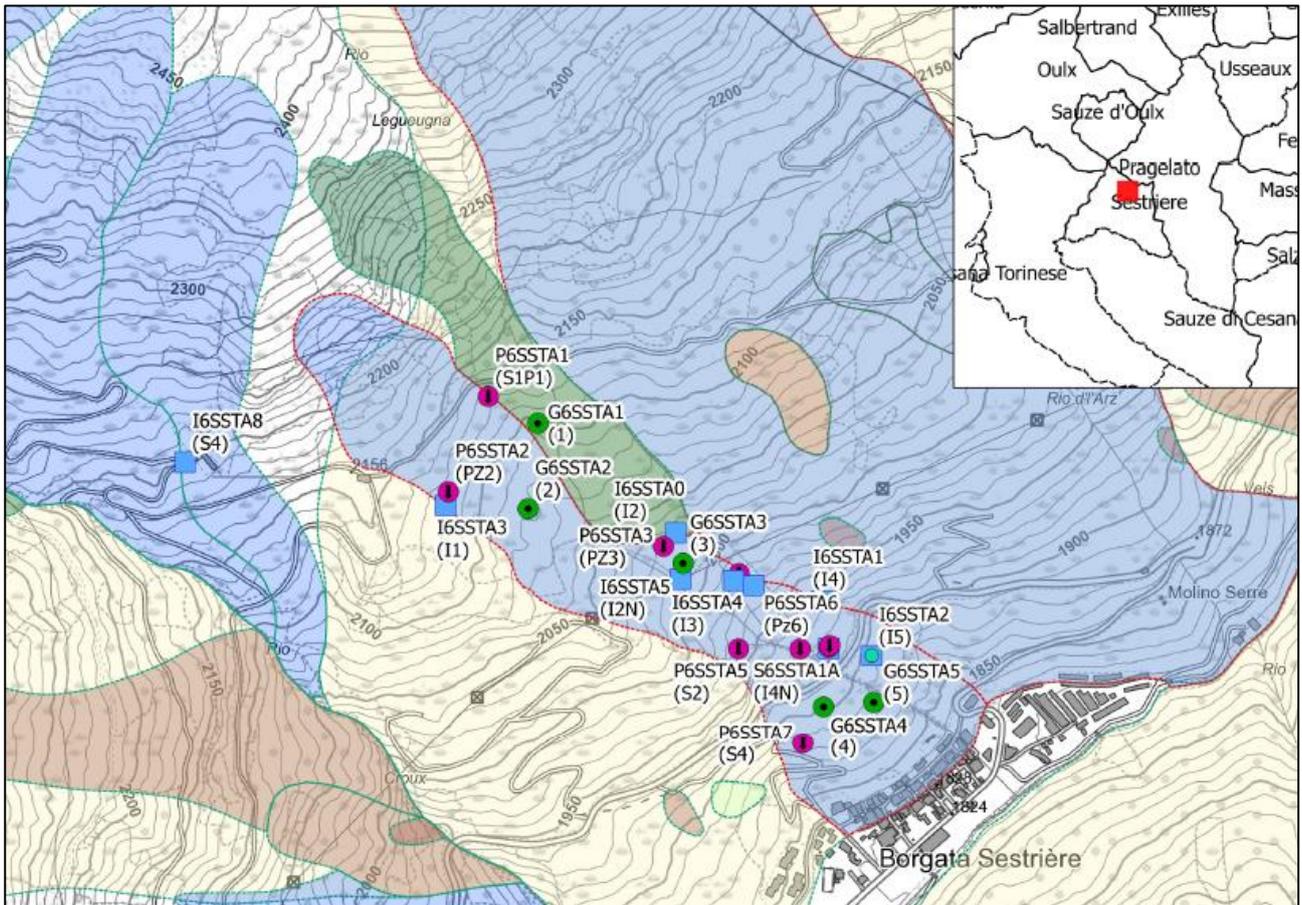


Figura 3.15: Individuazione della strumentazione presente in sito (da: Schede SIFRAP)



Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio

Strumentazione

- Caposaldo GPS
- Caposaldo topografico convenzionale
- Distometro a nastro
- Distometro laser
- Estensimetro a filo
- Inclino metro
- Misuratore di giunti
- Piezometro
- Spia fessurimetrica

Frane

- n.d.
- Crollo/Ribaltamento
- Scivolamento rotazionale/traslattivo
- Espansione
- Colamento lento
- Colamento rapido
- Sprofondamento
- Complesso
- DGPV
- Aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi
- Aree soggette a sprofondamenti diffusi
- Aree soggette a frane superficiali diffuse
- Serture CARG

Stato Attività

- stabilizzato/relitto
- attivo
- quiescente

Aggiornamento: 02/2017

Scala: 1: 10000

Per quanto riguarda la morfometria della frana, i dati sono i seguenti:

- Quota corona: 2300 m;
- Quota unghia: 1840 m;
- Lunghezza orizzontale: 1170 m;
- Dislivello: 460 m;
- Pendenza: 21.9°
- Azimut movimento: 127°
- Area totale: 191800 m²;
- Larghezza: 280 m;
- Profondità della superficie di scivolamento: 15 m.

La frana si estende lungo il versante a monte di Borgata ovvero dal paese (quota 1815 m), dove il piede è stato rimodellato dal forte intervento antropico, fino ad una quota di 2150 m s.l.m. piegando leggermente a Nord-Ovest. Prima degli interventi di sistemazione, che hanno portato ad una parziale riprofilatura del versante, si osservavano diversi gradini morfologici molto marcati. Un cambiamento importante si è rilevato in corrispondenza di una superficie di rottura posta ad una quota di 2010 m, interpretabile come coronamento superiore della zona più attiva. Nell'area sottostante questo gradino, infatti, sono stati registrati i movimenti più intensi ed inoltre, al salto morfologico superficiale, corrisponde un gradino nell'interfaccia tra substrato e copertura, come si deduce dal passaggio da profondità modeste del substrato (a monte di quota 2010 m) a profondità notevoli a valle.

Nella zona attiva al di sotto di quota 2010 vi erano presenti nicchie secondarie, fratture di trazione, contropendenze e blocchi di detrito, oltre a diffuse zone umide e piccole sorgenti, indicative di una saturazione almeno superficiale della coltre e potenziali cause scatenanti dei movimenti franosi registrati.

Attualmente il sito è monitorato da Arpa Piemonte mediante inclinometri e piezometri. I movimenti più rilevanti si concentrano alla profondità compresa tra 14 e 15 m circa dal piano campagna, sebbene l'inclinometro più profondo (50 m) registri una superficie con movimenti di entità minore alla profondità di 33 m dal piano campagna.

Di seguito in Figura 3.16 e in Figura 3.17 vengono riportate delle immagini che raffigurano il sito oggetto di interventi di drenaggio.

Figura 3.16: Panoramica del versante oggetto di interventi di drenaggio (da: Schede SIFRAP)



Figura 3.17: Ulteriore panoramica del versante oggetto degli interventi di drenaggio (da: Schede SIFRAP)



4. Analisi dei dati pluviometrici e delle temperature minime e medie dai database della Regione Piemonte

4.1 Introduzione all'argomento

Con il termine precipitazione si indicano gli afflussi meteorici sia liquidi, ovvero la pioggia, che solidi, ovvero la neve o la grandine.

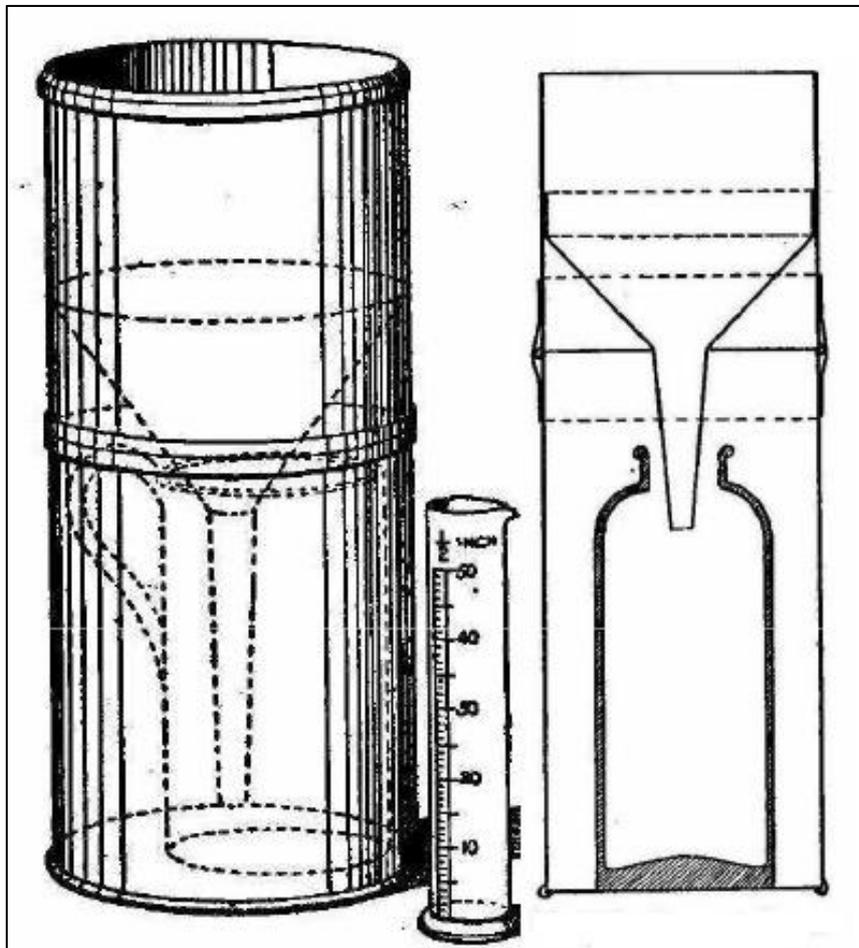
L'altezza di precipitazione si definisce come l'altezza della lama d'acqua che coprirebbe una superficie orizzontale, qualora tutta l'acqua raccolta dalla superficie fosse trattenuta, così da formare uno strato di spessore uniforme. Quando si parla di altezza di precipitazione è necessario specificare sempre l'intervallo di tempo in cui la stessa è caduta (si noti che 1 mm di lama d'acqua su 1 m² equivale ad un litro ovvero 1000 cm³).

Gli strumenti utilizzati per la misura delle precipitazioni raccolgono soltanto l'acqua caduta su una superficie molto ridotta e dunque la principale caratteristica delle misure di precipitazione è quella di essere una misura puntuale.

Un pluviometro è un recipiente cilindrico nella cui bocca, disposta orizzontalmente, è sistemato un imbuto raccogliitore il cui scopo è quello di ridurre il più possibile le perdite per evaporazione.

Per le misure dell'afflusso meteorico, nel caso di precipitazione solida, il pluviometro deve essere opportunamente riscaldato.

Figura 4.1: Schema di un pluviometro (da: Materiale didattico corso di Idrologia – Claps P. – 2015)



In Figura 4.1 è riportato lo schema di un pluviometro tradizionale, il quale viene installato generalmente ad un'altezza dal suolo di circa 1.5 metri in luogo aperto, lontano da alberi e fabbricati, in modo che la pioggia sia in ogni parte libera di cadere sul ricevitore del pluviometro stesso. Le altezze di precipitazione dei pluviometri sono generalmente misurate con una precisione di 0.2 mm. I dati ricavati vengono letti normalmente una volta al giorno ma, per misure relative ad intervalli di tempo minori, si usano strumenti chiamati pluviografi.

Il pluviografo più utilizzato è quello a bascula, il cui funzionamento è caratterizzato dal fatto che l'acqua proveniente dall'imbuto finisce in una coppia di piccoli recipienti (ora nell'uno, ora nell'altro) di volume noto e solidali ad una base basculante attorno ad un perno. Man mano che il recipiente si riempie, il baricentro del sistema basculante si sposta e una volta raggiunto un certo grado di riempimento il sistema ribalta. La registrazione del movimento delle vaschette fornisce l'andamento temporale delle precipitazioni. In Figura 4.2 e in Figura 4.3 vengono riportati schemi semplificativi che permettono di comprendere meglio il funzionamento dello strumento.

Uno strumento come il pluviometro è inevitabilmente assoggettato a certi errori ineluttabili come: la presenza del vento che devia i filetti fluidi soggetti ad azione gravitativa, l'evaporazione e l'adesione.

Figura 4.2: Schema di un pluviografo a bascula (da: Materiale didattico corso di Idrologia – Claps P. – 2015)

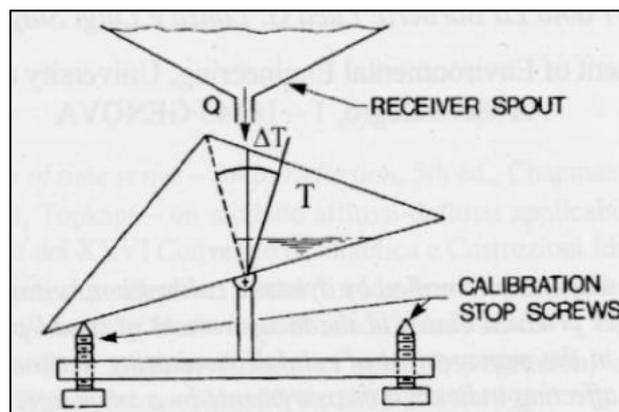
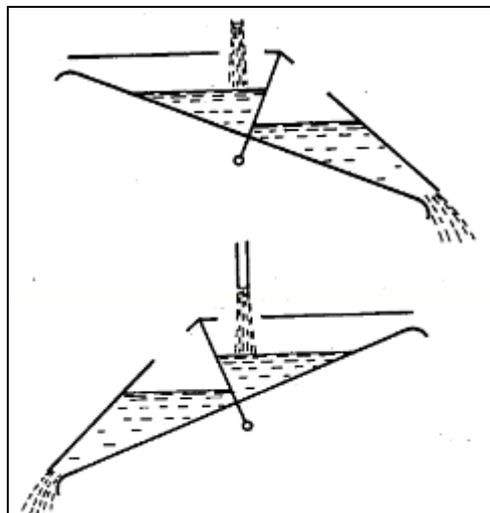


Figura 4.3: Altro schema del pluviografo a bascula (da: Materiale didattico corso di Idrologia – Claps P. – 2015)



Una volta individuati i siti e le informazioni geografiche e storiche, il passo successivo è stato quello di reperire i dati pluviometrici, necessari per le successive relazioni messe in atto.

Non si nasconde che trovare informazioni complete, continue ed aggiornate non è stato facile, infatti, come molto spesso accade in alcuni rami dell'Ingegneria, ci si deve districare pur non avendo a disposizione tutti i risultati desiderati. Questo inciso serve per spiegare il motivo per cui i dati pluviometrici utilizzati di seguito sono provenienti da strumenti non posizionati nei siti stessi di studio ma da pluviometri relativamente vicini alle località di studio (ovvero Bardonecchia e Sestriere) con il risultato di aver ottenuto più dati utili per le relazioni.

Per il sito di Bardonecchia località Tre Croci e per il sito di Bardonecchia Granges la Rho, la stazione pluviometrica di riferimento è stata quella di "Bardonecchia Pian Del Sole" la quale risulta distante circa 2 km in linea d'aria dalla località Tre Croci e distante circa 3 km in linea d'aria dalla località Granges la Rho. Si consideri che l'errore commesso non sarà molto marcato viste le distanze relativamente ridotte tra i siti di studio e gli strumenti di registrazione.

In riferimento al sito di Bardonecchia Pian Del Sole, in Figura 4.4, Figura 4.5 e in Figura 4.6, sono riportate la carta CTR e la documentazione fotografica della stazione. Si riporta inoltre, qui di seguito, l'anagrafica della stazione stessa:

- Codice stazione: S3238
- Quota sito (metri): 1585
- Comune: Bardonecchia
- Provincia: Torino
- Bacino: Dora Riparia
- Località: Pian Del Sole
- Inizio pubblicazione: 2003 – 02 - 07
- Fine pubblicazione: Attiva
- Latitudine N: 450351
- Longitudine E: 064221

Figura 4.4: Mappa CTR della stazione di Bardonecchia Pian Del Sole (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte)

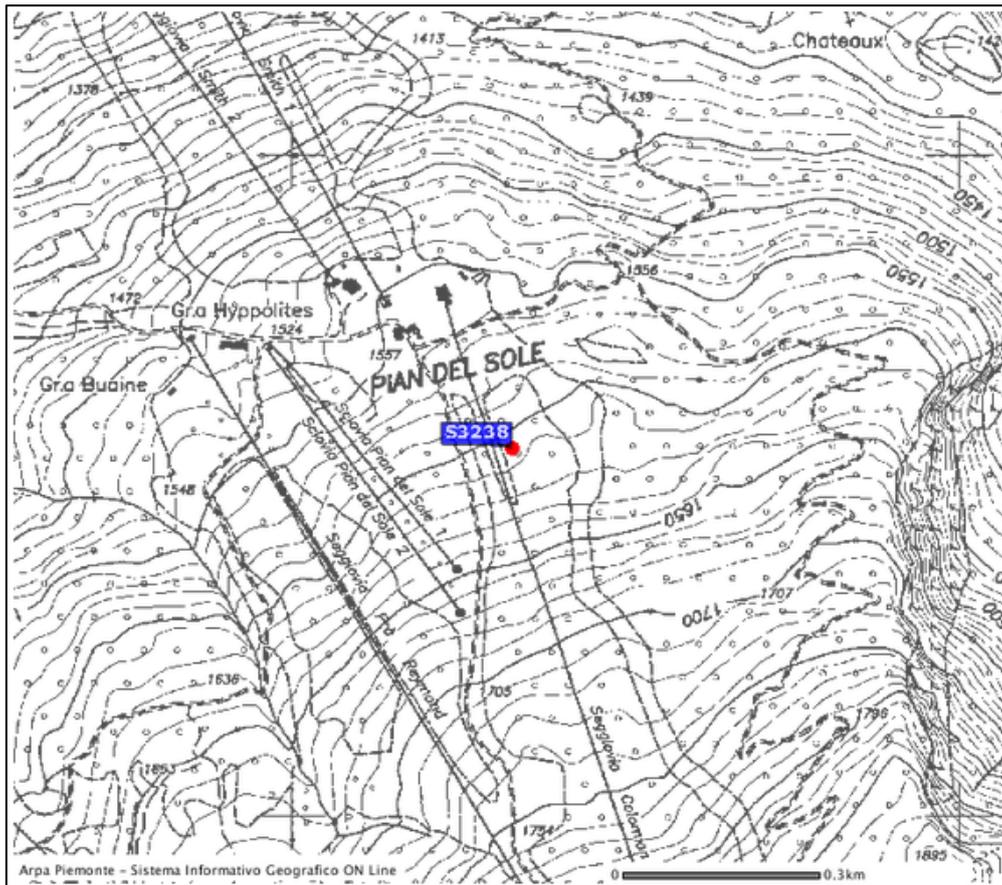


Figura 4.5: Visualizzazione fotografica della stazione di Bardonecchia Pian Del Sole (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte)



Figura 4.6: Ulteriore visualizzazione fotografica della stazione di Bardonecchia Pian Del Sole (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte)



Per quanto riguarda il sito di Sestriere località Borgata, la stazione pluviometrica di riferimento è stata quella di “Sestriere Alpette” la quale risulta distante circa 2 km in linea d’aria dalla località Borgata.

In riferimento alla stazione di Sestriere Alpette, in Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9 e in Figura 4.10, sono riportate la carta CTR e documentazione fotografica della stazione. Si riporta inoltre, qui di seguito, l’anagrafica della stazione stessa:

- Codice stazione: S2893
- Quota sito (metri): 2250
- Comune: Sestriere
- Provincia: Torino
- Bacino: Pellice
- Località: Monte Alpette
- Inizio pubblicazione: 2003 – 02 - 14
- Fine pubblicazione: Attiva
- Latitudine N: 445707
- Longitudine E: 065324

Figura 4.7: Mappa CTR della stazione di Sestriere Alpette (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte)

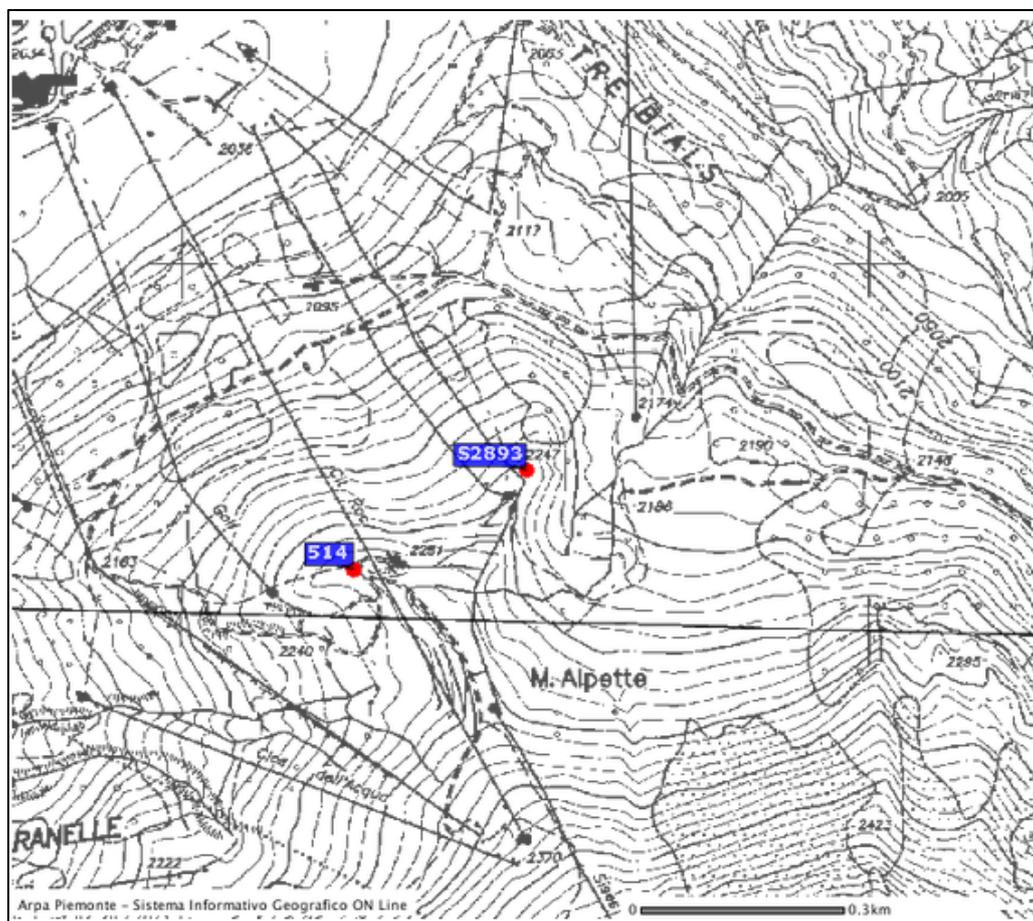


Figura 4.8: Visualizzazione fotografica della stazione di Sestriere Alpette (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte)



Figura 4.9: Ulteriore visualizzazione fotografica della stazione di Sestriere Alpette (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte)



Figura 4.10: Dettaglio della stazione di Sestriere Alpette (da: Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte)

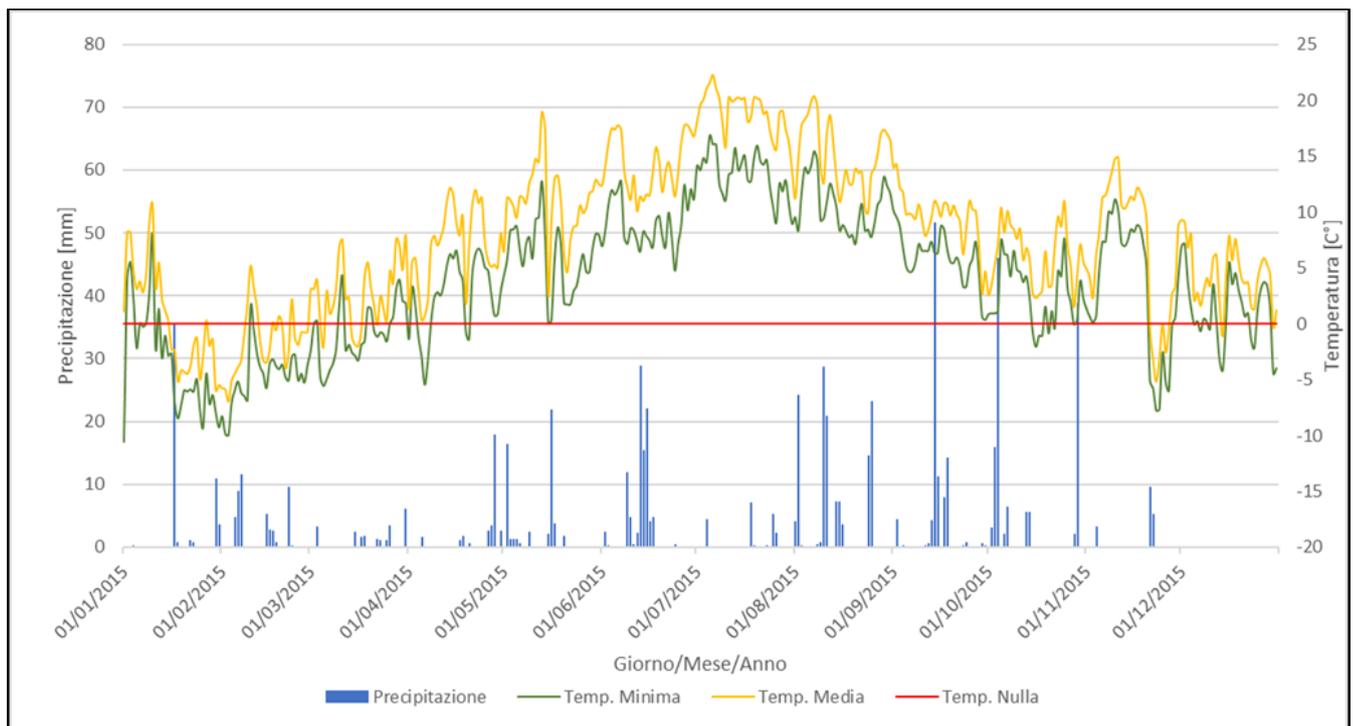


4.2 Analisi dei dati reperiti

Dopo aver reperito i dati pluviometrici, si è voluto distinguere tra le precipitazioni nevose e quelle acquose. Il dato più rappresentativo per questo tipo di analisi è sicuramente la quantità di neve al suolo ma per la stazione di Sestriere il dato non era riportato nei database per cui, volendo analizzare tutti i siti attraverso la medesima procedura, si è preferito utilizzare le temperature ed in particolare si è fatto riferimento a quelle minime e medie. L'obiettivo è stato quello di capire, con un certo grado di approssimazione, ed in base alle temperature, se le precipitazioni registrate fossero "precipitazioni nevose" o "precipitazioni liquide".

Di seguito in Figura 4.11 è riportata un'immagine che raffigura il grafico contenente il dato pluviometrico e l'andamento delle temperature minime e medie relativi alla stazione di Bardonecchia Pian Del Sole nell'anno 2015 (si fa presente che gli ulteriori grafici realizzati sono in Allegato I).

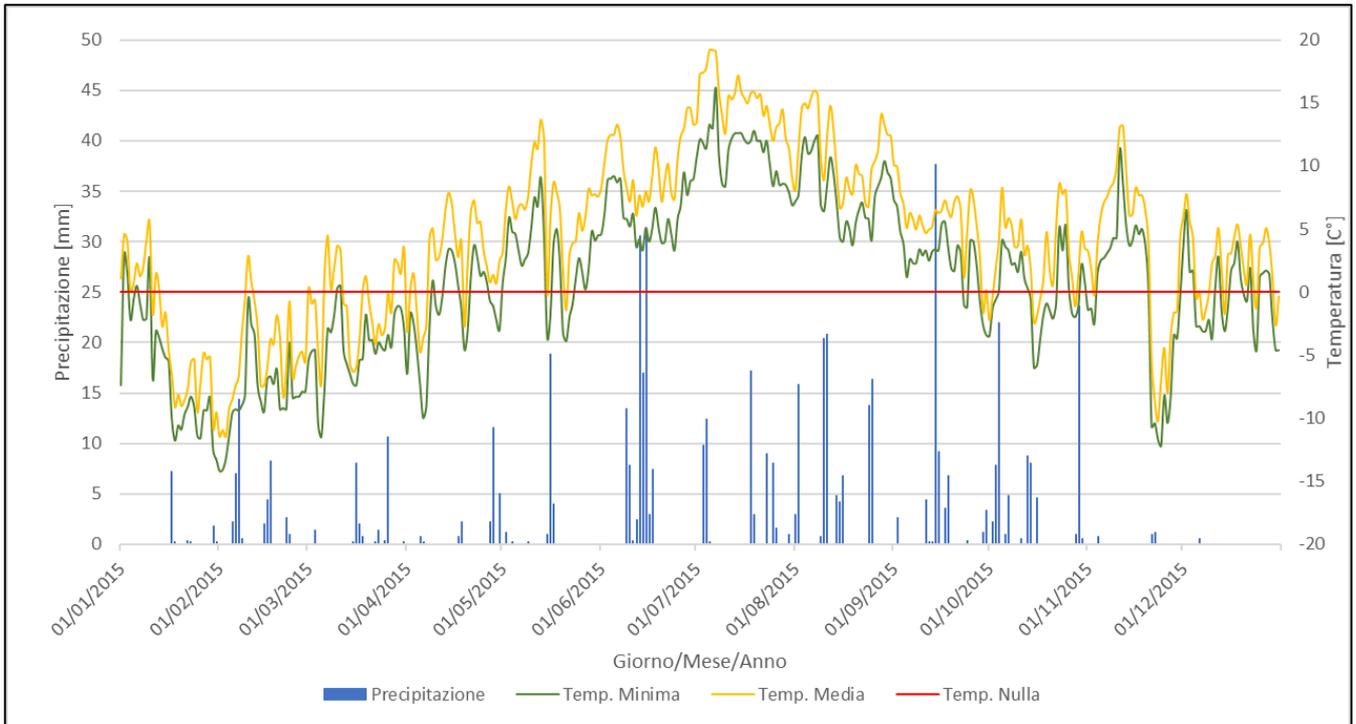
Figura 4.11: Relazione Precipitazione - Temp. Minima e Media - Anno 2015



La medesima procedura è stata effettuata per il sito di Sestriere.

In Figura 4.12 è riportata un'immagine che raffigura il grafico contenente il dato pluviometrico e l'andamento delle temperature minime e medie relativi alla stazione di Sestriere Alpette nell'anno 2015 (si fa presente che gli ulteriori grafici realizzati sono in Allegato II).

Figura 4.12: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2015

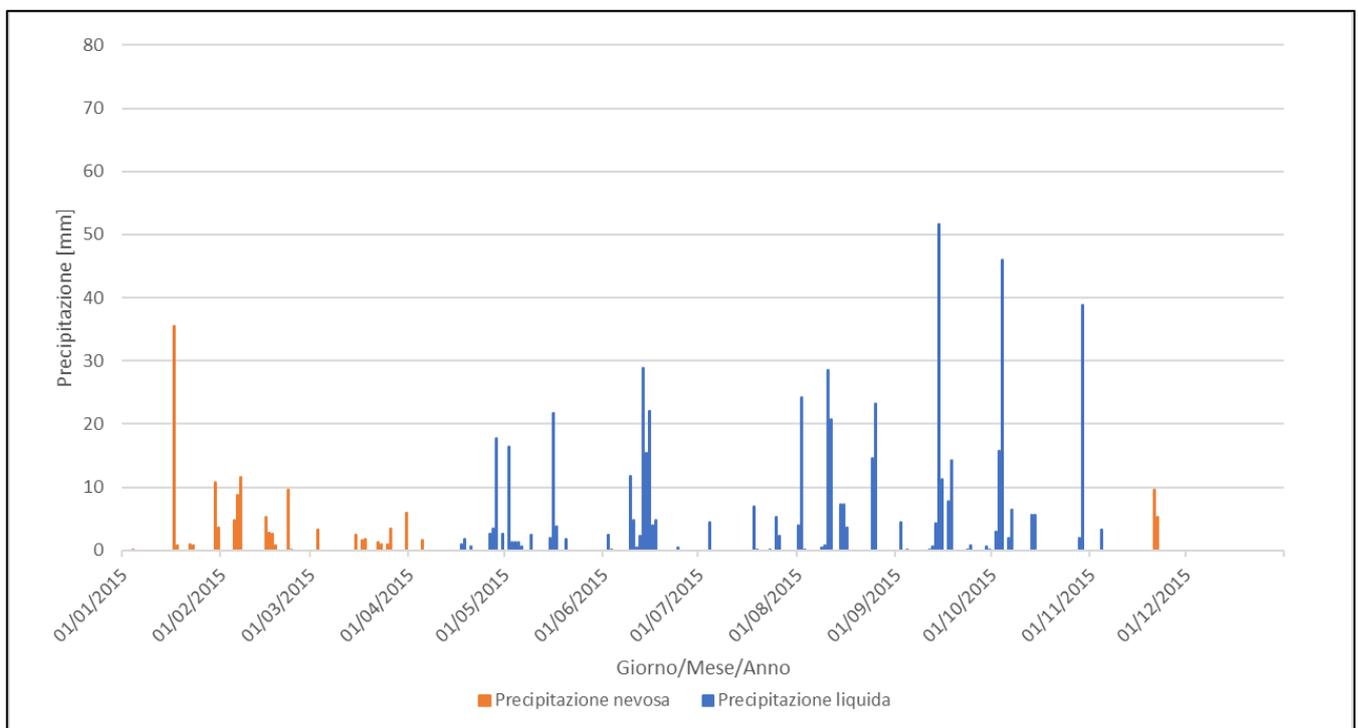


A questo punto è stato possibile distinguere le “precipitazioni nevose” dalle “precipitazioni liquide”, basandosi sull’andamento delle temperature minime e medie.

Per il sito di Bardonecchia Pian del Sole, in Figura 4.13 viene riportata la distinzione voluta, mediante differente colorazione, nell’anno 2015.

In generale, risulta profondamente evidente il fatto che nei mesi più freddi (generalmente quelli all’inizio e alla fine di ogni anno) le precipitazioni siano nevose invece nei mesi più caldi o più miti, com’è ovvio, le precipitazioni siano liquide (si fa presente che gli ulteriori grafici realizzati sono in Allegato III).

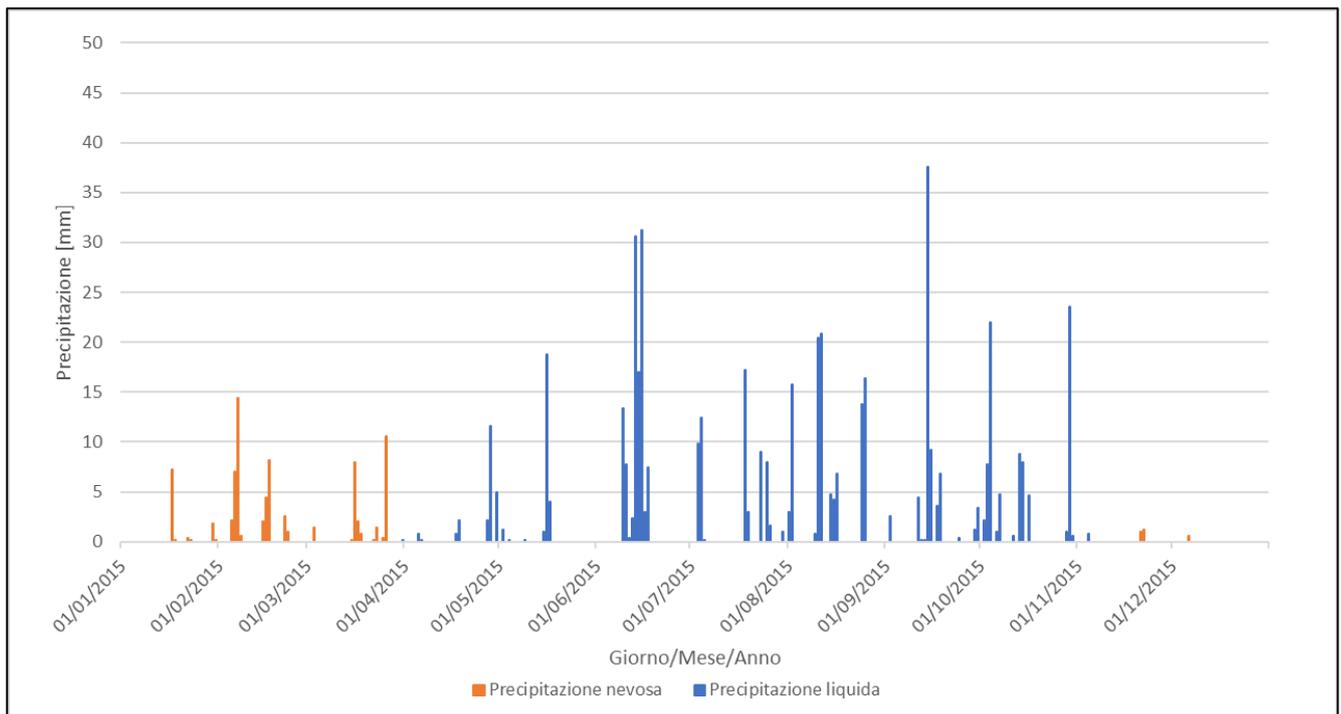
Figura 4.13: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2015



Lo stesso lavoro è stato effettuato per il sito di Sestriere Alpette e infatti in Figura 4.14 viene riportata la distinzione voluta, mediante differente colorazione, nell'anno 2015.

In generale, anche in questo caso, risulta profondamente evidente il fatto che nei mesi più freddi (generalmente all'inizio e alla fine di ogni anno) le precipitazioni siano nevose invece nei mesi più caldi o più miti, com'è ovvio, le precipitazioni siano liquide (si fa presente che gli ulteriori grafici realizzati sono in Allegato IV).

Figura 4.14: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2015



5. Relazioni tra le piogge e il livello di falda

5.1 Inquadramento del problema

In una analisi di stabilità di versante è importante capire se le piogge si infiltrano nel corpo frana o subiscono il fenomeno del ruscellamento superficiale.

È dunque importante verificare se vi sono correlazioni tra le piogge e le misure piezometriche.

5.2 Valutazione delle relazioni piogge - livello di falda in Bardonecchia Tre Croci

Per quanto riguarda il sito di Bardonecchia località Tre Croci, il piezometro a cui si è fatto riferimento e da cui è stato possibile ricevere e analizzare i dati, è quello denominato P6BARF0.

Si è deciso di procedere facendo delle relazioni tra le piogge e il livello di falda in modo tale da capire se la falda rispondeva alle piogge provenienti dall'alto; si sono considerati, ovviamente, i soli anni in cui è stato possibile avere a disposizione entrambe le tipologie di dati.

In generale le analisi hanno evidenziato un buon collegamento tra le piogge e il livello di falda.

A dimostrazione di ciò, si riportano in Figura 5.1 e in Figura 5.2 le condizioni registrate nel 2010 e nel 2015. In particolare, è evidente che nel 2010 non ci sia una importante variazione del livello di falda, a differenza di quanto accade nel 2015, ma bisogna considerare che gli apporti di pioggia nevosa che il sito ha ricevuto nel 2010 sono di gran lunga inferiori rispetto a quelli ricevuti nel 2015 e dunque sembra che lo scioglimento della neve giochi un ruolo importante nell'incremento del livello della falda.

Si deduce anche che le precipitazioni estive, spesso caratterizzate da scrosci improvvisi, e l'importante fenomeno evapo-traspirativo, non portano ad alcun importante effetto di infiltrazione e dunque generalmente non avviene un incremento del livello di falda significativo.

I singoli grafici e quelli ulteriori realizzati sono riportati, per completezza, in Allegato V.

Figura 5.1: Relazione tra precipitazione e livello falda – Anno 2010

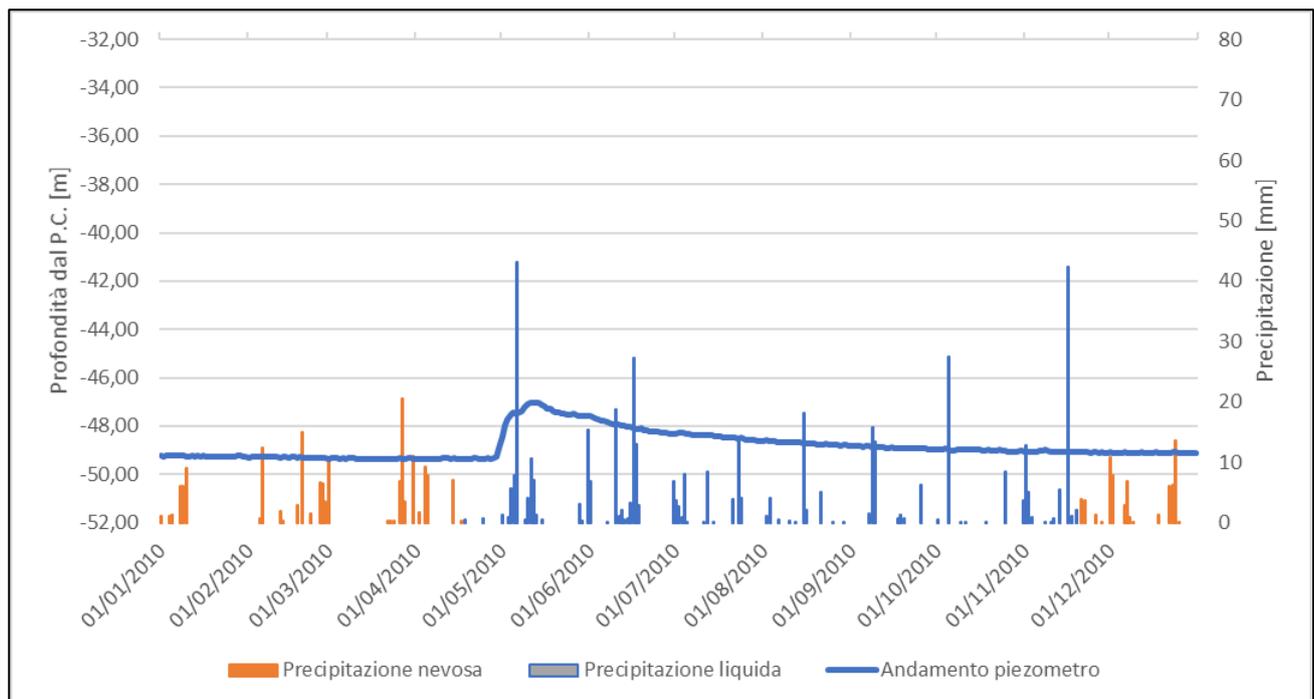
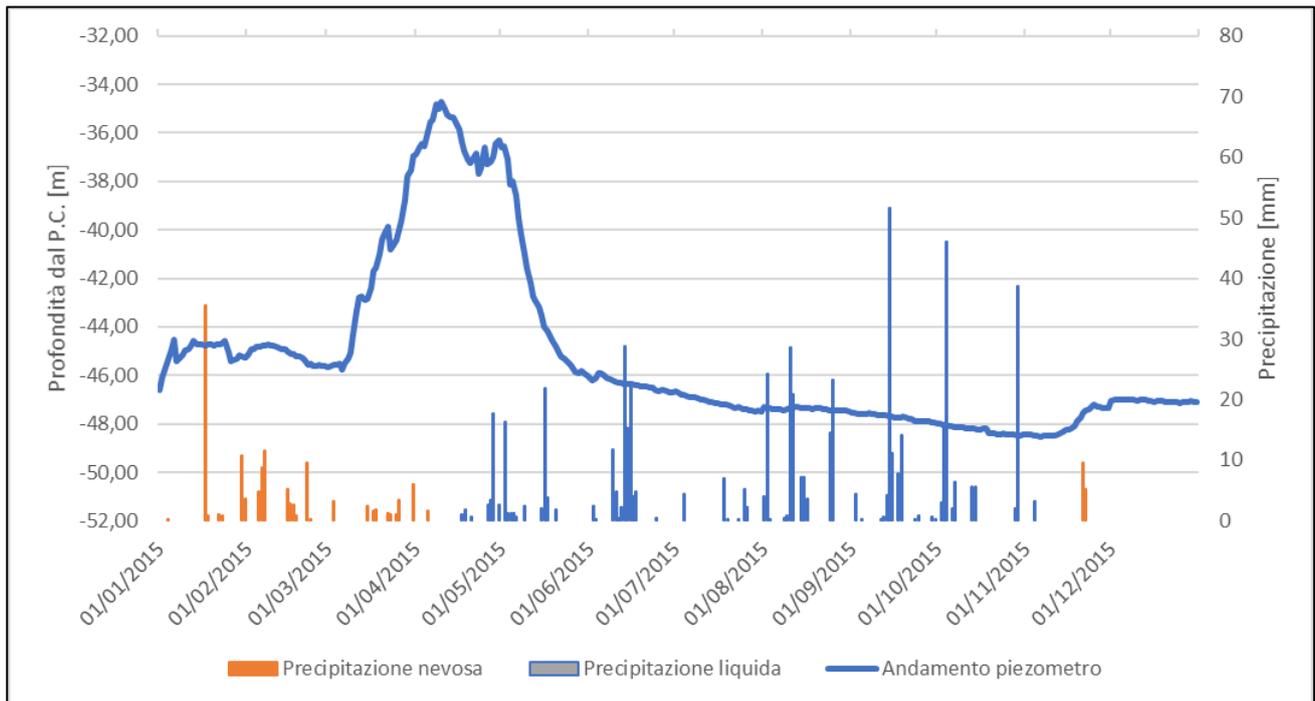


Figura 5.2: Relazione tra precipitazione e livello falda – Anno 2015



5.3 Valutazione delle relazioni piogge - livello di falda in Bardonecchia Granges la Rho

Per quanto riguarda il sito di Bardonecchia località Granges la Rho, il piezometro a cui si è fatto riferimento e da cui è stato possibile ricevere e analizzare i dati, è quello denominato P6BARD0.

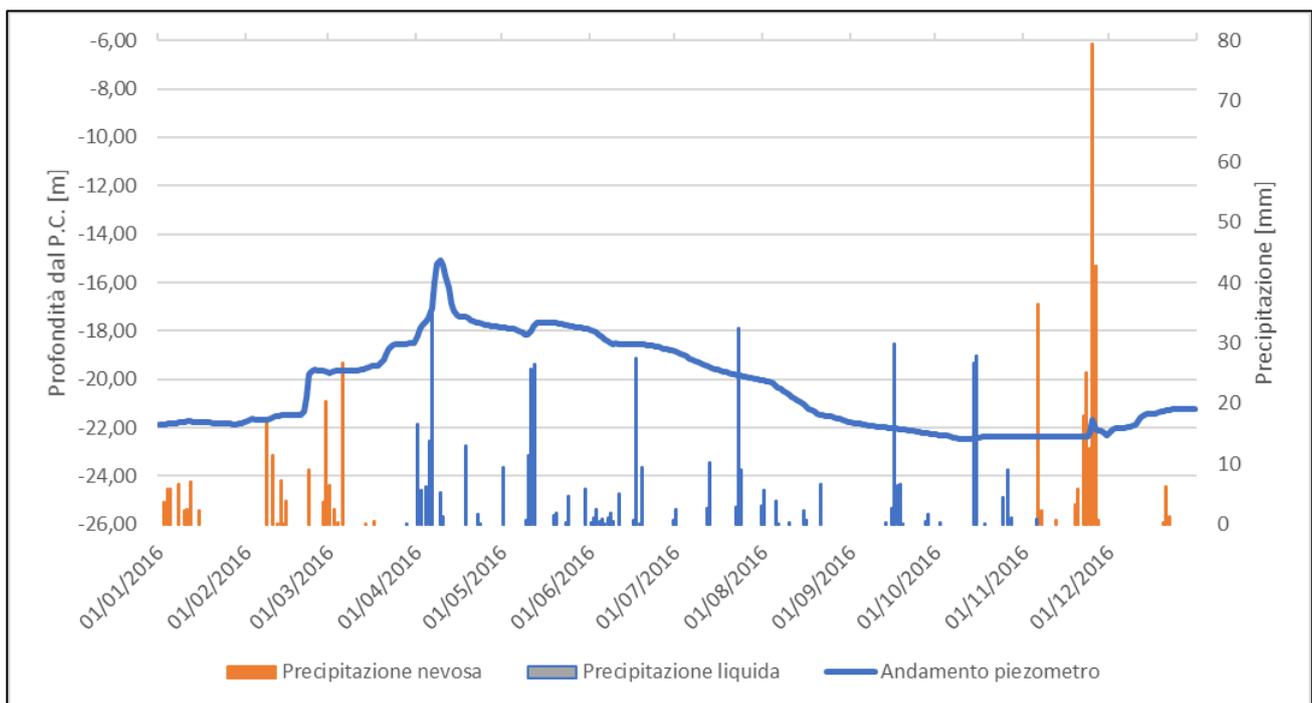
Si è proceduto facendo delle relazioni tra le piogge e il livello di falda in modo tale da capire se la falda rispondeva alle piogge provenienti dall'alto; si sono considerati, ovviamente, i soli anni in cui è stato possibile avere a disposizione entrambe le tipologie di dati.

In generale le analisi hanno evidenziato che in questo sito ci sia un buon collegamento tra le piogge e il livello di falda.

Si riporta in Figura 5.3 la condizione registrata nell'anno 2016, in cui è evidente che, in seguito alle abbondanti precipitazioni nevose e al conseguente scioglimento della neve, la falda incrementa il proprio livello in modo importante. Nella stagione estiva, invece, le piogge non procurano innalzamento del livello di falda, a conferma che in questo periodo dell'anno gran parte della pioggia sia soggetta a deflusso superficiale.

I singoli grafici e quelli ulteriori realizzati sono riportati, per completezza, in Allegato VI.

Figura 5.3: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2016



5.4 Valutazione delle relazioni piogge - livello di falda in Sestriere Borgata

Per quanto riguarda il sito di Sestriere località Borgata, il piezometro a cui si fa riferimento e da cui è stato possibile ricevere e analizzare i dati, è quello denominato P6SSTA8.

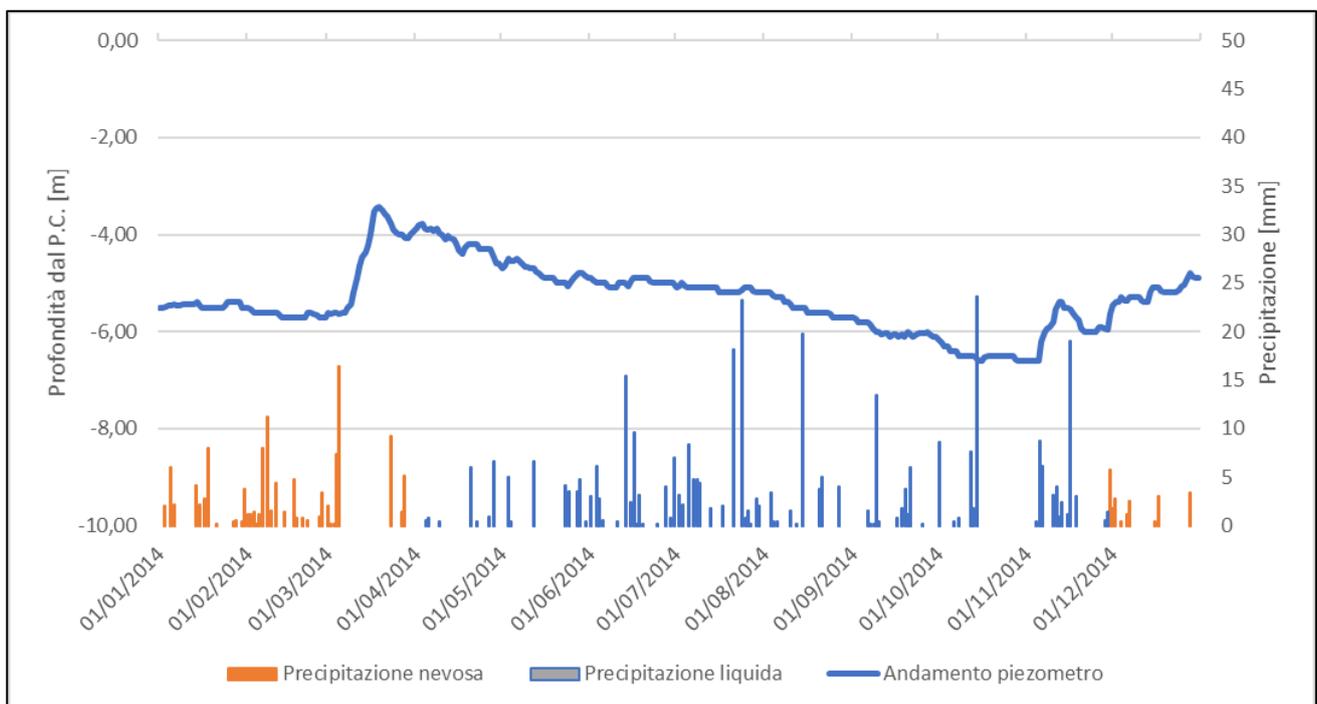
Anche in questo caso si è proceduto facendo delle relazioni tra le piogge e il livello di falda in modo tale da capire se la falda rispondesse alle piogge provenienti dall'alto; si sono considerati, ovviamente, i soli anni in cui è stato possibile avere a disposizione entrambe le tipologie di dati.

In generale le analisi hanno evidenziato che anche in questo caso ci sia un netto collegamento tra le piogge e il livello di falda.

Si riporta in Figura 5.4 la condizione registrata nell'anno 2014, in cui è evidente che, in seguito alle abbondanti precipitazioni nevose e al conseguente scioglimento della neve, la falda incrementa il proprio livello in modo importante. Nella stagione estiva, invece, le piogge non procurano innalzamento del livello di falda, a conferma che in questo periodo dell'anno gran parte della pioggia sia soggetta a deflusso superficiale.

Anche in questo caso i singoli grafici e quelli ulteriori realizzati sono riportati, per completezza, in Allegato VII.

Figura 5.4: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2014



6. Relazioni tra livello della falda e spostamenti inclinometrici

6.1 Introduzione all'argomento

L'inclinometro è uno strumento utilizzato per localizzare con precisione la profondità entro cui avviene lo scorrimento; è possibile capire se lo stesso avviene lungo un singolo piano oppure se il sito è costituito da un intero strato debole. L'inclinometro è lo strumento più usato per il monitoraggio delle frane e i dati che fornisce consentono di misurare la profondità e lo spessore della superficie di rottura, l'entità dello spostamento, la velocità del movimento e la direzione del movimento.

L'inclinometro tradizionale è costituito da un tubo in alluminio e da una sonda. Il tubo inclinometrico, nella parte inferiore, presenta un tappo di chiusura per non permettere l'infiltrazione dell'acqua. La sonda viene calata all'interno di un foro attrezzato con una canna inclinometrica, ovvero un tubo di alluminio o pvc in cui sono ricavate due coppie di guide verticali che consentono alla sonda, dotata di apposite ruote che si innestano nelle guide, di essere agevolmente movimentata lungo il tubo. In Figura 6.1 e in Figura 6.2 sono riportate delle sezioni semplificate, tali da permettere la comprensione della geometria dei tubi inclinometrici.

Figura 6.1: Sezione trasversale del tubo inclinometrico (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017)

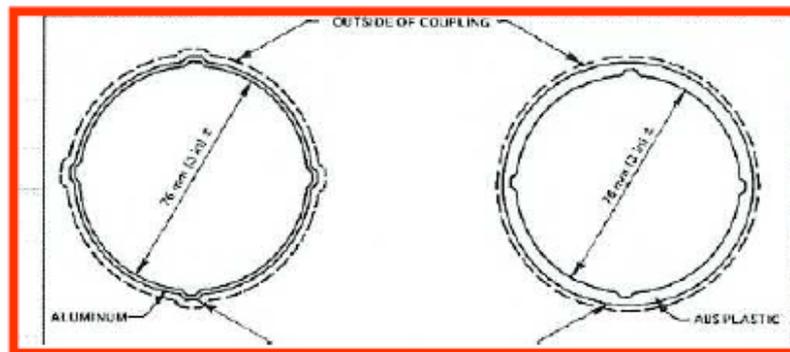
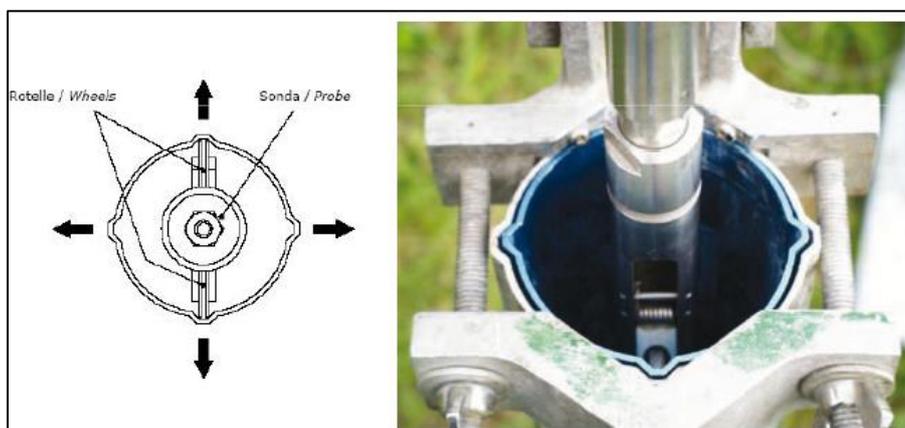


Figura 6.2: A sx sezione trasversale del tubo inclinometrico con sonda inserita; a dx foto dimostrativa (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017)



In particolare, l'inclinometro è costituito da un tubo a sezione circolare con quattro scanalature (guide) entro cui far scorrere i due carrelli della sonda inclinometrica. In questo modo viene mantenuto costante l'orientamento.

La sonda misura l'inclinazione del tubo inclinometrico rispetto alla verticale. Il problema è che il tubo potrebbe non essere del tutto verticale per difetti di installazione, pertanto la rotazione va riferita alla prima misura detta "lettura di zero". Per ottenere la rotazione impressa alla tubazione dallo spostamento del corpo di frana, ad ogni misura bisogna sottrarre la lettura di zero. La sonda si dispone secondo l'asse del foro e ne misura l'inclinazione θ e l'azimut β . Tale misura deve essere eseguita a varie profondità nel corpo di frana ed al di sotto di esso, in modo tale da ottenere il profilo degli spostamenti inclinometrici.

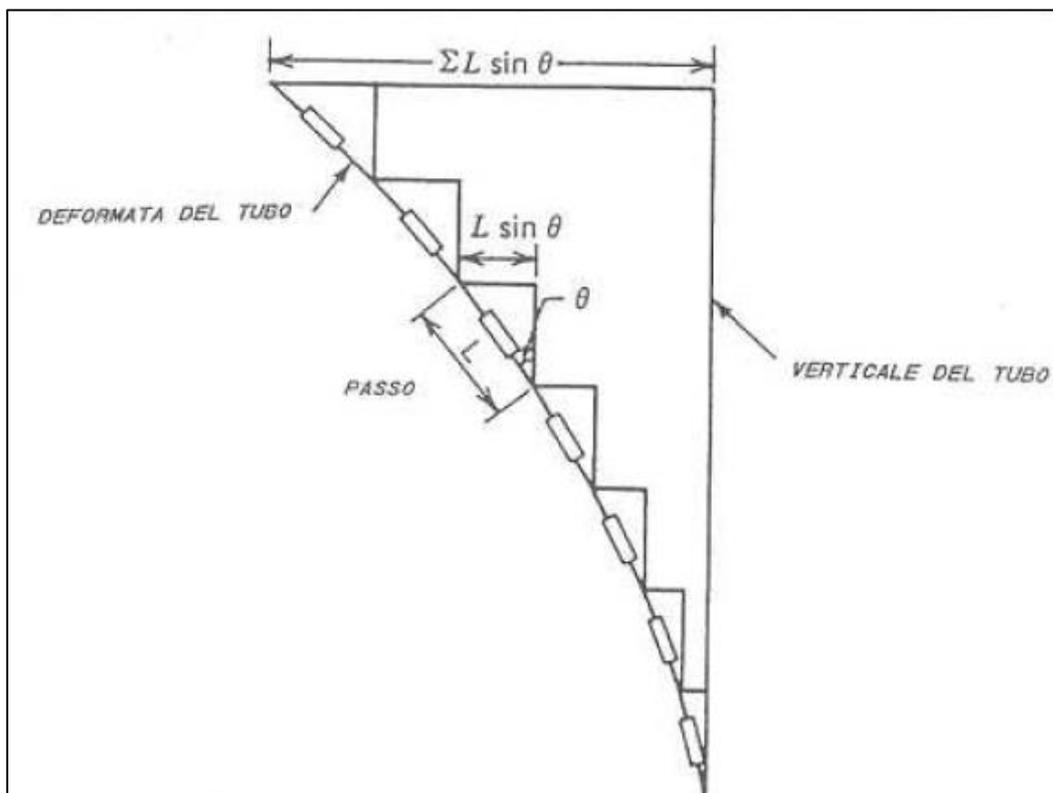
Si ottengono due angoli, misurati in due piani ortogonali (θ_x e θ_y) che consentono di definire lo spostamento spaziale della sonda attraverso l'inclinazione nel piano del massimo spostamento θ e l'azimut β (ovvero l'angolo fra il vettore del massimo spostamento ed un punto cardinale).

La centralina installata fornisce i due angoli di rotazione θ_x e θ_y del tubo alle varie profondità a cui è stata eseguita la misura. Moltiplicando i seni di tali angoli per il passo con cui è stata eseguita la misura si ottengono gli spostamenti parziali dei vari tratti di tubo. Questi ultimi si sommano a partire dalla base del tubo inclinometrico in modo tale da ottenere gli spostamenti s_x ed s_y rispettivamente nei due piani x e y. Gli spostamenti globali S_x ed S_y vengono composti vettorialmente ad ogni profondità, ottenendo il modulo dello spostamento ed il suo azimut.

In Figura 6.3 si riporta un'immagine che chiarisce la modalità analitica con cui si opera.

$$S_x = \sum_{i=1}^n L_i \cdot \sin\theta_{i,x} \quad S_y = \sum_{i=1}^n L_i \cdot \sin\theta_{i,y}$$

Figura 6.3: Metodo per ottenere il modulo dello spostamento (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii - Pirulli M. - 2017)

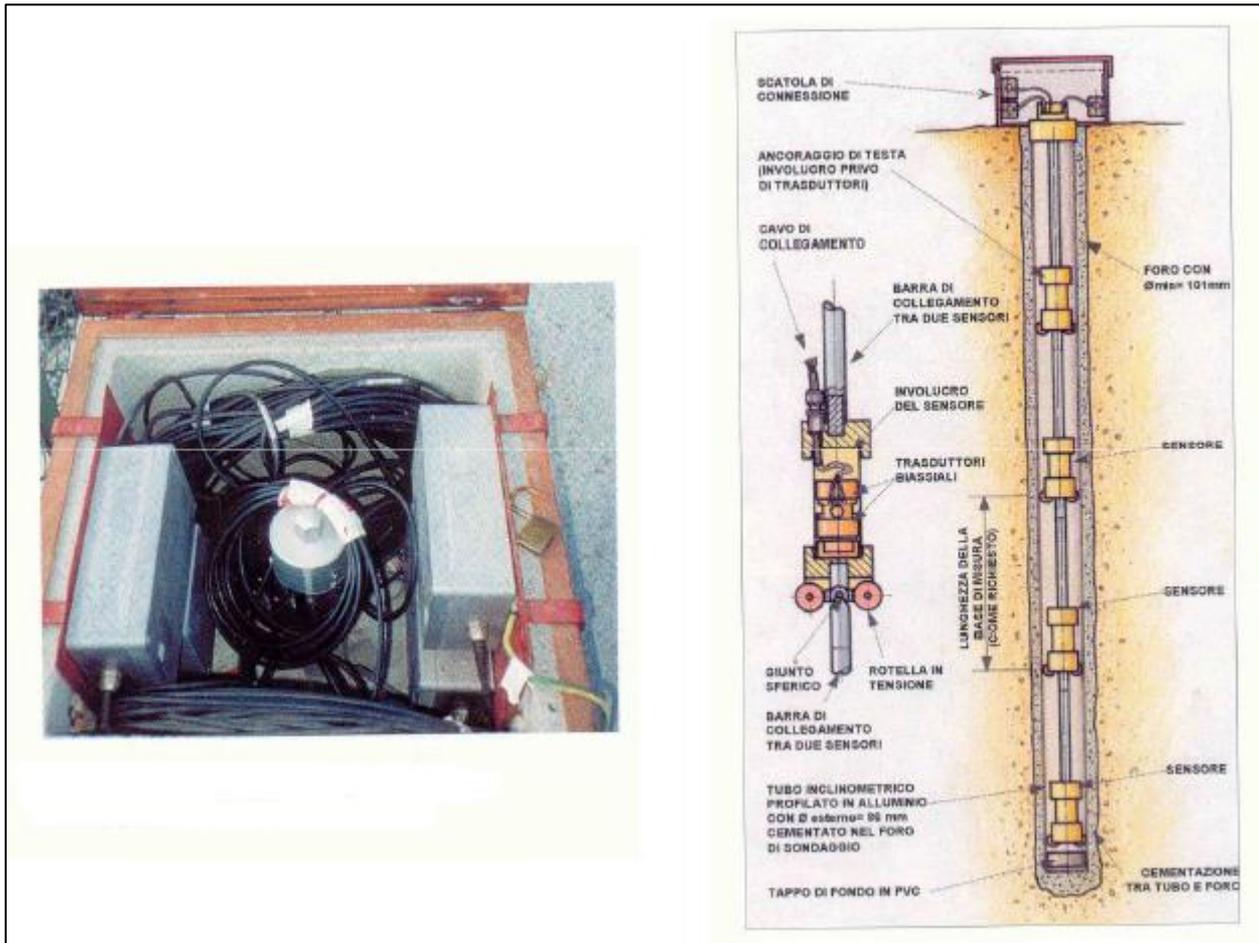


Ove necessario il tubo inclinometrico può essere attrezzato con una sonda fissa (ad esempio nel caso di grandi frane con accessibilità difficoltosa) con un certo numero di sensori e in questo caso la trasmissione dei dati è automatica.

Nel caso in esame, i tecnici dell'Arpa dopo aver analizzato le registrazioni manuali e individuato la profondità della superficie di scivolamento significativa, hanno inserito a queste profondità gli inclinometri fissi, in modo tale da avere le registrazioni in modo continuo e immediato.

In Figura 6.4 si riporta lo schema di un generico inclinometro fisso.

Figura 6.4: A sx la testa di un tubo inclinometrico attrezzato con sonde fisse – A dx lo schema di una sonda inclinometrica fissa biassiale per il controllo dei movimenti profondi (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017)

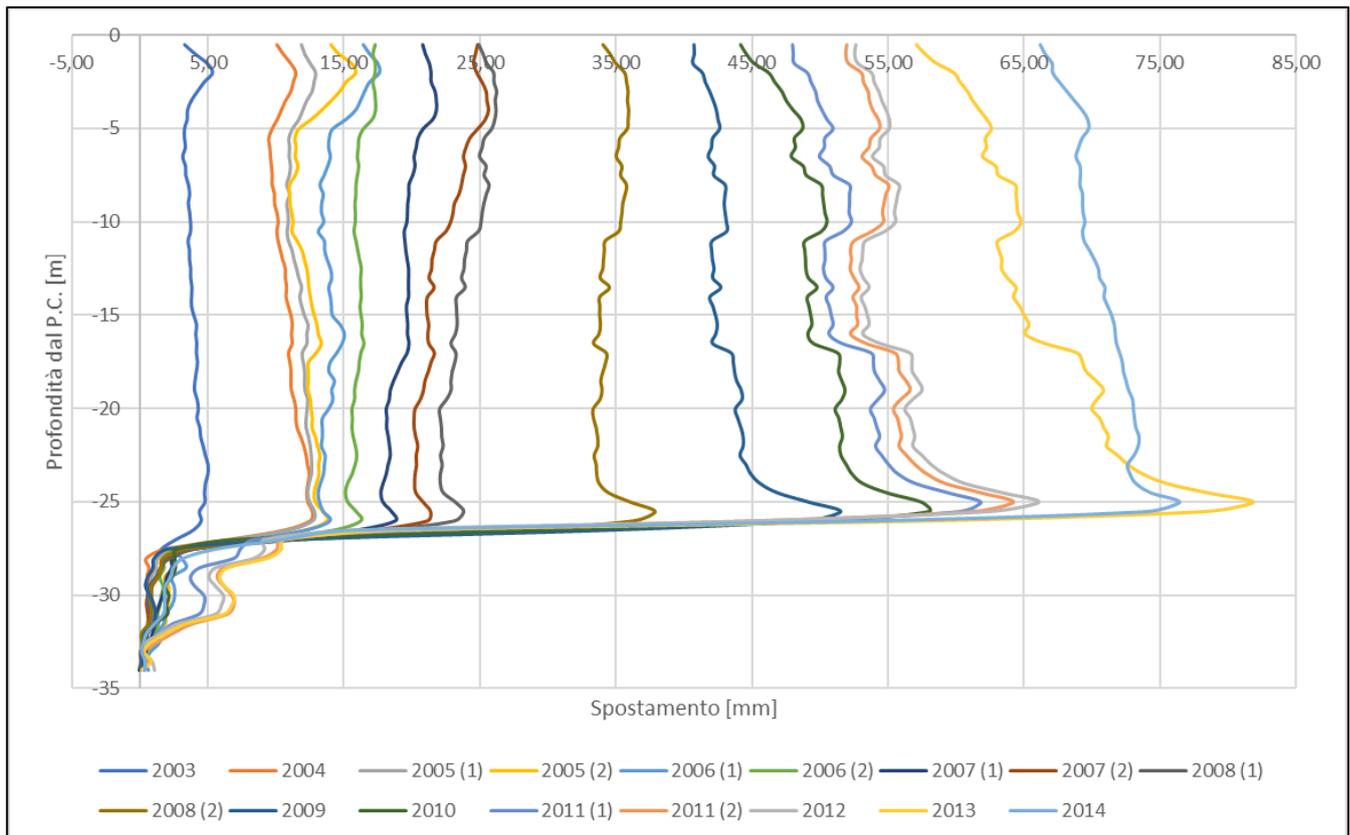


6.2 Valutazione delle relazioni spostamenti - livello di falda in Bardonecchia Tre Croci

Il sito è monitorato da Arpa Piemonte. Inizialmente è stato utilizzato un inclinometro manuale denominato I6BARF1, in modo tale da capire l'esatta posizione della superficie di scivolamento e poi è stata installata una sonda inclinometrica fissa.

Il risultato delle letture manuali ottenuto è riportato in Figura 6.5:

Figura 6.5: Risultato sonda inclinometrica manuale



Dal grafico sopra si evince che vi è la presenza netta di una superficie di scivolamento compresa tra 25 e 30 metri di profondità. Noto questo dato, i tecnici dell'Arpa hanno deciso di posizionare una sonda fissa alla profondità di 26.5 metri dal piano campagna e questi ultimi sono i dati utilizzati nelle analisi riportate nel seguito (è stata posta una sonda anche alla profondità di 13.50 m dal piano campagna ma questa ha registrato spostamenti trascurabili, considerando anche il fatto che gli strumenti fissi sono comunque caratterizzati da errori di misura).

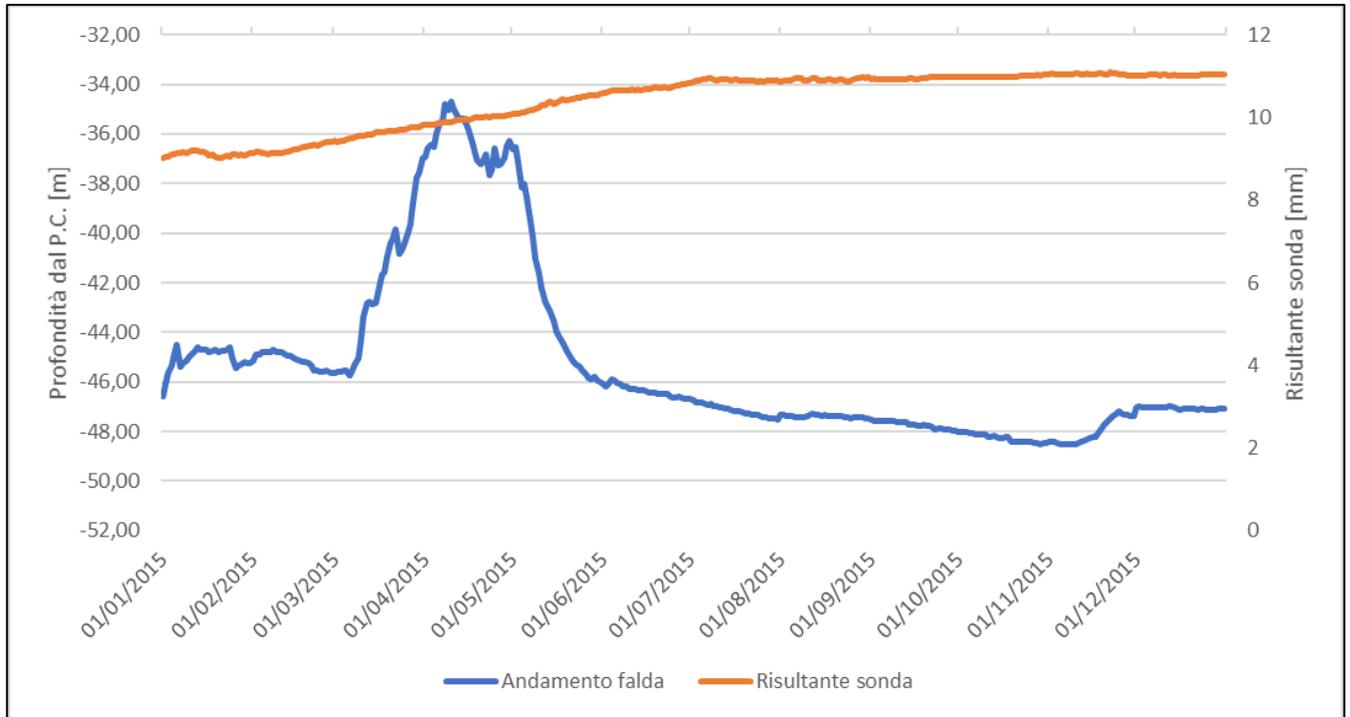
Per gli anni in cui è stato possibile avere delle registrazioni valide, sono stati realizzati i grafici tali da descrivere l'andamento della falda e l'incremento delle deformazioni.

In Figura 6.6 si riporta la condizione registrata nell'anno 2015: è evidente che la maggiore accelerazione si ha quando la falda incrementa il proprio livello, mostrando dunque la propria influenza.

Per facilità di lettura, è stato riportato un solo grafico ma per un dettaglio più completo si fa riferimento all'Allegato VIII ove sono stati riportati anche i grafici degli anni in cui uno dei due dati

(livello di falda e spostamento) risulta essere incompleto, per motivi vari come guasti delle sonde o errori di ricezione del dato.

Figura 6.6: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda – Anno 2015



Di seguito, in Figura 6.7 si riportano le relazioni ottenute sovrapponendo l'andamento della falda con i risultati forniti dall'inclinometro fisso posto ad una profondità di 26.5 metri dal piano campagna. Da questa immagine è possibile comprendere che vi è un'effettiva relazione tra la variazione del livello di falda e gli spostamenti accumulati ma è come se tra i due dati vi fosse una sorta di traslazione temporale, ovvero gli spostamenti accumulati sono frutto di variazioni passate del livello di falda.

In altre parole, gli spostamenti, in questo caso, sembra che non guardino al livello di falda presente ma al suo passato.

In Figura 6.8, Figura 6.9, Figura 6.10 e in Figura 6.11 si riportano con maggiore dettaglio i risultati che sono stati forniti dall'inclinometro fisso alle differenti profondità selezionate dai tecnici di Arpa Piemonte. In Figura 6.12, infine, si riporta l'andamento globale del livello della falda.

Figura 6.7: Relazione globale tra sonda inclinometrica fissa posta a 26,5 m e livello di falda

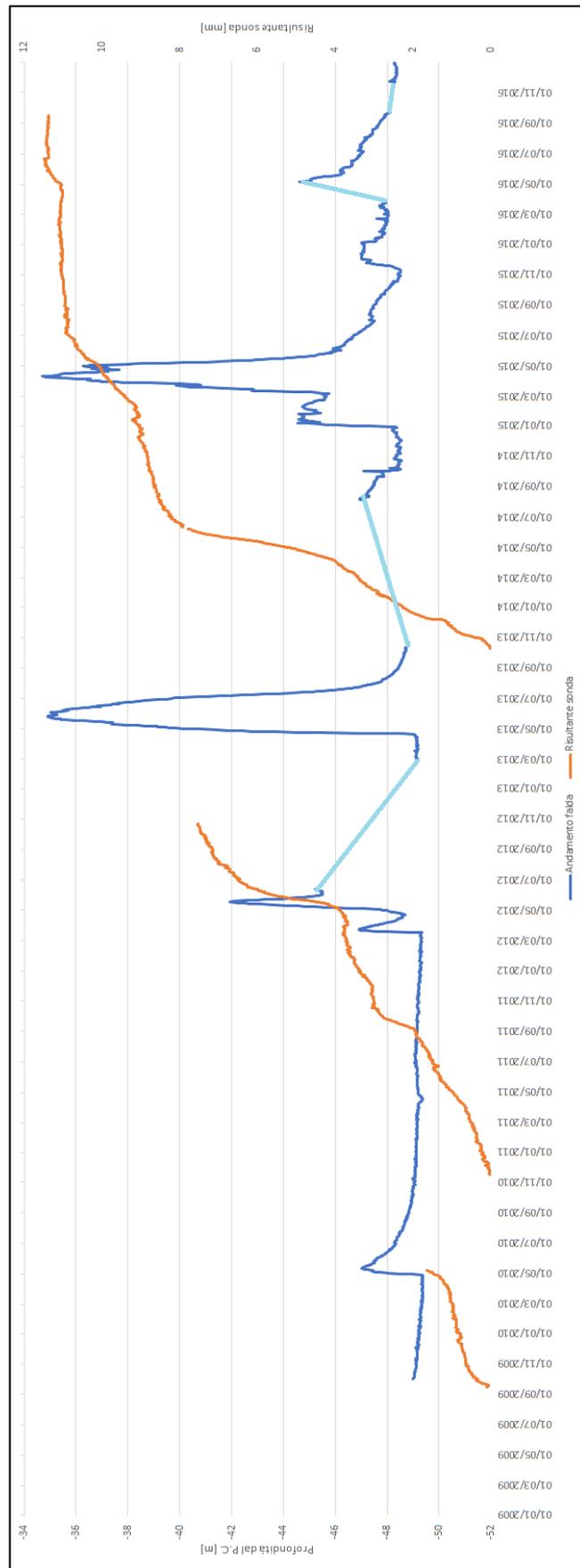


Figura 6.8: Dettaglio dei risultati dal 2009 al 2012 forniti dalla sonda fissa posta a 13,5 m

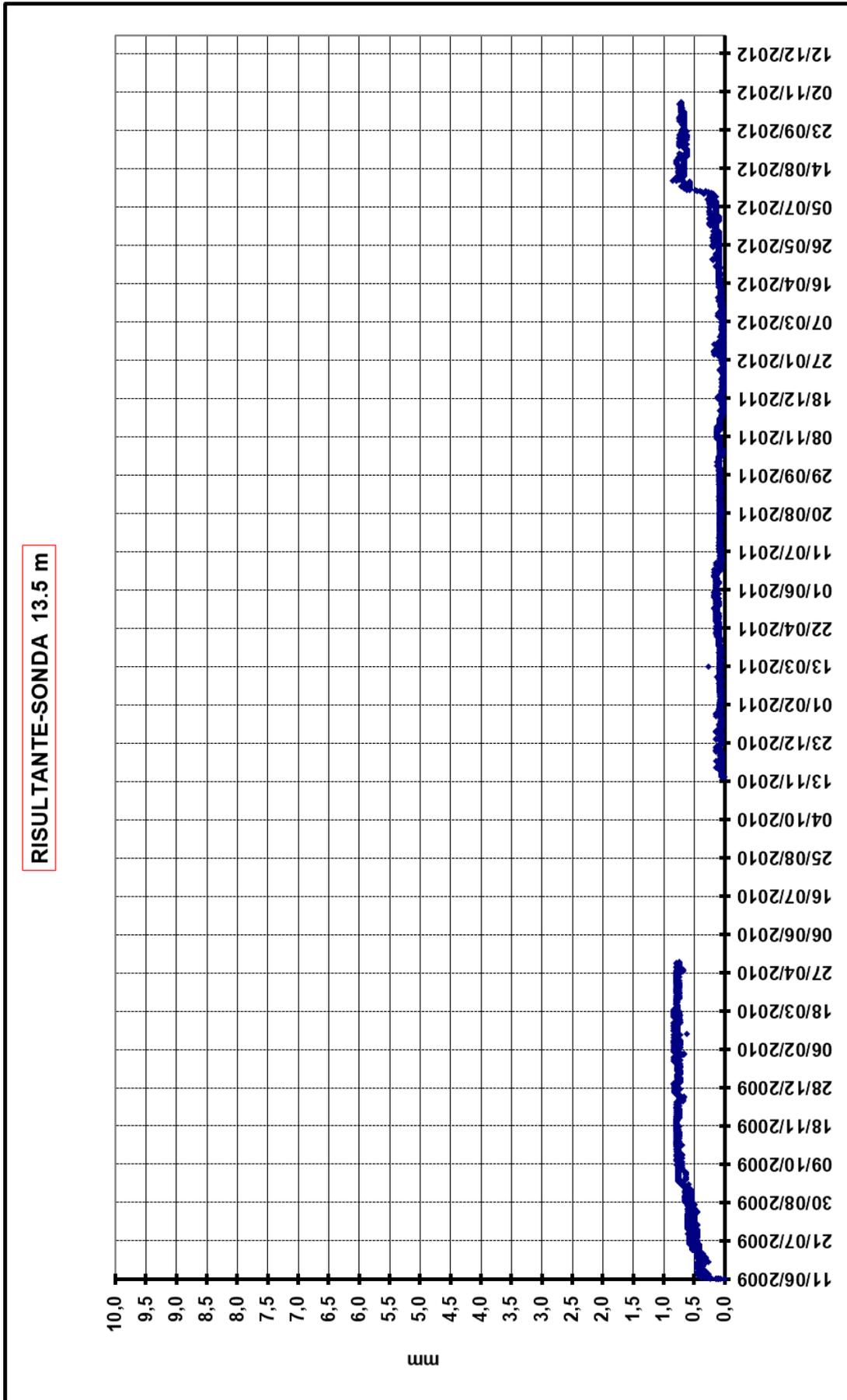


Figura 6.9: Dettaglio dei risultati dal 2013 al 2016 forniti dalla sonda fissa posta a 13,5 m

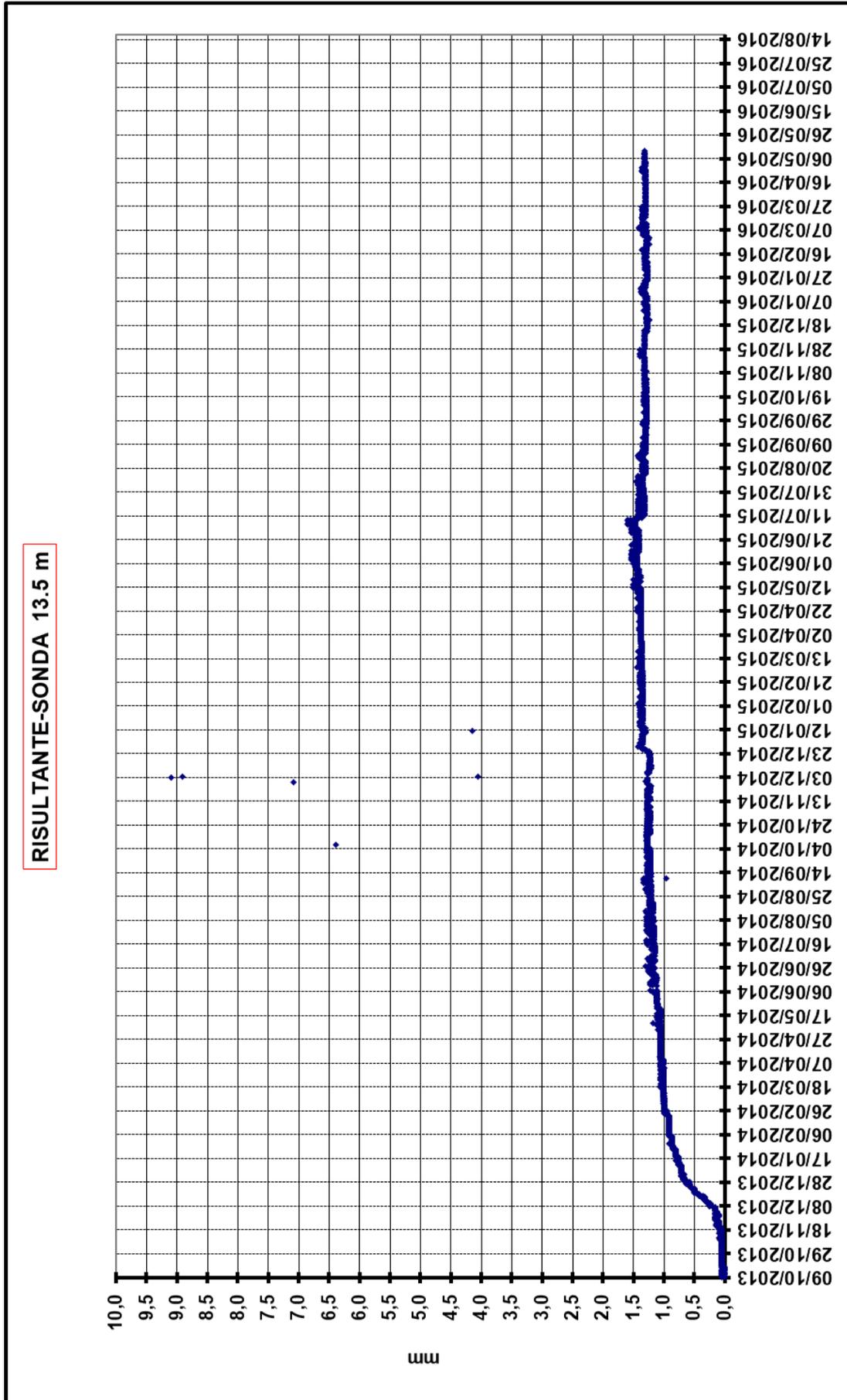


Figura 6.10: Dettaglio dei risultati dal 2009 al 2012 forniti dalla sonda fissa posta a 26,5 m

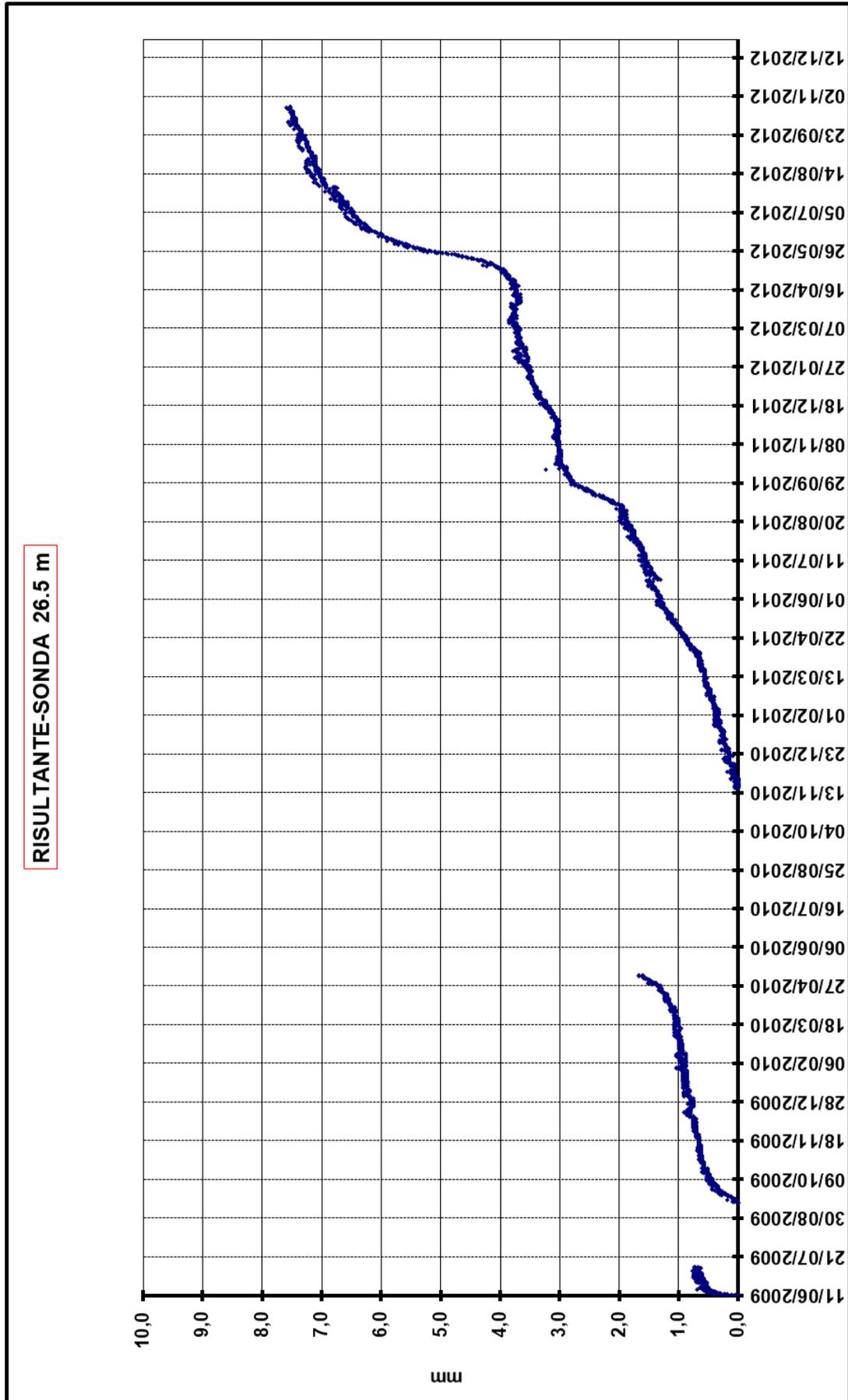


Figura 6.11: Dettaglio dei risultati dal 2013 al 2016 forniti dalla sonda fissa posta a 26,5 m

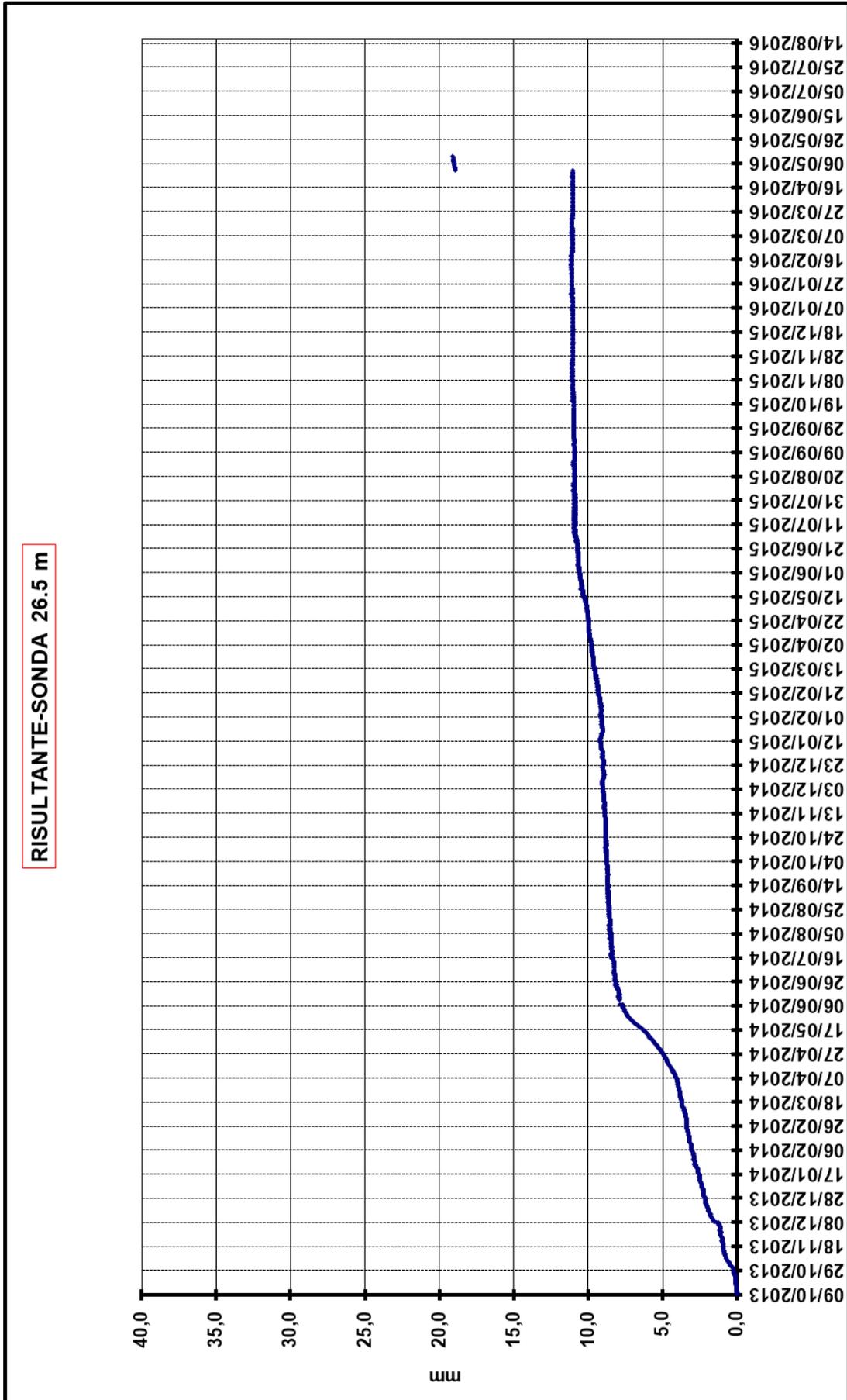
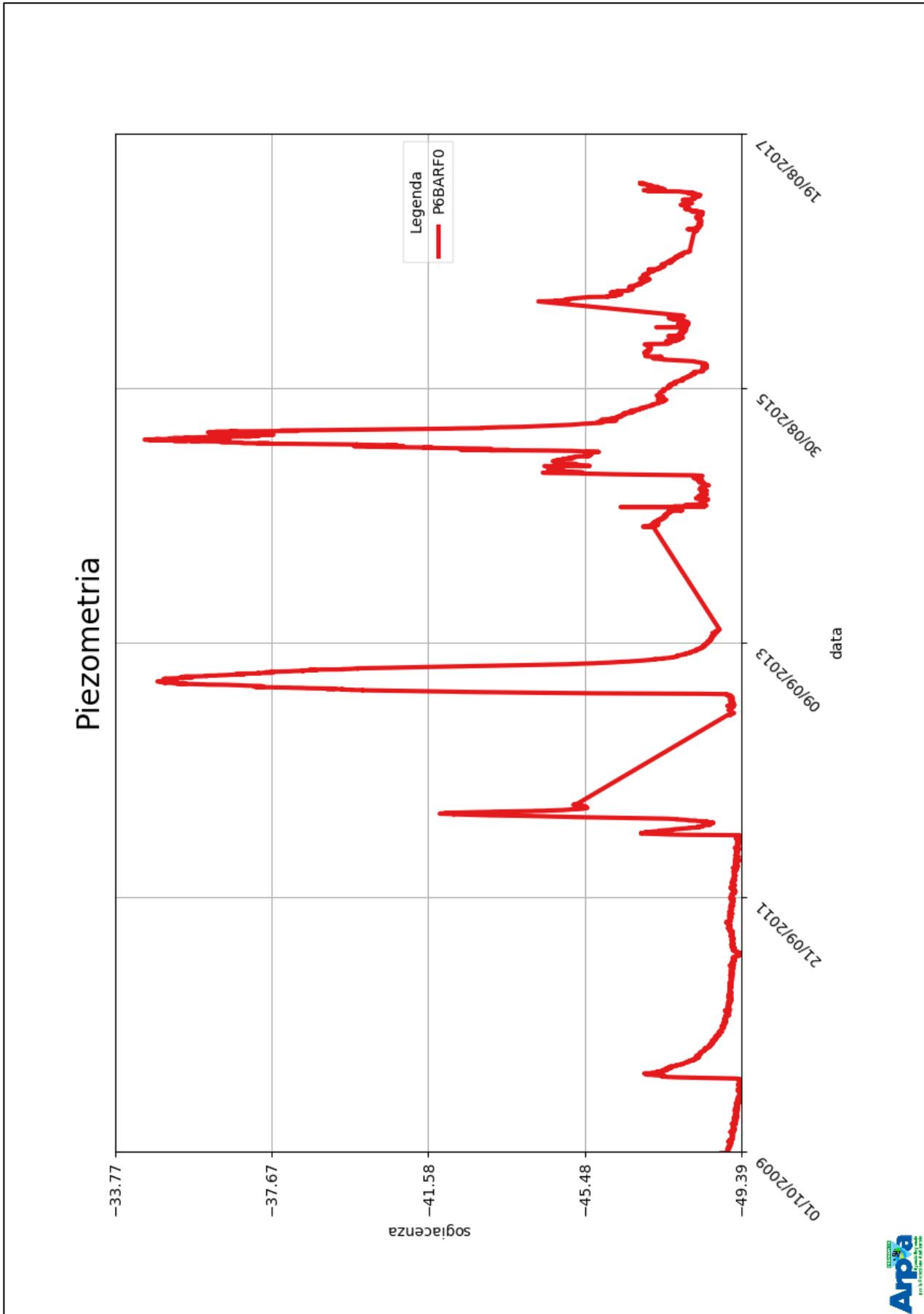


Figura 6.12: Andamento globale della quota piezometrica

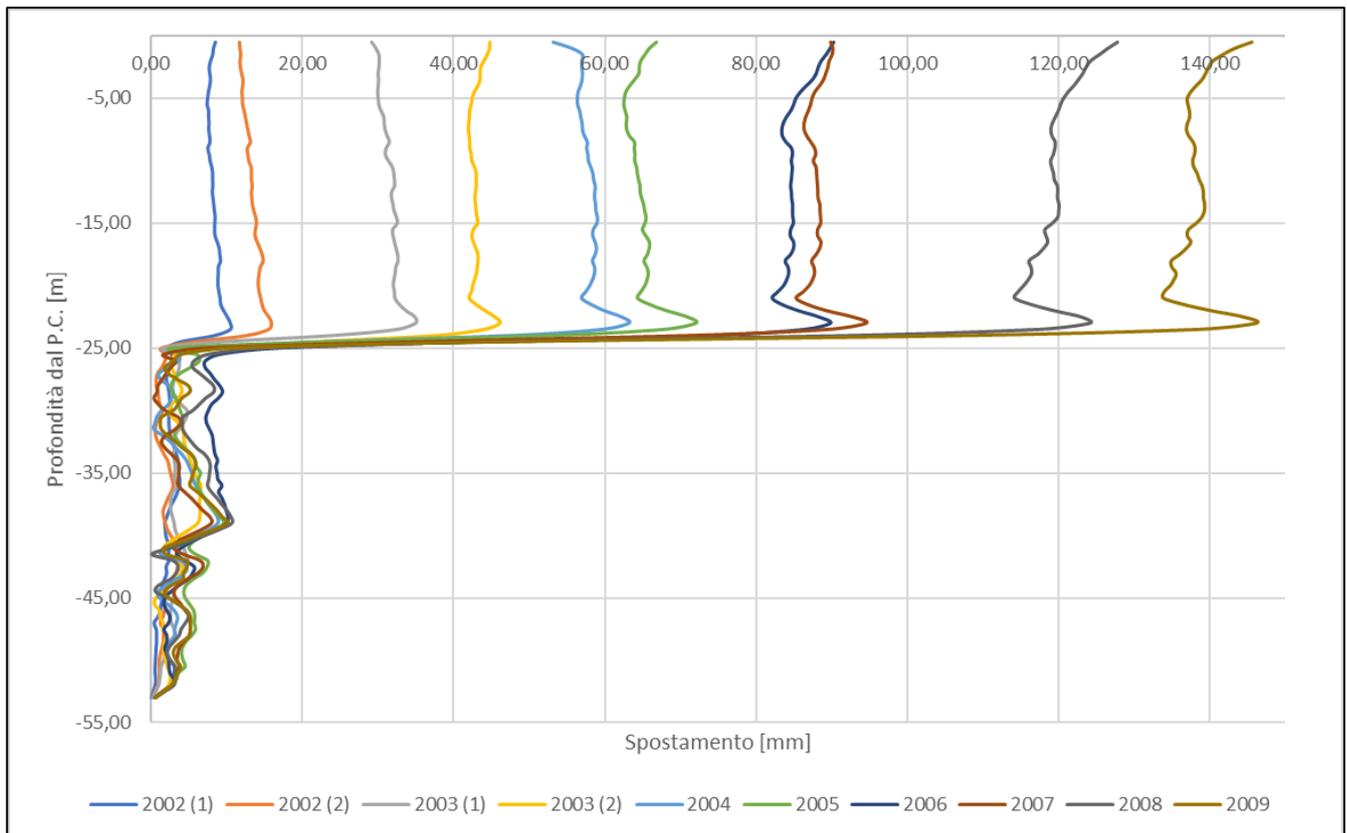


6.3 Valutazione delle relazioni spostamenti - livello di falda in Bardonecchia Rho

Il sito è monitorato da Arpa Piemonte. Inizialmente è stato utilizzato un inclinometro manuale denominato I6BARD0, in modo tale da capire l'esatta posizione della superficie di scivolamento e poi è stata installata una sonda inclinometrica fissa.

Il risultato ottenuto dalle letture manuali è riportato in Figura 6.13:

Figura 6.13: Risultato sonda inclinometrica manuale

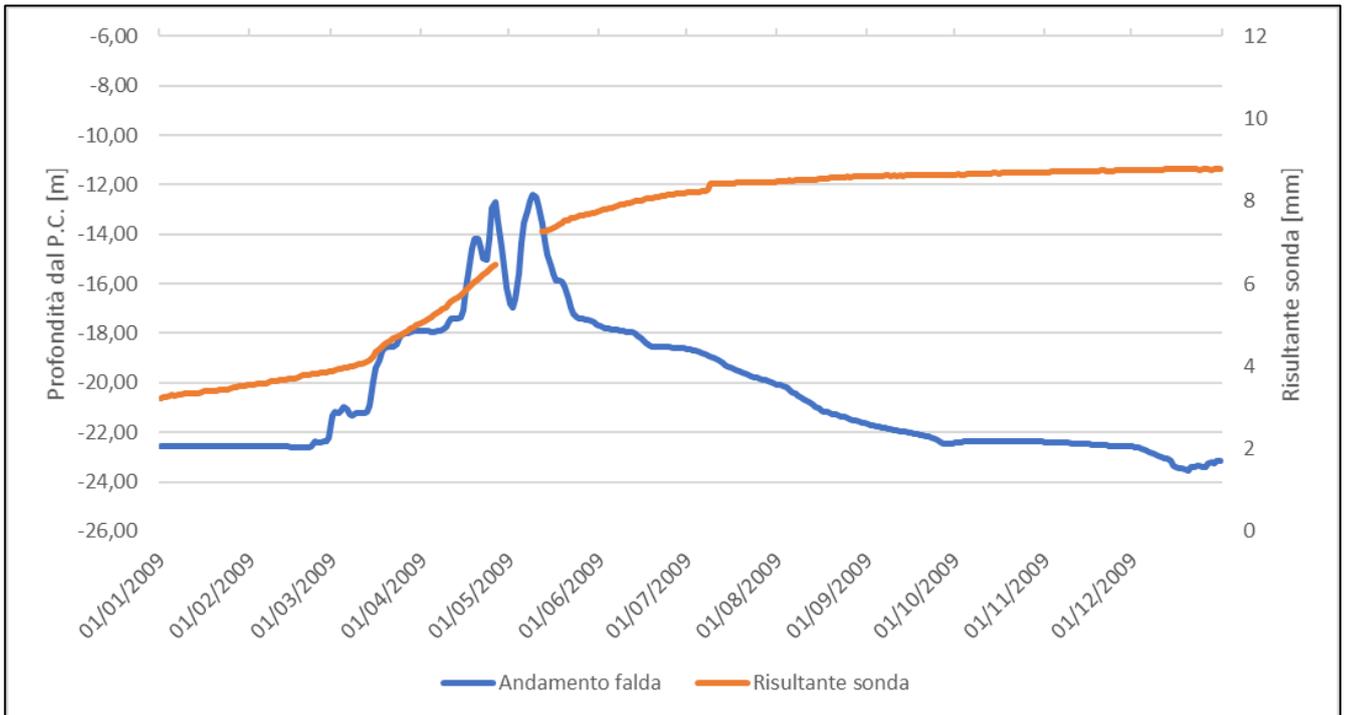


Dal grafico sopra si evince la presenza di una superficie di scivolamento compresa tra 23 e 27 metri. Noto questo dato, i tecnici dell'Arpa hanno deciso di posizionare una sonda fissa alla profondità di 24.0 metri dal piano campagna e questi ultimi sono i dati utilizzati nelle analisi riportati nel seguito (è stata posta una sonda anche alla profondità di 10 m dal piano campagna ma questa ha registrato spostamenti più che trascurabili, considerando anche il fatto che gli strumenti fissi sono comunque caratterizzati da errori di misura).

Per gli anni in cui è stato possibile avere delle registrazioni valide, sono stati realizzati i grafici tali da descrivere l'andamento della falda e l'incremento delle deformazioni. In Figura 6.14 si riporta la condizione registrata nell'anno 2009: è evidente che la maggiore accelerazione si ha quando la falda incrementa il proprio livello, mostrando dunque la propria influenza.

In questo capitolo, per facilità di lettura, è stato riportato un solo grafico ma per un dettaglio più completo si fa riferimento all'Allegato IX ove sono stati riportati anche i grafici degli anni in cui uno dei due dati (livello di falda e spostamento) risulta essere incompleto, per motivi vari come guasti delle sonde o errori di ricezione del dato.

Figura 6.14: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2009



Di seguito, in Figura 6.15 si riportano le relazioni ottenute sovrapponendo l'andamento della falda con i risultati forniti dall'inclinometro fisso posto ad una profondità di 24.0 metri dal piano campagna. Da questa immagine è possibile comprendere che vi è un'effettiva relazione tra la variazione del livello di falda e gli spostamenti accumulati.

In questo sito, infatti, sembra che ci sia una migliore relazione tra lo spostamento accumulato e il livello di falda e dunque lo spazio temporale tra i due fenomeni sembra che sia più vicino rispetto al caso precedente.

In Figura 6.16 e in Figura 6.17 si riportano con maggiore dettaglio i risultati che sono stati forniti dall'inclinometro fisso alle differenti profondità. In Figura 6.18, infine, si riporta l'andamento globale della falda.

Figura 6.15: Relazione globale tra sonda inclinometrica fissa posta a 24,0 m e livello di falda

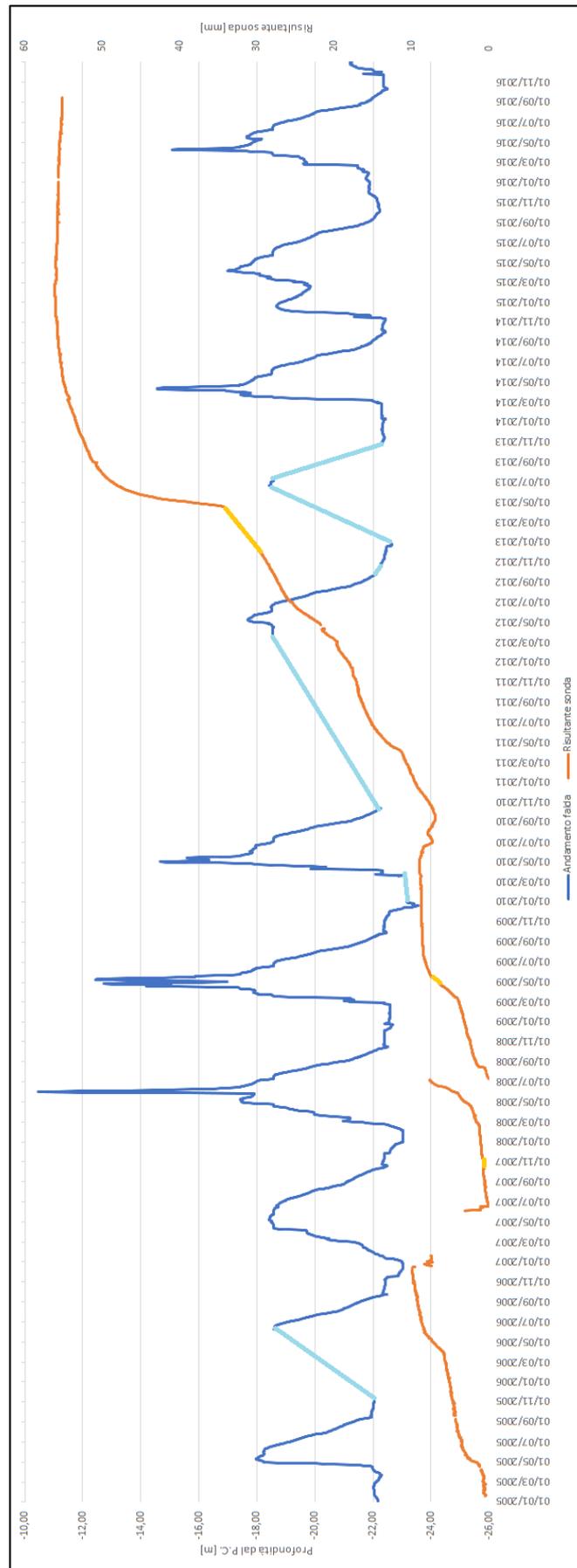


Figura 6.16: Dettaglio dei risultati dal 2005 al 2016 forniti dalla sonda fissa posta a 10,0 m

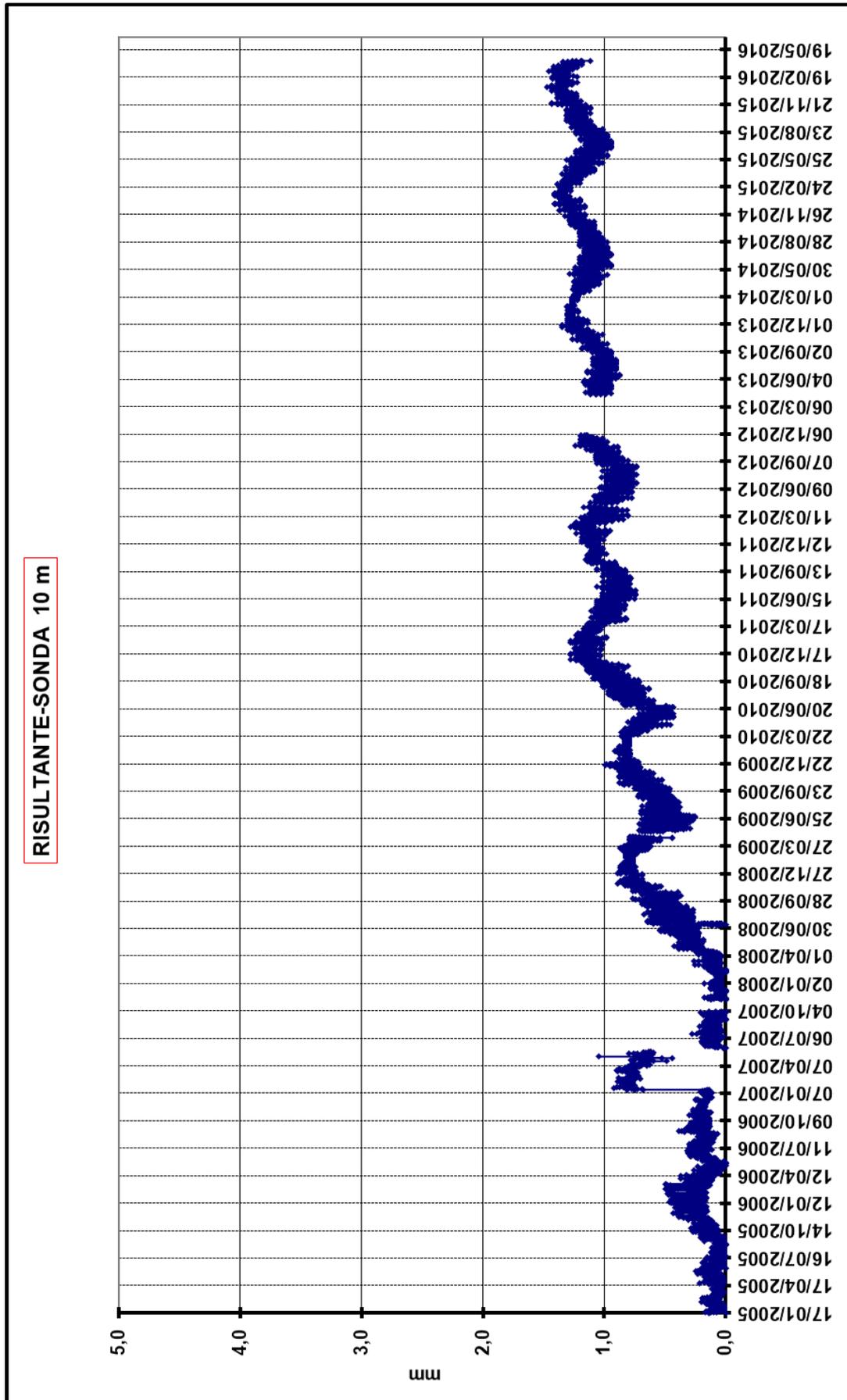


Figura 6.17: Dettaglio dei risultati dal 2005 al 2016 forniti dalla sonda fissa posta a 24,0 m

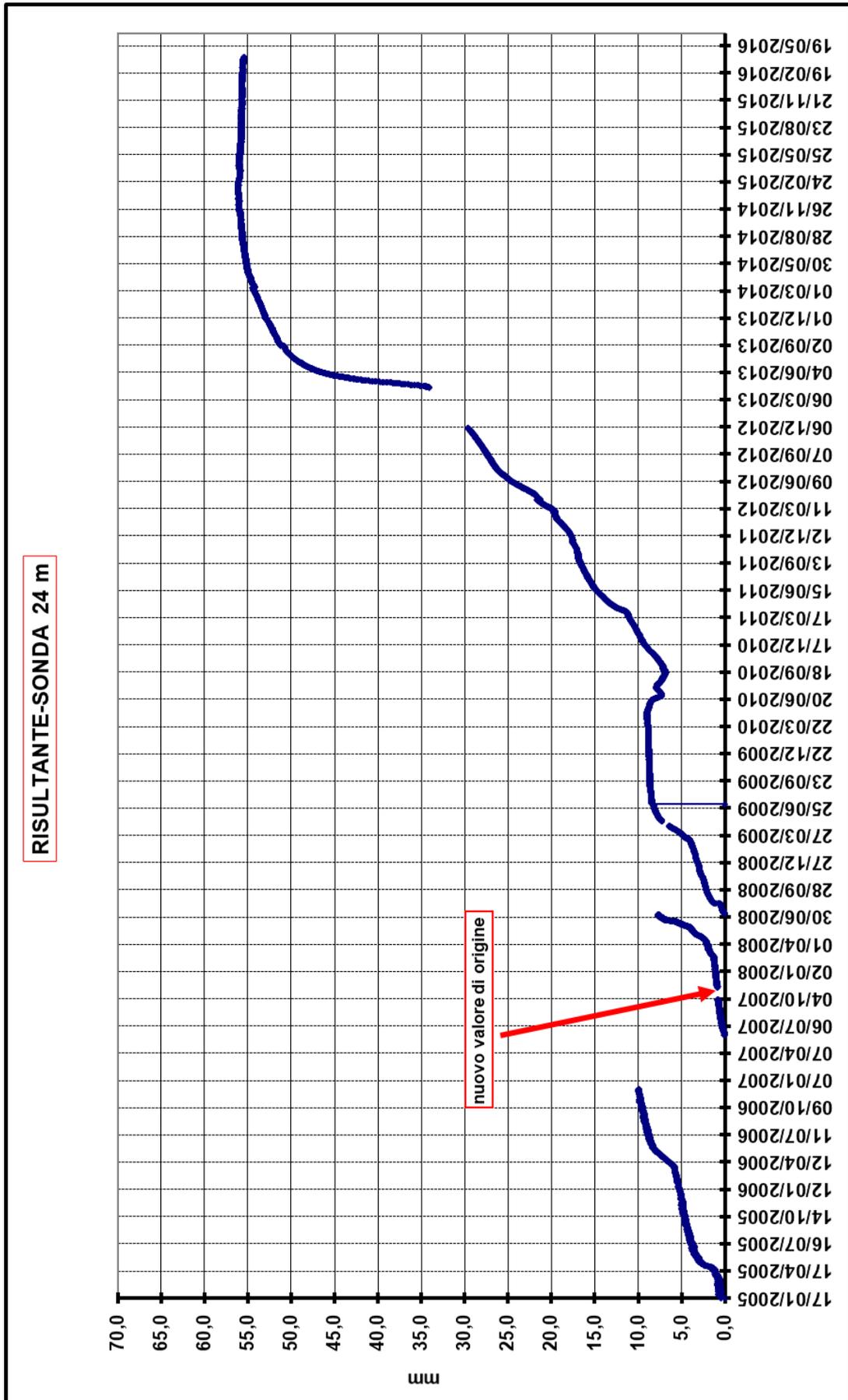
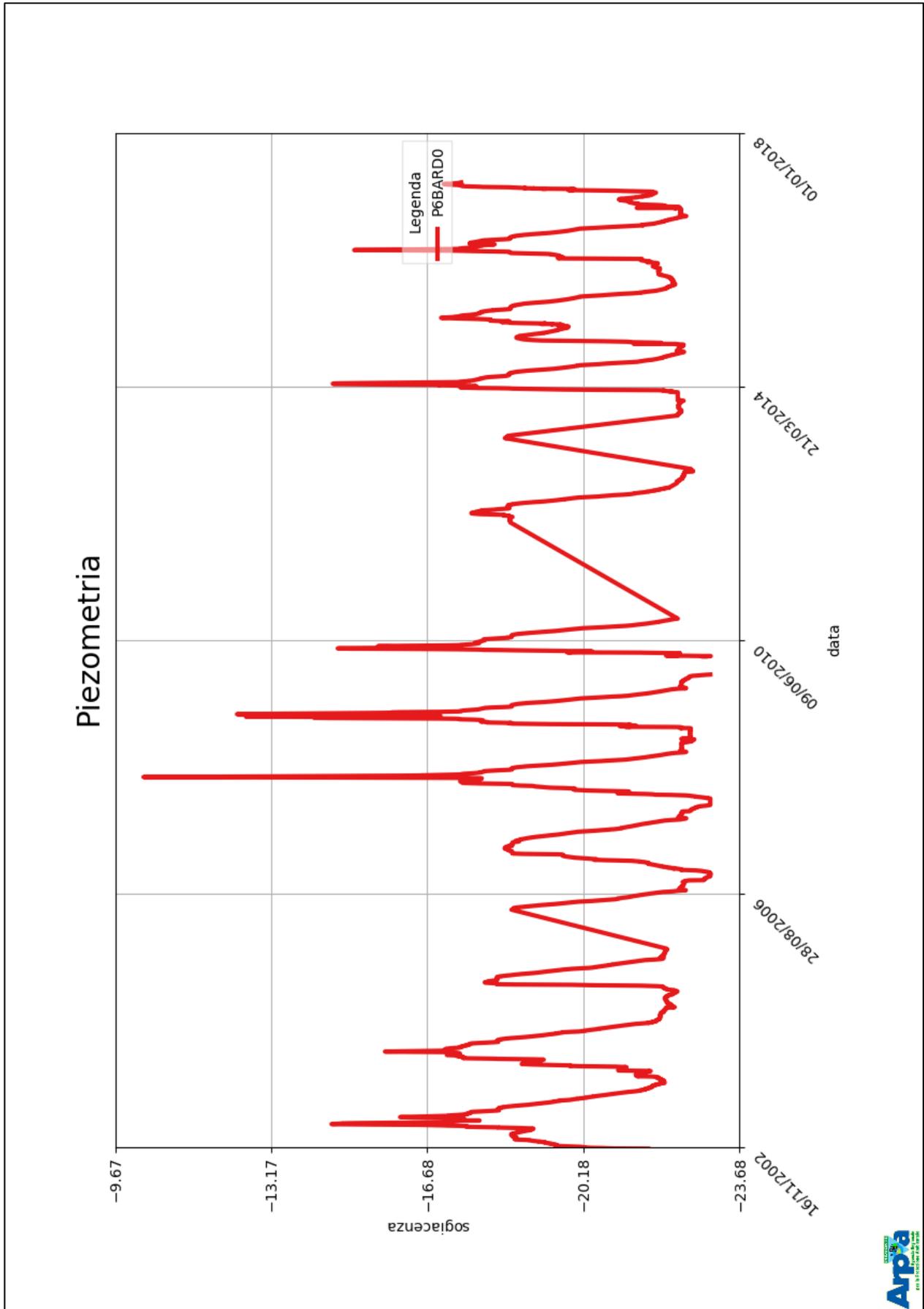


Figura 6.18: Andamento globale della quota piezometrica

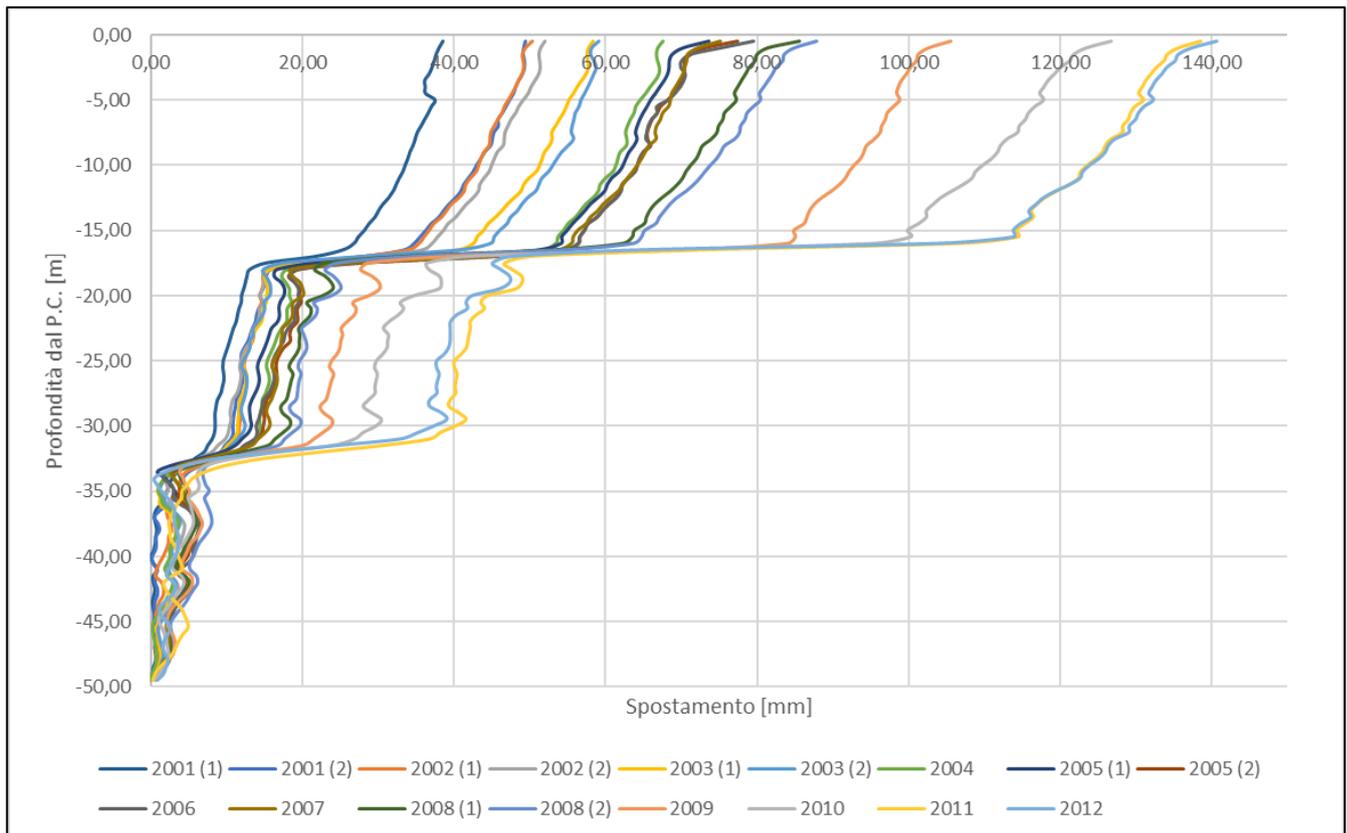


6.4 Valutazione delle relazioni spostamenti - livello di falda in Sestriere Borgata

Il sito è monitorato da Arpa Piemonte. Inizialmente è stato utilizzato un inclinometro manuale denominato I6SSTA2, in modo tale da capire l'esatta posizione della superficie di scivolamento e poi è stata installata una sonda inclinometrica fissa.

Il risultato ottenuto dalle letture manuali è riportato in Figura 6.19:

Figura 6.19: Risultato sonda inclinometrica manuale



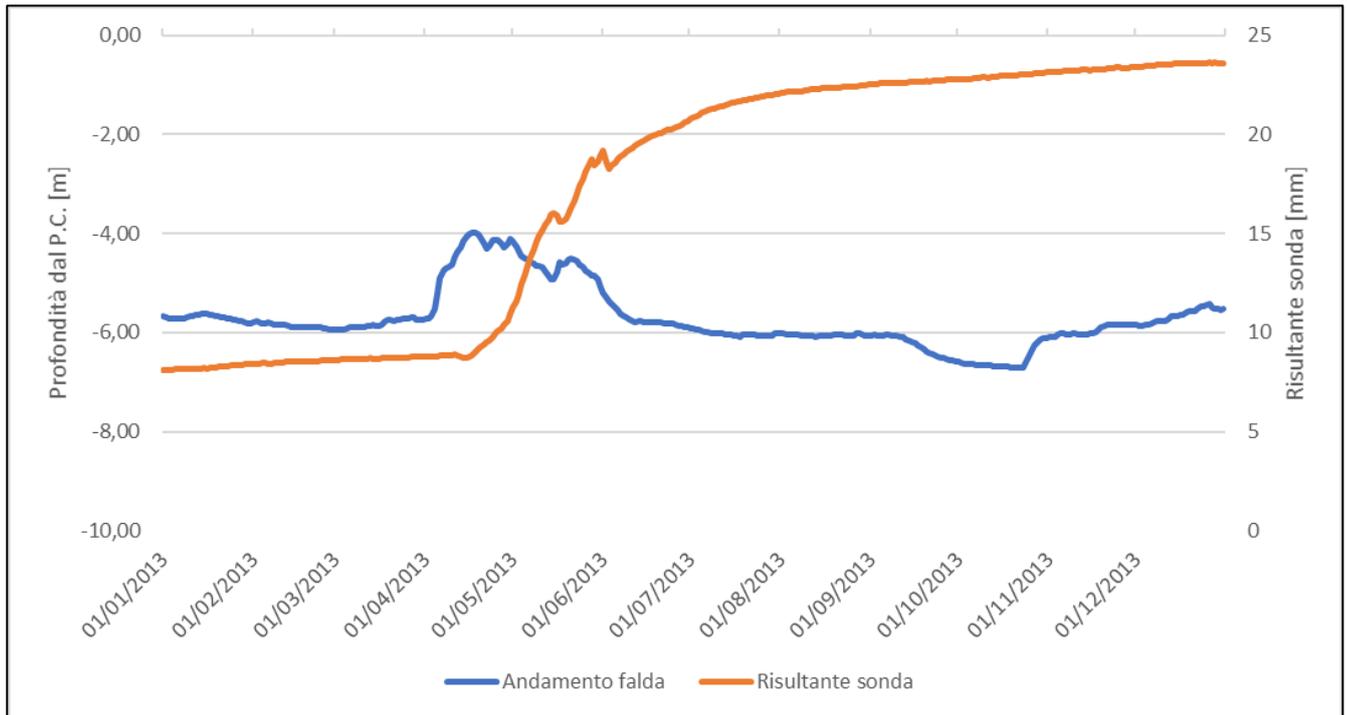
Dal grafico sopra si evince la presenza di due superfici di scivolamento: la prima è compresa tra 15 e 20 metri dal piano campagna mentre la seconda è compresa tra 30 e 35 metri dal piano campagna. Noti questi dati, i tecnici dell'Arpa hanno deciso di posizionare due sonde fisse: la prima alla profondità di 16.8 metri dal piano campagna e la seconda posizionata a 32.5 metri. La sonda fissa più profonda ha registrato spostamenti meno marcati rispetto a quella più in alto e infatti nelle analisi di seguito si è fatto riferimento alla sonda fissa più superficiale.

Per gli anni in cui è stato possibile avere delle registrazioni valide, sono stati realizzati i grafici tali da descrivere l'andamento della falda e l'incremento delle deformazioni.

In Figura 6.20 si riporta la condizione registrata nell'anno 2013: è evidente che la maggiore accelerazione si ha quando la falda incrementa il proprio livello.

In questo capitolo, per facilità di lettura, è stato riportato un solo grafico ma per un dettaglio più completo si fa riferimento all'Allegato X ove sono stati riportati anche i grafici degli anni in cui uno dei due dati (livello di falda e spostamento) risulta essere incompleto, per motivi vari come guasti delle sonde o errori di ricezione del dato.

Figura 6.20: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2013



Di seguito, in Figura 6.21 si riportano le relazioni ottenute sovrapponendo l'andamento della falda con i risultati forniti dall'inclinometro fisso posto ad una profondità di 16.8 metri dal piano campagna.

Risulta evidente il fatto che dopo il 2013 gli spostamenti abbiano subito un importante incremento senza alcuna apparente variazione sostanziale del livello di falda, tale da giustificare il fenomeno registrato. In molti sistemi, infatti, la complessità del fenomeno di instabilità e delle condizioni idrogeologiche del sito può portare ad avere casi in cui il comportamento passato sia completamente differente dopo qualche tempo.

Nel caso in esame, sembra che dopo il 2013 qualcosa sia cambiato e una variazione del livello del livello di falda paragonabile a quanto registrato negli anni precedenti, ha portato ad un notevole incremento degli spostamenti accumulati.

In Figura 6.22 e in Figura 6.23 si riportano con maggiore dettaglio i risultati che sono stati forniti dall'inclinometro fisso alle differenti profondità. In Figura 6.24, infine, si riporta l'andamento globale della falda.

Figura 6.21: Relazione globale tra sonda inclinometrica fissa posta a 16,8 m e livello di falda

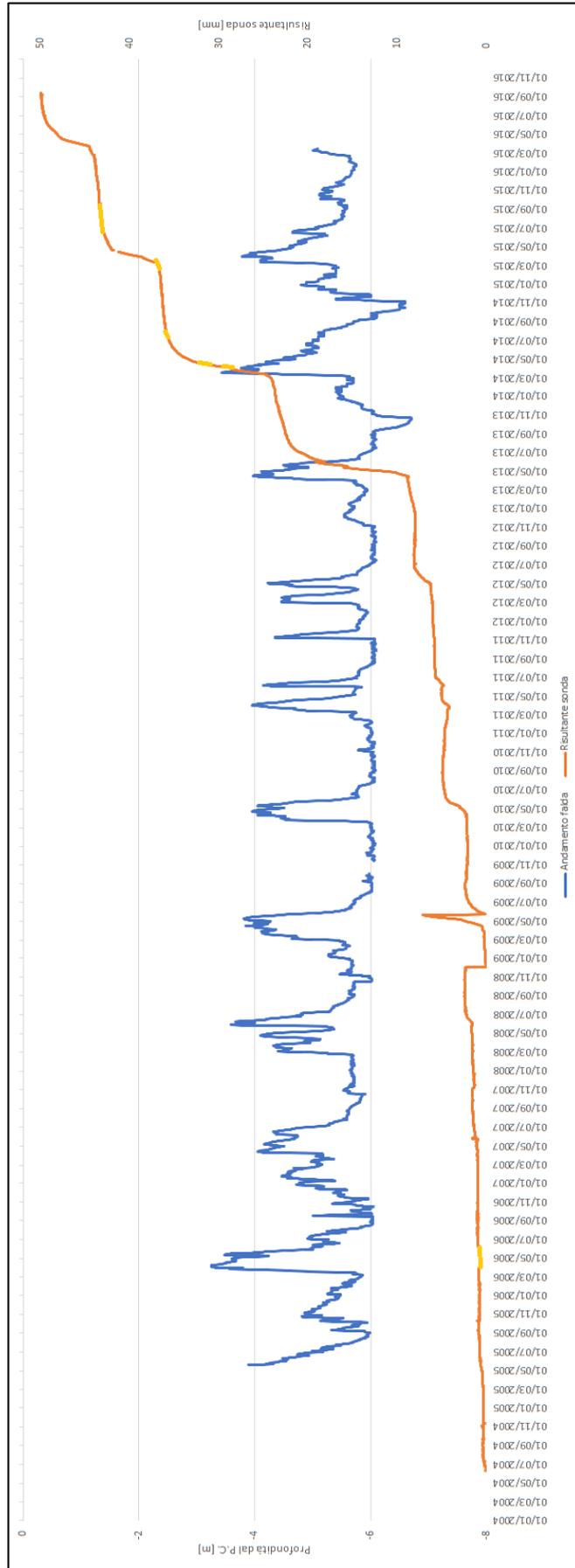


Figura 6.22: Dettaglio dei risultati dal 2004 al 2015 forniti dalla sonda fissa posta a 16,8 m

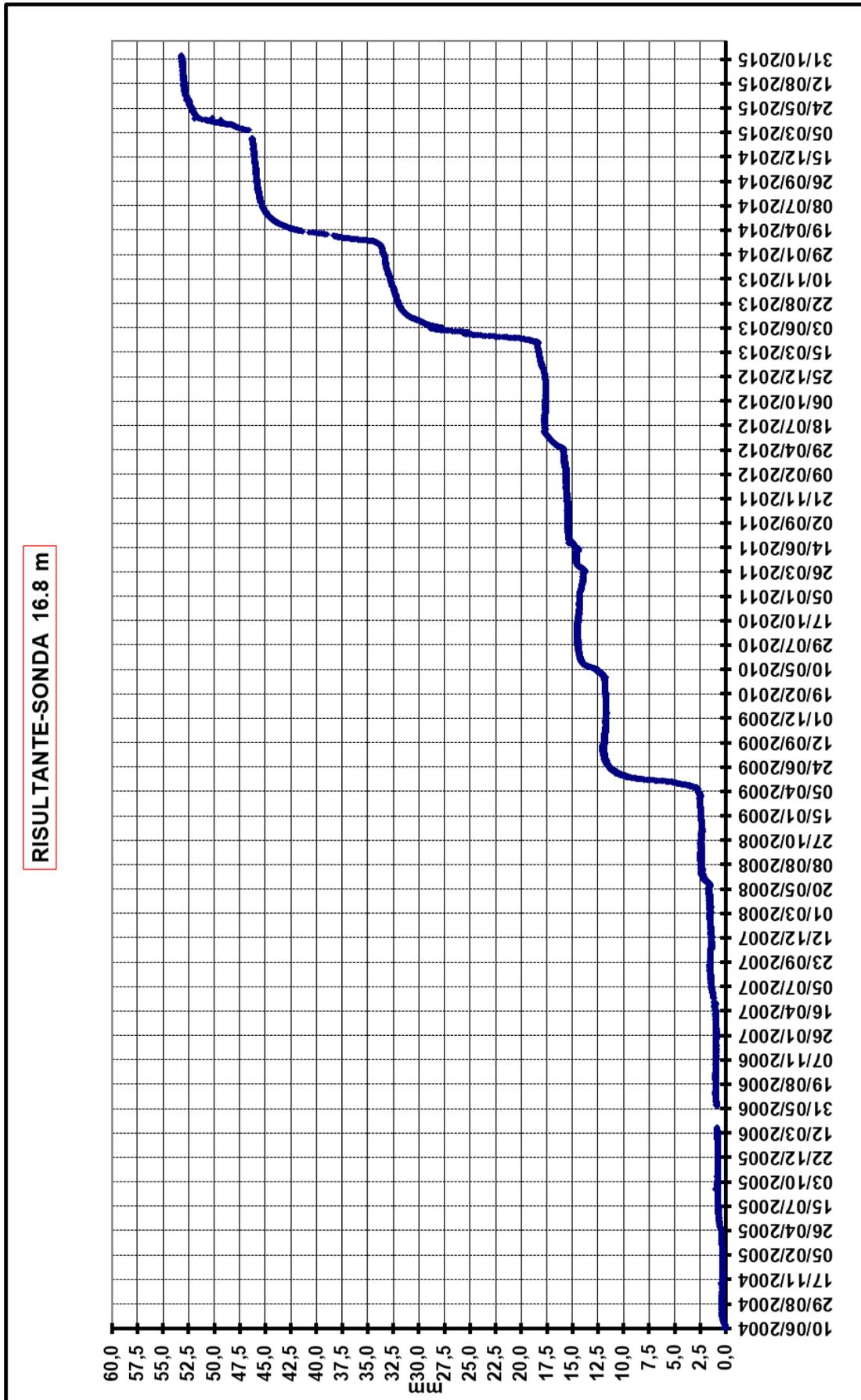


Figura 6.23: Dettaglio dei risultati dal 2007 al 2015 forniti dalla sonda fissa posta a 32,5 m

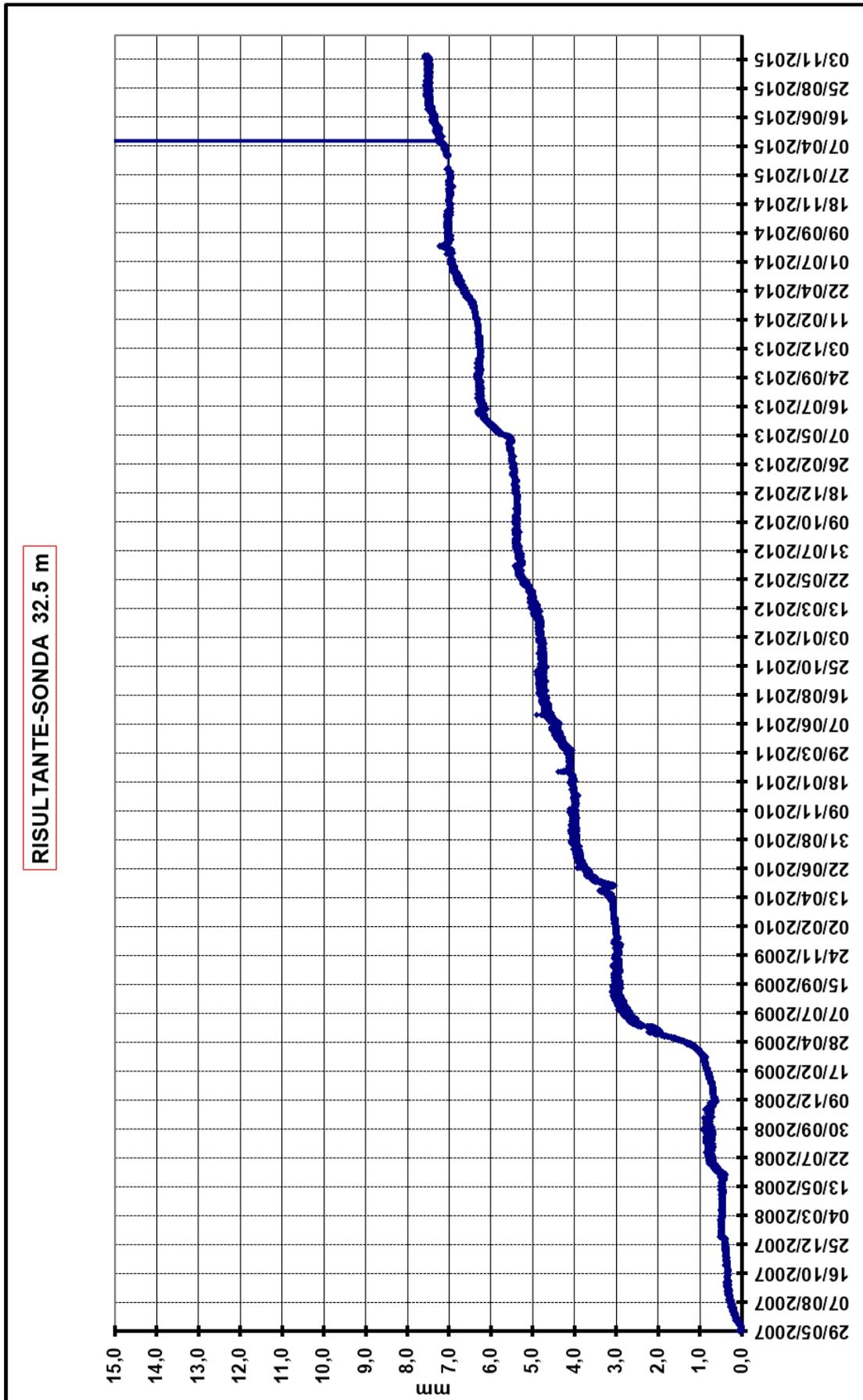
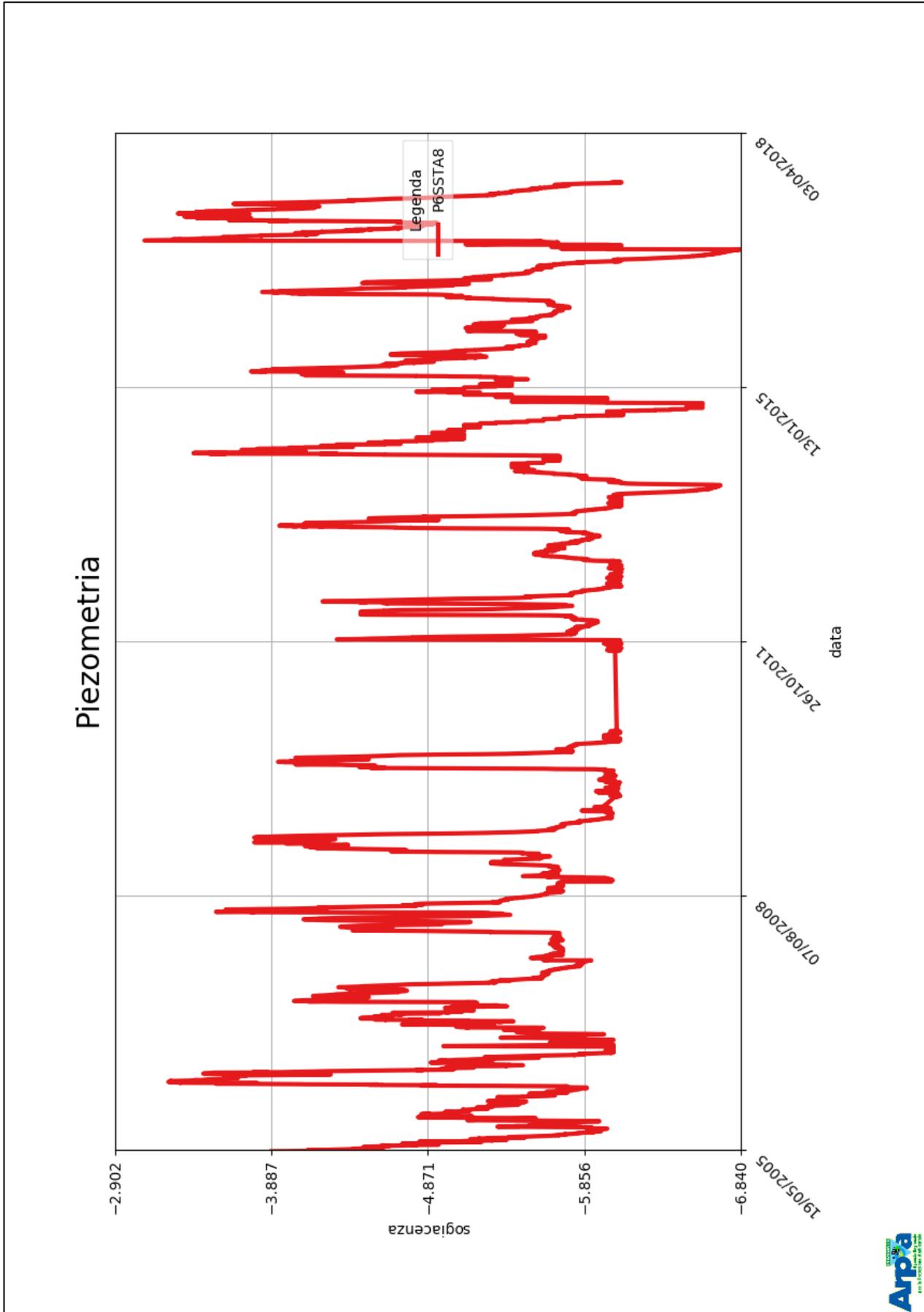


Figura 6.24: Andamento globale della quota piezometrica



7. Modellazione geotecnica agli elementi finiti del sito di Bardonecchia Rho

7.1 Introduzione all'argomento

I metodi di analisi di stabilità di un versante si distinguono in metodi all'equilibrio limite e metodi delle tensioni. In generale, i primi sono più semplici, richiedono molte meno informazioni sulle caratteristiche del sito invece i secondi studiano l'evoluzione spaziale dello stato tensionale a cui corrisponde il verificarsi di deformazioni. Di seguito si propongono in modo più accurato le principali differenze tra i due metodi.

I metodi all'equilibrio limite:

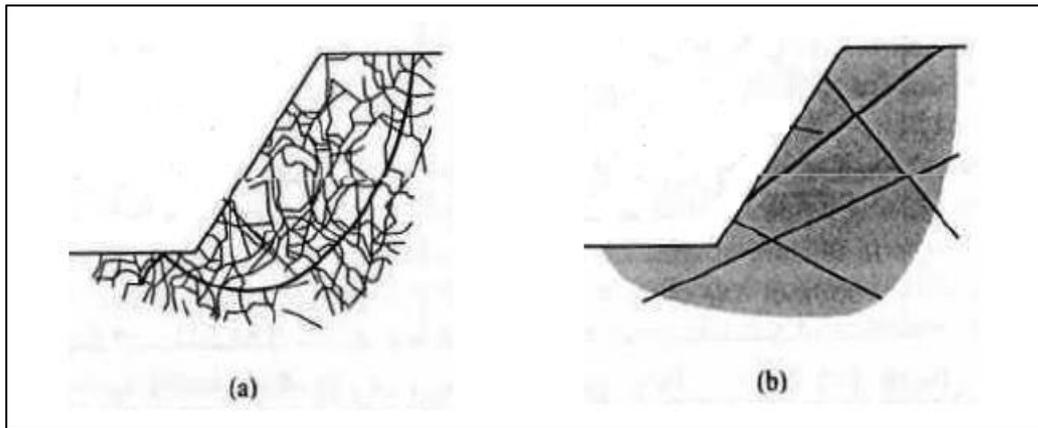
- considerano il sistema rigido, senza tener conto delle deformazioni e degli spostamenti ed inoltre la superficie di rottura deve essere nota a priori;
- richiedono soltanto di determinare i criteri di resistenza del materiale lungo la superficie di rottura;
- si basano sul confronto tra le forze resistenti e le forze agenti e sulla definizione di un fattore di sicurezza dato dal loro rapporto.

I metodi delle tensioni:

- calcolano l'evoluzione dei valori delle tensioni e delle deformazioni della massa con soluzioni numeriche;
- richiedono di assegnare le leggi costitutive e i criteri di resistenza dei materiali;
- simulano una rottura progressiva.

Il vantaggio di usare un metodo numerico consiste nel fatto che non si devono fare ipotesi preliminari sulla forma e sulla posizione della superficie di scivolamento in quanto questa si genera automaticamente nelle zone dove la resistenza al taglio non è in grado di fare fronte agli sforzi applicati e inoltre, se i parametri caratteristici del materiale sono realistici, è possibile avere un quadro dell'evoluzione degli sforzi e delle deformazioni permettendo dunque di simulare una rottura progressiva.

Figura 7.1: Differenza tra un approccio al continuo (a) e uno al discontinuo (b) (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017)



Come schematizzato in Figura 7.1, con i metodi numerici vi sono due tipi di approcci modellistici possibili:

- i metodi al continuo i quali assumono che il materiale sia continuo in tutto il corpo considerato. Le discontinuità sono trattate come casi particolari, introducendo interfacce tra corpi continui. Questo modello non può gestire il caso di più giunti che si intersecano ma tipicamente può simulare meno di una decina di discontinuità che non si intersecano. Se dunque si ha un versante fratturato dove non si individuano famiglie di discontinuità persistenti, questo è il modello da usare;
- i metodi del discontinuo trattano il materiale come un mezzo discontinuo, considerandolo come un assemblaggio di blocchi rigidi o deformabili. Se dunque si hanno poche discontinuità ben definite, si sceglierà un metodo del genere.

Figura 7.2: Metodi numerici utilizzati in un approccio al continuo (da: Materiale didattico corso di Stabilità dei Pendii – Pirulli M. – 2017)

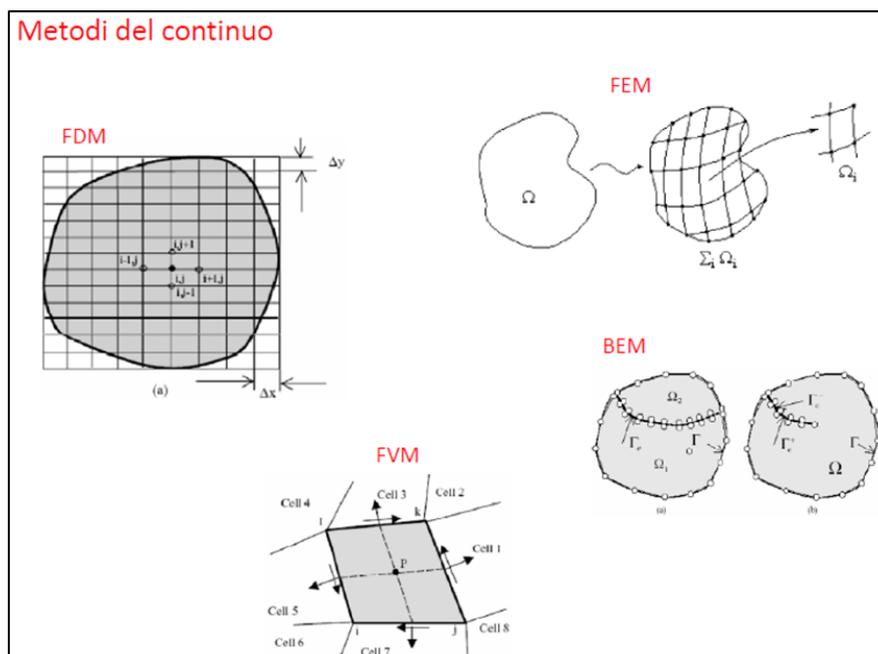


Figura 7.3: Elenco dei software maggiormente utilizzati in relazione al tipo di modello necessario

MODELLO	TEORIA	METODO NUMERICO	ESEMPI DI SOFTWARE
CONTINUO	quando non sia evidente la presenza di macrostrutture che governino la risposta deformativa	Differenze finite (FDM) Elementi finiti (FEM) Volumi finiti (FVM) Elementi di contorno (BEM)	PHASE2 FLAC FLAC3D VISAGE PLAXIS
DISCONTINUO (collettivamente riconosciuto come metodo agli elementi discreti)	quando il comportamento tensio-deformativo è governato principalmente dai sistemi di discontinuità	Elementi distinti/discreti (DEM)	UDEC 3DEC
IBRIDO	Analisi continuo-discontinuo combinate	FEM/DEM DEM/BEM	GEO-SLOPE ELFEN

In Figura 7.2 e in Figura 7.3 si riportano le tipologie di metodi numerici e poi l'elenco non esaustivo dei software maggiormente utilizzati in letteratura.

FEM (Metodo degli elementi finiti) → Si tratta di una tecnica numerica che ha lo scopo di cercare soluzioni approssimate di problemi meccanici complessi attraverso la risoluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali che vengono ridotte ad un sistema di semplici equazioni algebriche. Le equazioni differenziali in questione sono generalmente caratterizzate da un dominio di forma complessa, o variabile. Le soluzioni di tali equazioni non sono omogenee sul dominio o addirittura mancano di regolarità, esse si conseguono imponendo le condizioni iniziali e quelle al contorno.

Questa tecnica permette l'uso di elementi di forma qualunque per cui il dominio è suddiviso in elementi semplici e si può infittire il numero di maglie nelle zone più critiche anche se è chiaro che all'aumentare dell'infittimento dei nodi aumentano i tempi necessari per l'analisi.

FDM (Metodo alle differenze finite) → Tale metodo si basa sull'approssimazione diretta delle equazioni differenziali parziali ottenuta sostituendo alle derivate parziali delle differenze definite sul dominio del problema (Jing, 2003).

Si tratta di approssimare un continuo in una serie di punti discreti. La soluzione del sistema derivante si consegue imponendo le condizioni iniziali e quelle al contorno.

Si ipotizzi di essere di fronte ad un problema che preveda la risoluzione di un sistema di equazioni molto complesse e che non si riesca a risolverlo analiticamente: si può immaginare, ad esempio, di avere l'equazione di una circonferenza e di non riuscire a risolverla e allora l'unica soluzione per arginare l'ostacolo consisterebbe nel descrivere la circonferenza attraverso una successione discreta di punti dei quali si hanno informazioni soddisfacenti.

FVM (Metodo dei volumi finiti) → Tale metodo si basa sull'approssimazione delle equazioni differenziali parziali in forma integrale. Si tratta di un metodo a cavallo tra FDM (rispetto al quale sopperisce alla mancanza di flessibilità in particolar modo in merito alla modellazione di griglie irregolari, condizioni al contorno complesse e l'analisi di materiali eterogenei) ed il FEM con il quale presenta numerosi punti in comune. D'altra parte però il metodo dei volumi finiti pecca per una marcata difficoltà nel simulare sistemi discontinui che non consentono la continuità tra punti vicini della mesh.

Si tratta di una tecnica che introduce un volume di controllo ovvero un'area a partire dal centro degli elementi che convergono nel nodo. L'informazione al nodo diventa il bilancio di flussi entranti e uscenti.

BEM (Metodo degli elementi di contorno) → Tale nome deriva dal fatto che questo metodo di analisi richiede la discretizzazione del dominio della soluzione solo ai bordi e ciò riduce le dimensioni del problema e semplifica i dati richiesti in ingresso. Si basa sulla risoluzione di un'equazione integrale definita sul contorno invece che sulla risoluzione diretta delle equazioni differenziali parziali come invece avviene nel metodo FDM e nel metodo FEM.

DEM (Metodo degli elementi discreti) → Si tratta di un metodo discontinuo che schematizza il sistema come un assemblaggio di blocchi connessi tra loro attraverso i relativi punti di contatto. Grandi spostamenti o rotazioni, fratture o completo distacco tra i singoli elementi sono ammessi nel DEM ed impossibili negli altri metodi precedentemente citati. Le condizioni di compatibilità sugli spostamenti rappresentano un'importante differenza tra i metodi al continuo e quelli discreti: nei primi la compatibilità deve essere imposta tra elementi interni ed è automatica nel FDM e nel BEM ma non nel FEM, nei secondi non è richiesta poiché è sostituita dai modelli costitutivi di contatto tra unità adiacenti.

Di seguito verrà utilizzato un metodo agli elementi finiti, implementato sul software Rocscience, relativo al sito di Bardonecchia località Granges la Rho

7.2 Reperimento dei parametri geotecnici da inserire nel modello

1.1.1. Introduzione

Lo scopo delle indagini in sito è quello di determinare le condizioni stratigrafiche e di caratterizzare il comportamento meccanico delle diverse formazioni presenti.

In generale, le prove in sito sono molto utilizzate in quanto rapide ed economiche, permettono una descrizione continua o quasi della verticale, permettono di analizzare un vasto volume di terreno e di ricavare i parametri caratteristici su un terreno indisturbato. Per contro, sono incerte le condizioni al contorno, le condizioni di drenaggio e si hanno forti gradienti di $[\sigma]$ e di $[\varepsilon]$.

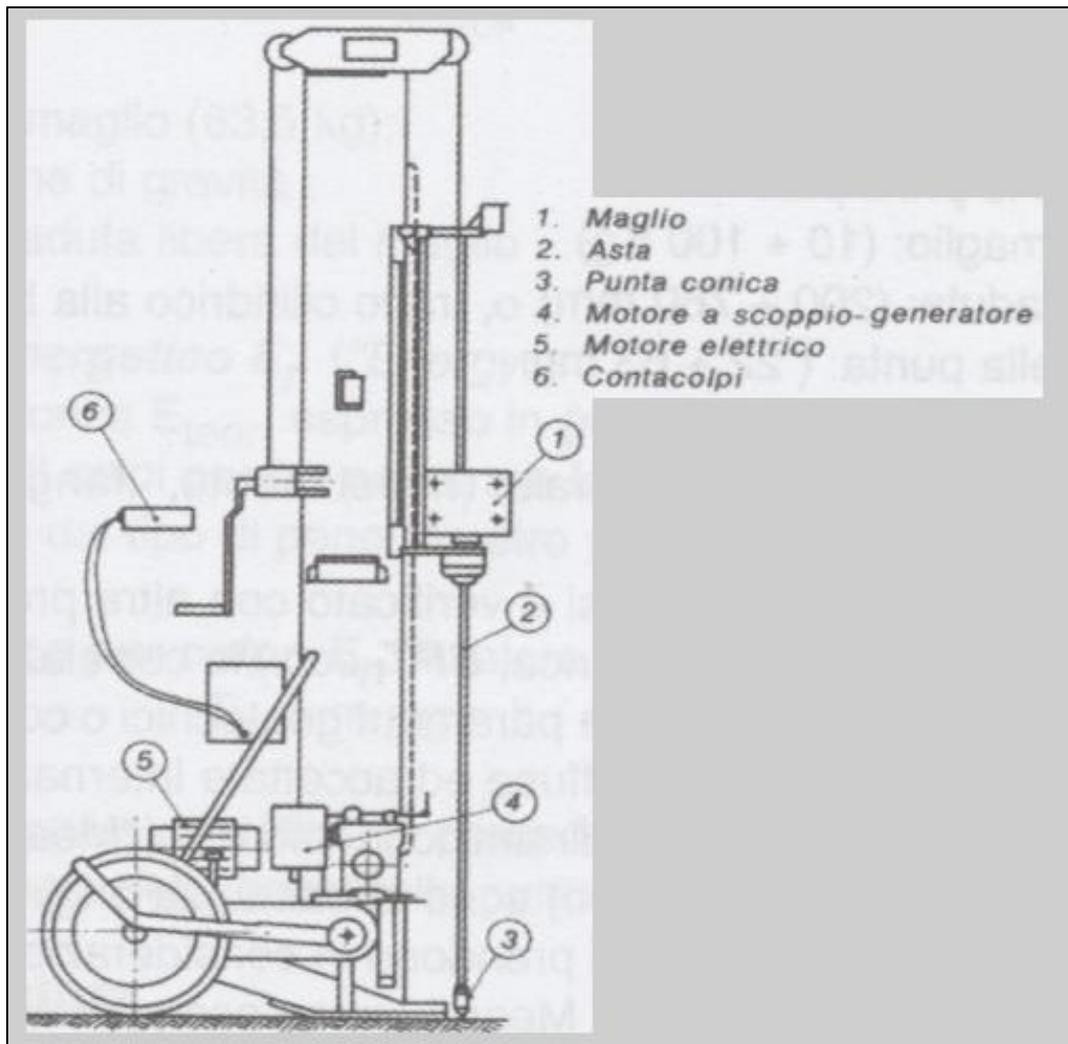
La maggior parte delle interpretazioni legate alle prove in sito, sono di carattere empirico e sono figlie di un'analisi svolta eseguendo in parallelo le prove in sito con le prove in laboratorio.

Le correlazioni empiriche, dunque, nascono da risultati di prove di laboratorio ma anche da analisi retrospettive di casi reali.

In letteratura esistono tante possibili prove ma, in particolare, la prova penetrometrica dinamica continua (DP) consiste nell'infiiggere verticalmente nel terreno una punta conica metallica posta all'estremità di un'asta di acciaio, prolungabile con l'aggiunta di successive aste.

In Figura 7.4 si riporta lo schema relativa all'attrezzatura utilizzata per lo svolgimento della prova.

Figura 7.4: Schema dell'attrezzatura tipo per prove penetrometriche dinamiche (da: Prove geotecniche in sito – Ferruccio Cestari – Editore Geo Graph – Edizione 3 – Luglio 2005)



L'infissione avviene per battitura facendo cadere sulla sommità delle aste, da un'altezza costante, un maglio di dato peso per poi contare i colpi necessari per la penetrazione di ciascun tratto di lunghezza stabilita. La prova descritta è largamente utilizzata nella progettazione delle fondazioni su pali prefabbricati battuti poiché i modelli di infissioni sono del tutto analoghi.

La resistenza del terreno è funzione inversa della penetrazione ed è collegata direttamente al numero di colpi N_{DP} per una data penetrazione. Può essere utilizzata sia per terreni di tipo granulare, sia per terreni fini attraverso appropriate correzioni.

Purtroppo sono numerose le differenze nei penetrometri esistenti e nelle modalità esecutive per cui ne risulta che, contrariamente a quanto si verifica con le altre tipologie di prove in sito (penetrometrica statica, dilatometrica, pressiometrica, SPT, ecc.), le correlazioni fra i risultati delle prove penetrometriche dinamiche continue e i parametri geotecnici o il comportamento dei manufatti, non sono in genere sviluppate, diffuse ed accettate a livello internazionale.

Le prove penetrometriche dinamiche possono essere realizzate adottando diverse combinazioni caratteristiche:

- massa del maglio compreso tra 10 kg e 100 kg;
- altezza di caduta compresa tra 200 mm e 700 mm;
- diametro della punta compreso tra 22 mm e 63 mm;
- forma della punta caratterizzata da un angolo di apertura di 60° o 90°;
- diametro esterno delle aste compreso tra 16 mm e 45 mm;
- penetrazione di riferimento compresa tra 100 mm e 300 mm;
- metodi differenti per eliminare o ridurre l'attrito laterale lungo le aste ovvero l'uso di rivestimenti, iniezione di fango attraverso le aste, scelta di un diametro della punta maggiore rispetto a quello delle aste.

Le caratteristiche delle attrezzature e le modalità esecutive sono state oggi standardizzate a livello europeo. Di seguito, in Tabella 7.1 si riportano le dimensioni dei componenti delle differenti attrezzature standard.

Tabella 7.1: Dimensioni dei componenti delle differenti attrezzature standard

		DPL (Leggero)	DPM (Medio)	DPH (Pesante)	DPSH	
					A	B
Maglio	Massa [Kg] (1)	10 ± 0.1	30 ± 0.3	50 ± 0.5	63.5 ± 0.5	63.5 ± 0.5
	Caduta [mm]	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	750 ± 20
Testa di battitura	Diametro [mm]	50 < d < Dh (a)				
	Massa max [kg] (2)	6	18	18	18	30
Punta conica 90°	Area di base [cm ²]	10	15	15	16	20
	Diametro [mm] (1)	35.7 ± 0.3	43.7 ± 0.3	43.7 ± 0.3	45.0 ± 0.3	50.5 ± 0.3
	Max. diametro usurato [mm]	34	42	42	43	49
	Lungh. Parte cilindrica [mm]	35.7 ± 1	43.7 ± 1	43.7 ± 1	90 ± 2 (b)	51 ± 2
	Altezza cono [mm]	17.9 ± 1	21.9 ± 0.1	21.9 ± 0.1	22.5 ± 0.1	25.3 ± 0.4
Aste (3)	Massima usura cono [mm]	3	4	4	5	5
	Massa max [kg/m]	3	6	6	6	8
	Diametro esterno max [mm]	22	32	32	32	35
	Lavoro specifico/colpo [KJ/m ²]	50	100	167	194	238

Note

(a) Dh: diametro del maglio, nel caso di forma rettangolare la minore dimensione viene assunta come diametro.

(1) dimensioni dell'attrezzo nuovo

(2) guida non compresa.

(3) lunghezza massima di un'asta, non deve superare i due metri.

Ciò che è differente nelle diverse prove è la massa del maglio, la sua altezza di caduta, la geometria e la massa della testa di battitura ma anche la geometria della punta conica e delle aste. Per quanto riguarda la modalità di esecuzione della prova, in generale, le prove dinamiche continue vengono eseguite a partire dal piano campagna e il penetrometro deve essere posizionato verticalmente.

In Italia, ed anche in altri paesi, è diffuso l'impiego di un penetrometro molto pratico e facilmente trasportabile ma le cui caratteristiche non rientrano in quelle degli standard, ovvero il penetrometro 30-20. Nella Tabella 7.2 sono riportate le principali caratteristiche di questo penetrometro in confronto con quelle dei penetrometri DPL e DPM della norma EN-ISO.

Come si può facilmente osservare, il penetrometro 30-20, sotto certi aspetti, è più prossimo ad un leggero DPL piuttosto che al medio DPM.

Tabella 7.2: Raffronto tra le dimensioni dei componenti DPL, DPM e 30-20 italiano

		DPL (Leggero)	DPM (Medio)	30-20 (5)	
				A (3)	B (4)
Maglio	Massa [Kg] (1)	10 ± 0.1	30 ± 0.3	30	30
	Caduta [m]	500 ± 10	500 ± 10	200	200
Testa di battitura	Diametro [mm]	50 < d < Dh (a)	50 < d < Dh (a)	-	-
	Massa max [kg] (2)	6	18	15	0.25
Punta conica 90°	Area di base [cm ²]	10	15	10	10
	Diametro [mm] (1)	35.7 ± 0.3	43.7 ± 0.3	35.7	35.7
	Max. diametro usurato [mm]	34	42	-	-
	Lungh. Parte cilindrica [mm]	35.7 ± 1	43.7 ± 1	8	8
	Altezza cono [mm]	17.9 ± 1	21.9 ± 0.1	31	31
	Massima usura cono [mm]	3	4	-	-
Aste	Massa max [kg/m]	3	6	2.4	2.4
	Diametro esterno max [mm]	22	32	20	20
	Lavoro specifico/colpo [KJ/m ²]	50	100	60	60
Note					
(a) Dh: diametro del maglio, nel caso di forma rettangolare la minore dimensione viene assunta come diametro					
(1) dimensioni dell'attrezzo nuovo					
(2) guida non compresa.					
(3) DPM 30-20 della Pagani					
(4) TG 30-20 4x4 ruote motrici					
(5) in generale le attrezzature A e B utilizzano punte "a perdere"					

Come già accennato in precedenza, il maggiore ostacolo alla precisione della misura della resistenza del terreno ed al raffronto tra differenti misure, deriva dalla difficoltà di isolare la componente della resistenza dovuta all'attrito laterale del terreno lungo la batteria di aste. Solo con alcuni accorgimenti questa componente è separabile da quella dovuta alla resistenza alla penetrazione della punta, come il rivestimento o il flusso di fango attraverso le aste.

Con il penetrometro utilizzato dai tecnici di Arpa Piemonte, ovvero il penetrometro 30-20, si è registrato il numero di colpi necessari per un avanzamento di 100 mm (ovvero il valore N_{10}).

Bisogna considerare il fatto che i risultati della prova possono essere influenzati ad esempio dai fattori geotecnici e dunque dalla tipologia del terreno (granulometria, dimensione dei clasti, grado di cementazione) ma anche dalla presenza della falda in quanto nei terreni granulari grossolani, a parità di altre condizioni, il numero di colpi risulta minore se si opera sotto il livello della falda e ciò è particolarmente importante nei terreni poco addensati invece nei terreni limosi il numero di colpi

risulta uguale o maggiore se si opera sotto il livello della falda, a parità delle altre condizioni al contorno.

Utilizzando il penetrometro di tipo medio-leggero 30-20, è possibile sfruttare le relazioni ricavate da Vannelli e Benassi (1983), i quali hanno ricercato delle relazioni tra i valori di N_{10} e il numero di battute relative alla prova SPT. Le relazioni empiriche prodotte dai due autori sono state ottenute confrontando i risultati derivanti dal penetrometro 30-20 con i risultati ottenuti dalla prova SPT.

La relazione è la seguente:

$$0.7 \cdot N_{SPT} \leq N_{10} \leq 1.2 \cdot N_{SPT}$$

In particolare gli autori hanno distinto il comportamento di terreni prevalentemente coesivi e di terreni prevalentemente granulari.

Per i terreni prevalentemente coesivi:

- $\frac{N_{10}}{N_{SPT}} \geq 0.7 \div 0.8$ per $8 \leq N_{10} \leq 14$
- $\frac{N_{10}}{N_{SPT}} \geq 0.8 \div 1.0$ per $14 \leq N_{10} \leq 18$

Per i terreni prevalentemente granulari:

- $\frac{N_{10}}{N_{SPT}} \geq 0.95 \div 1.0$ per $8 \leq N_{10} \leq 15$
- $\frac{N_{10}}{N_{SPT}} \geq 1.0 \div 1.2$ per $15 \leq N_{10} \leq 30$

In riferimento al valore di angolo di attrito, nel presente lavoro, si è deciso di sfruttare la relazione di SHIOI E FUKUNI pubblicata nel Road Bride Specification (1982) la quale è valida per sabbie fini o limose e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova superiori a 8 – 10 metri per terreni sopra falda e superiori a 15 metri per terreni in falda. Anche se il metodo non è perfettamente calzante con il caso in esame, è stato deciso comunque si sfruttare la relazione in modo tale da avere comunque una base di partenza iniziale. Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$\phi = \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} + 15$$

In riferimento al valore di modulo elastico E si è utilizzata la relazione di BURLAND E BURBIDGE (1985) la quale è una correlazione valida per tutti i tipi di suolo e fornisce un range di valori plausibili:

- per $N_{SPT} = 4 \rightarrow E = (1.6 \div 2.4) \cdot N_{SPT}$
- per $N_{SPT} = 10 \rightarrow E = (2.2 \div 3.4) \cdot N_{SPT}$
- per $N_{SPT} = 30 \rightarrow E = (3.7 \div 5.6) \cdot N_{SPT}$
- per $N_{SPT} = 60 \rightarrow E = (4.6 \div 7.0) \cdot N_{SPT}$

1.1.2. Analisi delle prove in sito realizzate

L'obiettivo di questo paragrafo è quello di spiegare come si è proceduto per poter definire i parametri geotecnici con cui partire per la realizzazione del modello agli elementi finiti.

Per il sito di Bardonecchia località Granges la Rho, non si sono avute a disposizione prove di laboratorio o prove penetrometriche, neanche in aree vicine al sito oggetto di studio.

Si è così deciso di utilizzare delle prove penetrometriche svolte nel comune di Sauze d'Oulx in quanto, anche osservando le informazioni provenienti dalle carte geologiche, si è avuta la conferma che la stratigrafia presente non fosse molto dissimile da quella riscontrata nella zona di Bardonecchia.

Nonostante ciò, trovare le relazioni tra i risultati delle prove penetrometriche e i sondaggi superficiali eseguiti non è stato facile in quanto il sito di Sauze d'Oulx è caratterizzato da una forte disomogeneità.

I dati ricavati sono stati molto utili perché, con qualche grado di approssimazione, hanno permesso di avere dei dati geotecnici iniziali e coerenti, sia pur molto approssimativi e inevitabilmente soggetti a modifiche nella fase di Back Analysis.

In Figura 7.5, Figura 7.6 e in Figura 7.7 vengono riportate, sfruttando un grado di dettaglio differente, la zona e le denominazioni dei sondaggi e delle prove penetrometriche svolte nella località di Sauze d'Oulx.

Figura 7.5: Zona di esecuzione delle prove penetrometriche e sondaggi superficiali (da: Geoportale Arpa Piemonte)

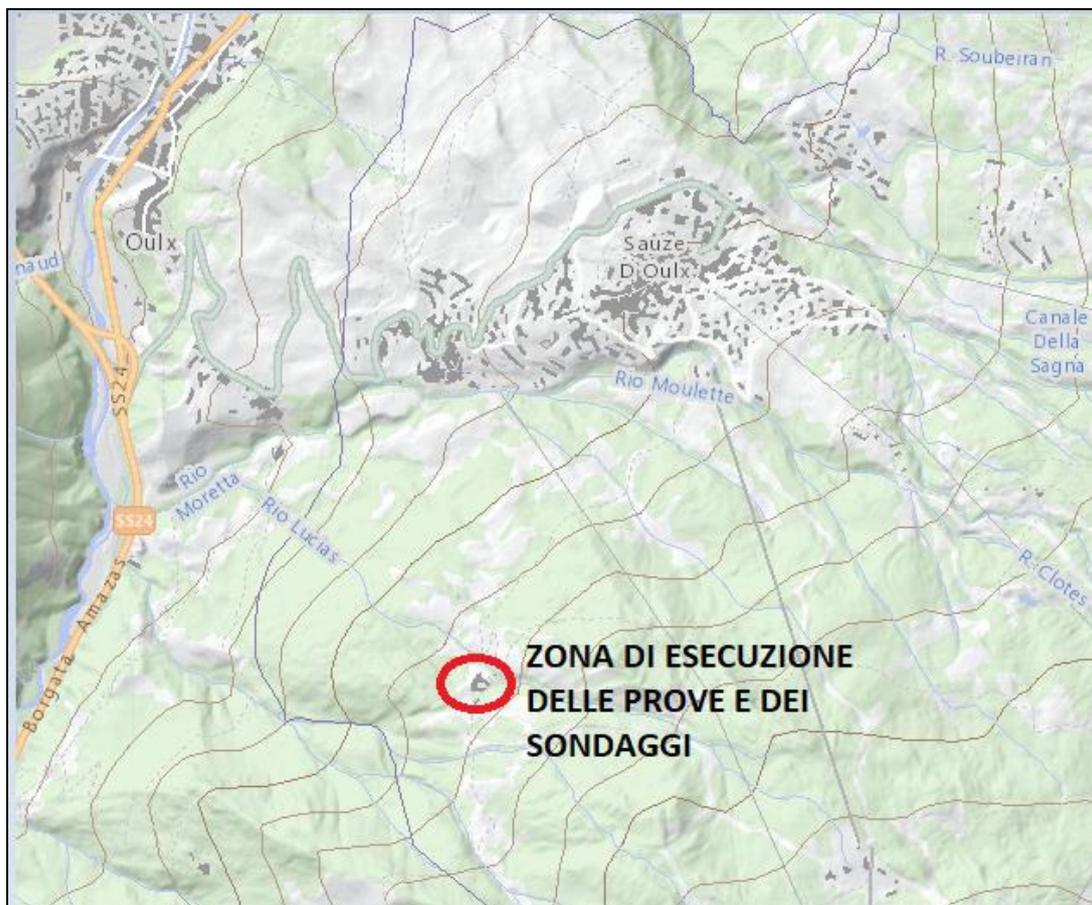


Figura 7.6: Zona di esecuzione delle prove penetrometriche e sondaggi superficiali e relative curve di livello (da: Geoportale Arpa Piemonte)

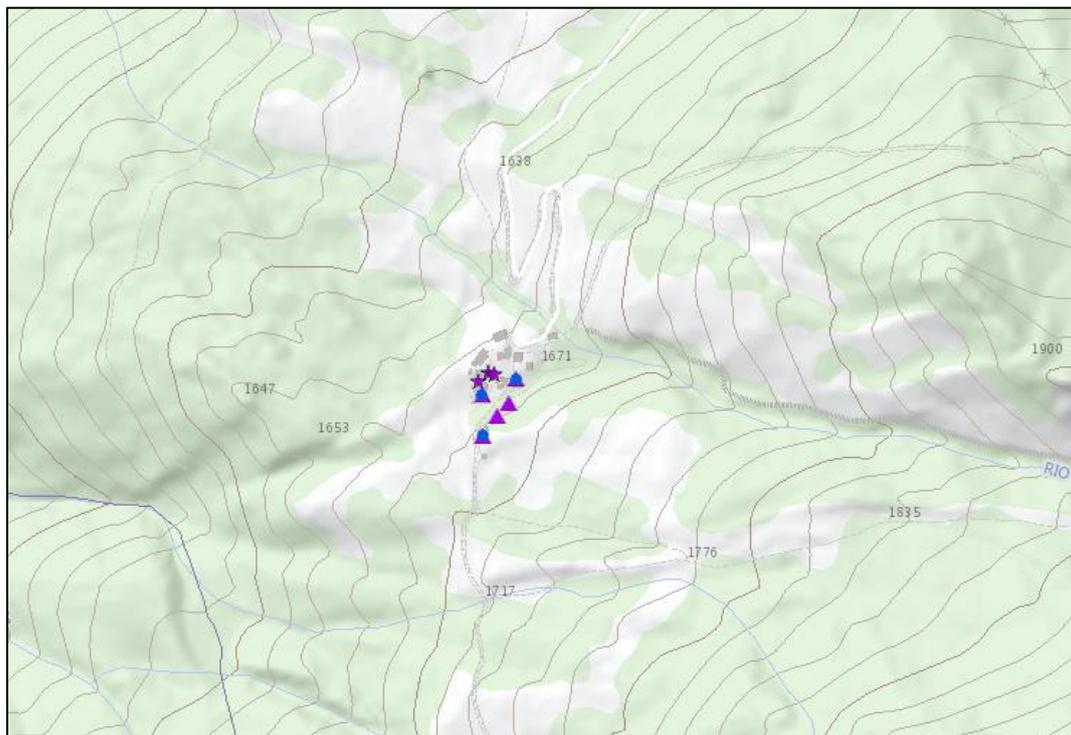
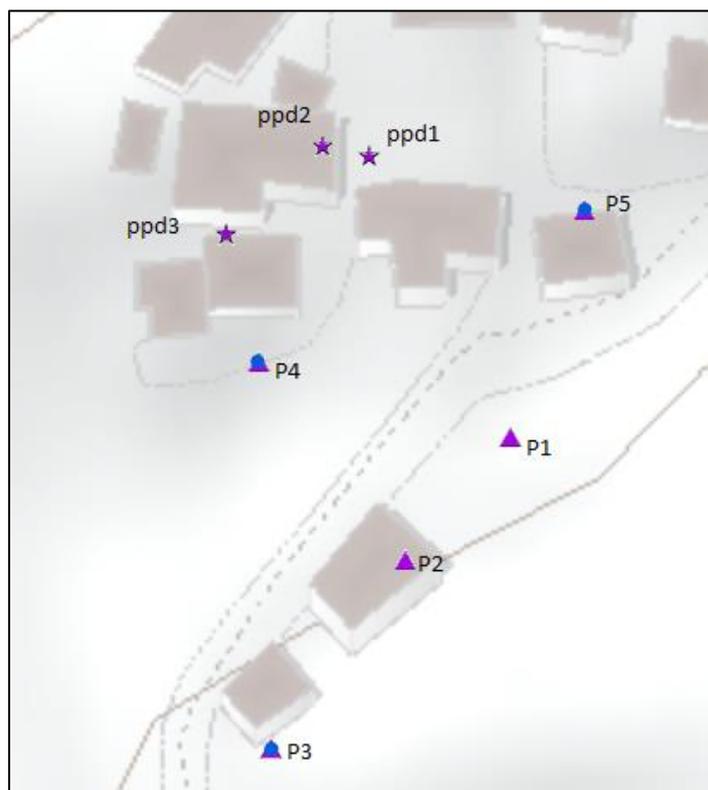


Figura 7.7: Zoom dell'area e denominazione dei sondaggi e delle prove eseguite (da: Geoportale Arpa Piemonte)



Le diverse analisi effettuate hanno permesso di abbinare la prova penetrometrica dinamica, effettuata nella località di Sauze d'Oulx (denominata per comodità ppd3) con il sondaggio P1, anch'esso effettuato in zona Sauze d'Oulx.

Di seguito si riporta la documentazione di riferimento e le relazioni utilizzate. Per una migliore visione dei documenti forniti da Arpa Piemonte si rimanda il lettore all'Allegato XI.

In Figura 7.8 si riporta il risultato della prova penetrometrica dinamica ppd3 a cui si è ritenuto opportuno associare il sondaggio P1 riportato in Figura 7.9.

In Figura 7.10 si mostra l'abbinamento scelto tra il risultato della prova penetrometrica dinamica e il relativo sondaggio, mostrando anche il legame con gli orizzontamenti di materiale.

Figura 7.8: Risultati della prova penetrometrica dinamica denominata ppd3

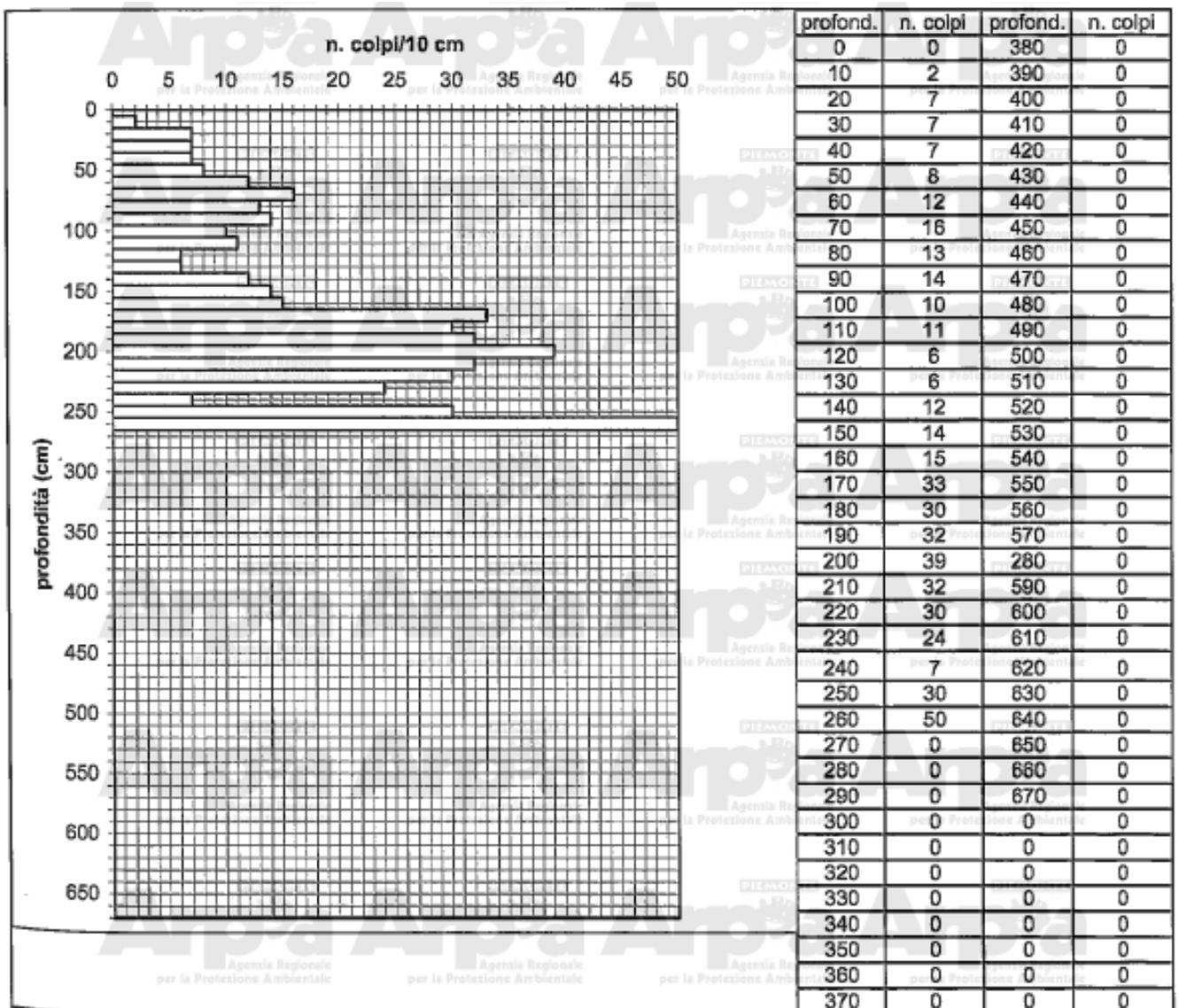


Figura 7.9: Risultato del sondaggio denominato P1

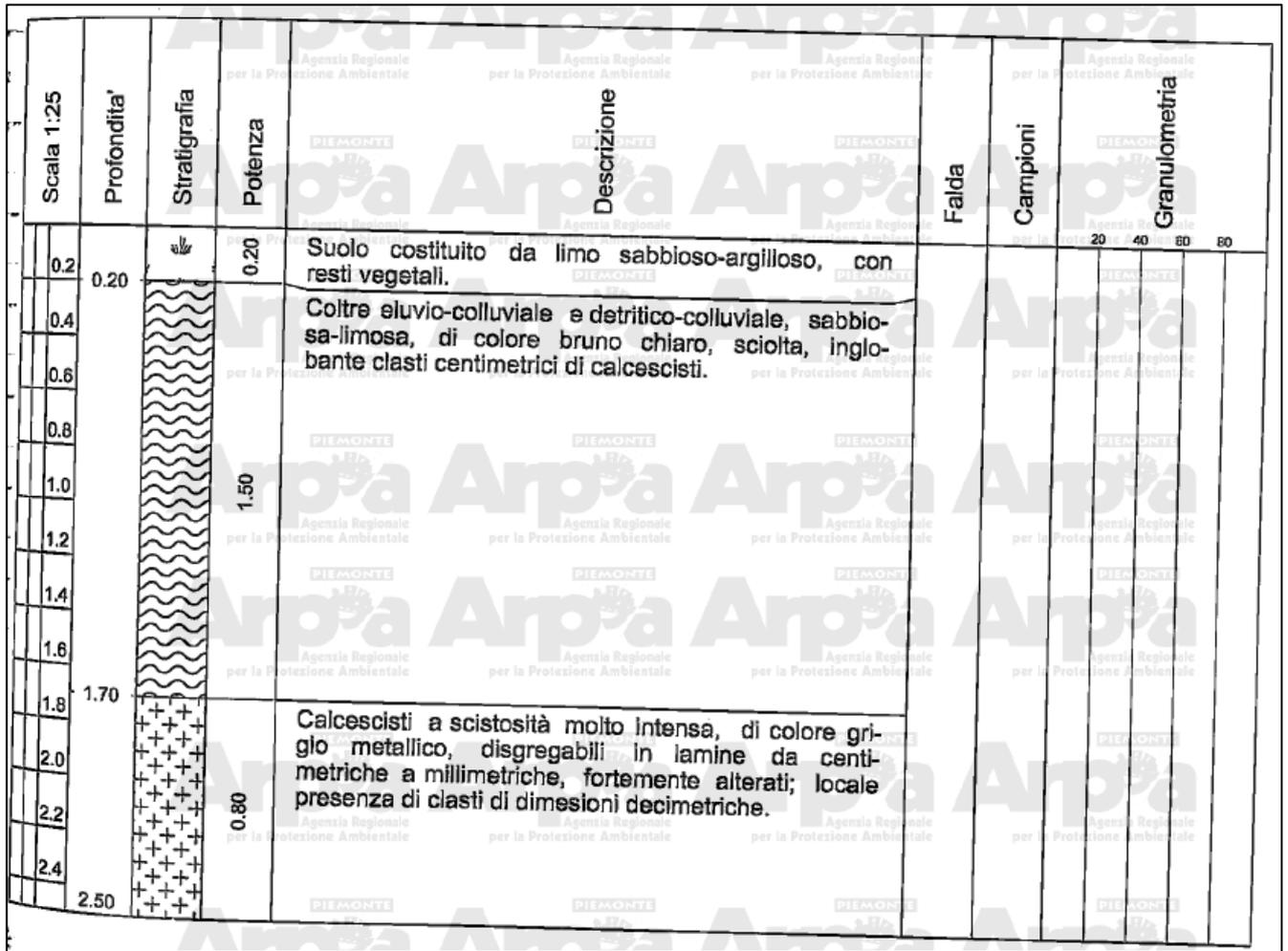
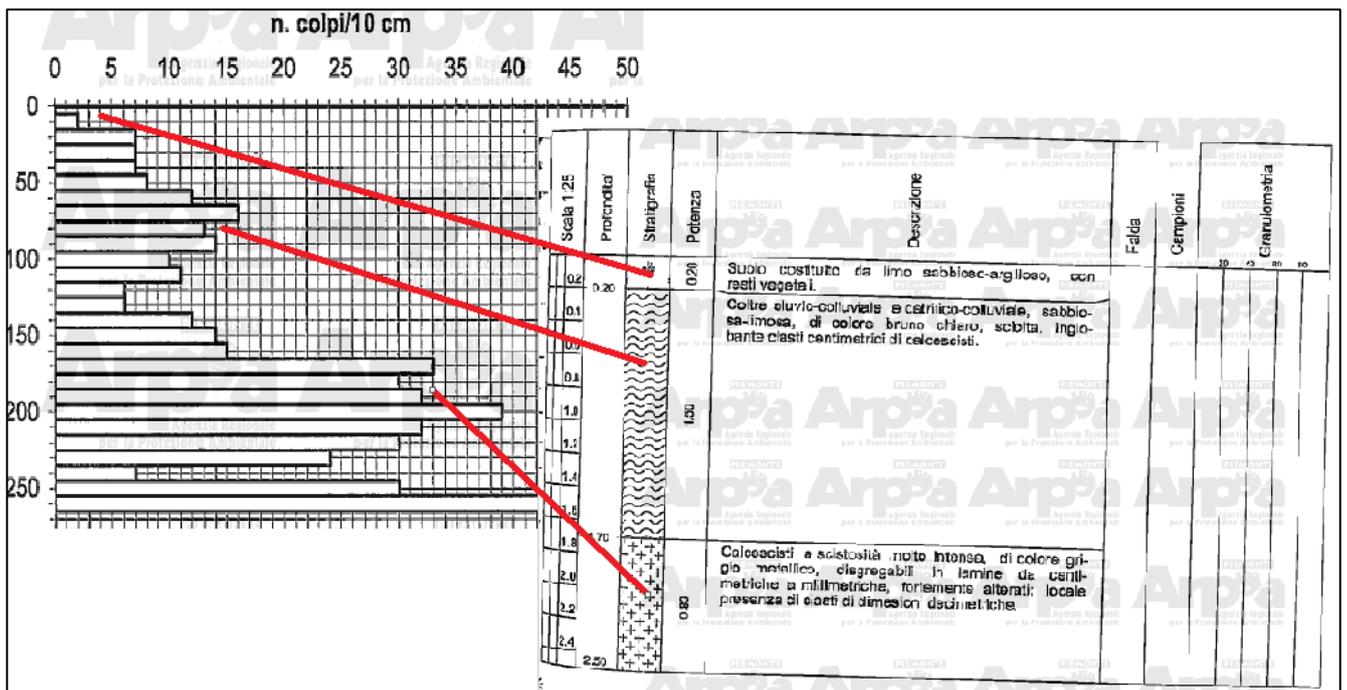


Figura 7.10: Relazione tra la prova penetrometrica ppd3 e la stratigrafia P1



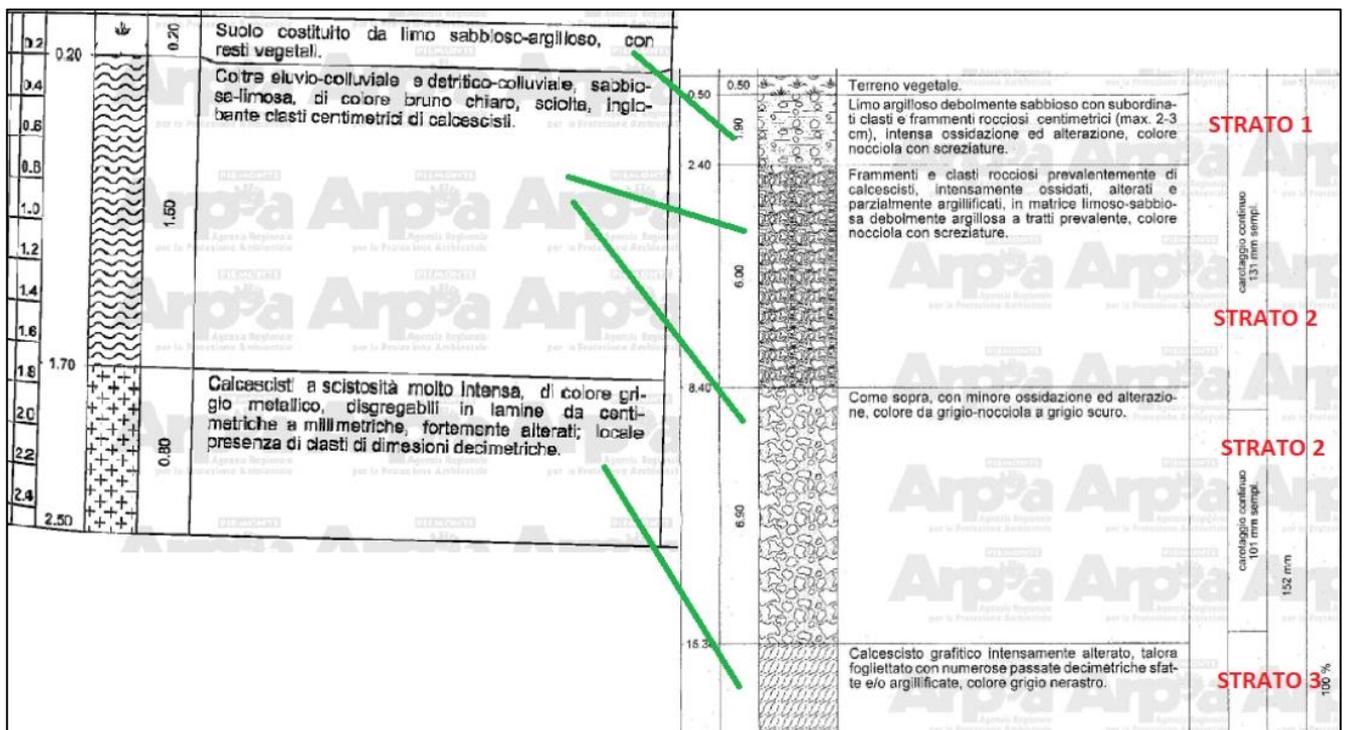
Il passaggio successivo è stato quello di legare la stratigrafia ottenuta con il sondaggio denominato P1 e il sondaggio 5 relativo alla zona di Bardonecchia Rho. Il legame ottenuto è riportato di seguito in Figura 7.11.

Le caratteristiche del primo strato del sondaggio P1, spesso 20 cm sono state associate allo strato spesso 1.90 metri relativo al sondaggio 5; il secondo strato del sondaggio P1, spesso 1.50 metri, è stato associato agli strati spessi 6.00 metri e 6.90 metri relativi al sondaggio 5 ed infine il terzo strato, spesso 0.80 metri e relativo al sondaggio P1, è stato associato ai calcescisti intensamente alterati che si trovano ad una profondità compresa tra i 15.30 metri e i 32.70 metri del sondaggio 5.

Per gli altri strati relativi al sondaggio 5, definiti nel modello di cui si farà riferimento in seguito, non sono stati ricavati dati utili per cui l'approccio utilizzato è stato quello della modifica dei parametri geotecnici derivati da letteratura, facendo un'analisi a ritroso.

Per i primi strati caratterizzabili da prove in sito, noti i valori del numero di colpi, si è calcolato un valore medio e successivamente, mediante le relazioni empiriche prese da letteratura (definite nel paragrafo precedente), si è proceduto a definire l'angolo di attrito e il valore del modulo elastico.

Figura 7.11: Relazioni scelte tra il sondaggio P1 di Sauze d'Oulx e il sondaggio 5 di Bardonecchia Rho



Per gli strati denominati Strato 1 - Strato 2 - Strato 3 in Figura 7.7, si riporta il valore medio di N_{10} per poi giungere al valore di N_{SPT} relativo ai diversi strati e il calcolo relativo al valore dell'angolo di attrito e del valore del modulo elastico.

- Per lo Strato 1 si sono sfruttate le relazioni relative ad un terreno coesivo ottenendo:

$$\text{int}(\overline{N_{10}}) = 2$$

$$\frac{N_{10}}{N_{SPT}} \geq 0.7 \div 0.8 \rightarrow \text{int}(N_{SPT,MAX}) = 2$$

$$\phi = \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} + 15 = \phi = \sqrt{15 \cdot 2} + 15 \approx 20.5^\circ$$

relazione scelta con $N_{SPT} = 4 \rightarrow E = (1.6 \div 2.4) \cdot N_{SPT} \rightarrow E_{MINIMO} = 1.6 \cdot 2 = 3.2 MPa$

Nota: con la scrittura $int(\overline{N_{10}})$ si intende il valore intero medio di colpi necessari per avere un approfondimento della punta di 10 cm.

- Per lo Strato 2 si sono sfruttate le relazioni relative ad un terreno coesivo ottenendo:

$$int(\overline{N_{10}}) = 10$$

$$\frac{N_{10}}{N_{SPT}} \geq 0.7 \div 0.8 \rightarrow int(N_{SPT,MAX}) = 14$$

$$\phi = \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} + 15 = \phi = \sqrt{15 \cdot 14} + 15 \simeq 29.5^\circ$$

relazione scelta con $N_{SPT} = 10 \rightarrow E = (2.2 \div 3.4) \cdot N_{SPT} \rightarrow E_{MINIMO} = 2.2 \cdot 14 = 30.8 MPa$

- Per lo Strato 3 si sono sfruttate le relazioni relative ad un terreno granulare. In questo caso nel calcolo del valore medio di N_{10} si è trascurato il valore ottenuto alla profondità di 240 cm relativamente alla prova penetrometrica dinamica continua, in quanto ritenuto troppo basso in confronto agli altri valori e quindi forse l'eventuale presenza di una sottile lente di materiale tenero può aver condizionato il dato. Si è ottenuto:

$$int(\overline{N_{10}}) = 31$$

$$\frac{N_{10}}{N_{SPT}} \geq 1.0 \div 1.2 \rightarrow int(N_{SPT,MINIMO}) = 31$$

$$\phi = \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} + 15 = \phi = \sqrt{15 \cdot 31} + 15 \simeq 36.6^\circ$$

relazione scelta con $N_{SPT} = 30 \rightarrow E = (3.7 \div 5.6) \cdot N_{SPT} \rightarrow E_{MINIMO} = 3.7 \cdot 31 = 114.7 MPa$

Tutto il modello è stato costruito prendendo in riferimento cinque orizzontamenti e tipologie di materiale. Come già specificato, con i primi tre è stato possibile reperire delle prove in sito invece gli ultimi due strati non è stato possibile.

7.3 Geometria del modello

La geometria del modello è stata ottenuta considerando una sezione in corrispondenza della linea di massima pendenza. Quest'ultima è stata determinata attraverso il DTM del sito di Bardonecchia Rho.

In Figura 7.12 e in Figura 7.13 si riporta con il colore rosso la linea di cui sopra e in Figura 7.14 la sezione determinata.

Si fa presente che in riferimento alla sezione, il punto di ascissa 0 corrisponde al punto A e il punto di ascissa massima corrisponde al punto B riportati in Figura 7.12.

Figura 7.12: Evidenza della linea di massima pendenza

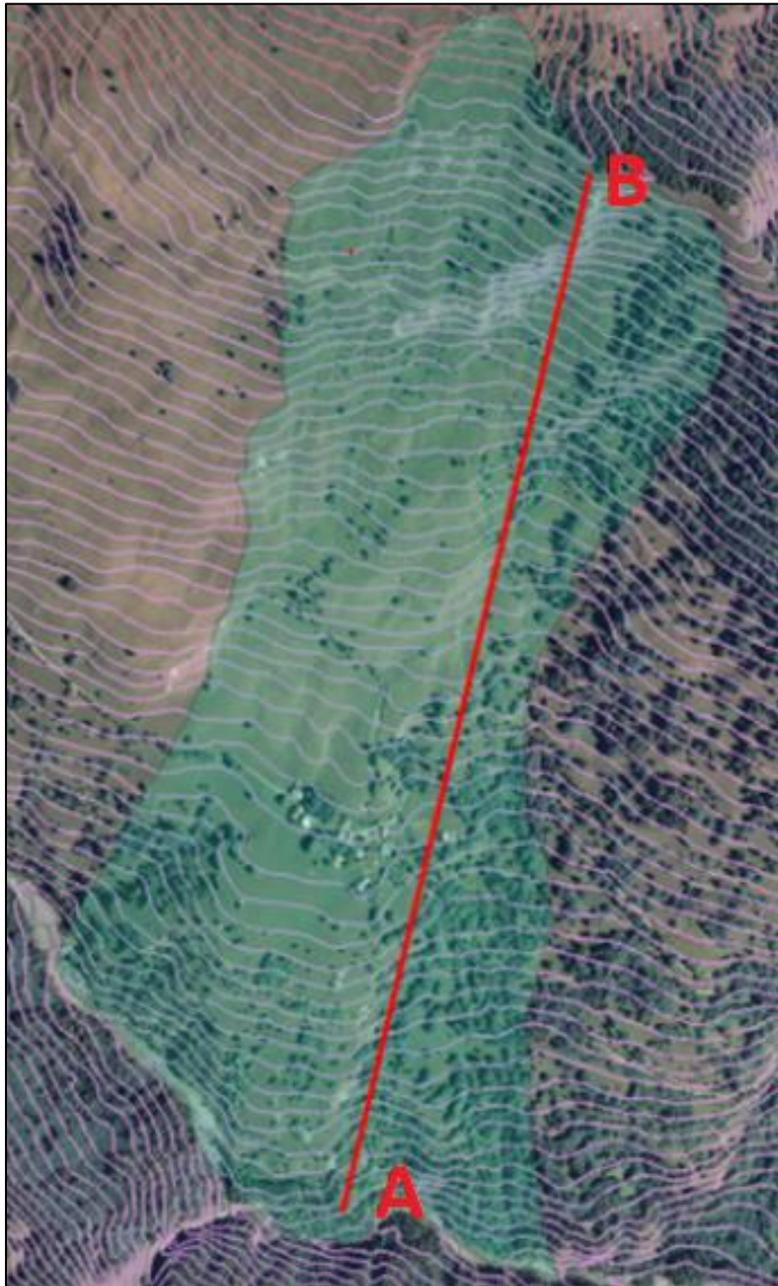


Figura 7.13: Posizione della sezione scelta

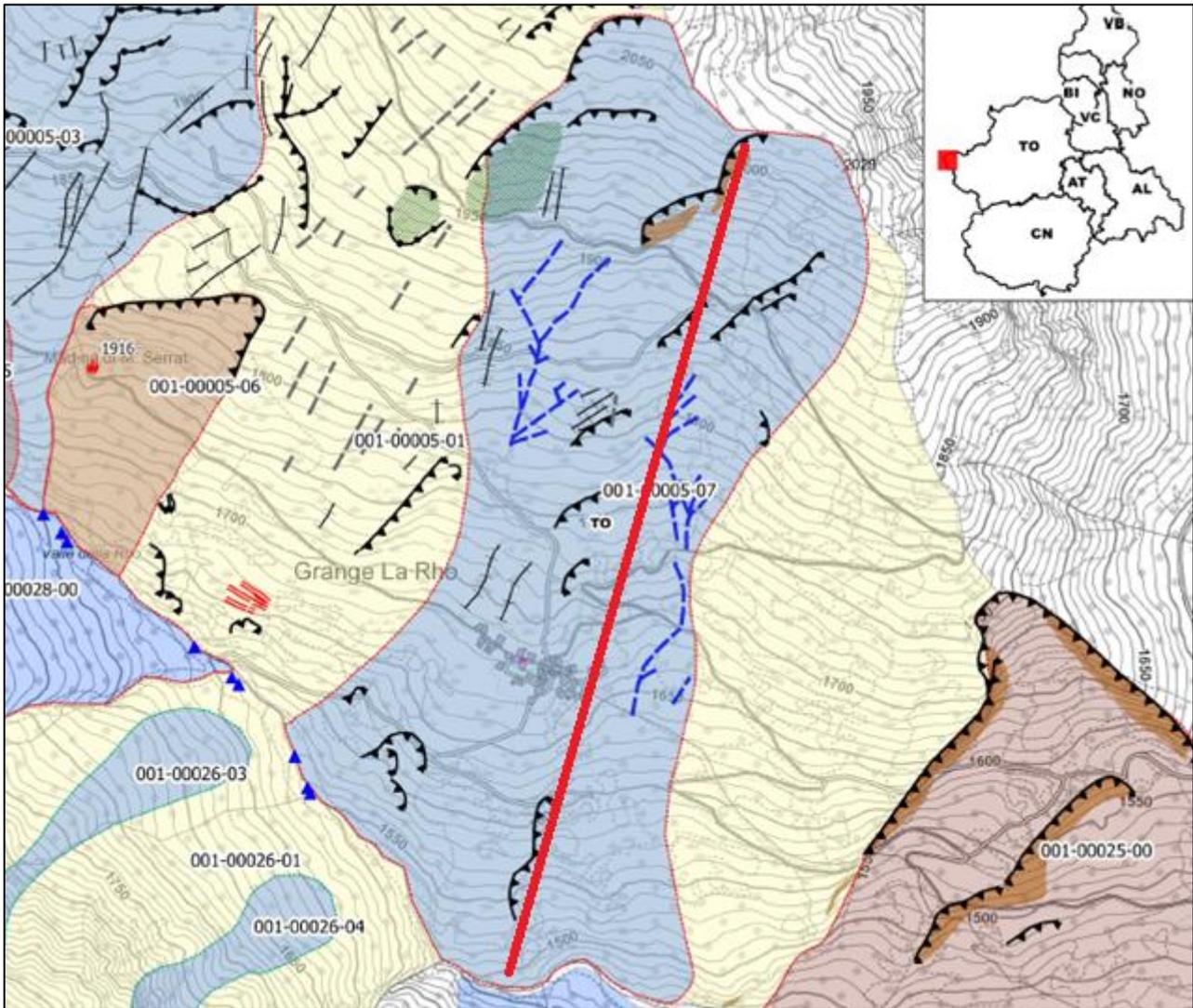
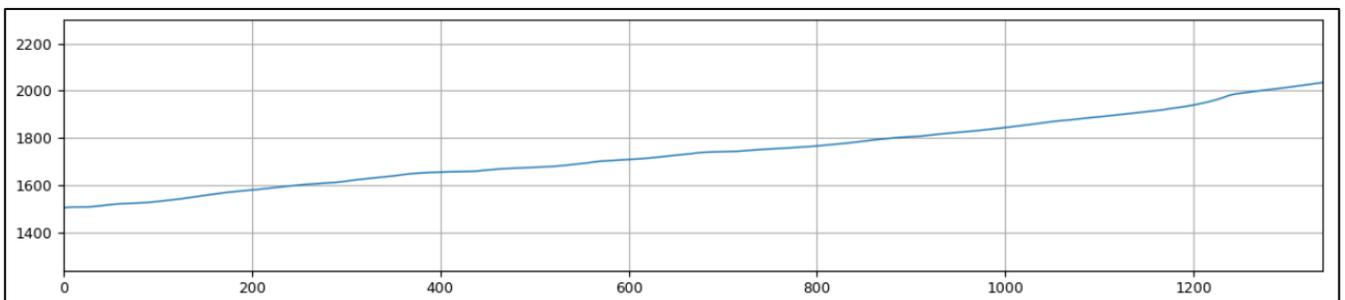


Figura 7.14: Sezione ricavata considerando la linea di massima pendenza



A questo punto, nota la sezione, è stata riportata la posizione dei sondaggi 4, 5 e 6 (in Allegato XII si troveranno i sondaggi specificati) ed è stato ricostruito il modello geometrico degli strati di materiale facendo le opportune semplificazioni e interpolazioni tra le informazioni ricavate dai diversi sondaggi.

In particolare le cinque tipologie di materiale considerate, prendendo come riferimento il sondaggio 5, sono di seguito riportate:

- il primo orizzontamento costituente il modello è quello che si trova dalla profondità di 0.50 metri alla profondità di 2.40 metri (per comodità nel seguito sarà chiamato "Strato 1") ed è caratterizzato da limo argilloso debolmente sabbioso con clasti e frammenti rocciosi centimetrici;
- il secondo orizzontamento costituente il modello è quello che si trova dalla profondità di 2.40 metri alla profondità di 15.30 metri (per comodità nel seguito sarà chiamato "Strato 2") ed è caratterizzato da frammenti e clasti rocciosi prevalentemente di calcescisti intensamente alterati e parzialmente argillificati;
- il terzo orizzontamento costituente il modello è quello che si trova dalla profondità di 15.30 metri alla profondità di 32.70 metri (per comodità nel seguito sarà chiamato "Strato 3") caratterizzato da calcescisti grafitici intensamente alterati talora fogliettati da passate decimetriche sfratte e/o argillificate;
- il quarto orizzontamento costituente il modello è quello che si trova dalla profondità di 32.70 metri alla profondità di 50.00 metri (per comodità nel seguito sarà chiamato "Strato 4") caratterizzato da calcescisti grafitici con fratture sub-orizzontali;
- il quinto orizzontamento costituente il modello è quello che si trova dalla profondità di 50.00 metri in poi (per comodità nel seguito sarà chiamato "Strato 5") caratterizzato da calcescisti grafitici.

Per quanto riguarda la posizione della falda, laddove non vi era alcuna indicazione, si è deciso che questa avrebbe dovuto avere un andamento parallelo al pendio.

La realizzazione del modello è iniziata pensando inizialmente ad un dominio scatolare ed alla successiva realizzazione di step tali da simulare uno scavo progressivo sino a giungere al profilo reale. Tutto ciò è stato fatto in modo tale da rendere più stabile la soluzione infatti, se si fosse giunti direttamente dal dominio scatolare al profilo reale, il software avrebbe visto questa pratica come uno scarico improvviso e ciò avrebbe inficiato negativamente sulla soluzione finale.

La costruzione del dominio scatolare ha previsto anche un'estensione dello stesso a sinistra e a destra ma anche in profondità, in modo tale da limitare gli effetti di bordo sul risultato finale. In particolare, le estensioni laterali sono state di 500 metri per lato e anche in profondità si è utilizzato lo stesso valore di estensione partendo dal punto altimetricamente più basso.

Partendo dal dominio scatolare, si sono realizzati in totale sei stage ove nei primi tre si è provveduto allo scarico di porzioni di materiali, giungendo al profilo reale al quarto stage.

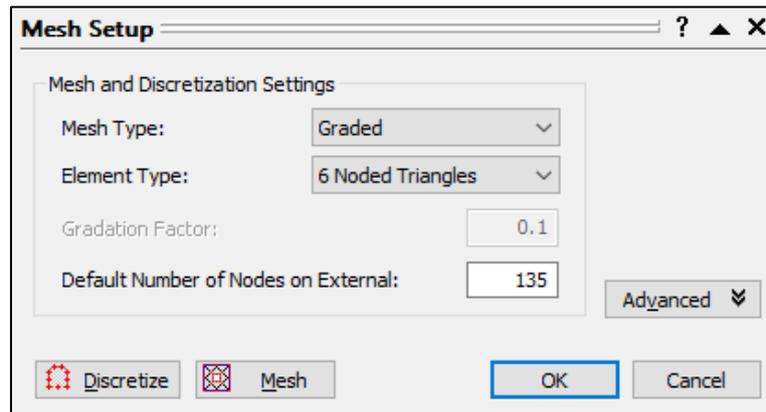
Nello stage cinque si è passati da una legge costitutiva elastica del materiale ad una legge elastica perfettamente plastica per i soli primi quattro orizzontamenti considerati, in quanto l'ultimo strato è stato considerato, in base ai risultati delle misure inclinometriche, ininfluenza sulla stabilità del versante e dunque, per velocizzare il calcolo, lo si è lasciato elastico.

Nell'ultimo stage, si è aggiunta la presenza della falda.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, si è deciso di porre dei carelli lungo i margini verticali e delle cerniere alla base del modello. Ovviamente, la superficie è stata mantenuta libera.

Per quanto riguarda la mesh utilizzata, si è subito notato quanto sia importante che la stessa sia molto fitta in quanto influenza notevolmente i risultati finali. In particolare, è stata scelta una mesh triangolare a 6 nodi, come si evince dalla Figura 7.15.

Figura 7.15: Informazioni sulla tipologia di mesh utilizzata



Di seguito, in Figura 7.16, Figura 7.17, Figura 7.18 e in Figura 7.19 si riporta ciò che si è ottenuto con i primi quattro stage ovvero l'evoluzione del cambiamento di geometria del dominio considerato, partendo inizialmente dalla forma scatolare e giungendo poi al profilo reale del pendio. Infine in Figura 7.20 e in Figura 7.21 si riportano gli ultimi due stage.

Figura 7.16: Stage 1 del modello ovvero quello caratterizzato dal dominio scatolare

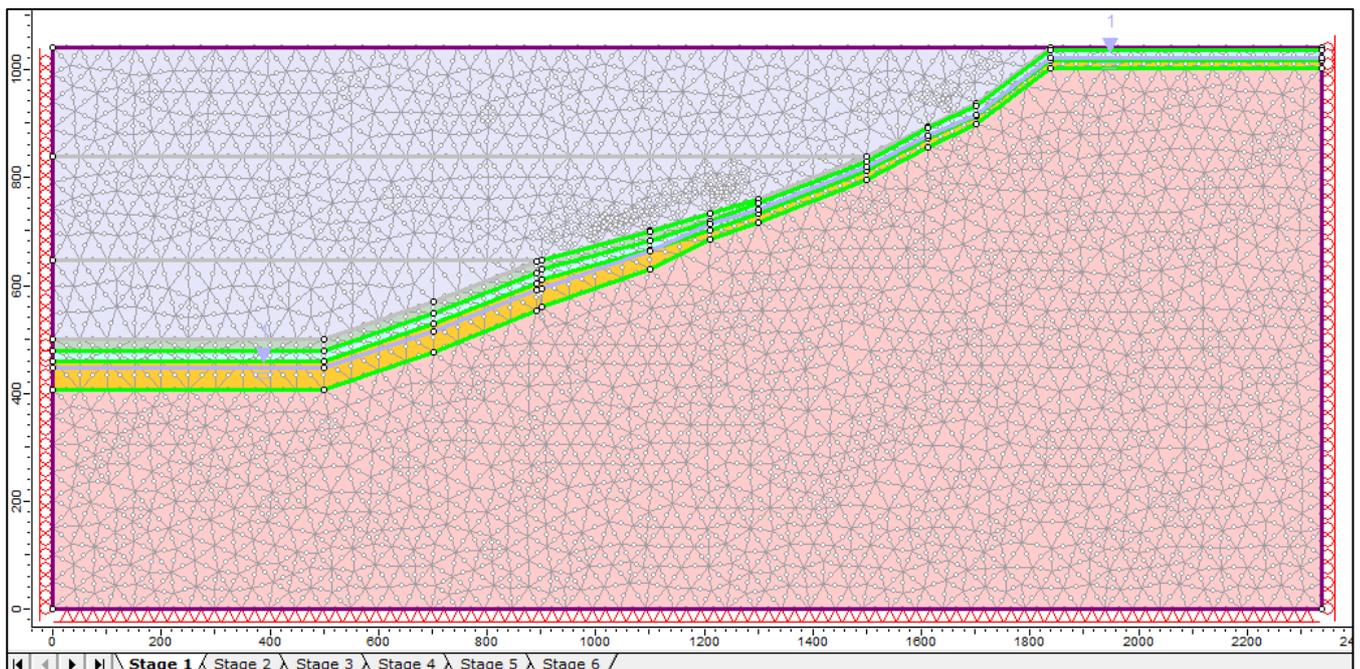


Figura 7.17: Stage 2 del modello ovvero quello caratterizzato dalla prima fase di scarico

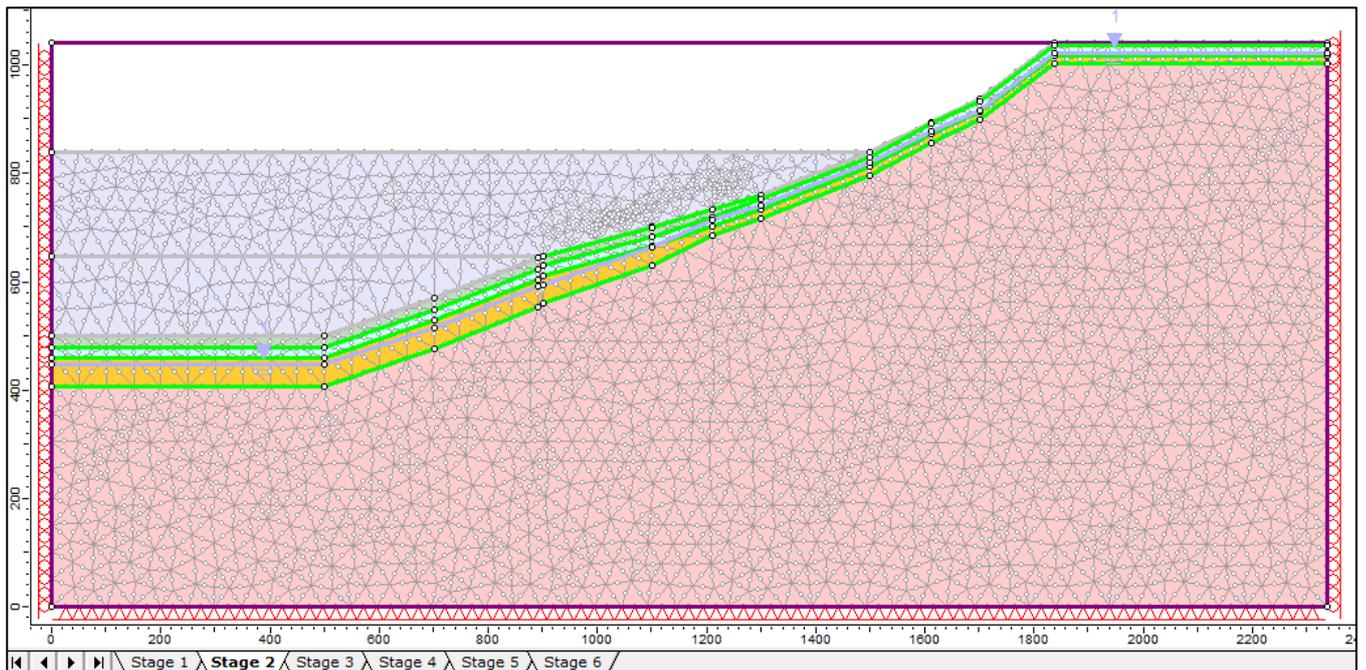


Figura 7.18: Stage 3 del modello ovvero quello caratterizzato dalla seconda fase di scarico

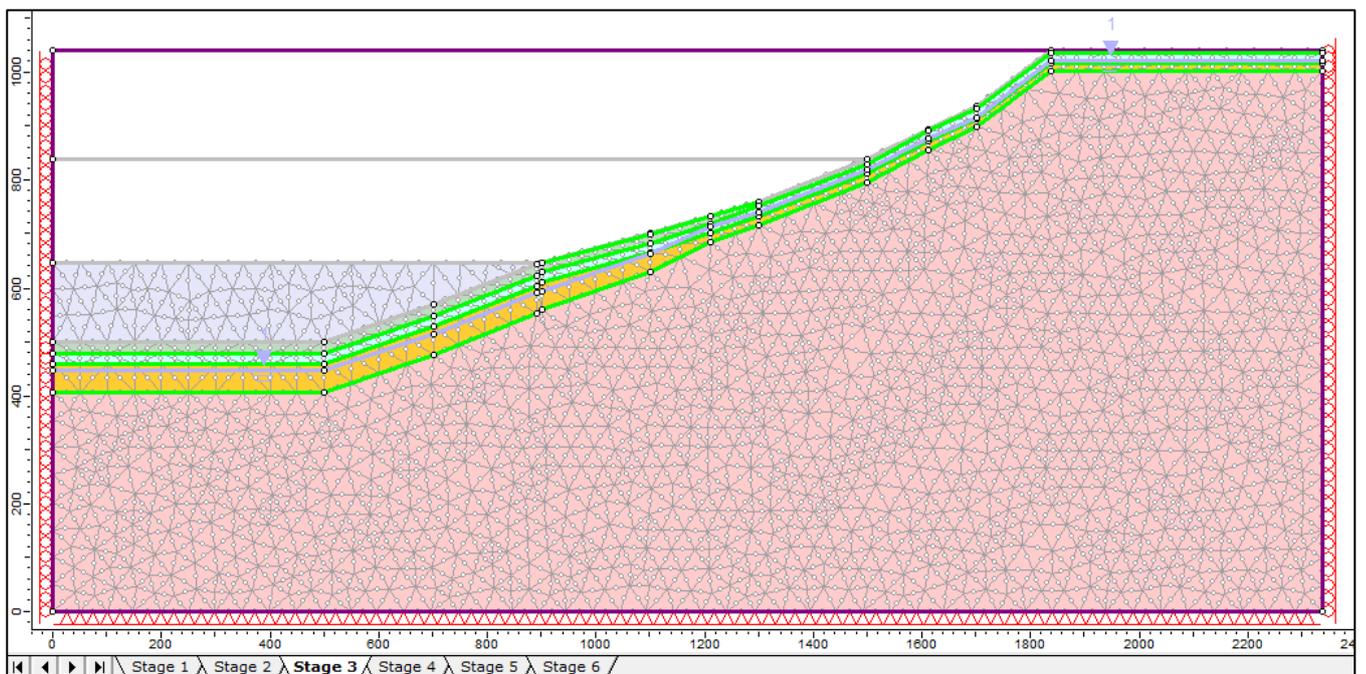


Figura 7.19: Stage 4 del modello ovvero quello caratterizzato dalla terza ed ultima fase di scarico

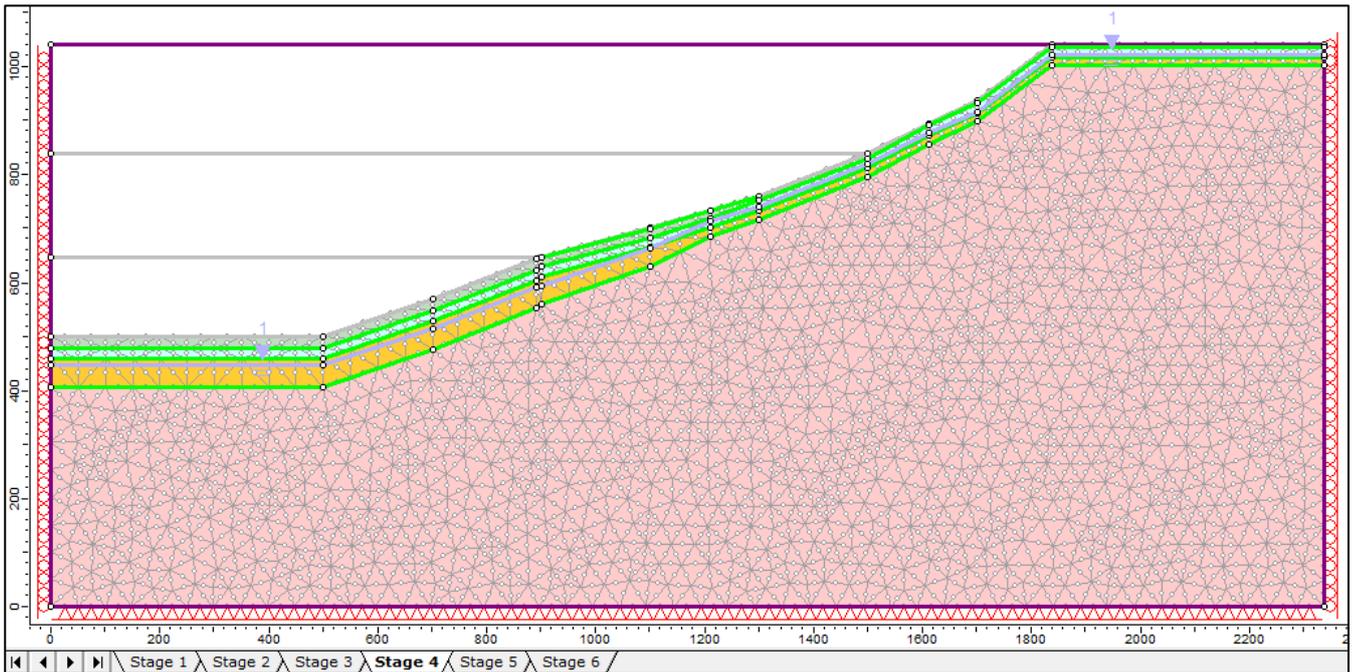


Figura 7.20: Stage 5 del modello ovvero quello in cui si ha il passaggio ad un modello elasto-plastico perfetto

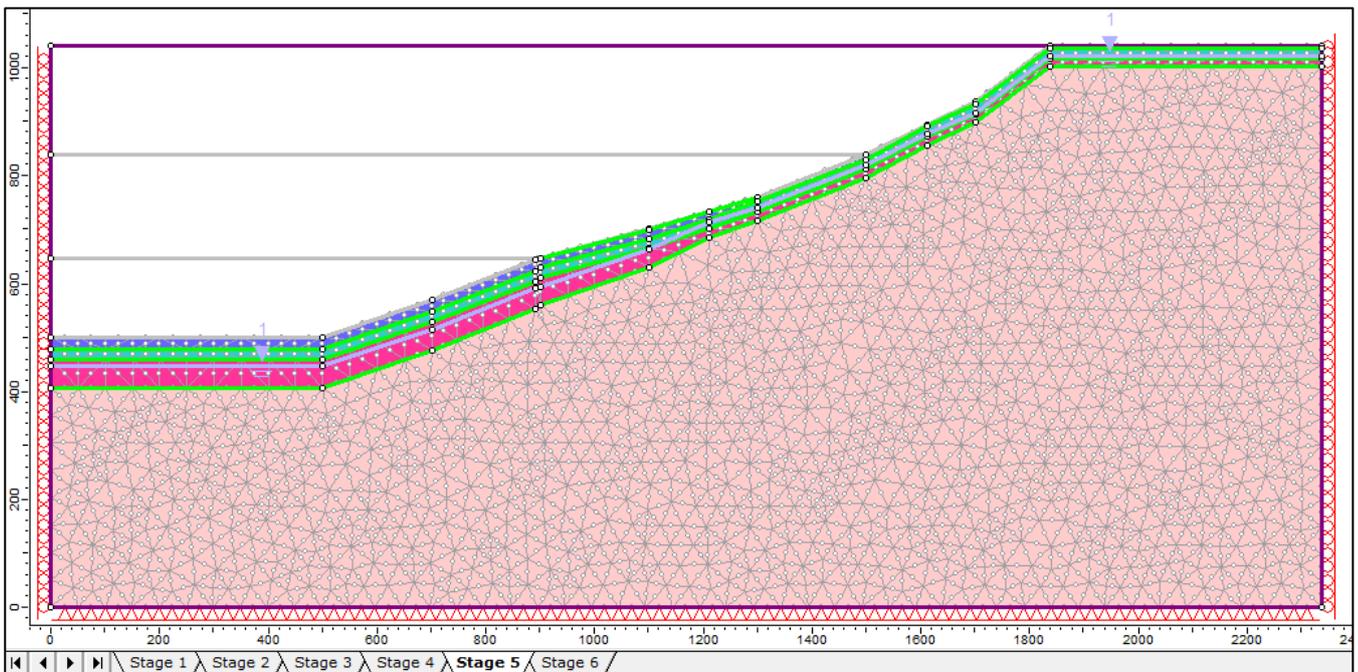
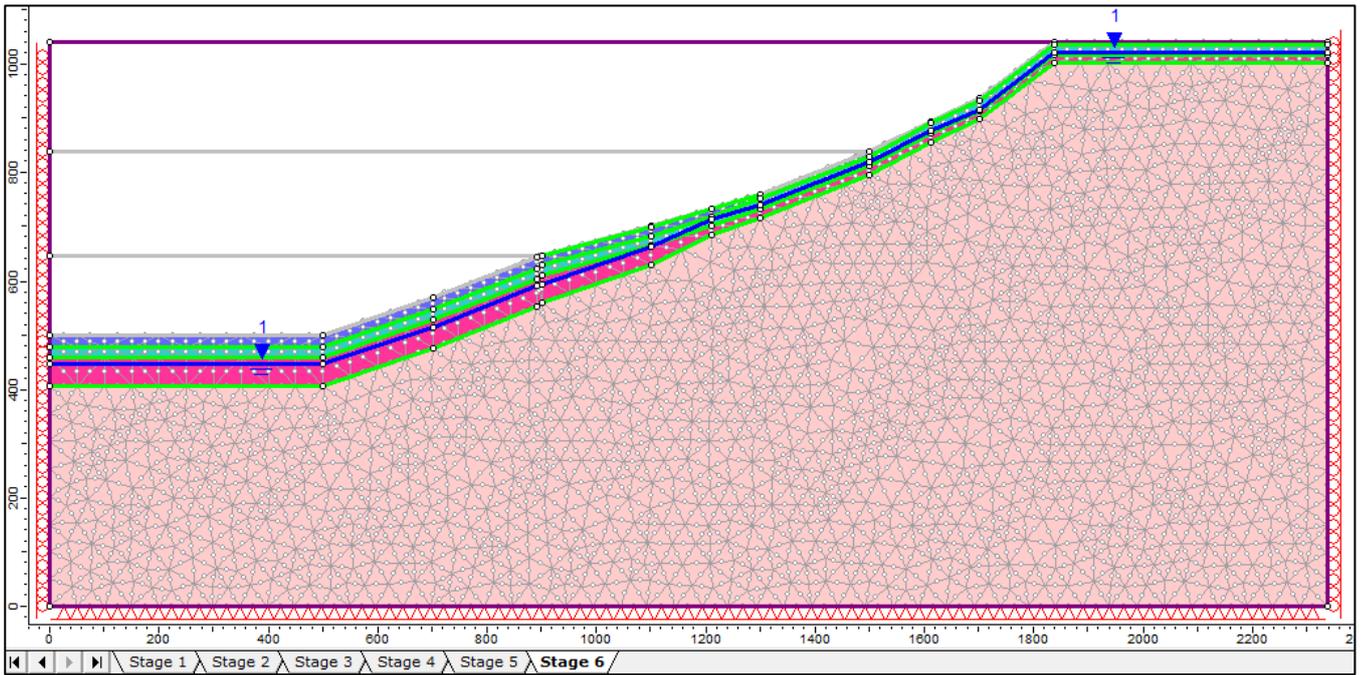


Figura 7.21: Stage 6 del modello ovvero quello caratterizzato dalla presenza della falda



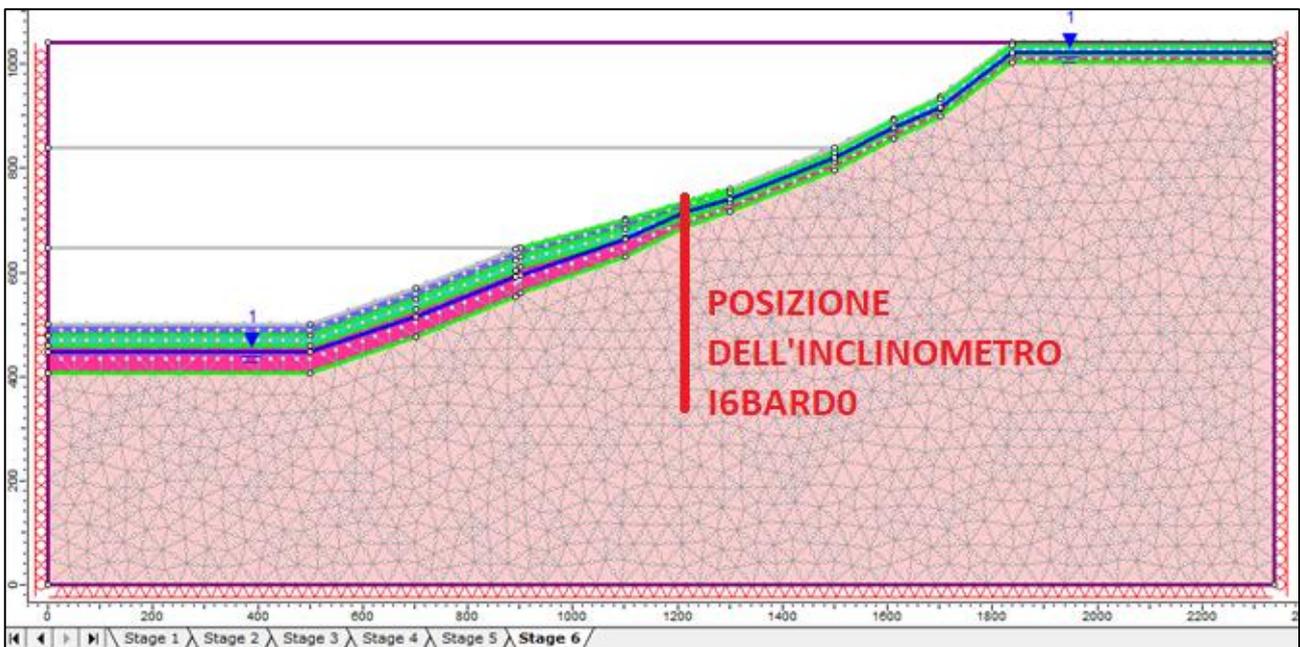
7.4 Back Analysis

Una volta impostato il modello, si è proceduto con l'analisi. Si sono assegnati i parametri meccanici ai materiali e per gli strati di cui non si aveva alcuna conoscenza, si è proceduto ad una loro stima iniziale in base ai dati di letteratura. Si è poi sviluppata un'analisi a ritroso sulla base di due parametri: le deformazioni di taglio e il valore dello spostamento.

L'obiettivo è stato quello di fare in modo che le prime fossero massime alla profondità di circa 24 metri ovvero la profondità alla quale, attraverso l'inclinometro manuale I6BARD0 (la cui posizione nel modello è riportata in Figura 7.22), si è registrata la superficie di scivolamento, mentre il secondo avrebbe dovuto essere coerente con quanto registrato dagli inclinometri.

L'analisi a ritroso è stata basata sull'osservazione che il versante è in evidente equilibrio limite, quindi il fattore di sicurezza globale deve essere prossimo all'unità.

Figura 7.22: Posizione dell'inclinometro di riferimento



Si vuole ricordare che negli stage iniziali si è utilizzata una legge costitutiva elastica dei materiali invece negli stage ultimi si è passati ad una legge costitutiva elastica perfettamente plastica.

Di seguito, in Tabella 7.3, si riportano i parametri ottenuti a seguito della taratura del modello.

In Allegato XII, per completezza, si riportano gli *screenshot* provenienti dal software Rocscience, relativi all'inserimento delle proprietà dei materiali nel modello.

Tabella 7.3: Parametri ottenuti a seguito della taratura del modello

	Modulo Elastico [MPa]	Resistenza a trazione [MPa]	Angolo di attrito [°]	Coesione [MPa]
Strato 1	7	0.0015	20	0.005
Strato 2	38	0.0035	29	0.010
Strato 3	50	0.0120	36	0.030
Strato 4	2700	2.0	37	5.0
Strato 5	30000	8.2	38	20.0

Di seguito si riportano i risultati in termini tensionali e deformativi, relativi all'ultimo stage. In particolare, in Figura 7.23 e in Figura 7.24 si riportano rispettivamente l'andamento delle σ_1 e delle σ_3 che caratterizzano il modello.

Figura 7.23: Variazione delle σ_1 nel modello

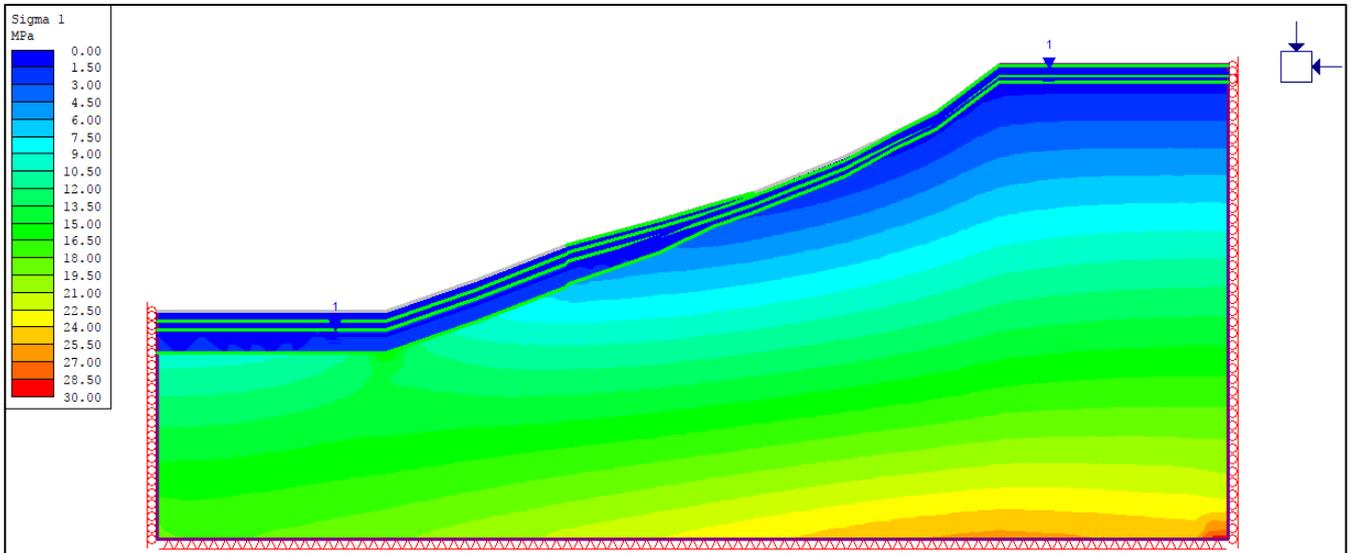
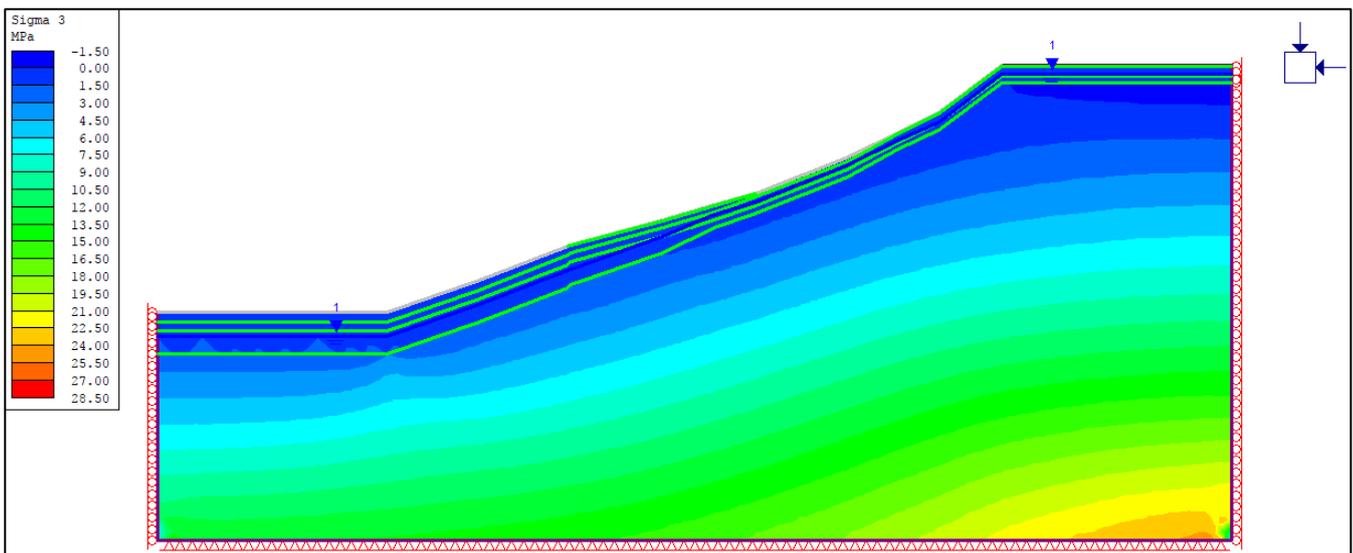


Figura 7.24: Variazione delle σ_3 nel modello



In Figura 7.25 si riporta l'andamento delle massime deformazioni di taglio ed in particolare, in Figura 7.26 si riportano i valori numerici ottenuti in corrispondenza dell'inclinometro la cui posizione è dettagliata in Figura 7.22.

Si osserva che i massimi valori si ottengono ad una profondità vicina ai 24 metri, ovvero quella a cui si è individuata la presenza della superficie di scivolamento, come ci si aspettava in termini teorici.

Figura 7.25: Variazione delle massime deformazioni di taglio

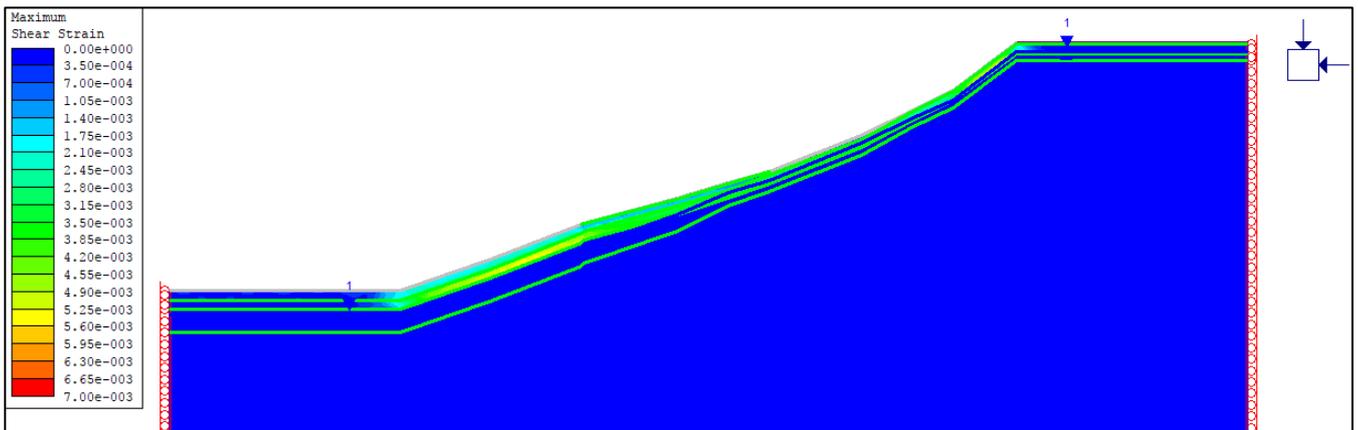
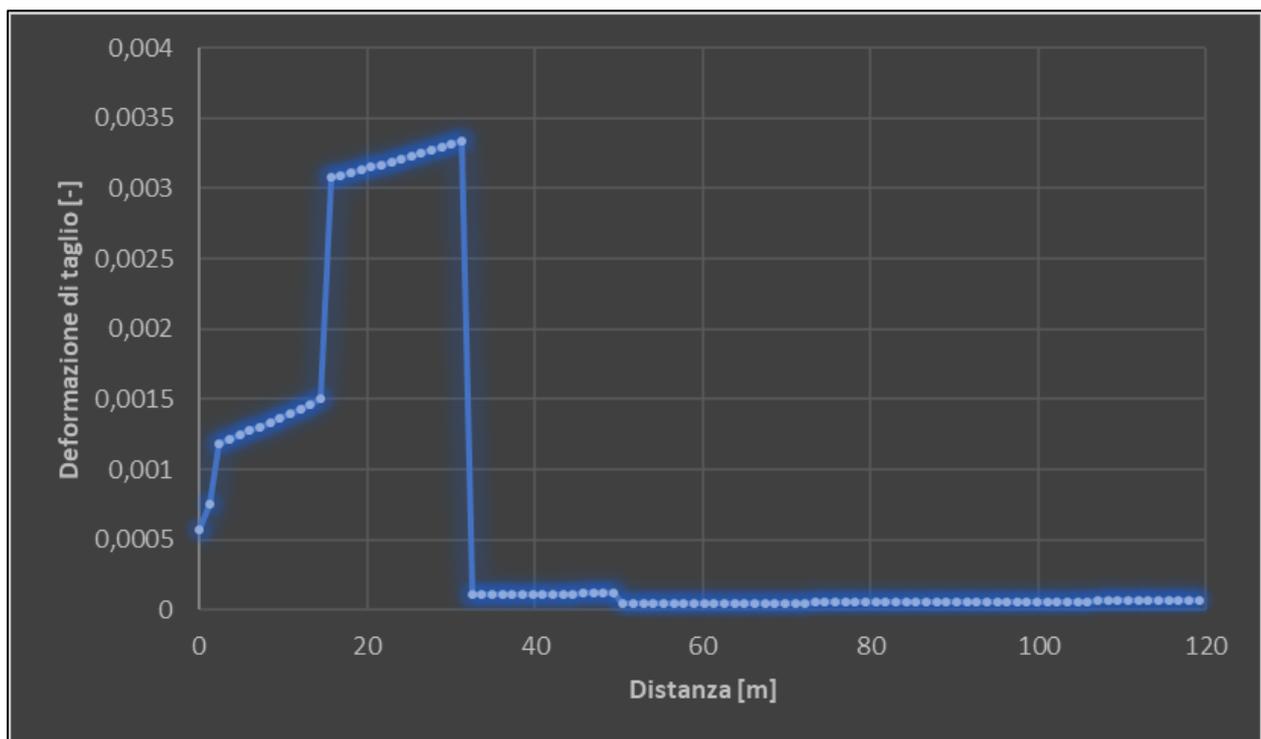


Figura 7.26: Plot relativo alle deformazioni di taglio provenienti dal modello



In Figura 7.27 si riporta l'andamento degli spostamenti determinati dal modello, i quali mostrano una buona concordanza con quelli misurati dall'inclinometro manuale di riferimento.

In Figura 7.28 si riporta il grafico che fornisce, attraverso i valori numerici, i massimi spostamenti ottenuti lungo la posizione dell'inclinometro.

Si nota che gli spostamenti in testa sono coerenti con quanto registrato dallo strumento e che dopo aver raggiunto la profondità relativa alla posizione della superficie di scivolamento, lo spostamento si riduce di notevolmente.

Figura 7.27: Porzione superficiale del modello che registra i massimi spostamenti

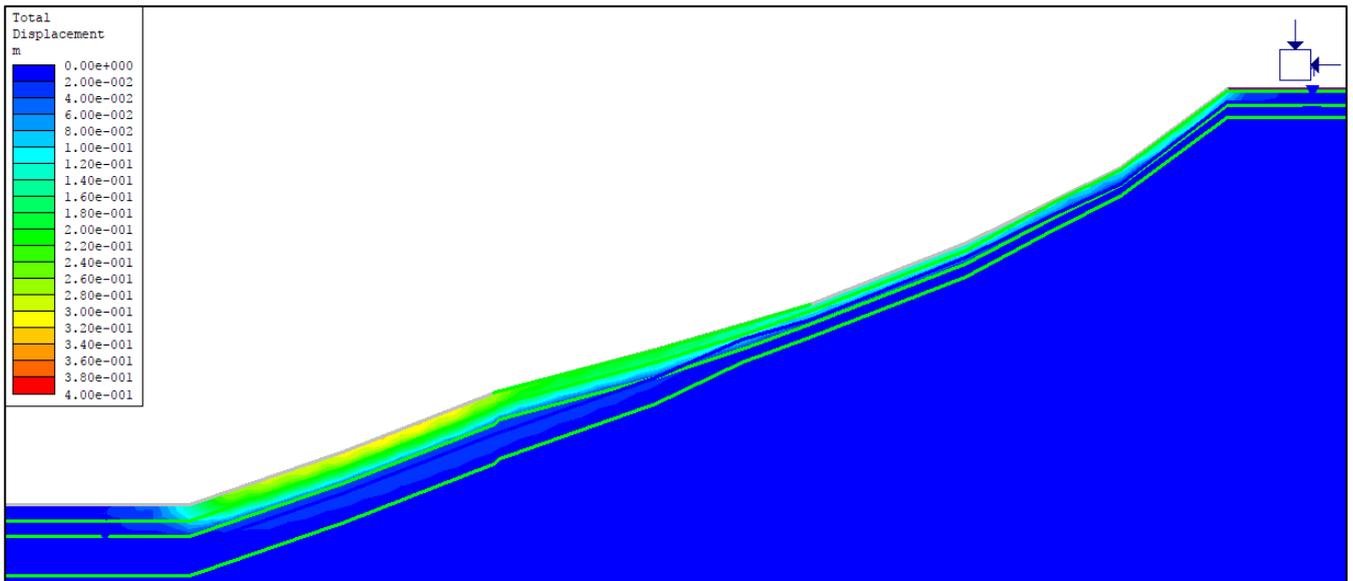
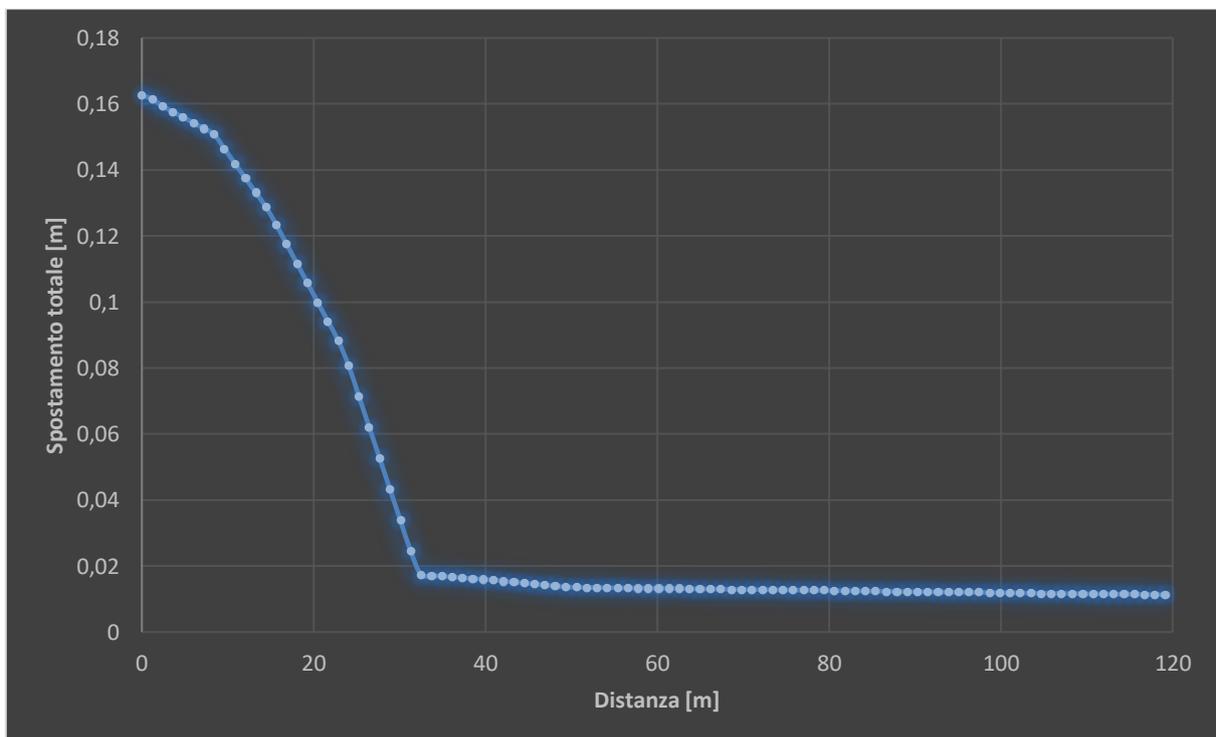


Figura 7.28: Plot relativo ai massimi spostamenti provenienti dal modello



Il fattore di sicurezza FS è definito dal seguente rapporto:

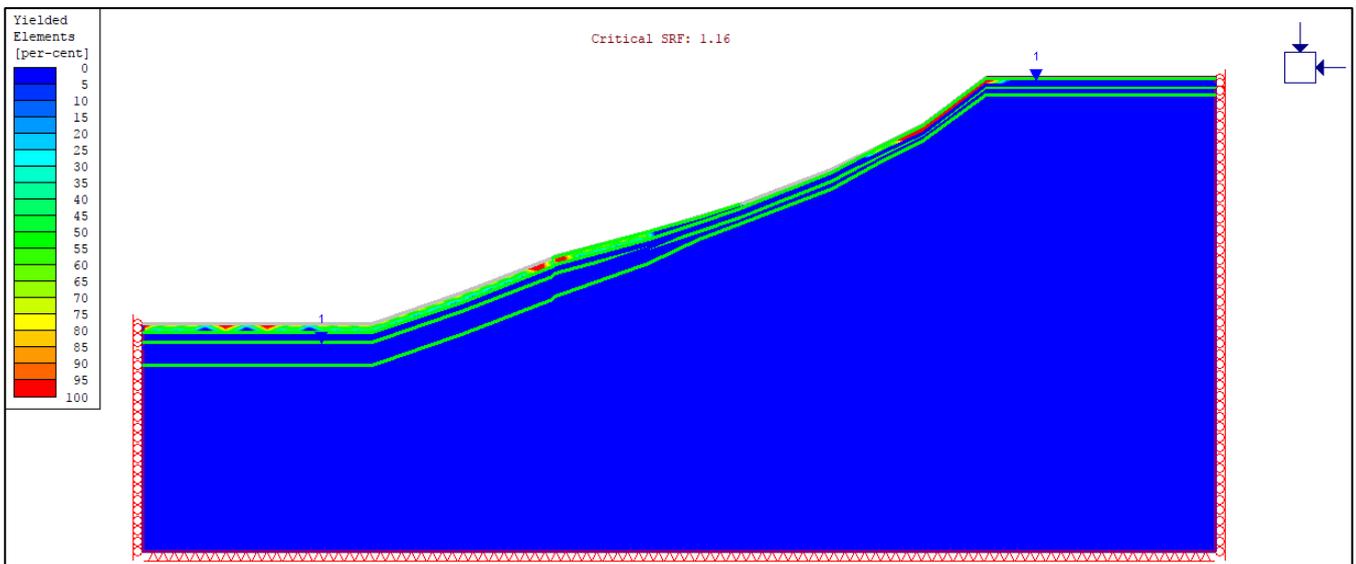
$$FS = \frac{Resistenze}{Azioni}$$

La relazione riportata di seguito è quella utilizzata dal software per giungere al fattore di sicurezza. Vengono prodotte una serie di iterazioni variando di volta in volta il valore del fattore di sicurezza FS posto al denominatore, fino a quando non si raggiunge l'equilibrio limite.

$$Azioni = \frac{Resistenze}{FS} = 1$$

In Figura 7.29 si riporta il risultato proveniente dal software di calcolo che raffigura l'andamento della porzione plasticizzata del modello e il valore del fattore di sicurezza ottenuto, ovvero 1.16. Come giustamente ci si aspettava, la zona plasticizzata è molto superficiale e interessa l'area nella quale si verifica lo spostamento principale. Inoltre, la zona a monte manifesta una marcata plasticizzazione.

Figura 7.29: Zona plasticizzata e valore del fattore di sicurezza ottenuto



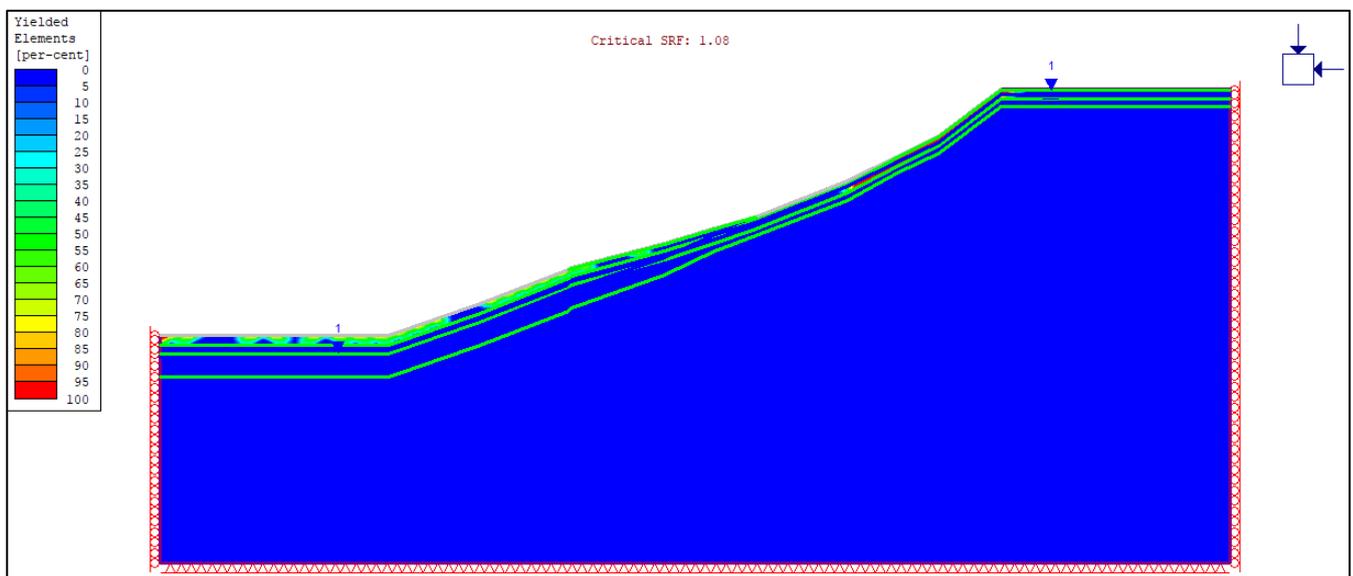
7.5 Analisi previsionali

Un'ultima fase dello studio ha riguardato la messa a punto di due scenari previsionali. Dopo aver verificato che l'escursione massima della falda tra il valore minimo assoluto registrato e quello massimo assoluto registrato è di circa 13 metri, si è scelto di impostare un primo scenario previsionale che è consistito nell'innalzare il livello della falda di un valore medio ovvero 6.5 metri. Il risultato ottenuto, relativo alla zona plasticizzata e al valore del fattore di sicurezza, è riportato di seguito in Figura 7.30.

In particolare, si evince che l'innalzamento della falda influenzi la porzione plasticizzata, soprattutto per quanto riguarda la zona del modello che si trova a monte.

In questa prima analisi previsionale la zona plasticizzata è più estesa rispetto a quanto mostrato in Figura 7.29. In queste condizioni, il fattore di sicurezza raggiunto è 1.08, come riportato in Figura 7.30.

Figura 7.30: Zona plasticizzata e valore del fattore di sicurezza ottenuto a seguito dell'innalzamento della falda

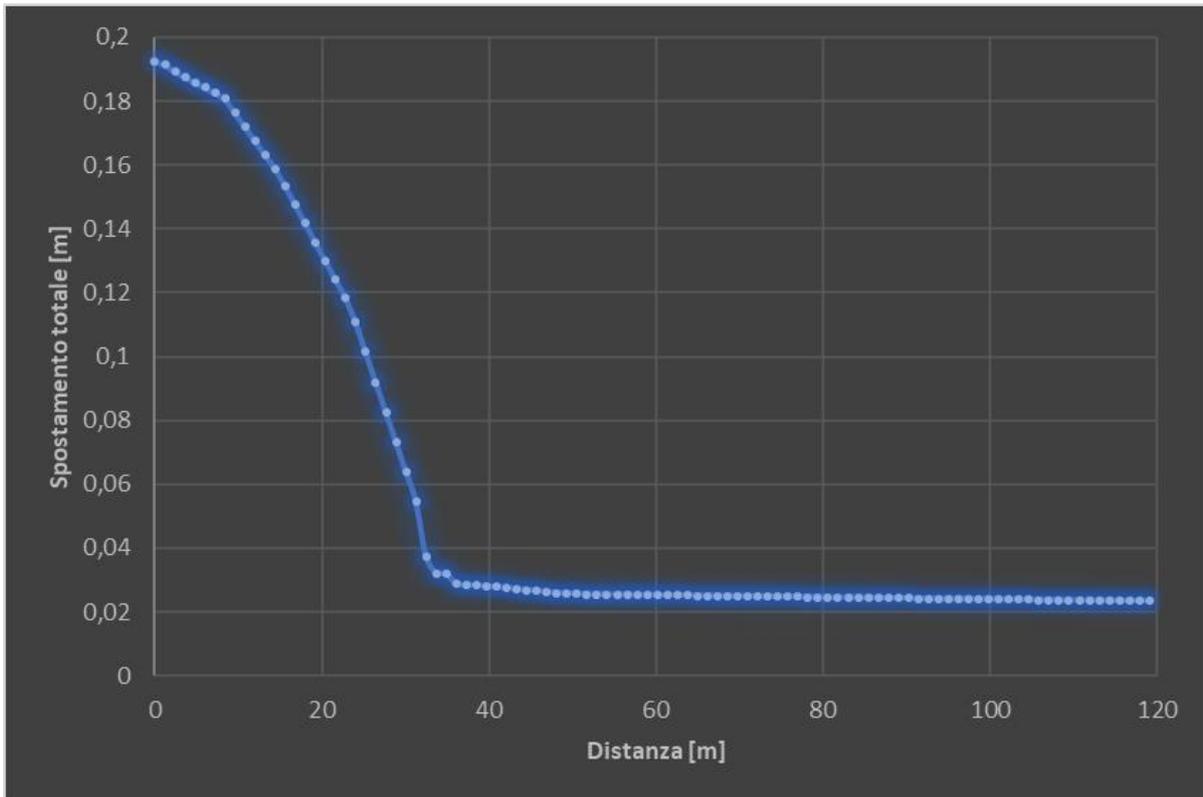


In Figura 7.31 si riporta il grafico che fornisce, attraverso i valori numerici, i massimi spostamenti ottenuti lungo la posizione dell'inclinometro.

Si evince che l'innalzamento della falda influenza soprattutto gli spostamenti degli strati più superficiali, ovvero quelli con caratteristiche meccaniche più scadenti.

Gli strati sottostanti, invece, caratterizzati da migliori proprietà meccaniche, vengono influenzati in modo trascurabile.

Figura 7.31: Plot relativo ai massimi spostamenti provenienti dal modello



Si procede nel seguito con il secondo ed ultimo scenario previsionale in cui si considera un innalzamento della falda pari a 13 metri.

È chiaro che la probabilità che costantemente la falda mantenga questo livello è molto bassa.

In Figura 7.32 si evince come la zona plasticizzata proveniente da monte, sia più estesa rispetto ai casi precedenti a dimostrazione che il livello della falda influenza in modo non trascurabile la plasticizzazione del materiale.

Nel caso studio in esame si verifica l'instabilità ed infatti si ottiene un fattore di sicurezza pari a 0.72, come riportato in Figura 7.32.

In Figura 7.33 si riporta infine il grafico relativo ai massimi spostamenti ottenuti lungo la posizione dell'inclinometro. Si evince che l'innalzamento della falda continua ad influenzare gli strati più superficiali, ovvero quelli più scendenti in termini di proprietà meccaniche.

Gli strati inferiori più resistenti, questa volta vengono influenzati in modo più marcato rispetto al modello previsionale precedente ma comunque si raggiungono spostamenti trascurabili.

Figura 7.32: Zona plasticizzata e valore del fattore di sicurezza ottenuto a seguito dell'innalzamento della falda

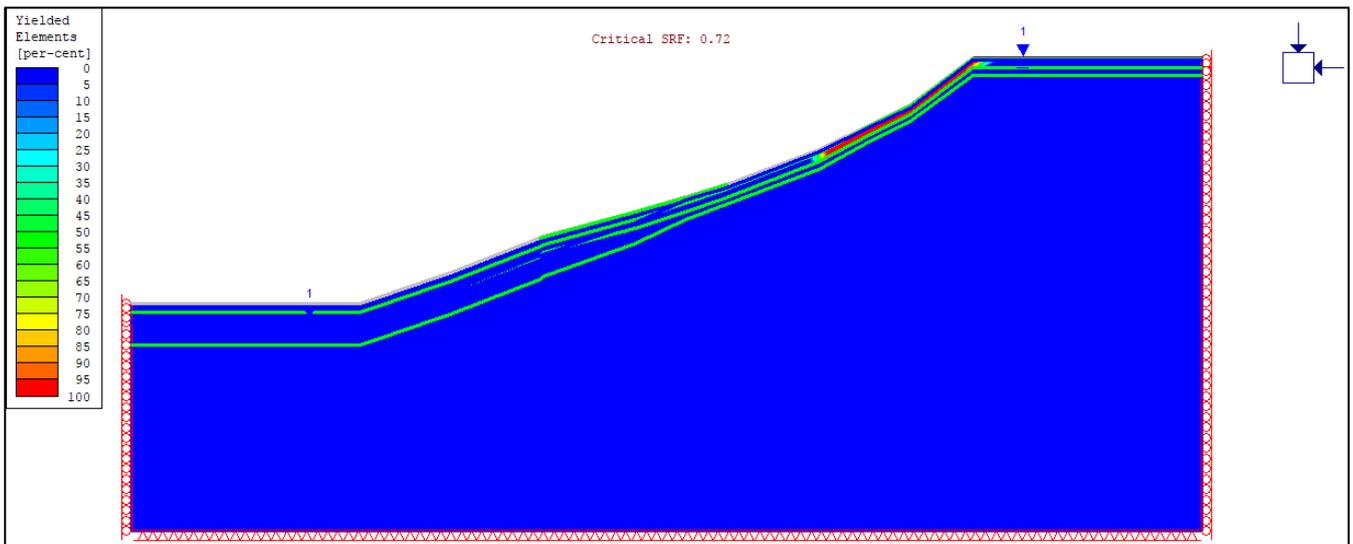
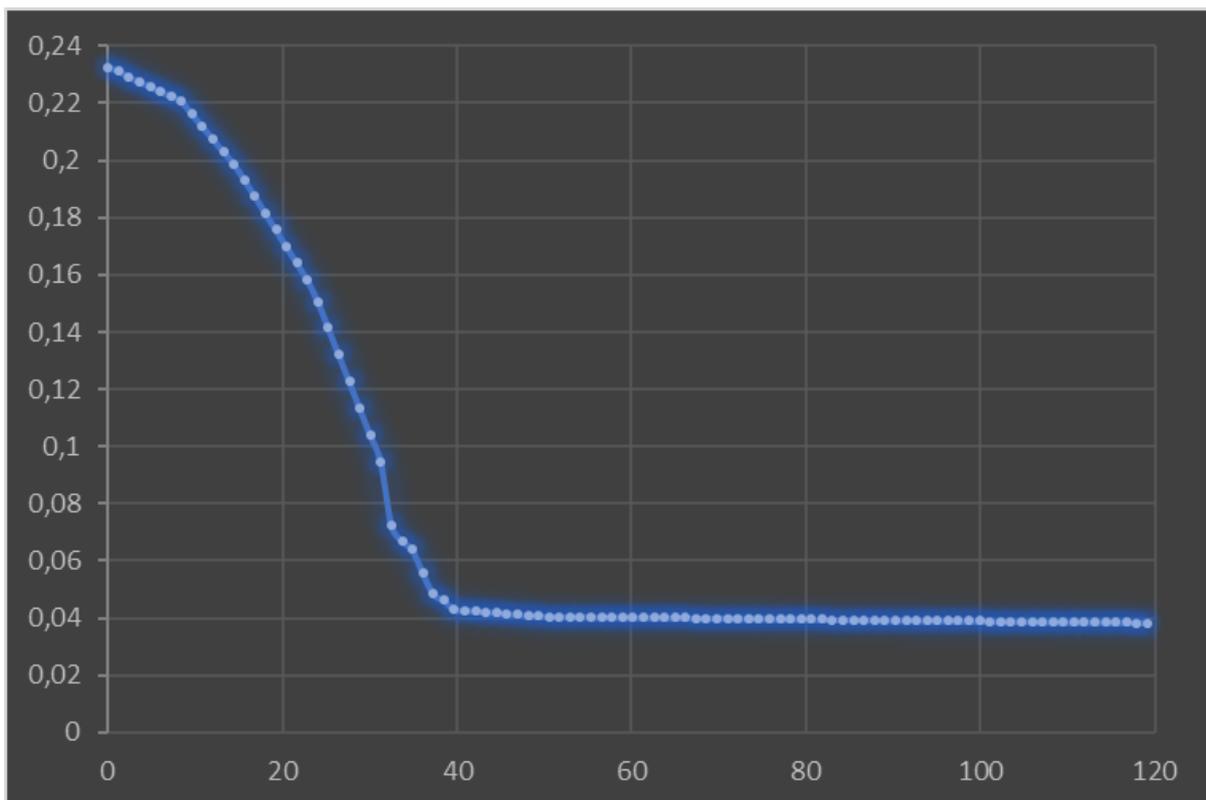


Figura 7.33: Plot relativo ai massimi spostamenti provenienti dal modello



8. Conclusioni

I tre siti analizzati hanno manifestato una evidente relazione tra il dato piezometrico e quello inclinometrico e dunque si è dimostrata l'effettiva influenza del livello di falda sugli spostamenti.

Generalmente, si può affermare che il livello della falda giochi un ruolo chiave sulle accelerazioni raggiunte e sugli spostamenti accumulati dai siti.

Attraverso le analisi dei dati, si è giunti alla ulteriore conclusione che le aree in frana con caratteristiche idrogeologiche differenti, si comportano in modo diverso ma, in particolare, può accadere che un sito cambi il proprio comportamento nel tempo.

Può verificarsi infatti che un innalzamento del livello di falda già registrato in passato, produca delle piccole accelerazioni ma da un certo punto in poi, in termini temporali, il medesimo incremento del livello della falda può portare ad avere delle accelerazioni improvvise e marcate e da qui si deduce quanto sia importante il monitoraggio continuo sui versanti instabili.

Si è inoltre proceduto alla realizzazione di un'analisi agli elementi finiti di uno dei siti analizzati e dopo aver reperito i parametri caratteristici degli orizzontamenti costituenti il modello attraverso la Back Analysis, si sono valutati gli effetti prodotti dalla variazione del livello della falda verificando le zone plasticizzate e il fattore di sicurezza.

A tal proposito, sono state implementate due analisi previsionali le quali hanno messo in evidenza il marcato decadimento del fattore di sicurezza all'aumentare del livello della falda e inoltre si è osservata una maggiore estensione della zona di materiale soggetta a plasticizzazione.

9. Bibliografia

- Govi M. (1979), *L'assetto geomorfologico nella valutazione dei rischi connessi ad eventi idrologici estremi*, seminario su "La Pianificazione di Bacino", luglio 1979, Genova;
- Regione Piemonte, CNR-IRPI Torino & CSI Piemonte (1990), *Banca Dati Geologica*, maggio 1990.
- Regione Piemonte, *Archivio della Banca Dati Geologica*. Settore Studi e Ricerche Geologiche – Sistema Informativo Prevenzione Rischi.
- Tropeano D. (1989), *Eventi alluvionali e frane nel bacino della Bormida. Studio retrospettivo*. Associazione Mineraria Subalpina.
- AA.VV. (1997), *Ieri...Oggi...Forse Domani...La sicurezza delle città!*. Circoscrizione Alessandria Nord, Grafiche Macaluso.
- AA.VV. (s.d.), *Meteorological Events and Natural Disasters*. Report CEC field mission in Piedmont (Northern Italy), ENEA – Consorzio Civita.
- Luino F., Ramasco M., Susella G. (1993), *Atlante dei centri abitati instabili Piemontesi*.
- AA.VV. (1996), *Landslides Investigation and mitigation*, Special Report 247 – Transportation Research Board, National Research Council – Nat. Acad. Press. Washington D.C.
- Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach P. (1991), *GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*, Earth surface processes and landforms, vol. 5.
- Catenacci V. (1993), *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Servizio Geologico Nazionale, Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, Volume XLVII, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- De Lotto P., Frassoni A. (1996), *Geotechnical description in Meteorological Events and Natural disasters*, Edited by Casale e Margottini.
- Hutchinson J.N. (1988), *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology* (General Report). Proc. Of the V Int. Symp. on Landslides, Lausanne, ed. Bonnard C., Balkema.
- Regione Piemonte (1995), *Linee guida per le reti di controllo topografico*. Settore Progettazione Interventi Geologico-Tecnici e Sismico.
- Regione Piemonte (s.d.), Schede SIFRAP dei siti in frana – Arpa Piemonte.
- Varnes D.J. (1978), *Slope movements types and processes*, in Schuster R.L. & Krizek R.J. Ed., "Landslides, analysis and control". Transportation Research Board Sp. Rep. No. 176, Nat. Acad. Of Sciences, Washington.
- Regione Piemonte (s.d.), Sondaggi delle aree in frana – Arpa Piemonte.
- Pirulli, M. (2017). Materiale didattico del corso di Stabilità dei pendii. Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino;
- Suter Sardo P., Berretta G.P., De Luca D.A. & Masciocco L. (1996), *Frane superficiali innescatesi nei dintorni di Ceva in conseguenza dell'evento meteorologico del novembre 1994*. CNR – Convegno internazionale "La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica", Alba.
- Claps, P. (2015). Materiale didattico del corso di Idrologia. Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino;
- Piccioni C., Ramasco M. (1997), *Gli scivolamenti planari nel territorio delle Langhe piemontesi attivati durante l'evento del 4-6 novembre 1994*. Scala 1:10.000. Regione Piemonte, Settore Prevenzione del Rischio Geologico, Meteorologico e Sismico – Banca Dati Geologica.

- Pegoraro C. (1998), *Studio propedeutico alla valutazione della pericolosità geologica inerente all'instabilità dei versanti mediante tecniche GIS ed approccio statistico multivariato*, Rapporto finale stage, Corso di Specializzazione Post Lauream in Sistemi Informativi Territoriali, COREP-GISFORM, Torino.
- Govi M. (1985), The instability processes induced by meteorological events. An approach for hazard evaluation in the Piedmont region (NW Italy). C.N.R.-P.A.N. Meeting in "Process in mass movements and sediment transport studies", Torino.
- Moser M. & Hohensinn F. (1982 – 1983), *Geotechnical aspects of soil slip in the Alpine regions*, Engineering Geology.
- APAT, Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (2006) - *Manuale e linee guida, Fenomeni di dissesto geologico – idraulico sui versanti*.
- Ferruccio Cestari (2005), *Prove geotecniche in sito* – Editore Geo-Graph-Segrate, Edizione terza.
- Mappa interattiva Geoportale Arpa Piemonte (webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/).
- Software RocScience versione 8.0 (<https://rocscience.com/company>).
- Applicativo Meteoweb scaricabile dal portale di Arpa Piemonte (www.arpa.piemonte.gov.it).

10. Allegati

10.1 Allegato I: dati pluviometrici e di temperatura relativi al sito di Bardonecchia

Figura 10.1: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2004

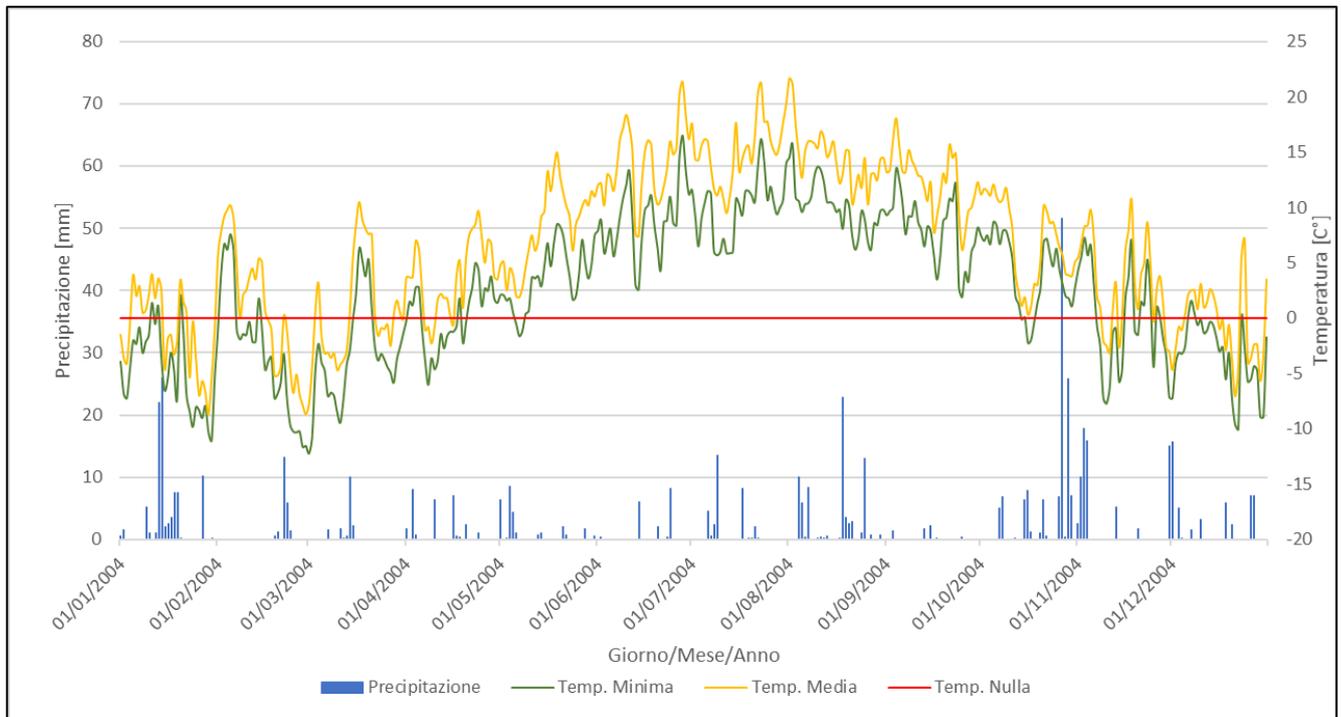


Figura 10.2: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2005

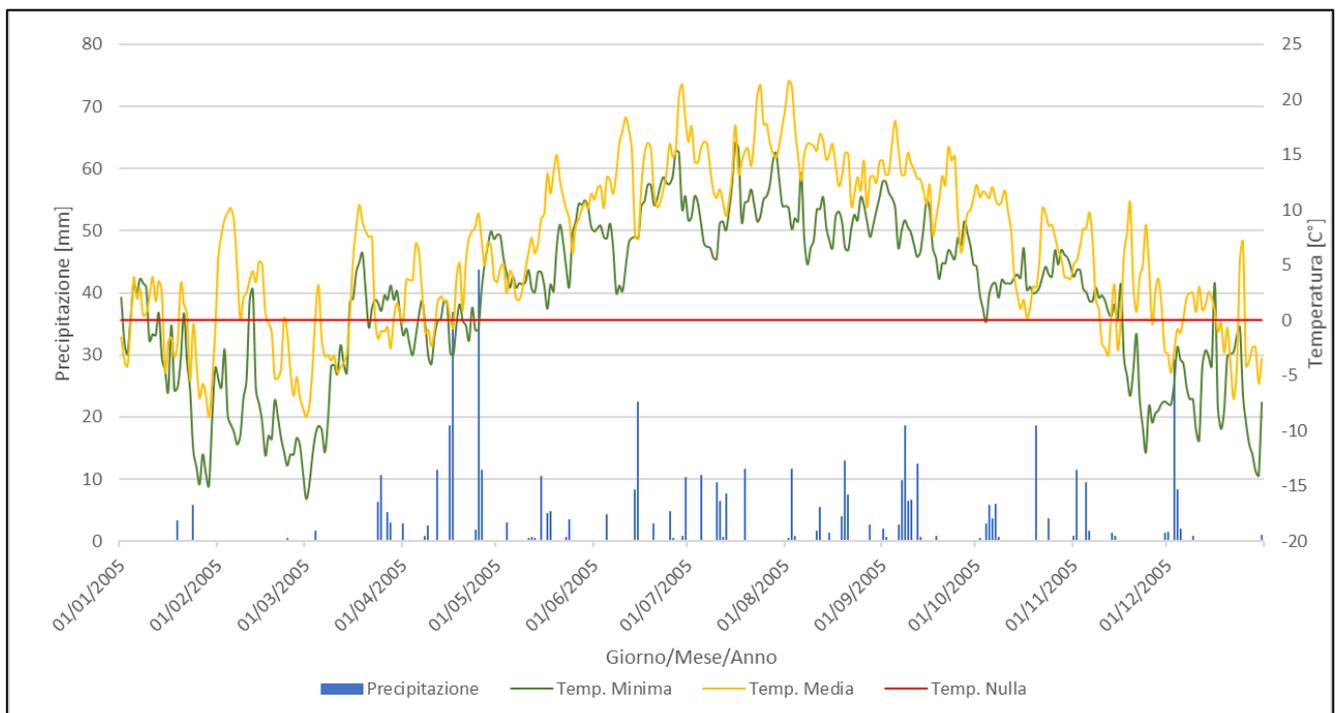


Figura 10.3: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2006

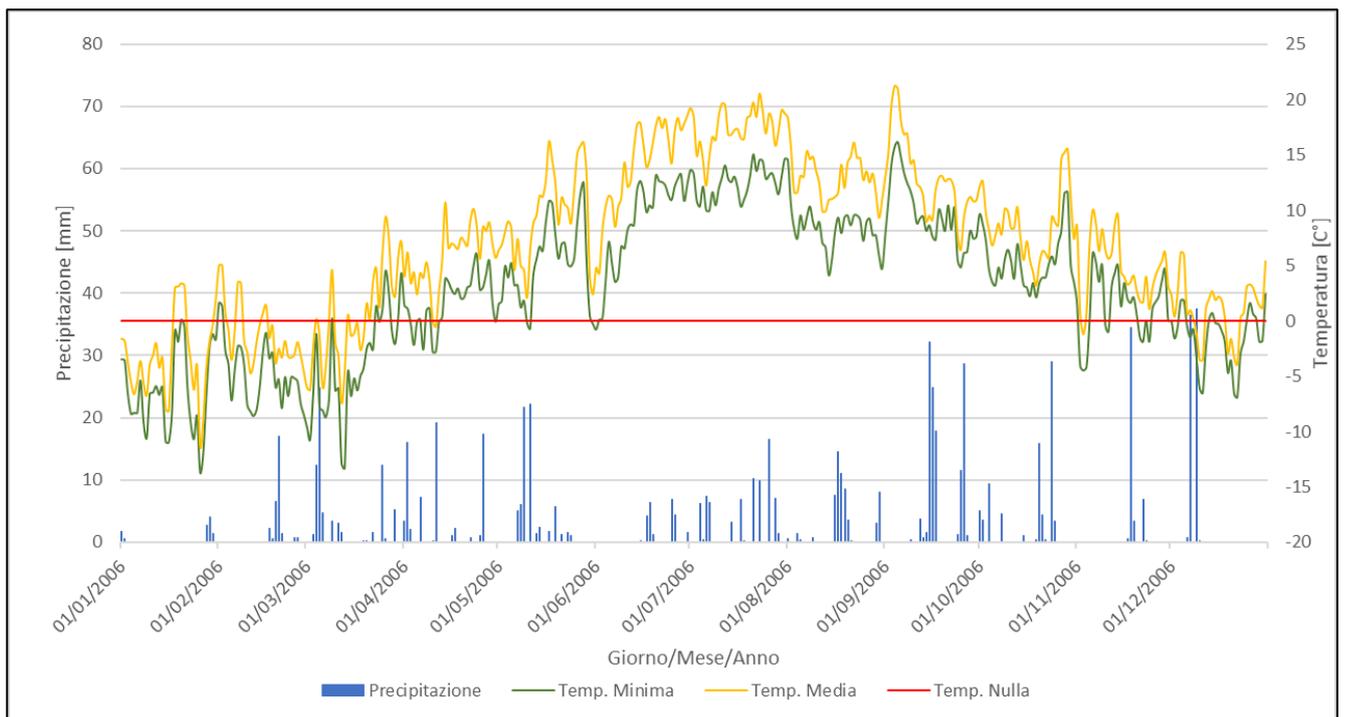


Figura 10.4: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2009

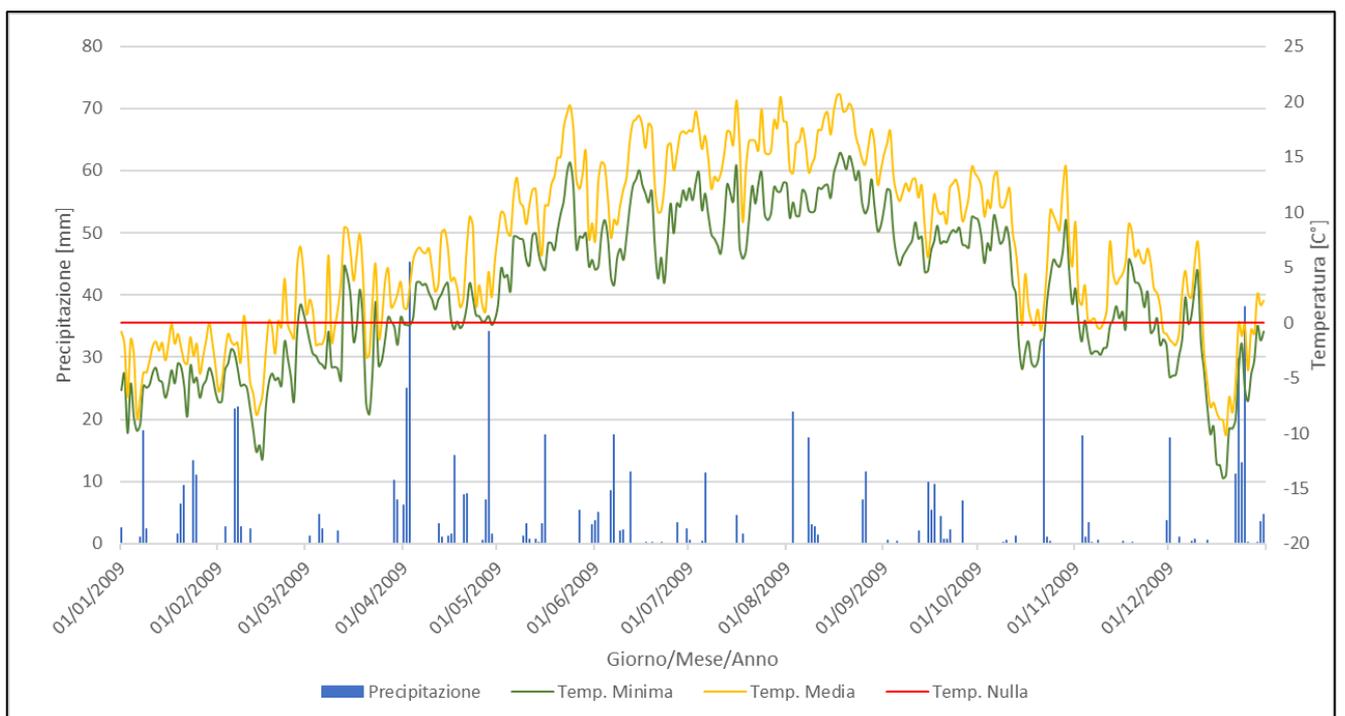


Figura 10.5: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2010

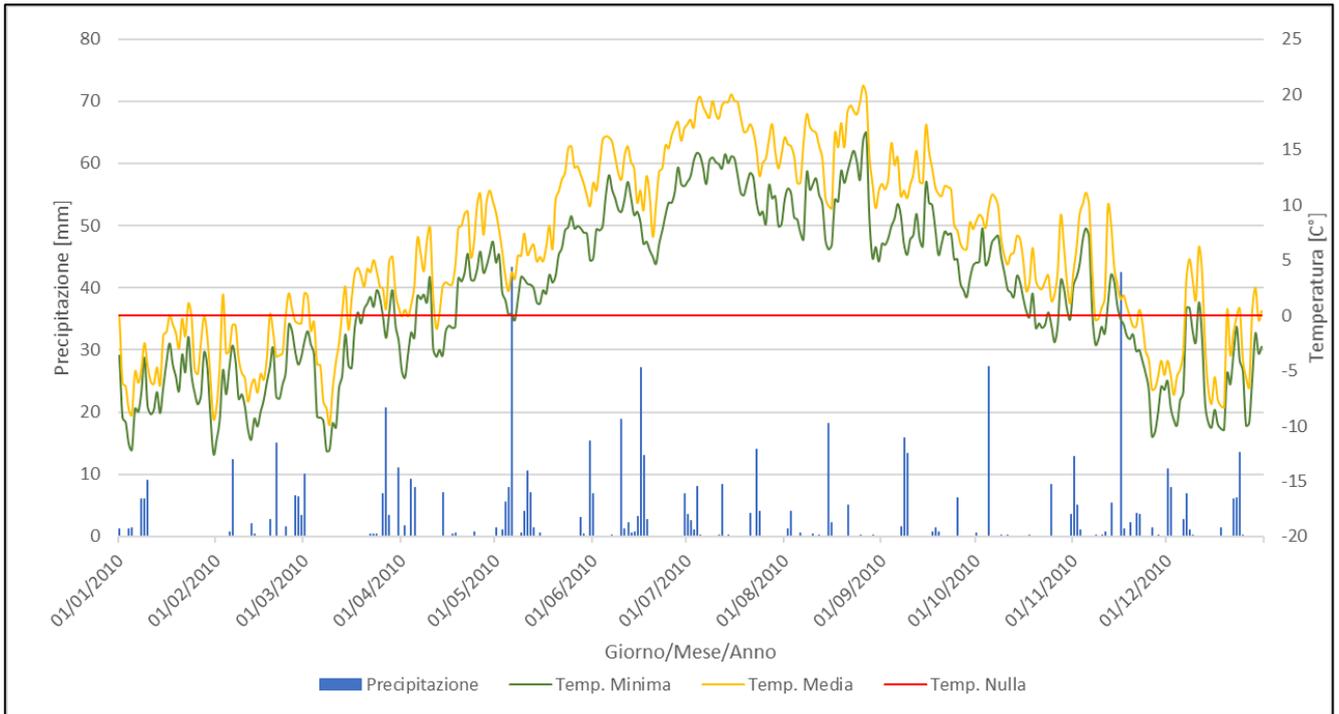


Figura 10.6: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2011

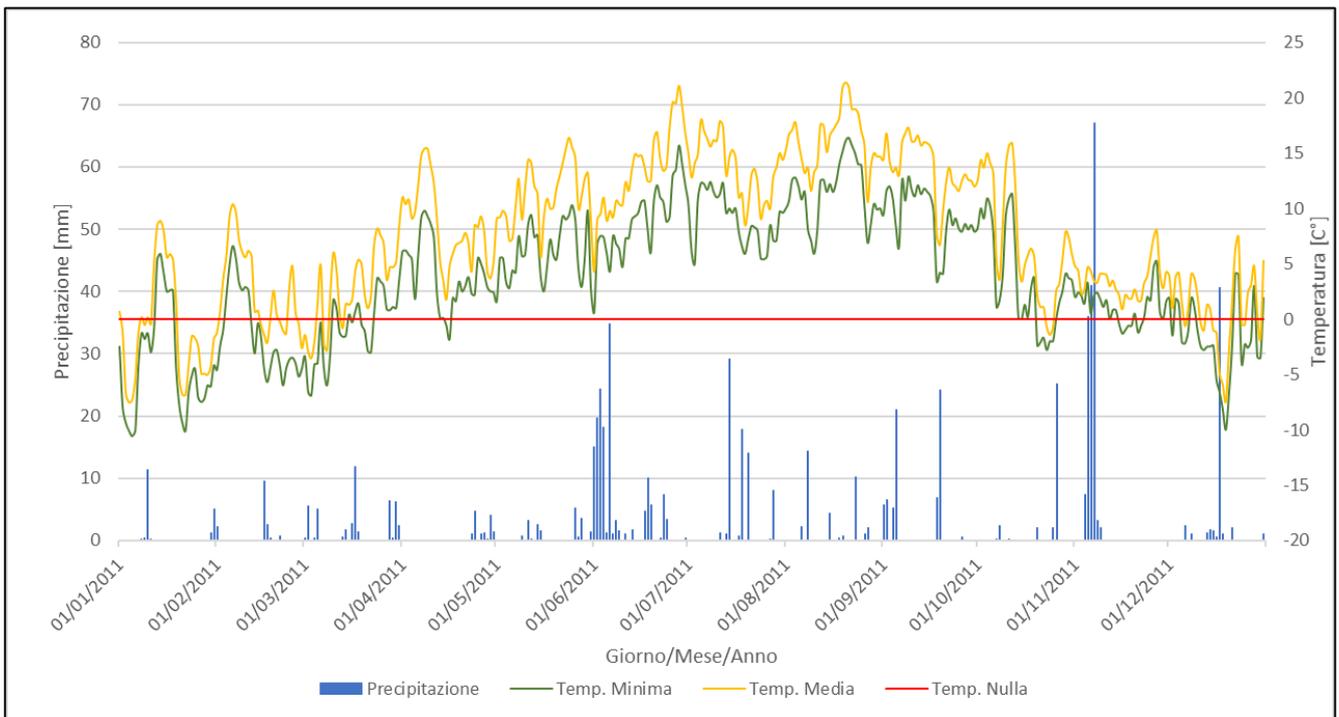


Figura 10.7: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2012

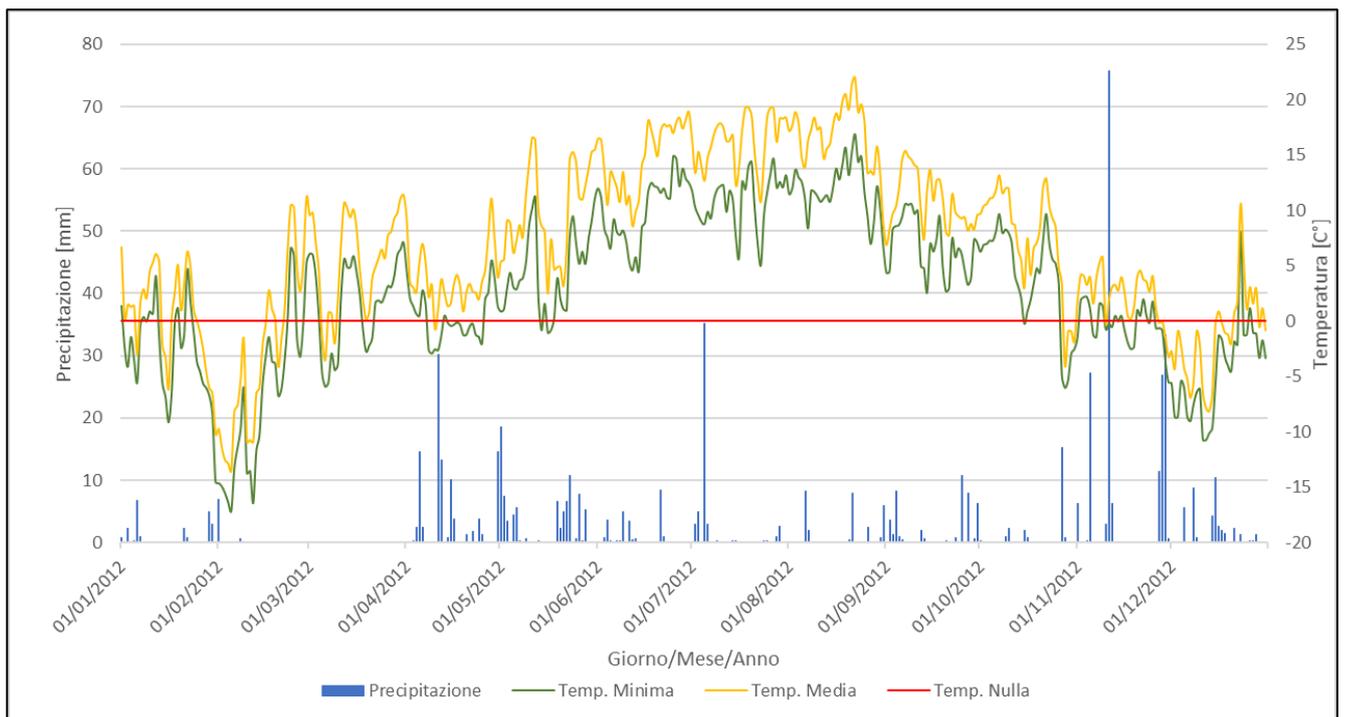


Figura 10.8: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2013

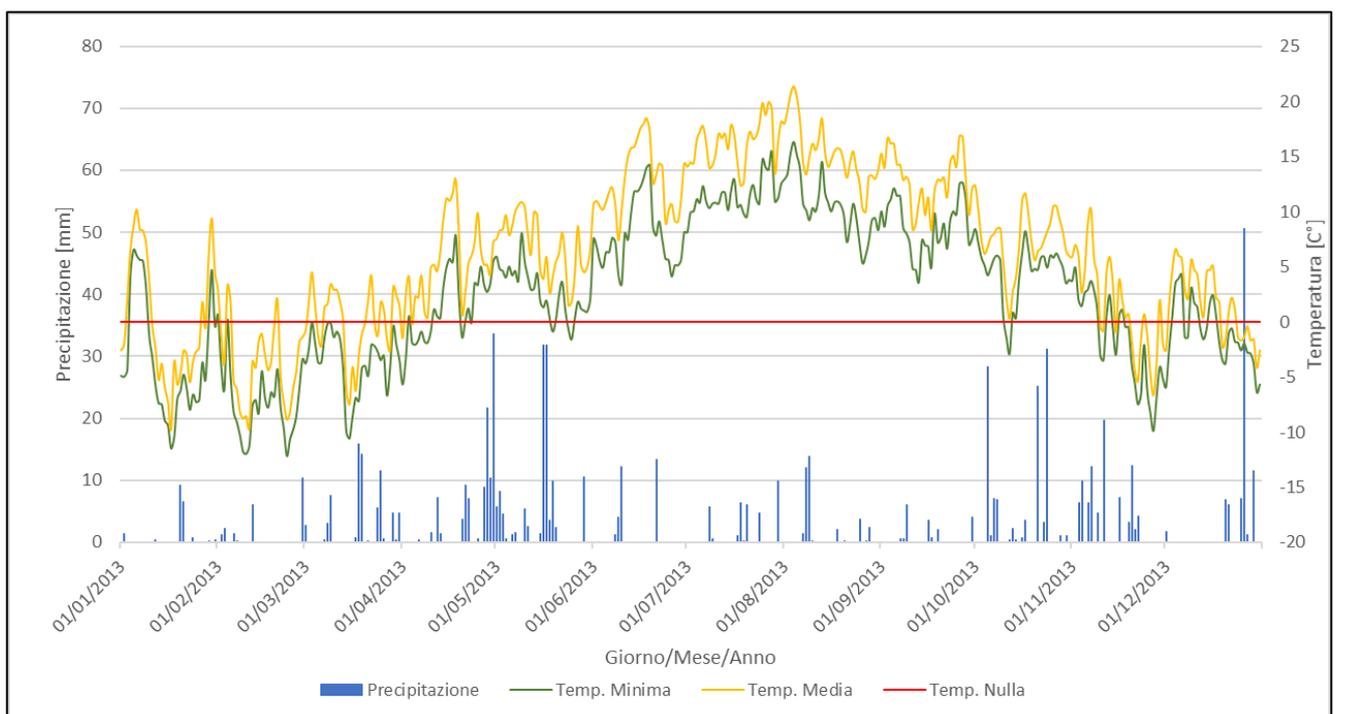


Figura 10.9: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2014

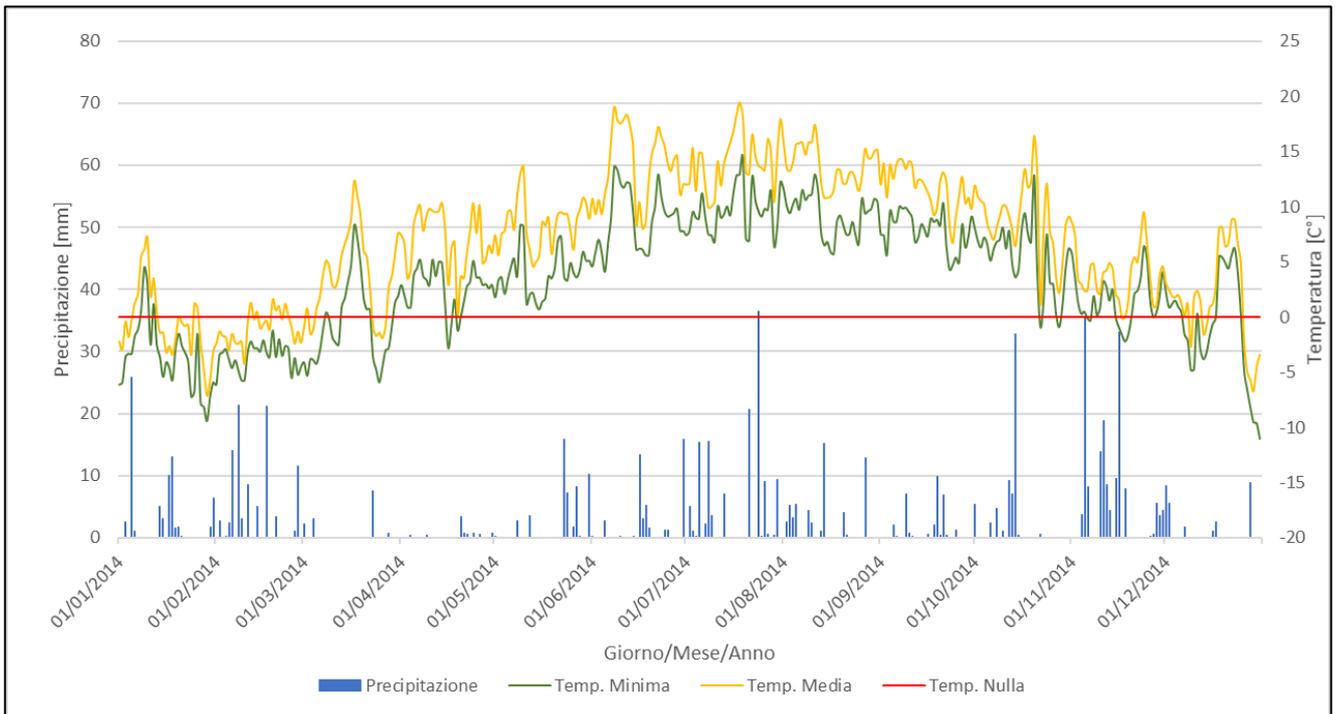


Figura 10.10: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2015

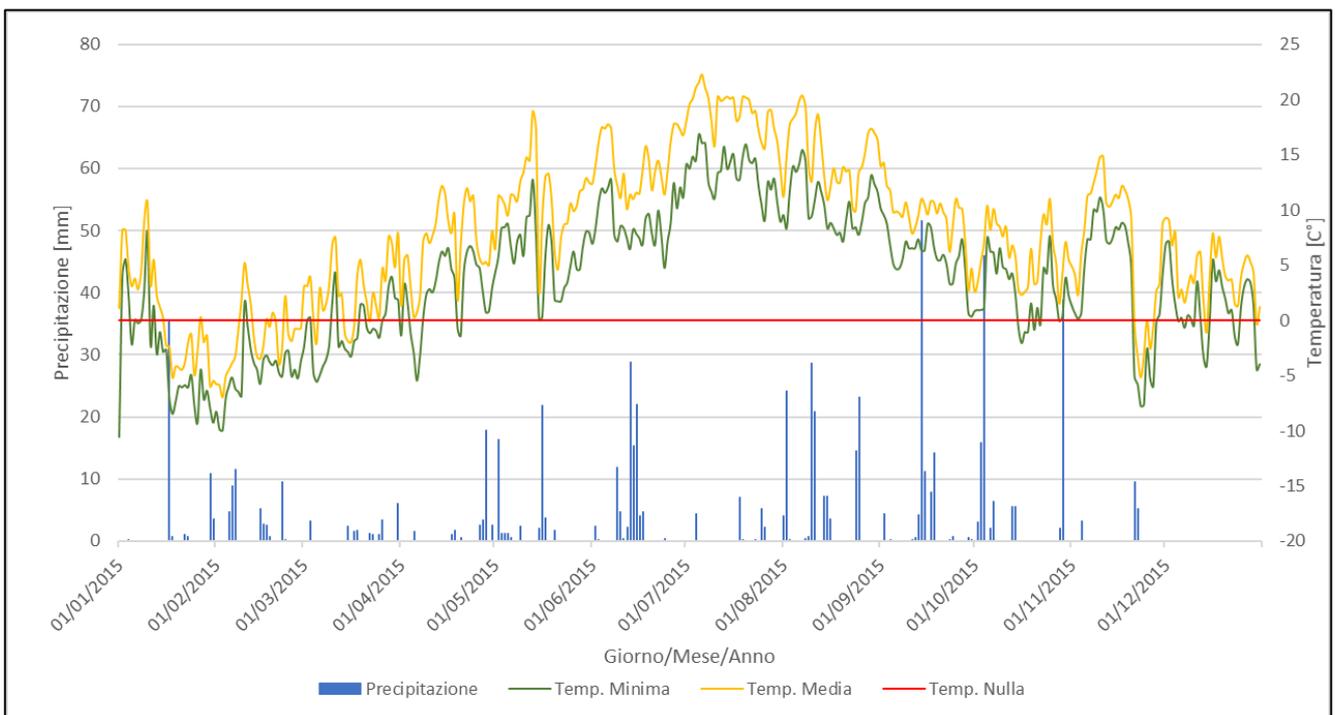
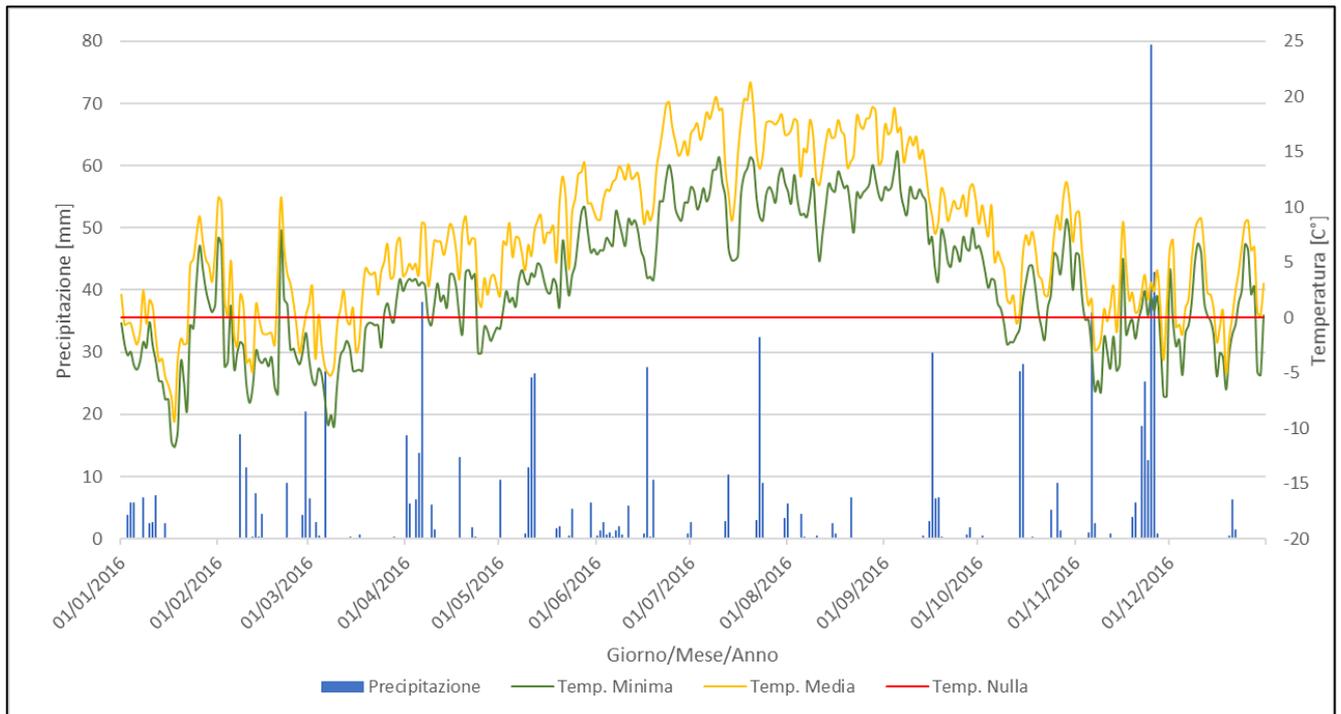


Figura 10.11: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2016



10.2 Allegato II: dati pluviometrici e di temperatura relativi al sito di Sestriere

Figura 10.12: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2004

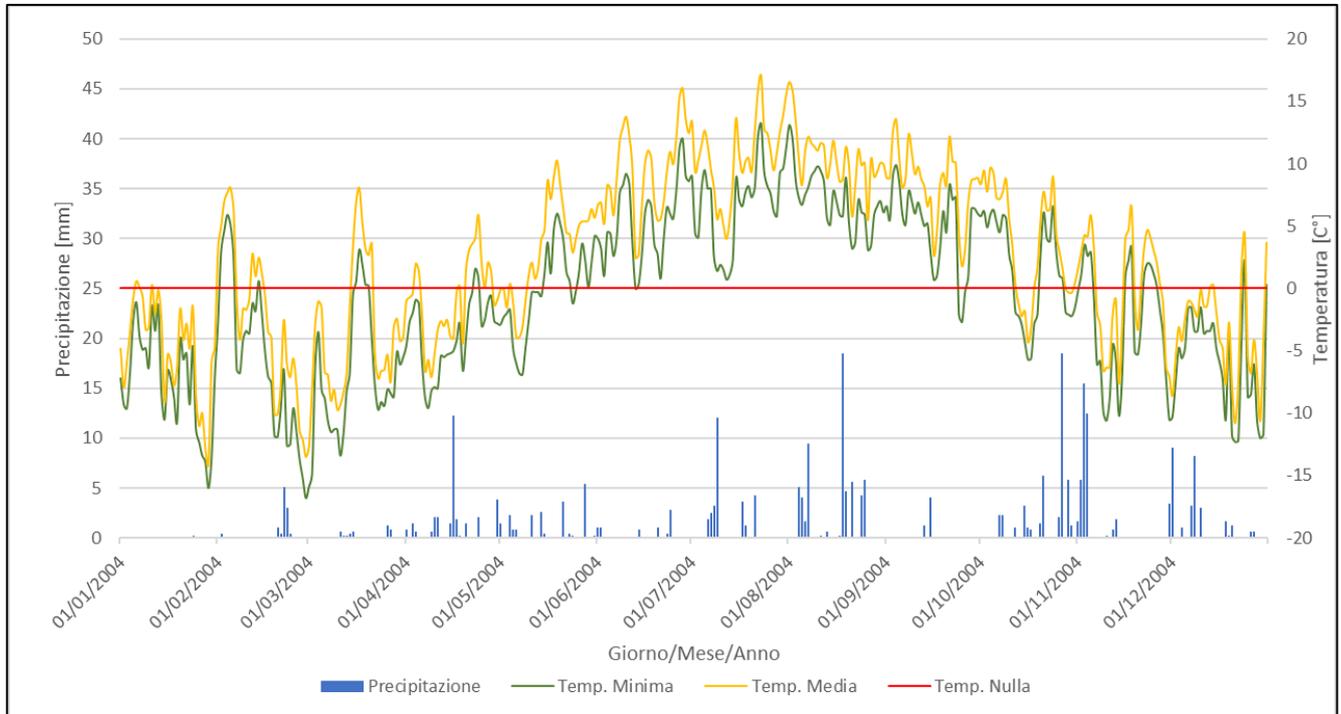


Figura 10.13: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2005

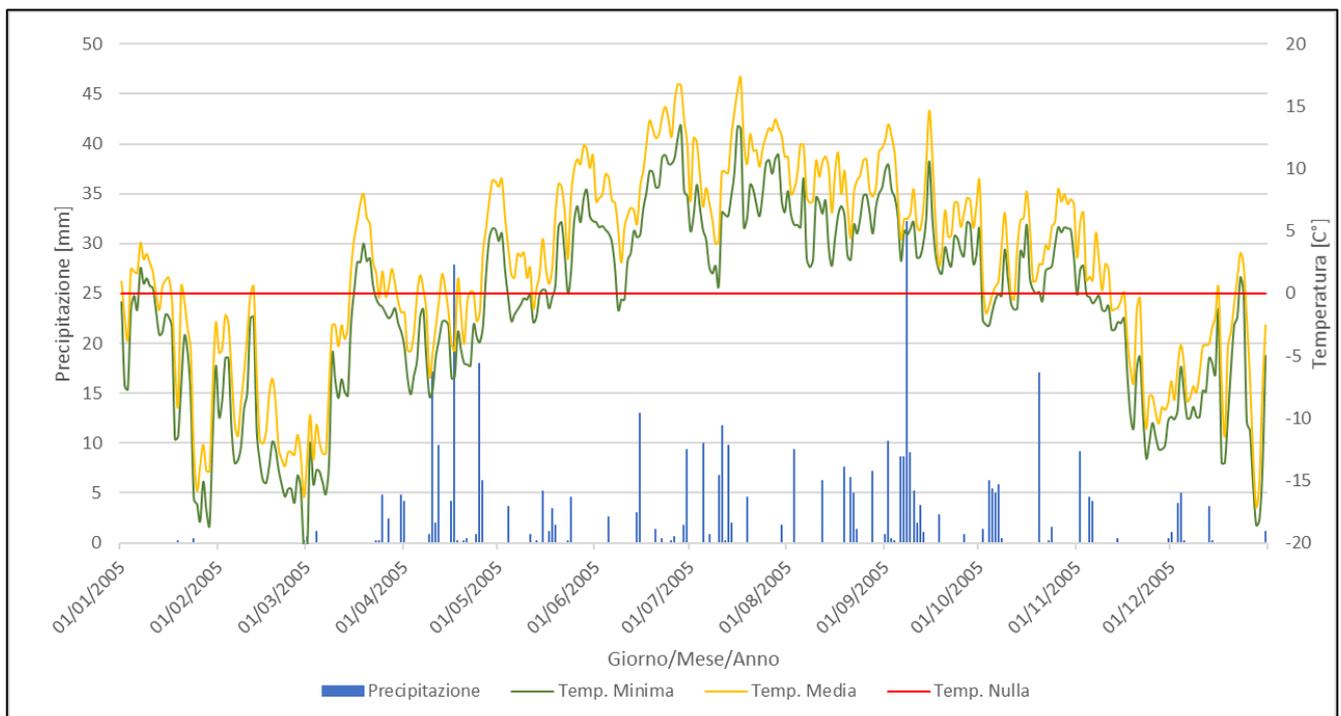


Figura 10.14: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2006

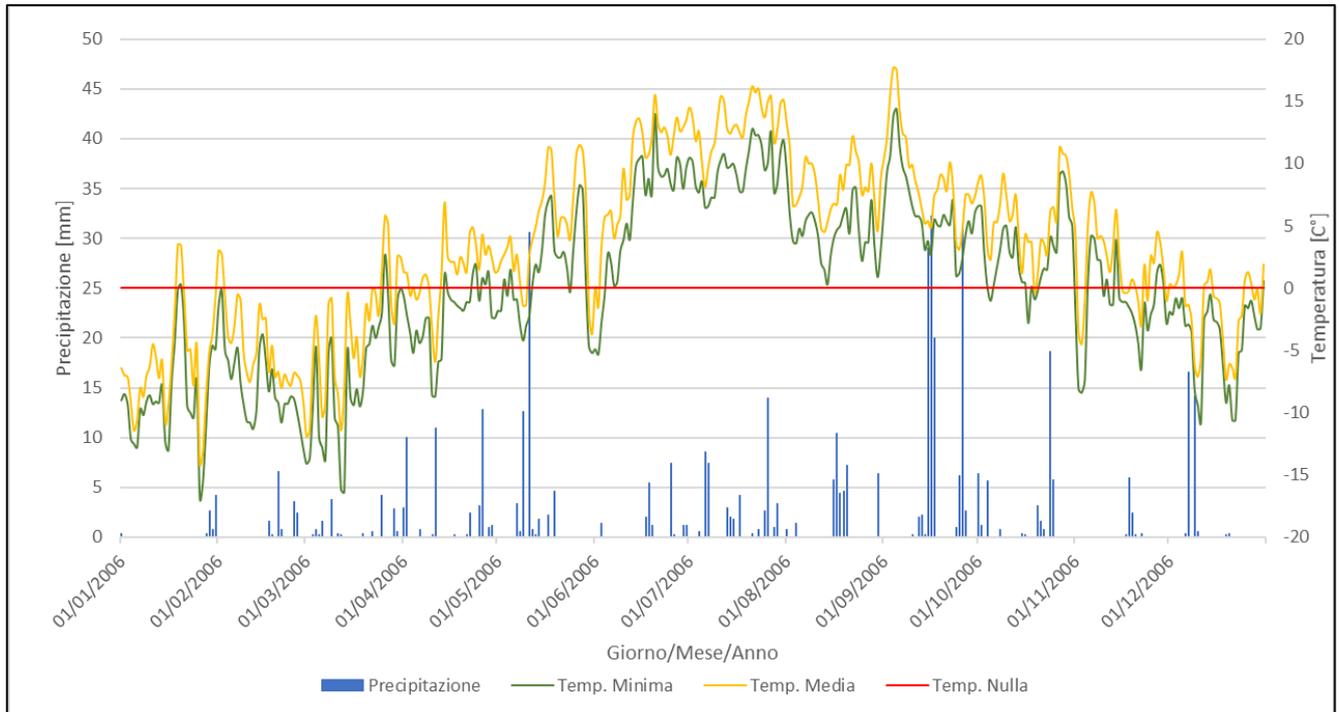


Figura 10.15: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2007

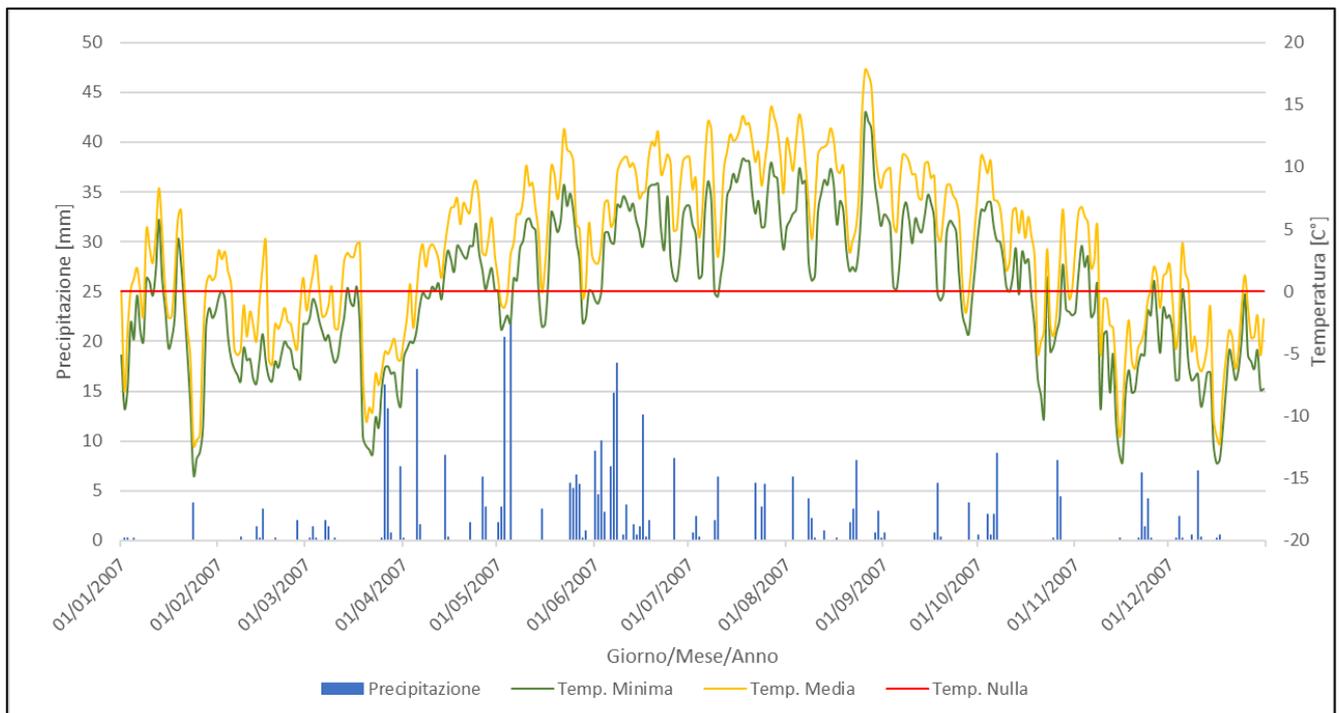


Figura 10.16: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2013

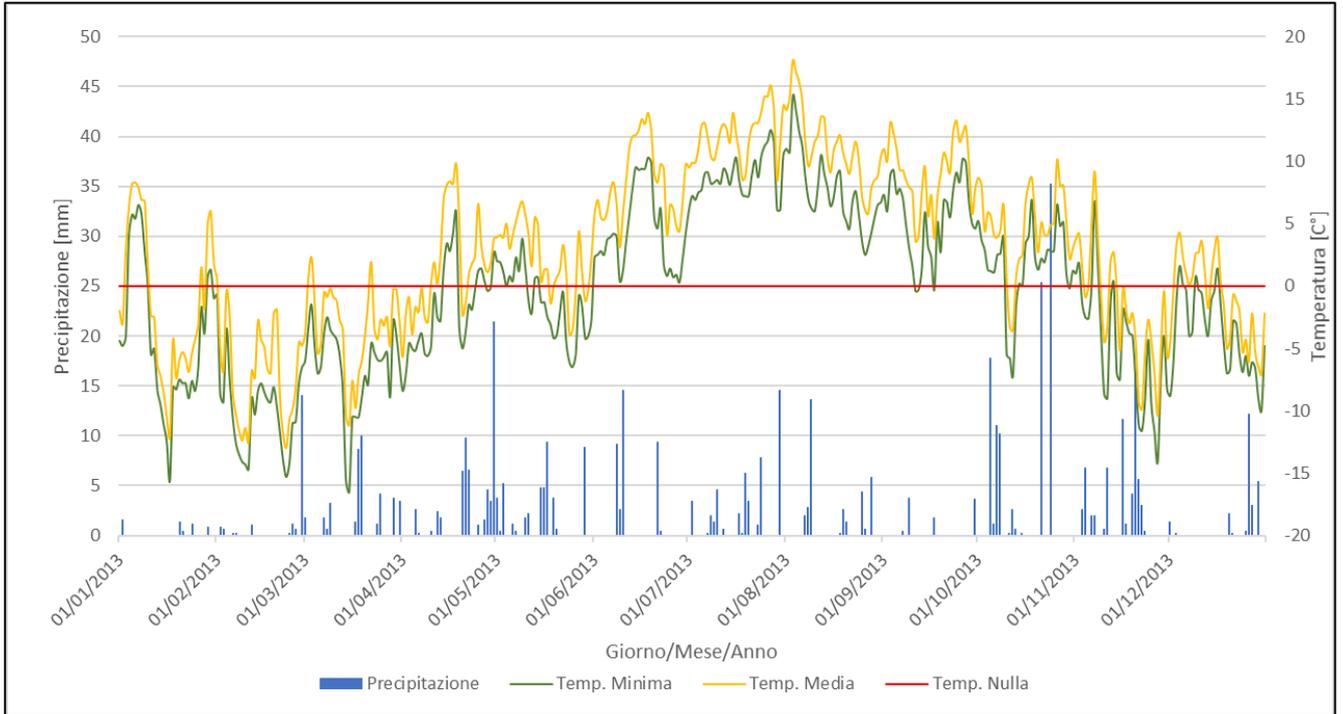


Figura 10.17: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2014

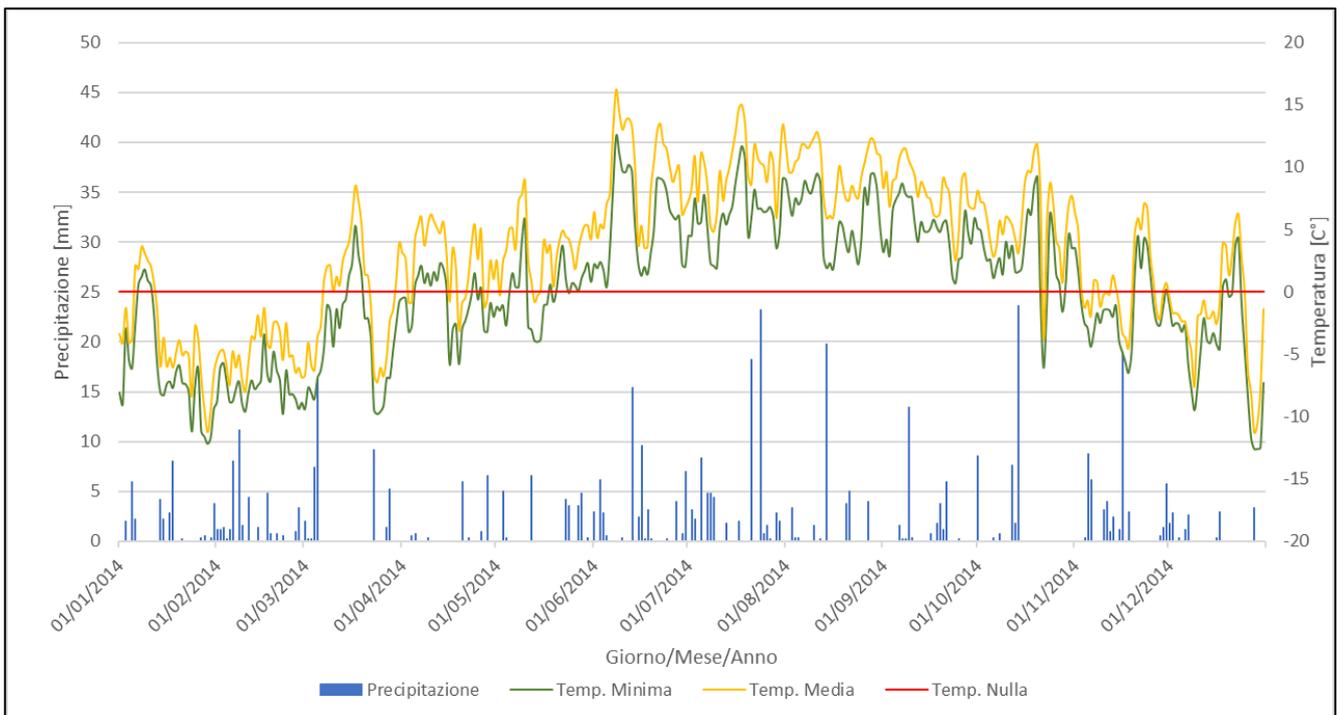


Figura 10.18: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2015

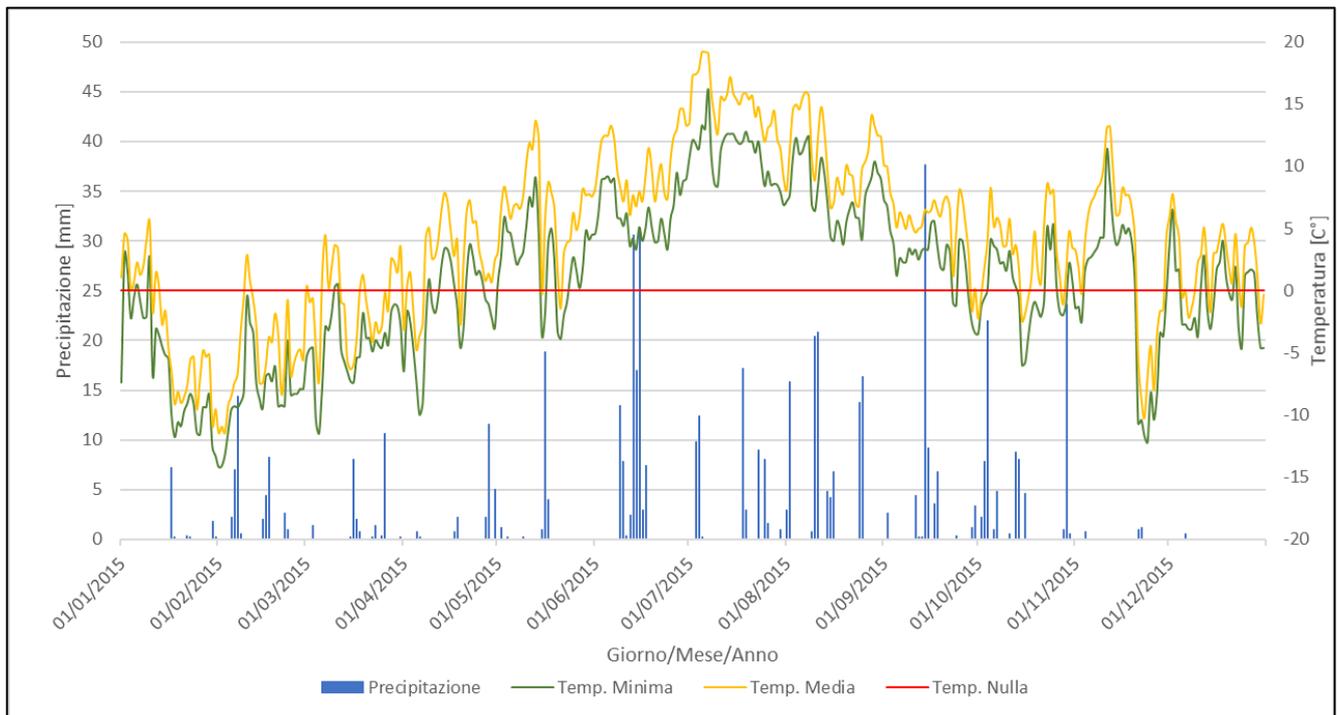
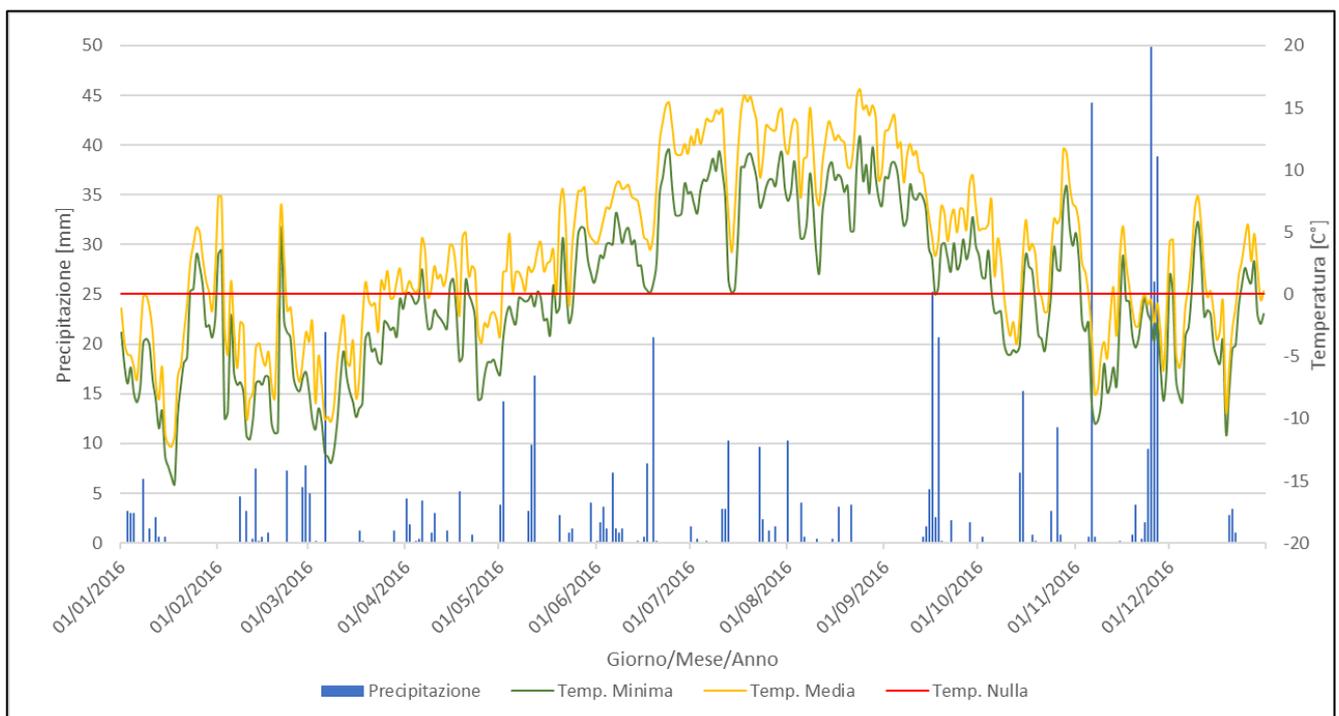


Figura 10.19: Relazione Precipitazione – Temp. Minima e Media – Anno 2016



10.3 Allegato III: distinzione tra piogge fluide e nevose relative al sito di Bardonecchia

Figura 10.20: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2004

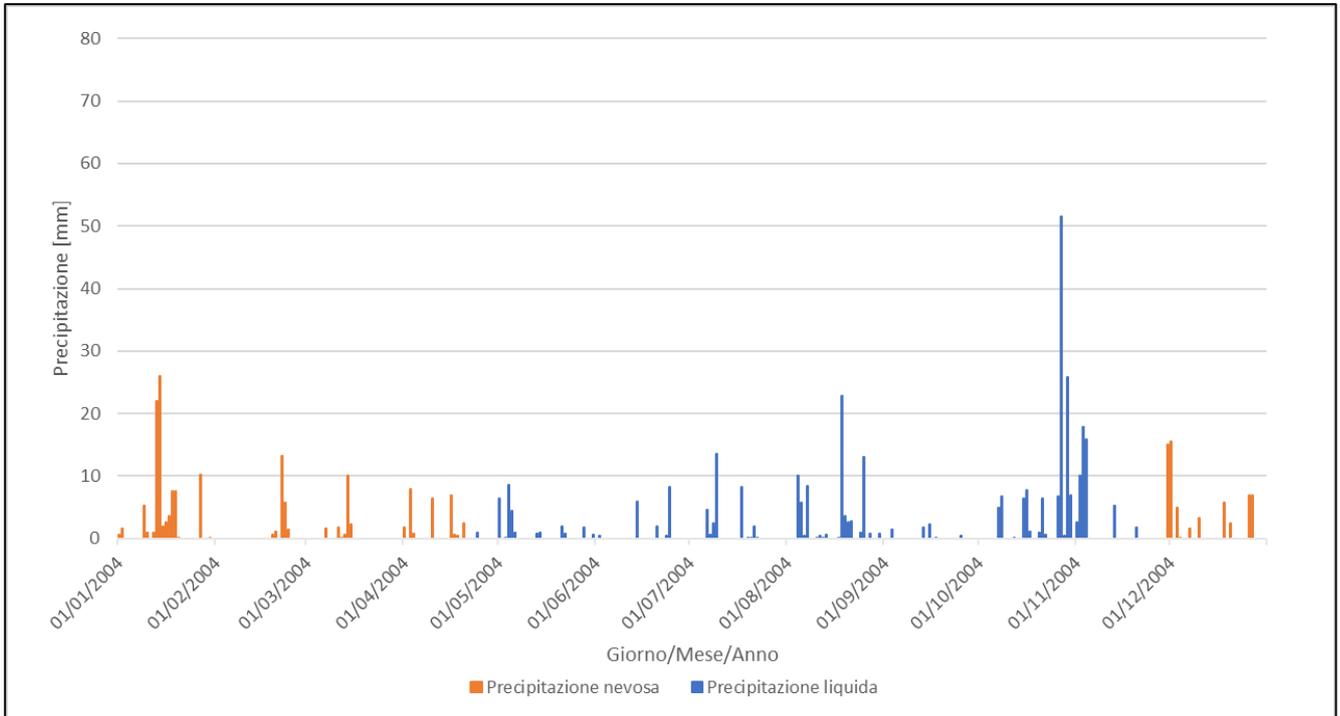


Figura 10.21: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2005

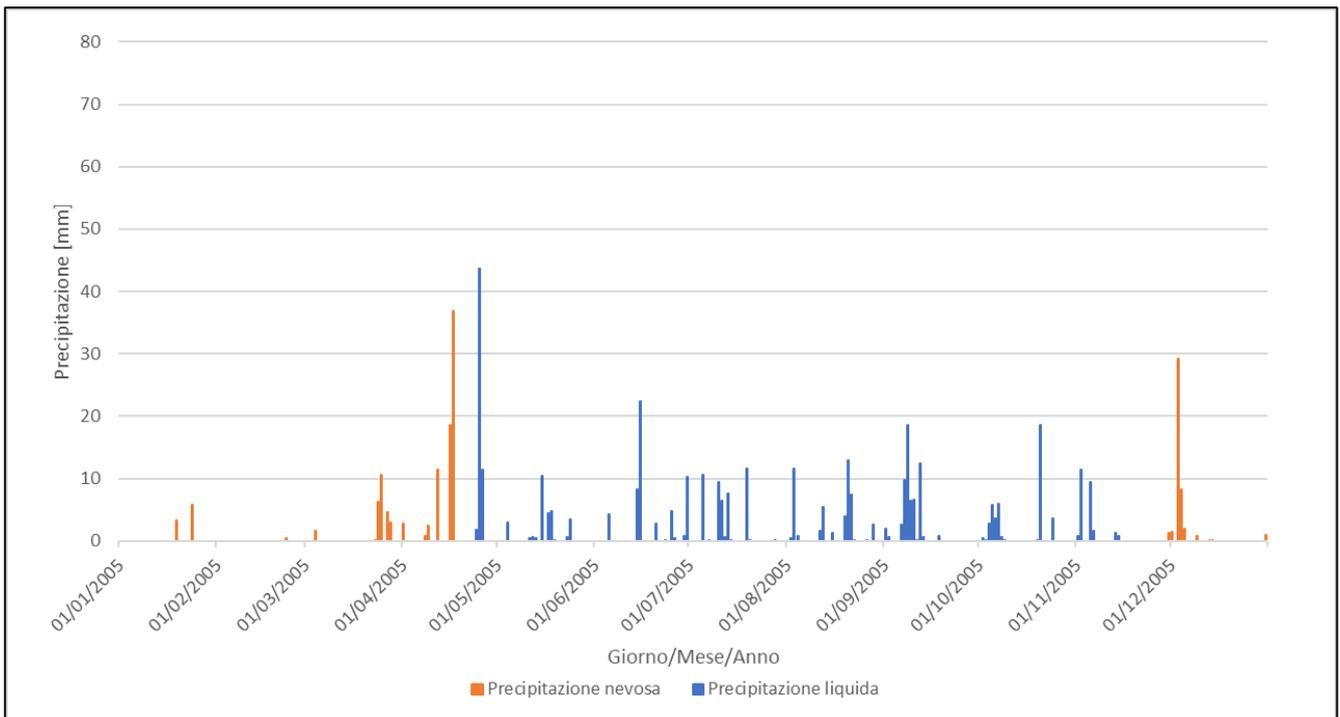


Figura 10.22: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2006

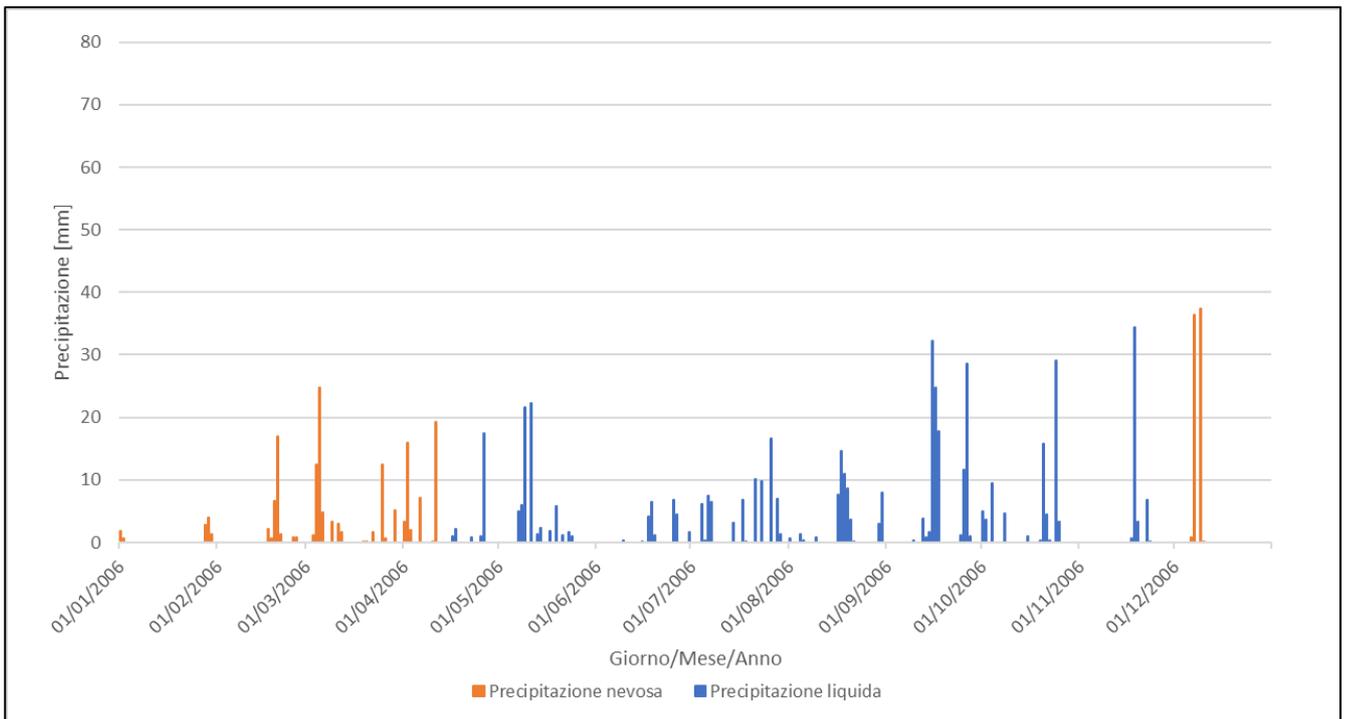


Figura 10.23: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2009

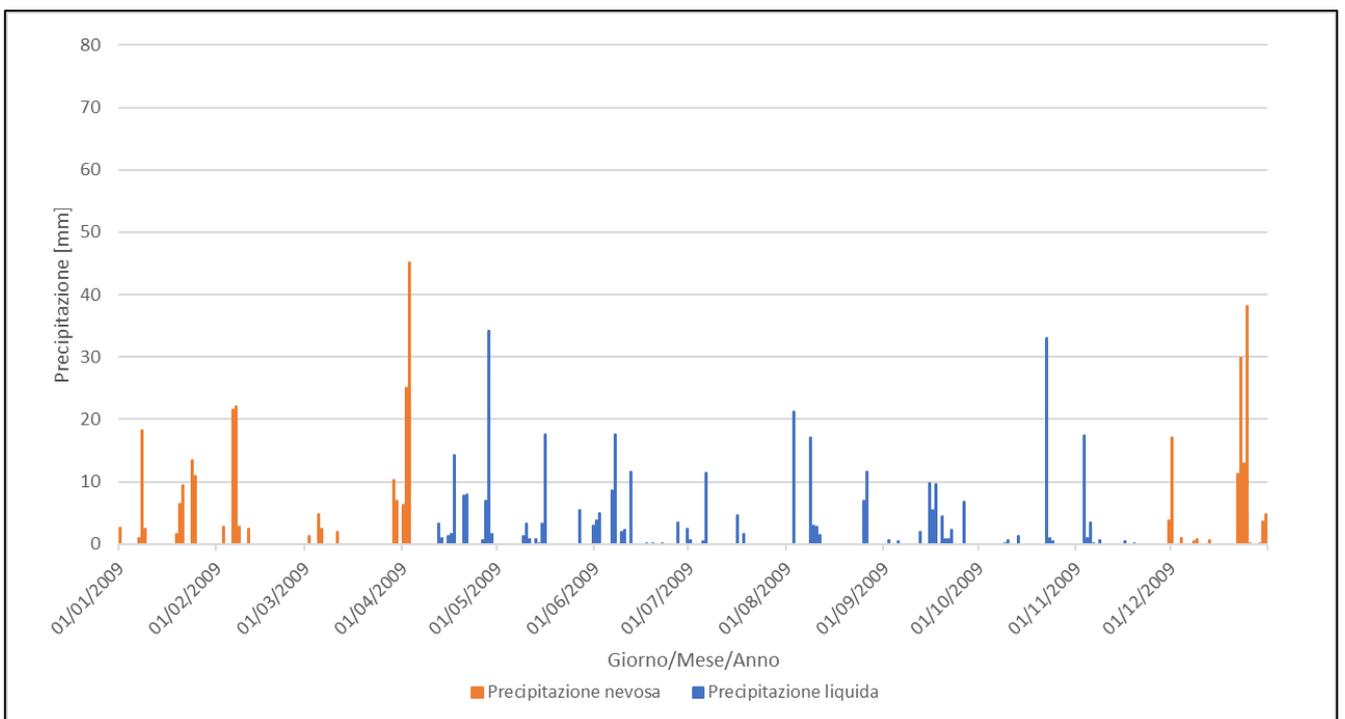


Figura 10.24: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2010

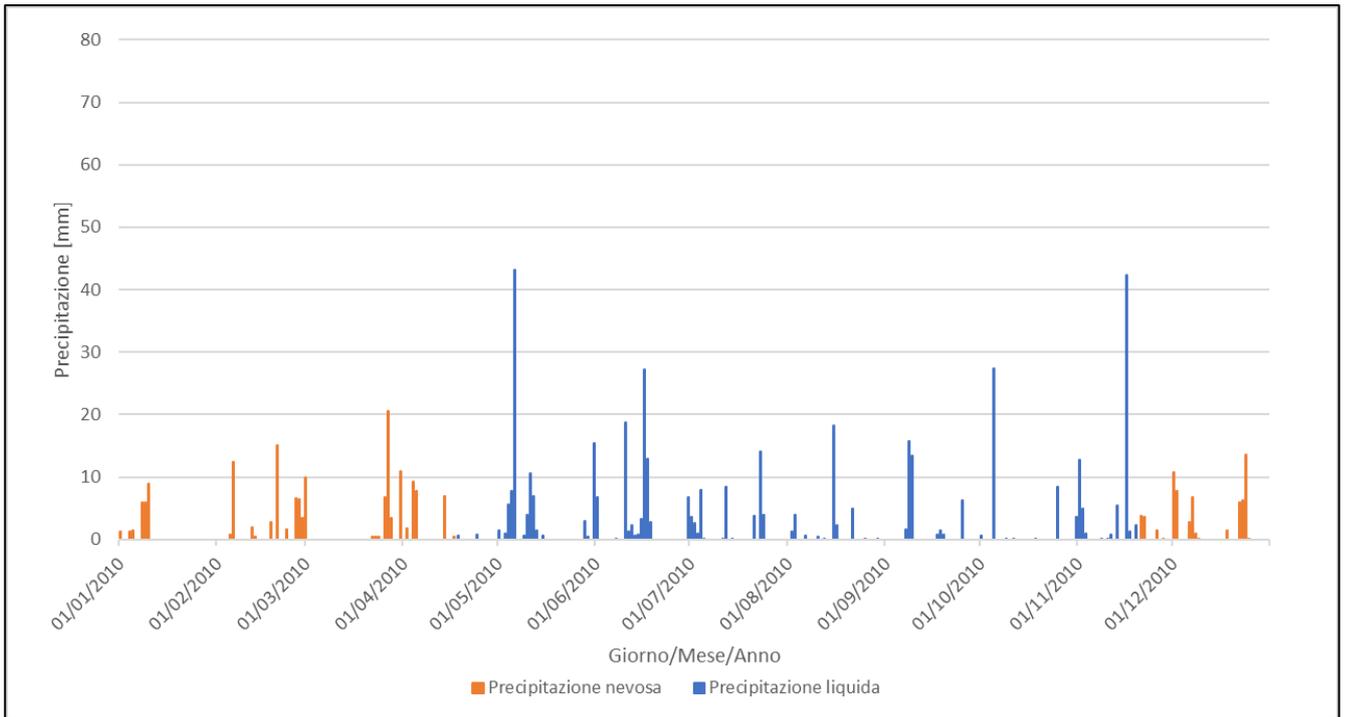


Figura 10.25: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2011

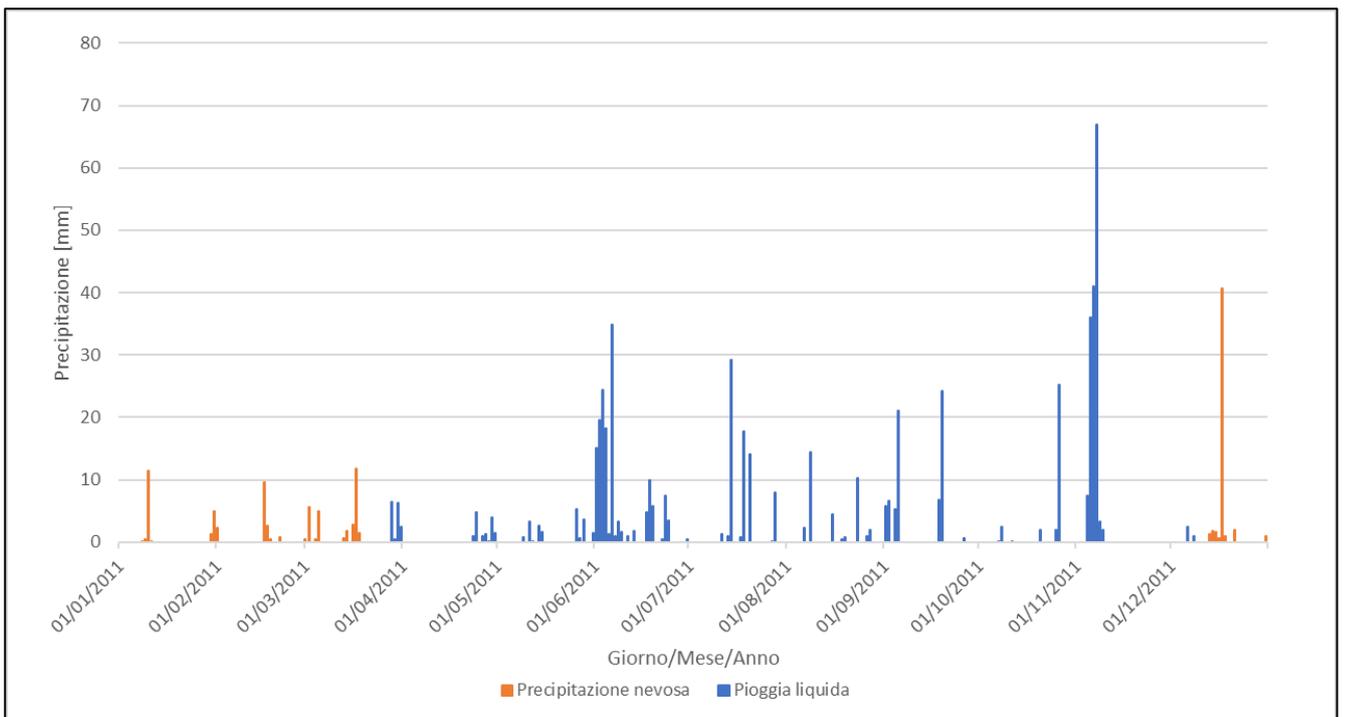


Figura 10.26: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2012

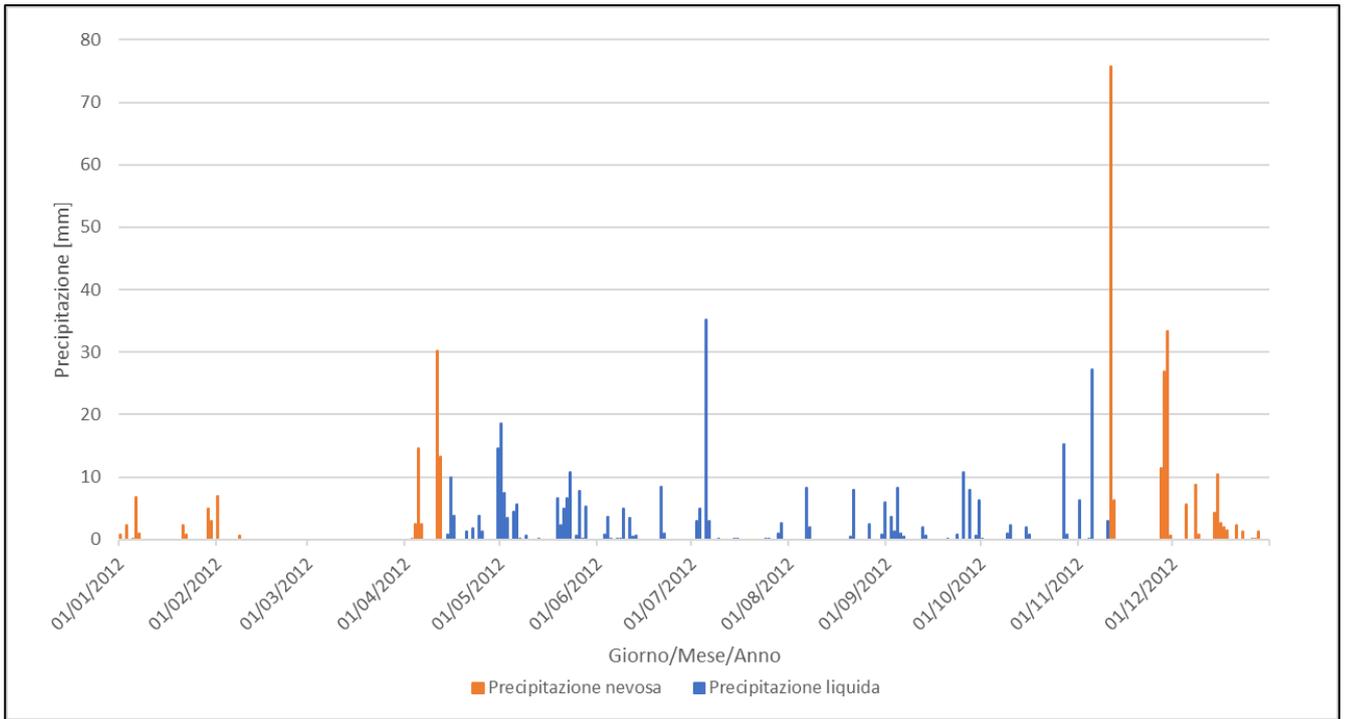


Figura 10.27: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2013

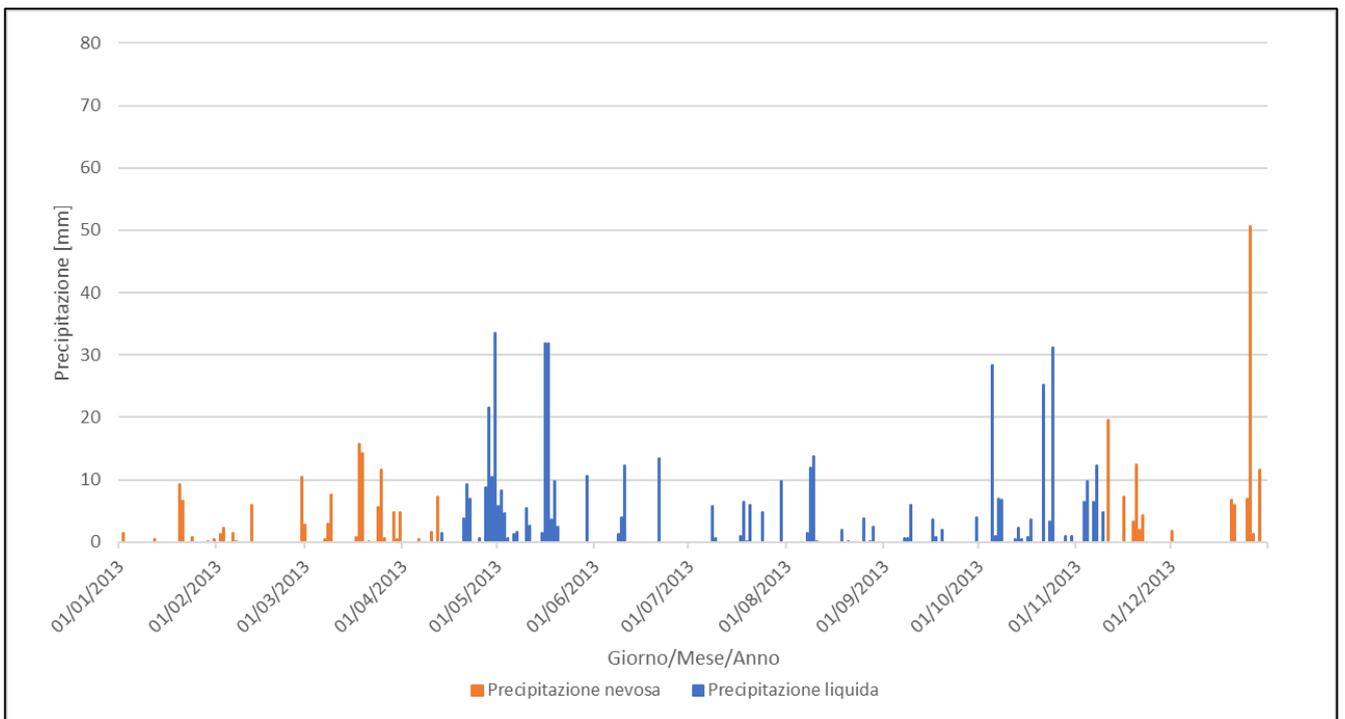


Figura 10.28: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2014

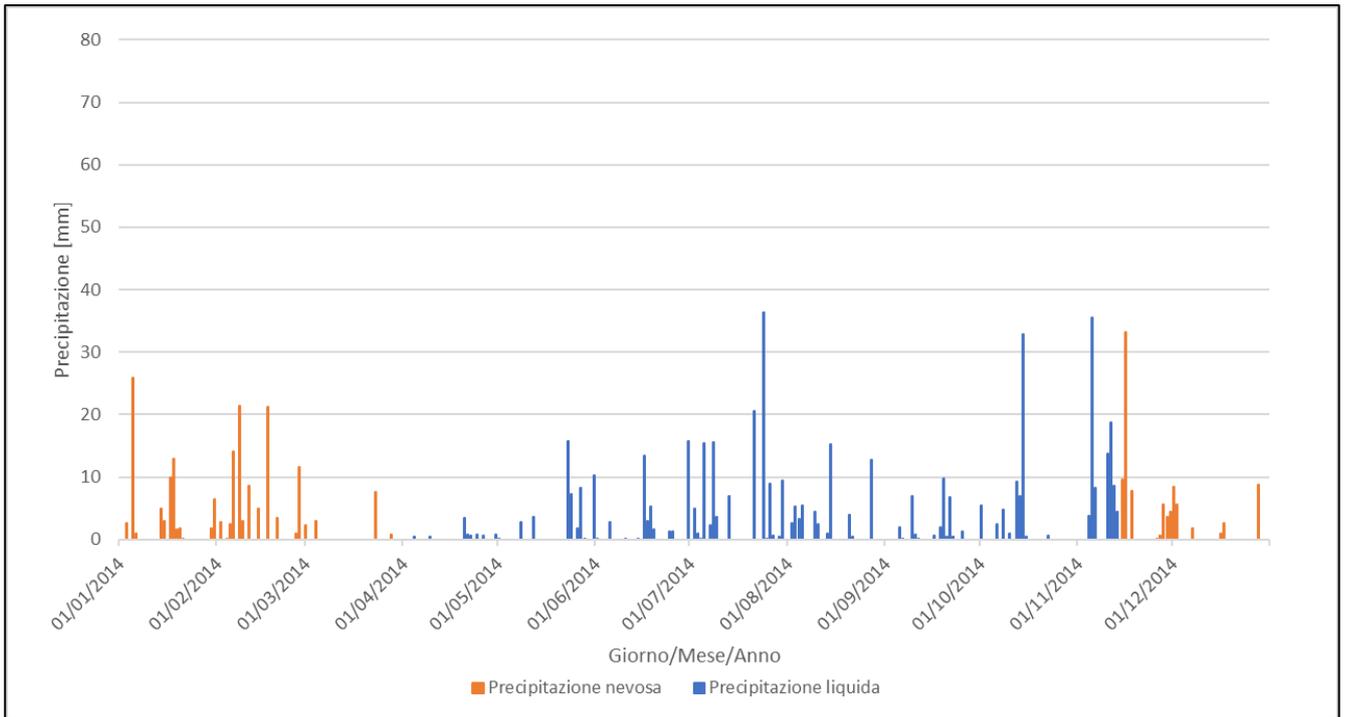


Figura 10.29: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2015

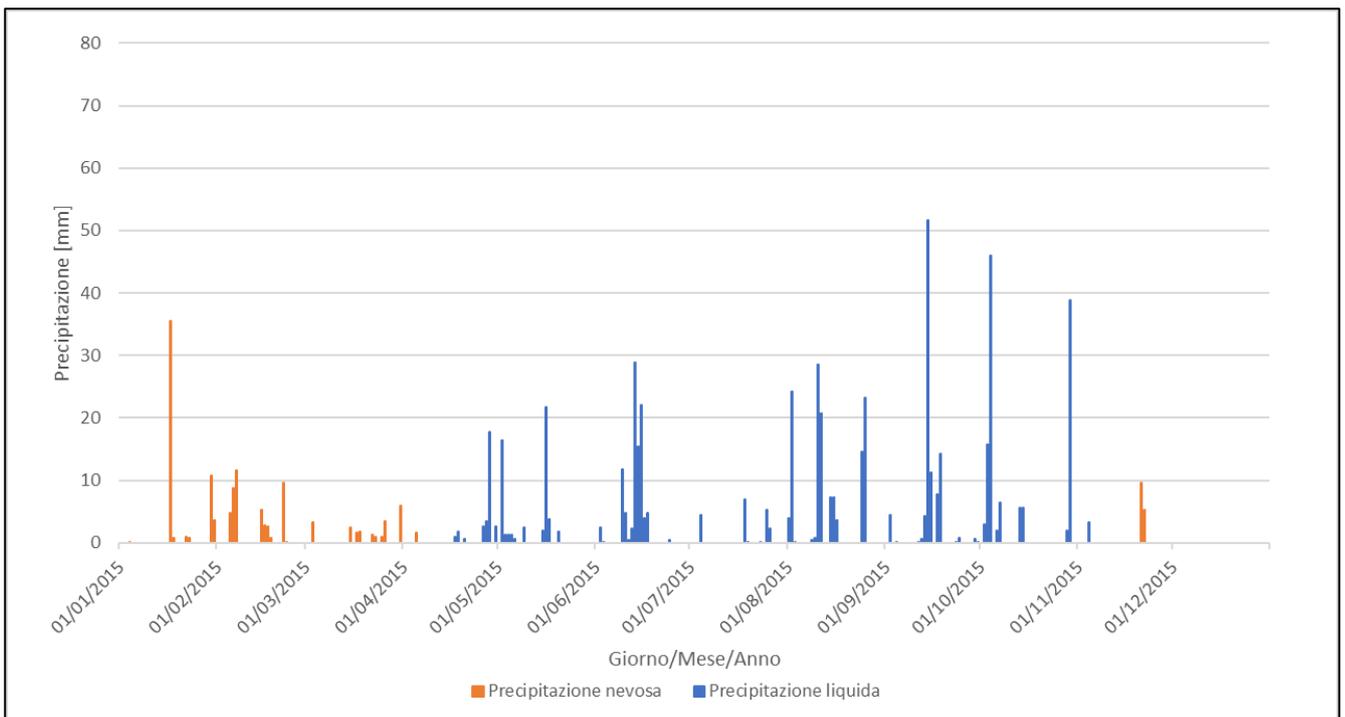
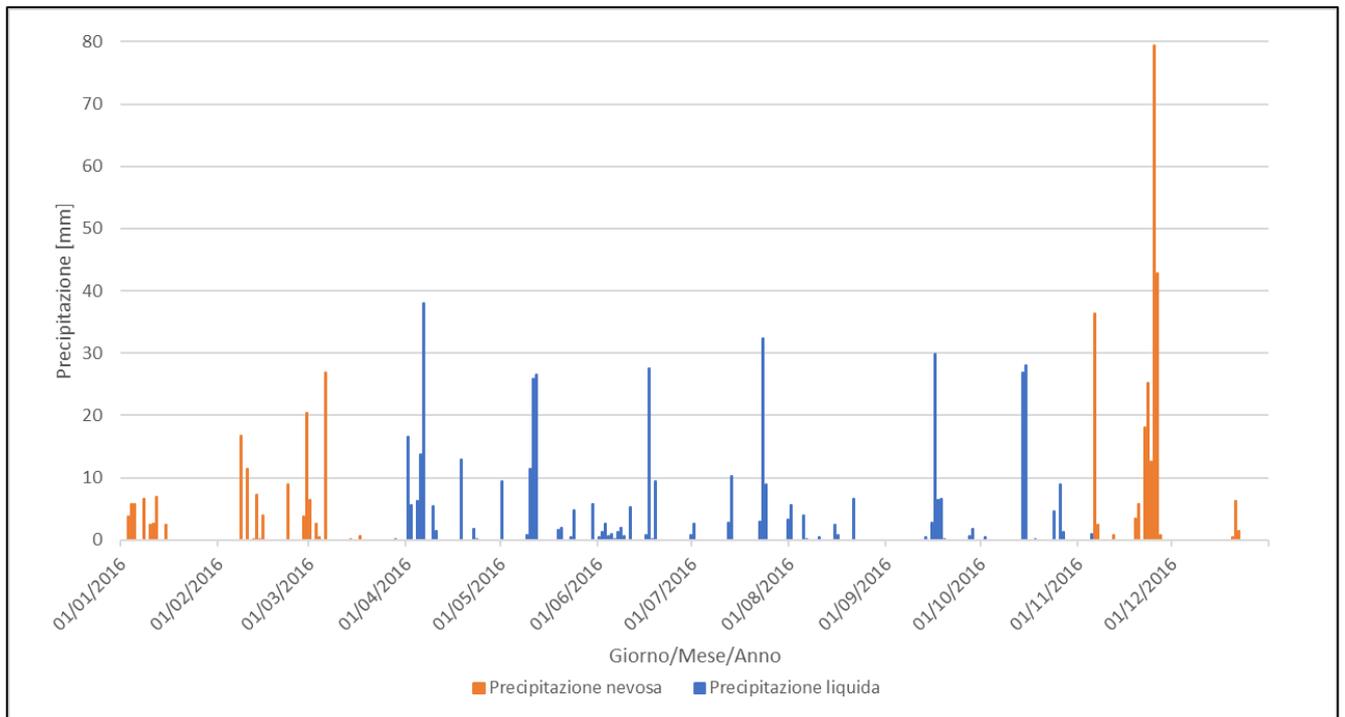


Figura 10.30: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2016



10.4 Allegato IV: distinzione tra piogge fluide e nevose relative al sito di Sestriere

Figura 10.31: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2004

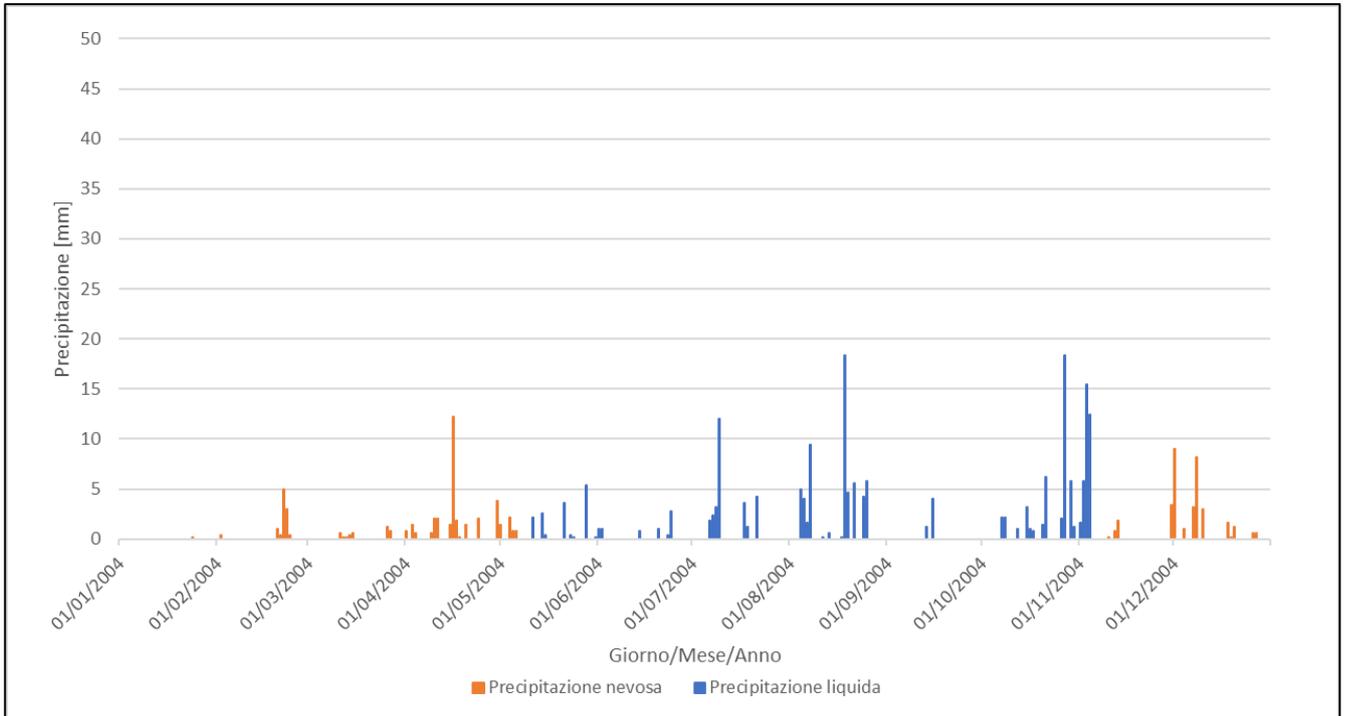


Figura 10.32: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2005

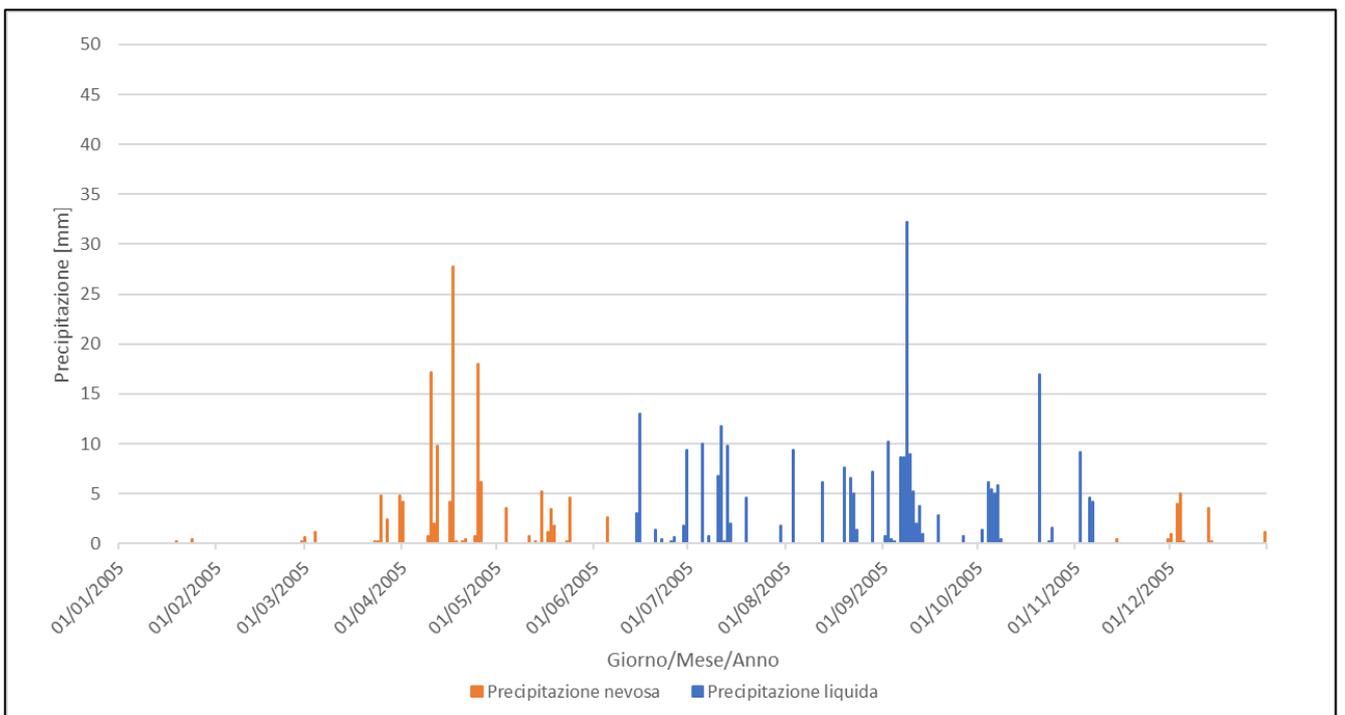


Figura 10.33: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2006

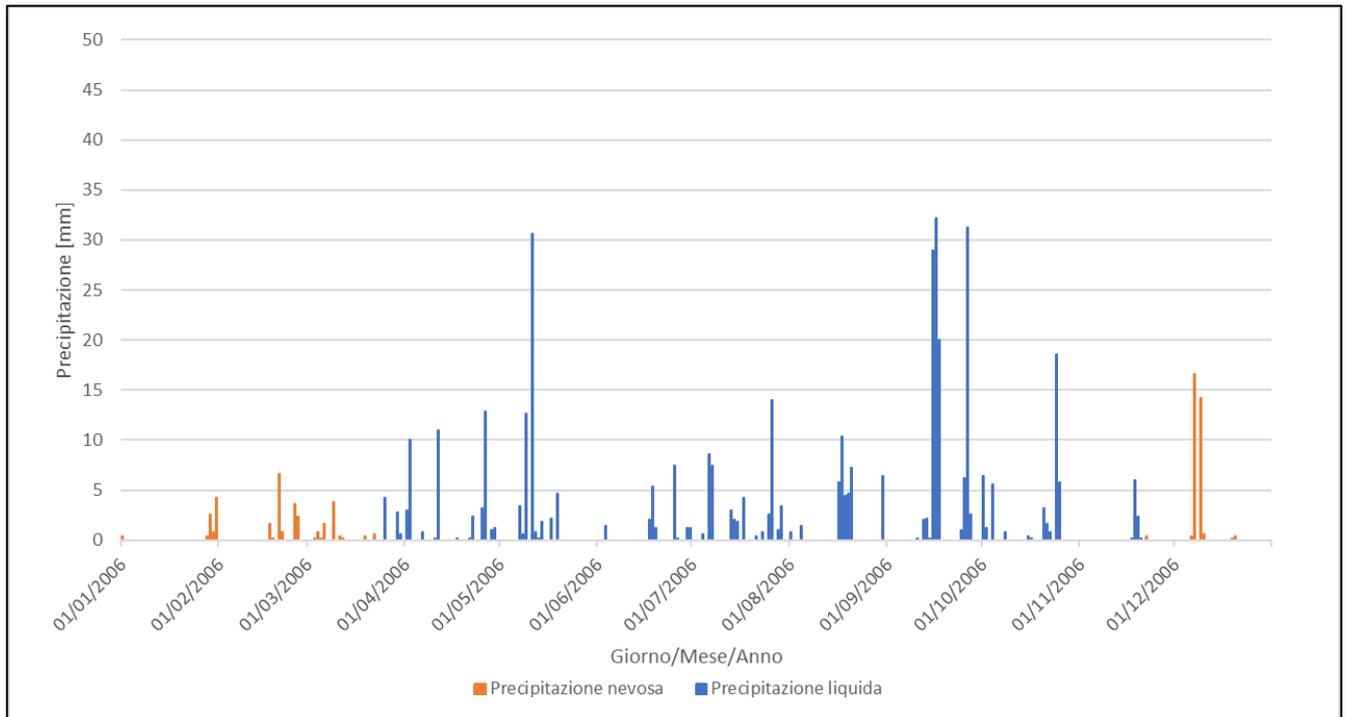


Figura 10.34: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2007

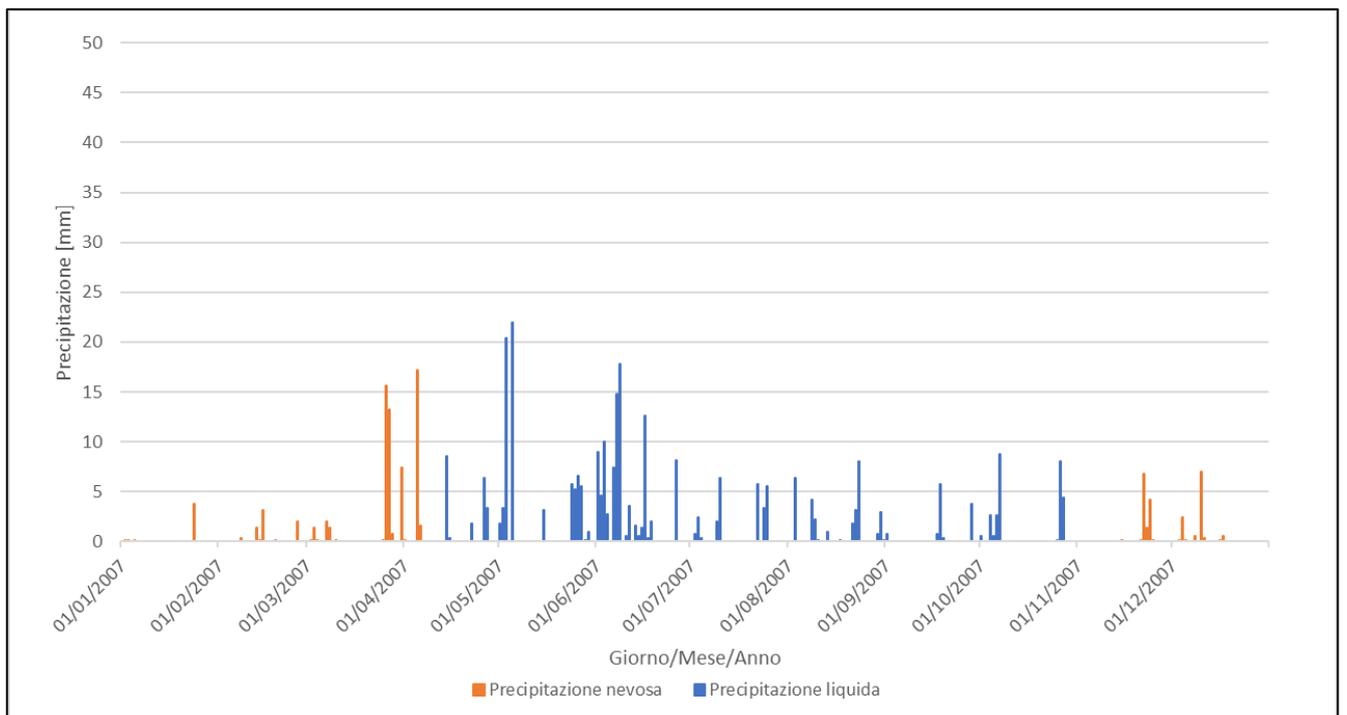


Figura 10.35: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2013

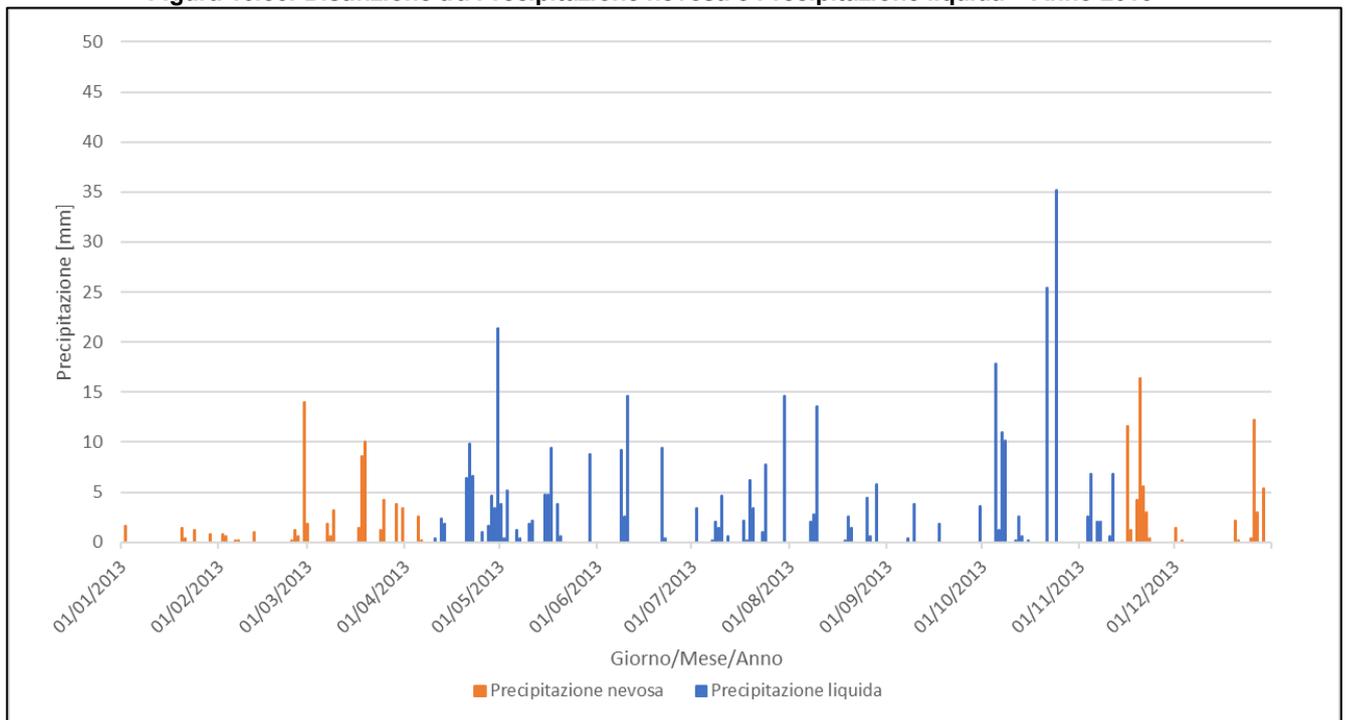


Figura 10.36: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2014

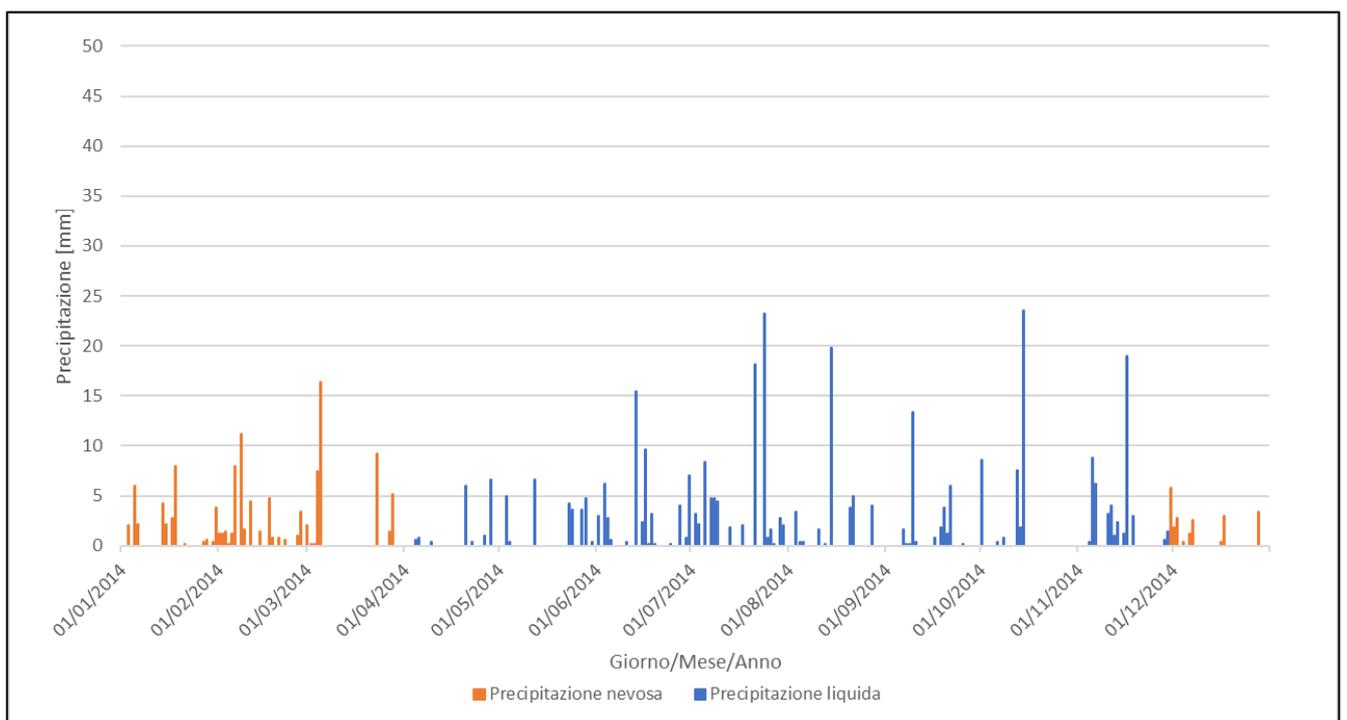


Figura 10.37: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2015

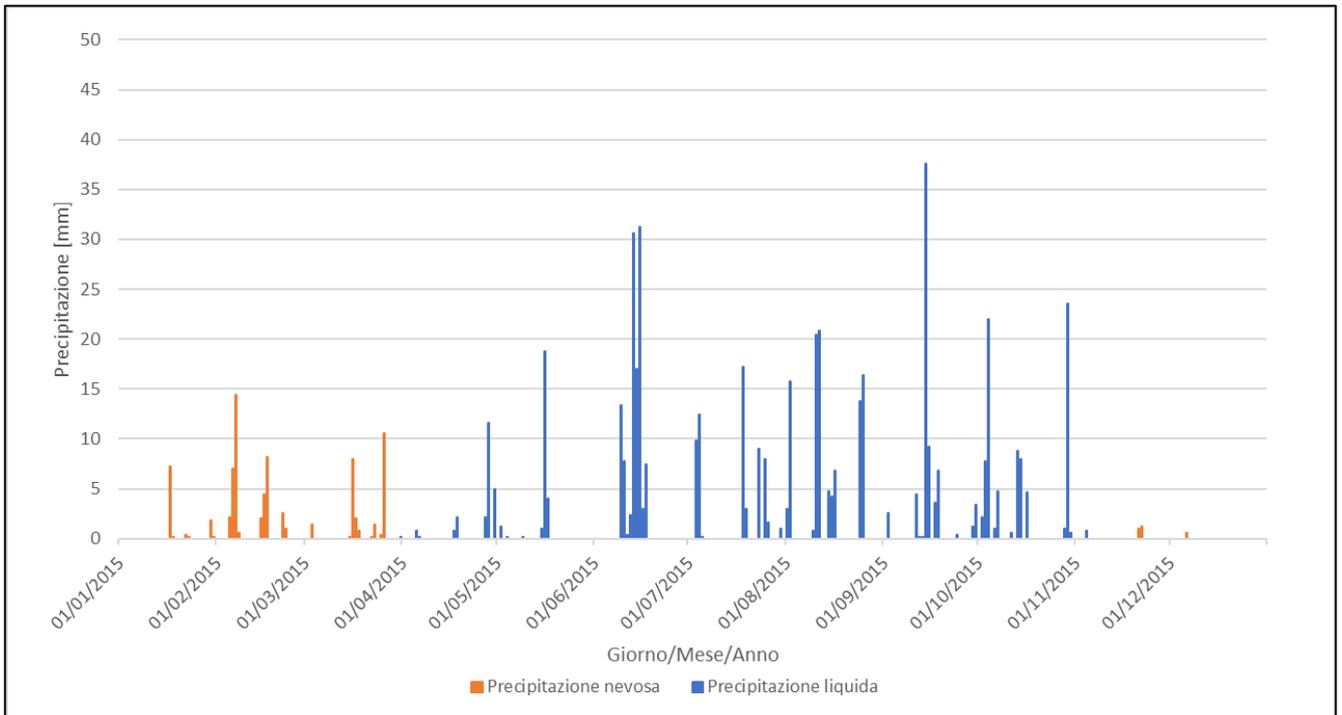
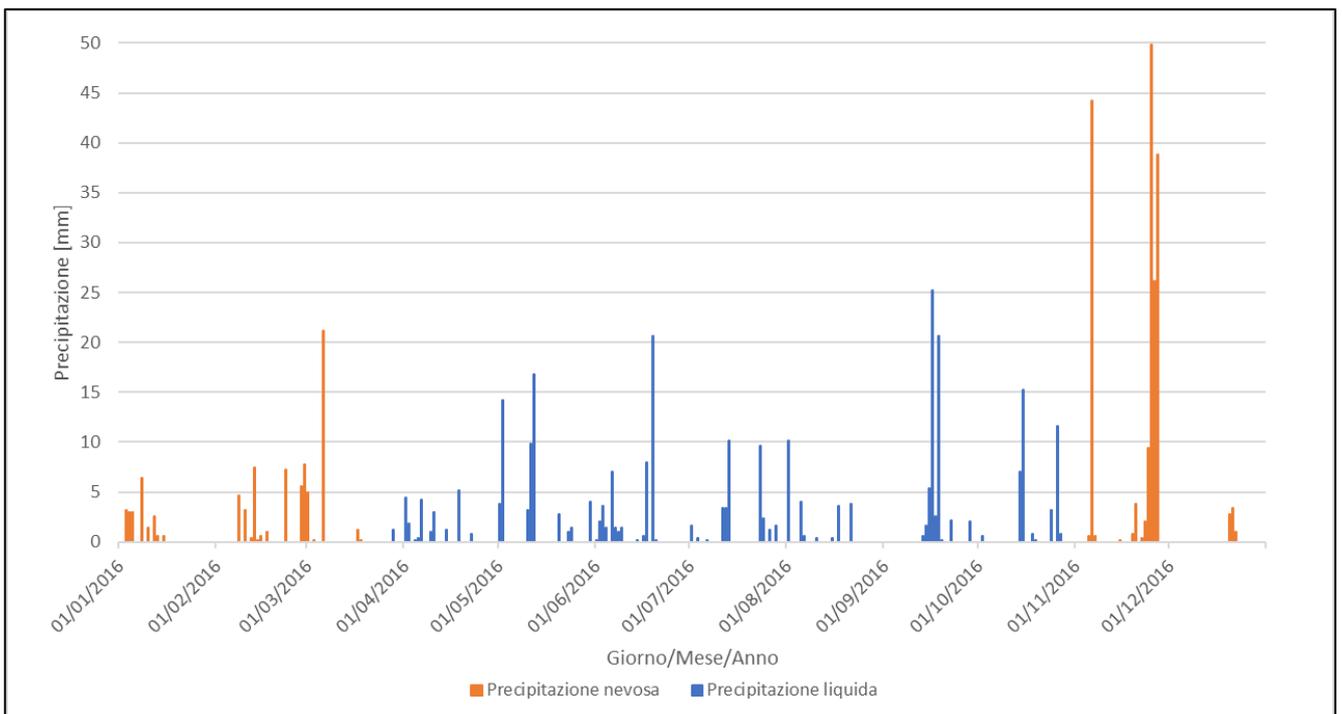


Figura 10.38: Distinzione tra Precipitazione nevosa e Precipitazione liquida – Anno 2016



10.5 Allegato V: relazioni tra le piogge e il livello di falda per il sito di Bardonecchia località Tre Croci

Figura 10.39: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2010

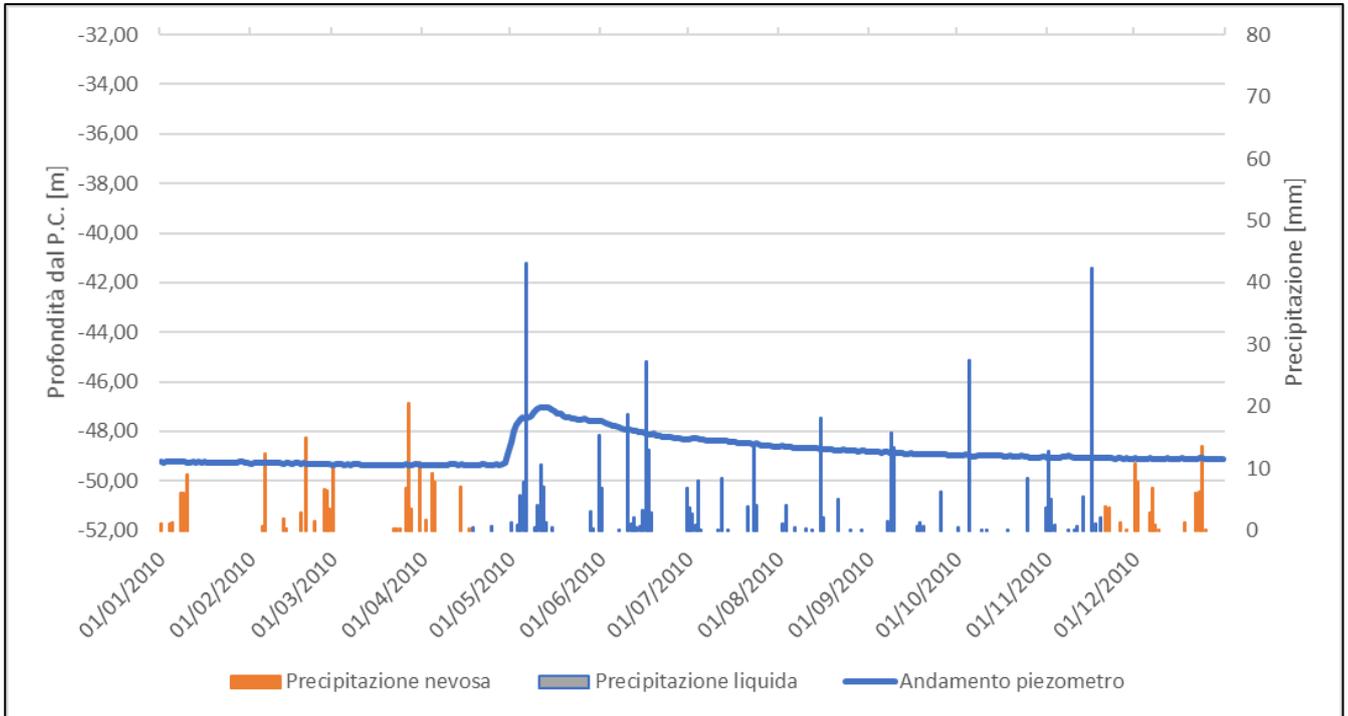


Figura 10.40: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2011

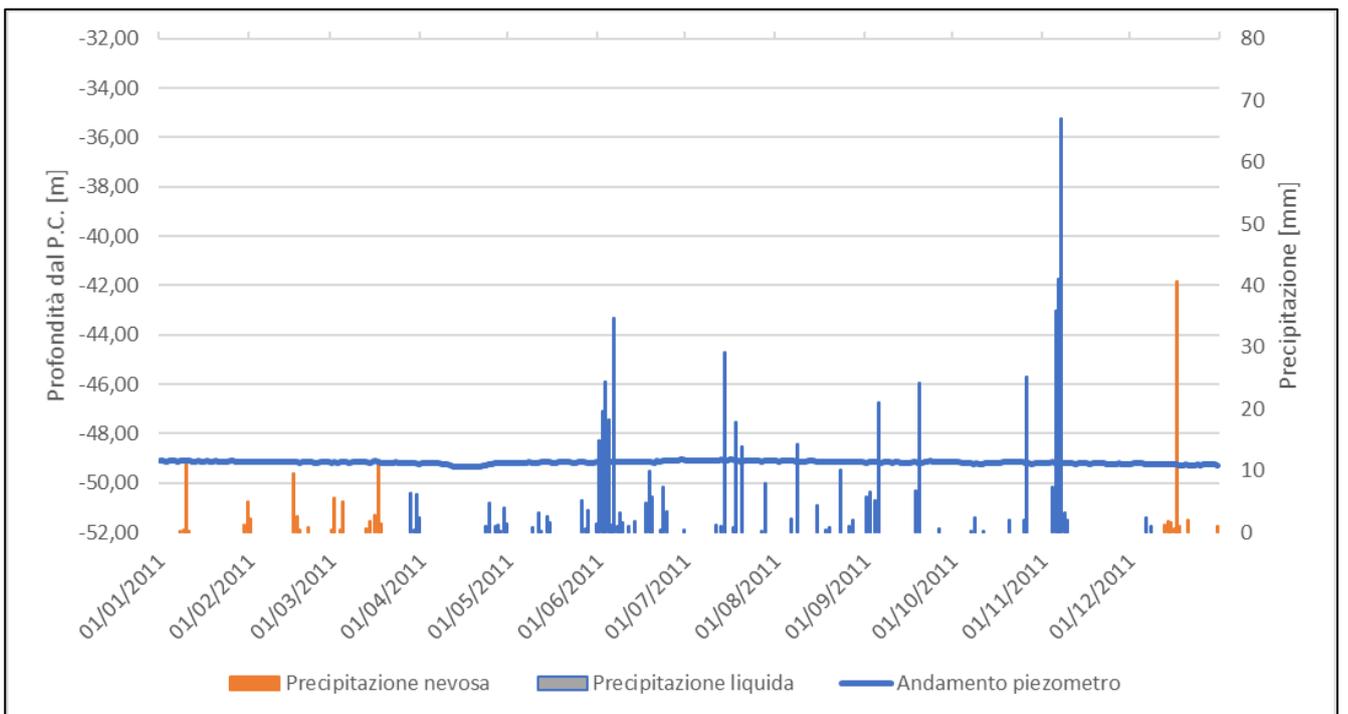
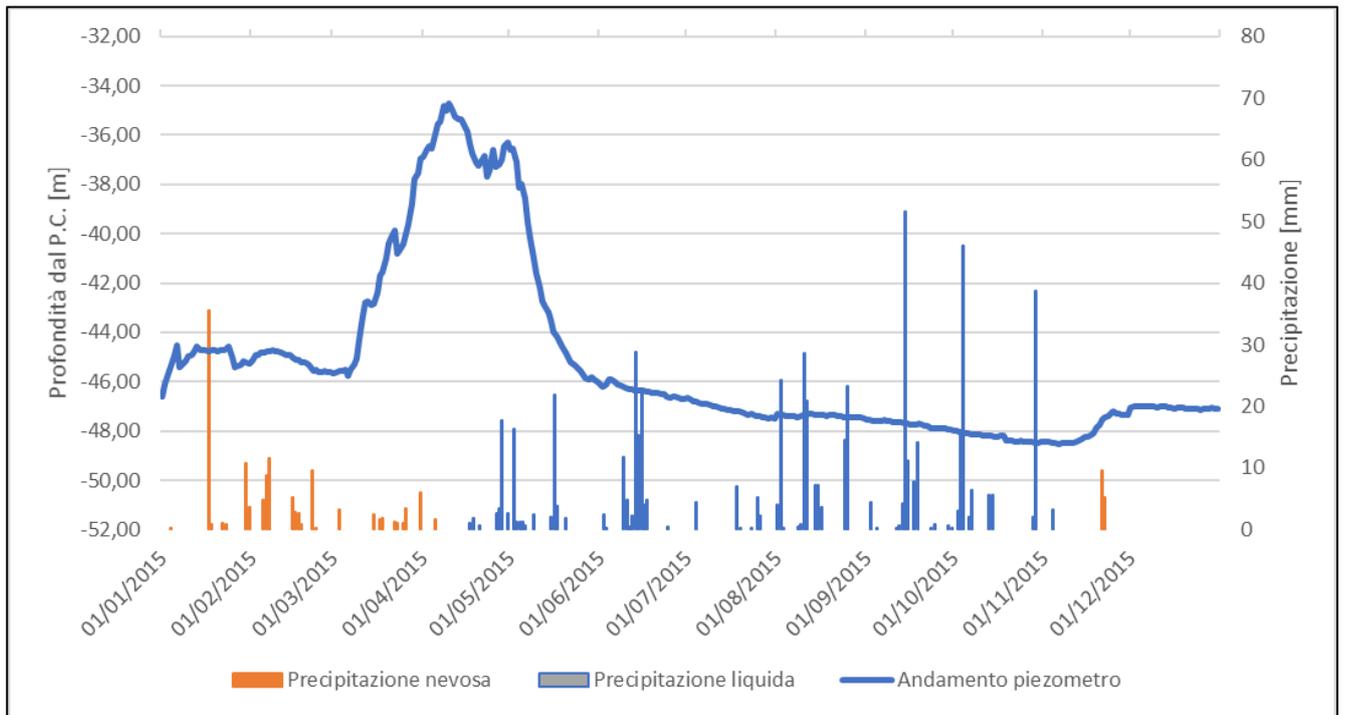


Figura 10.41: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2015



10.6 Allegato VI: relazioni tra le piogge e il livello di falda per il sito di Bardonecchia località Granges la Rho

Figura 10.42: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2004

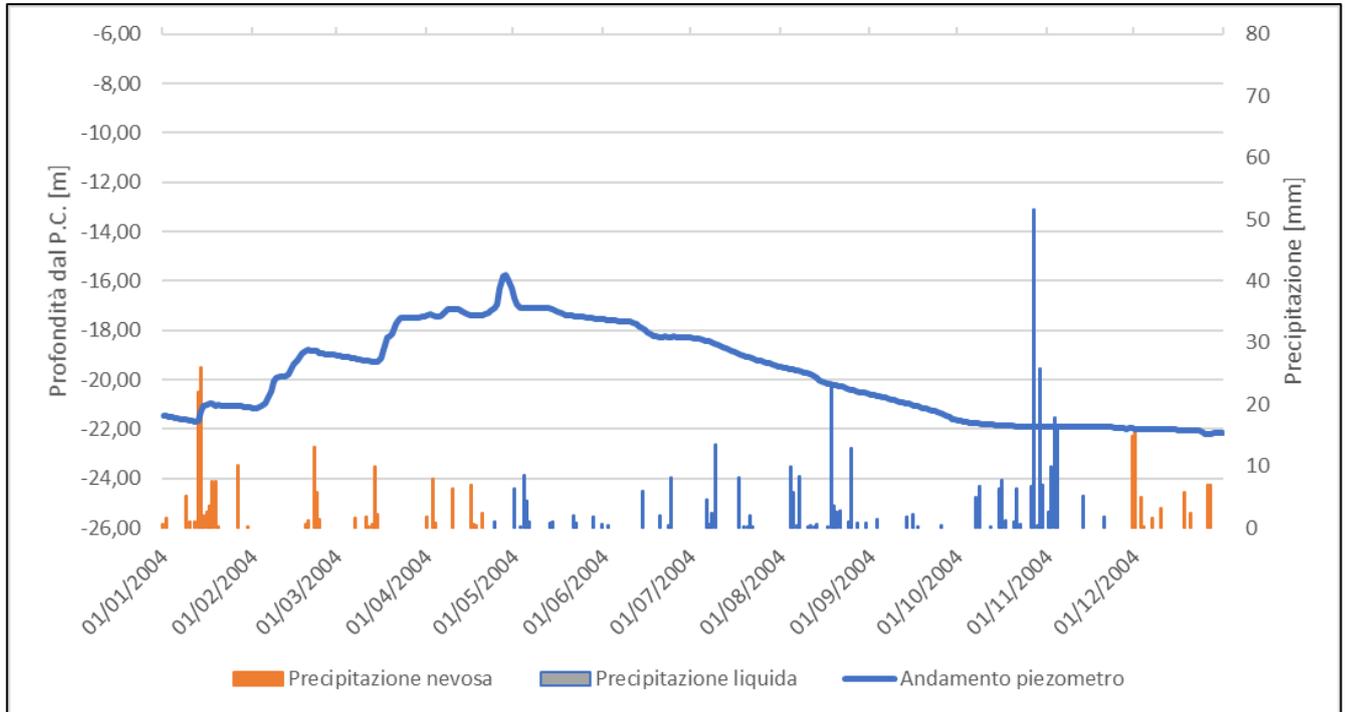


Figura 10.43: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2009

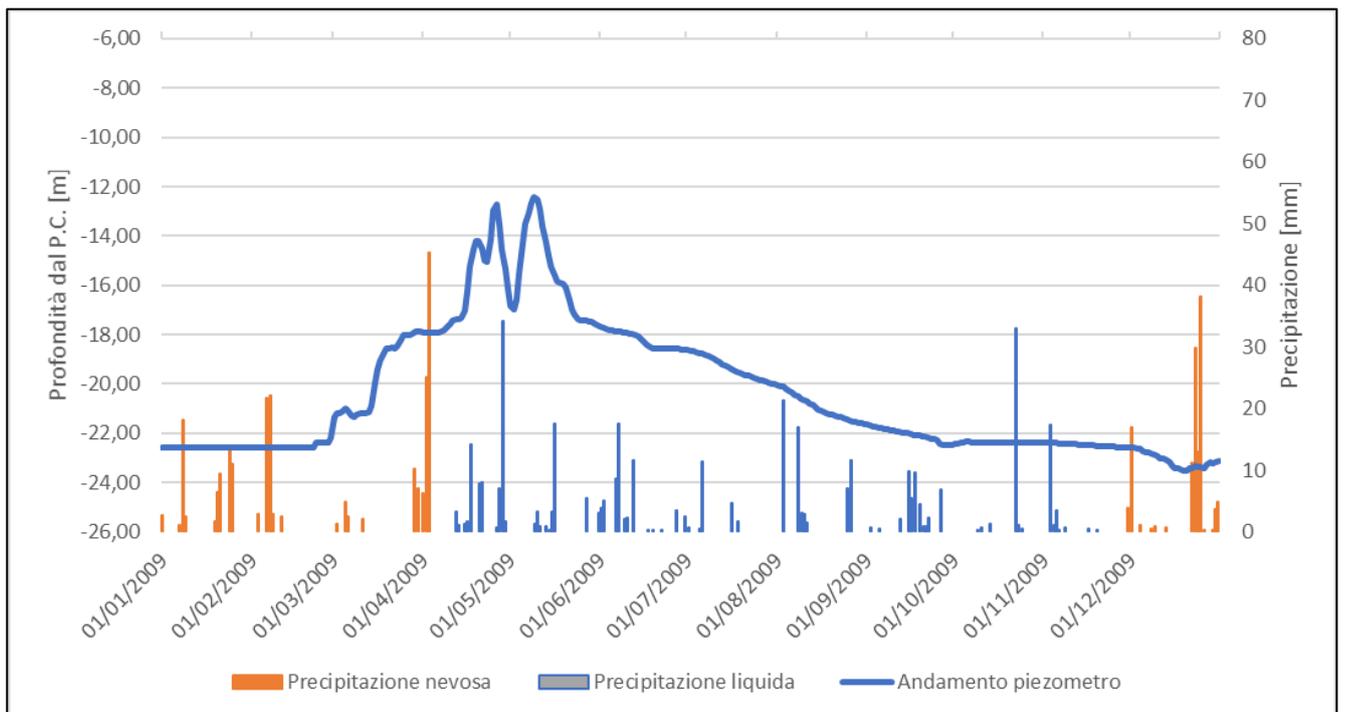


Figura 10.44: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2014

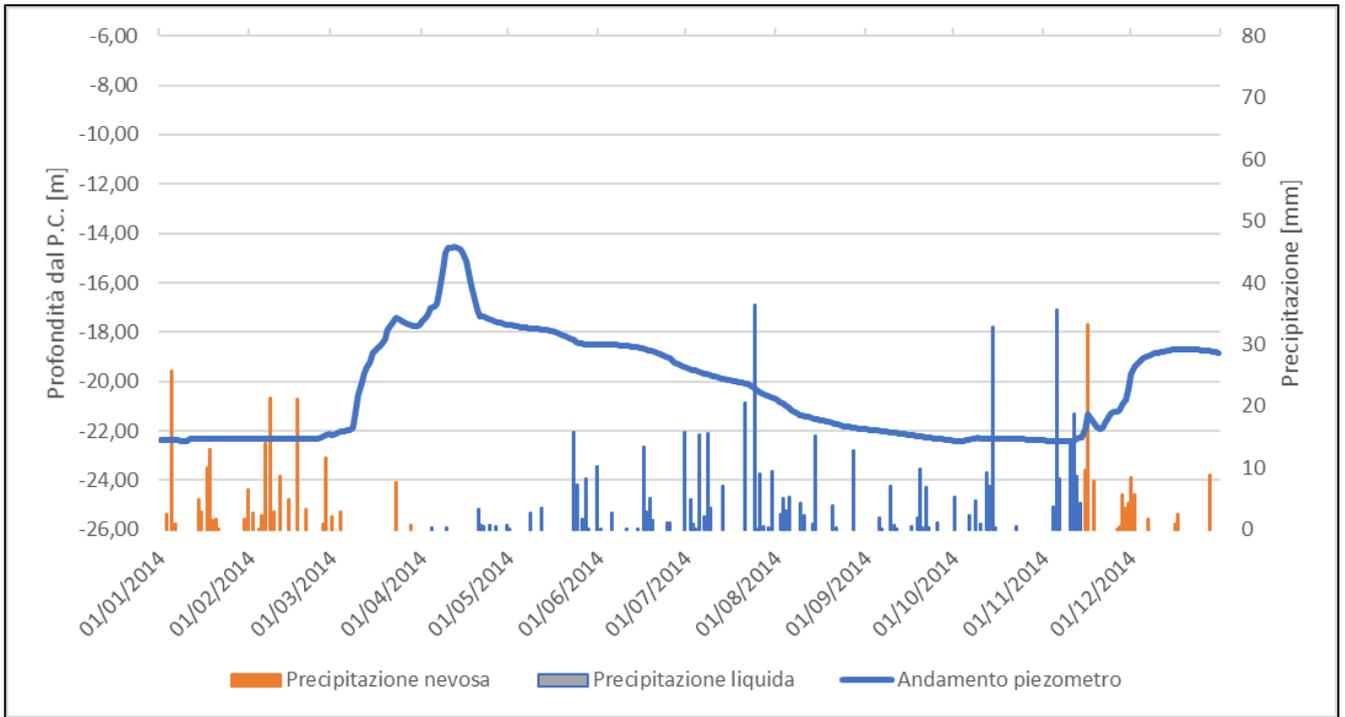


Figura 10.45: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2015

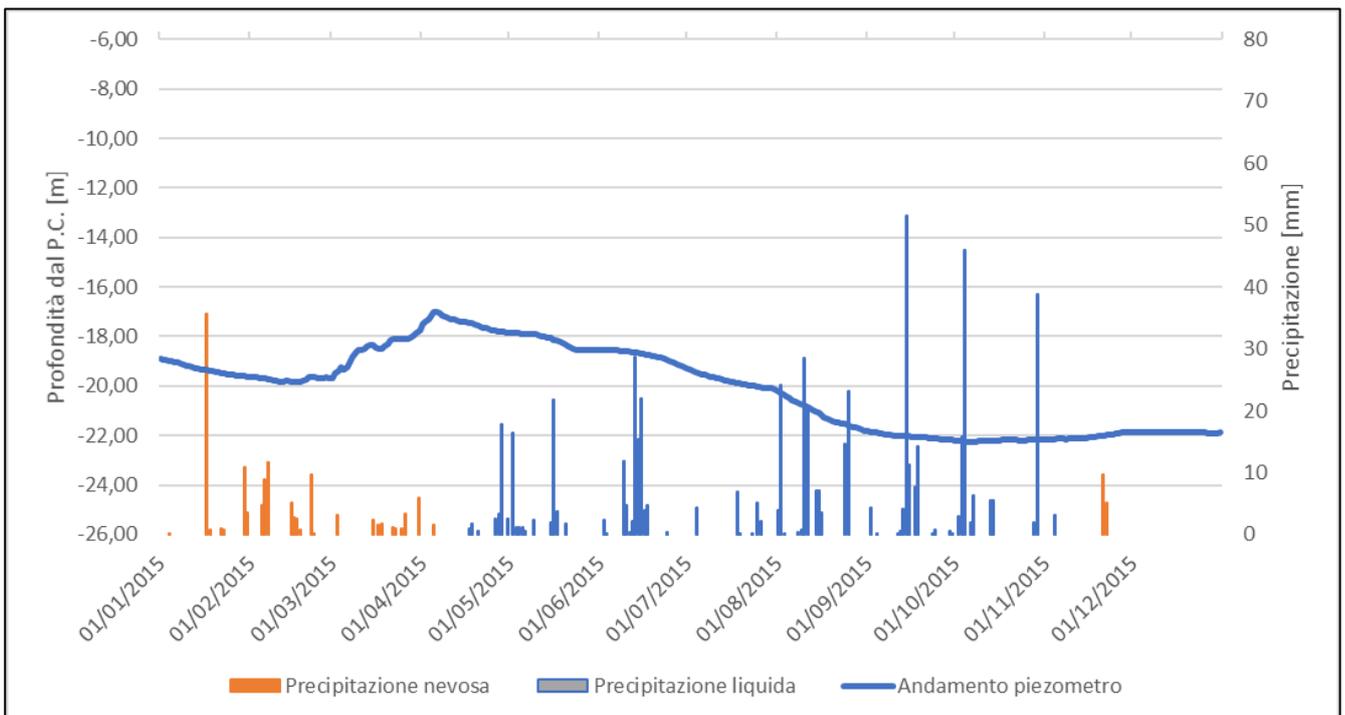
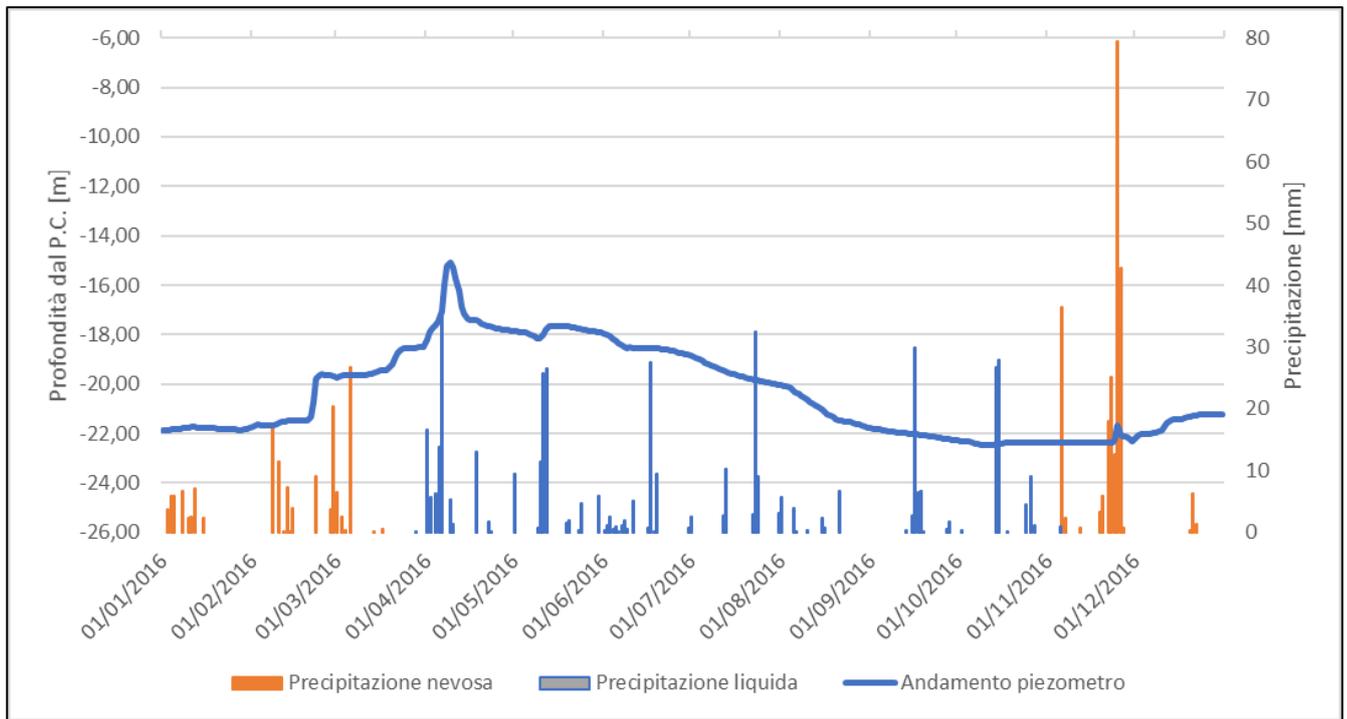


Figura 10.46: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2016



10.7 Allegato VII: relazioni tra le piogge e il livello di falda per il sito di Sestriere località Borgata

Figura 10.47: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2006

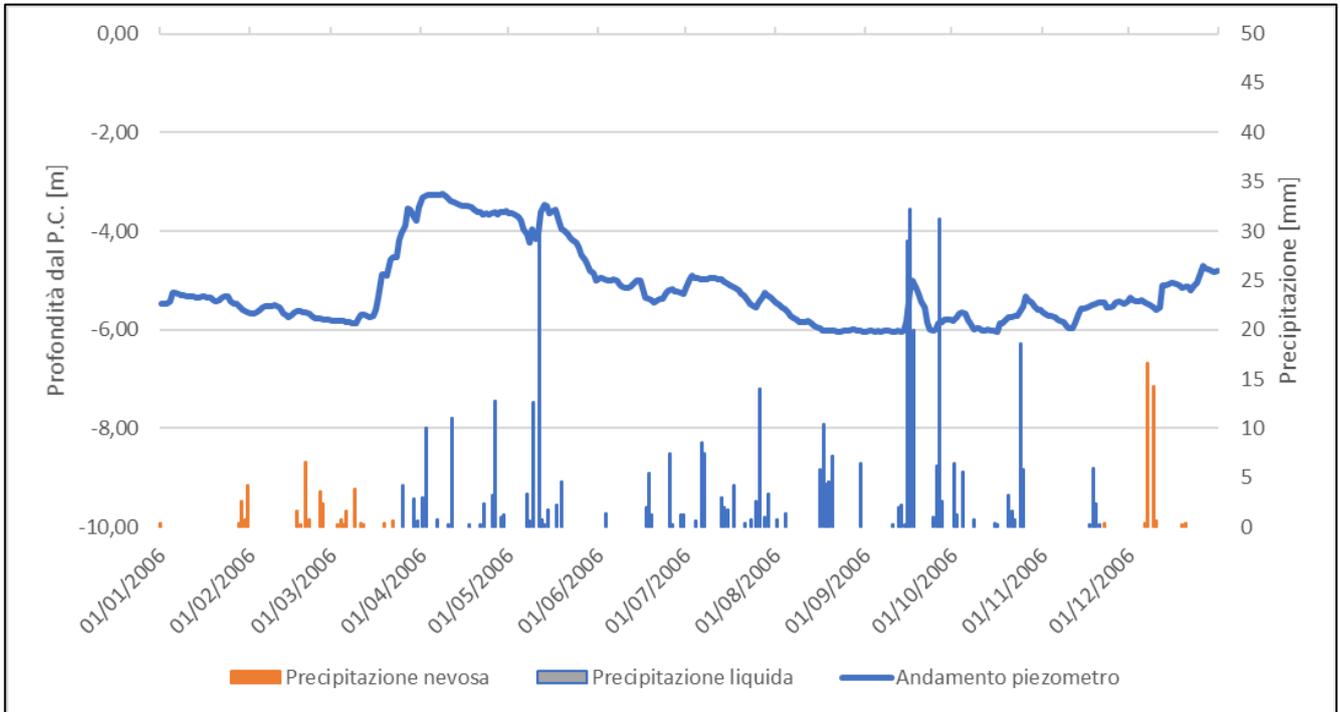


Figura 10.48: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2007

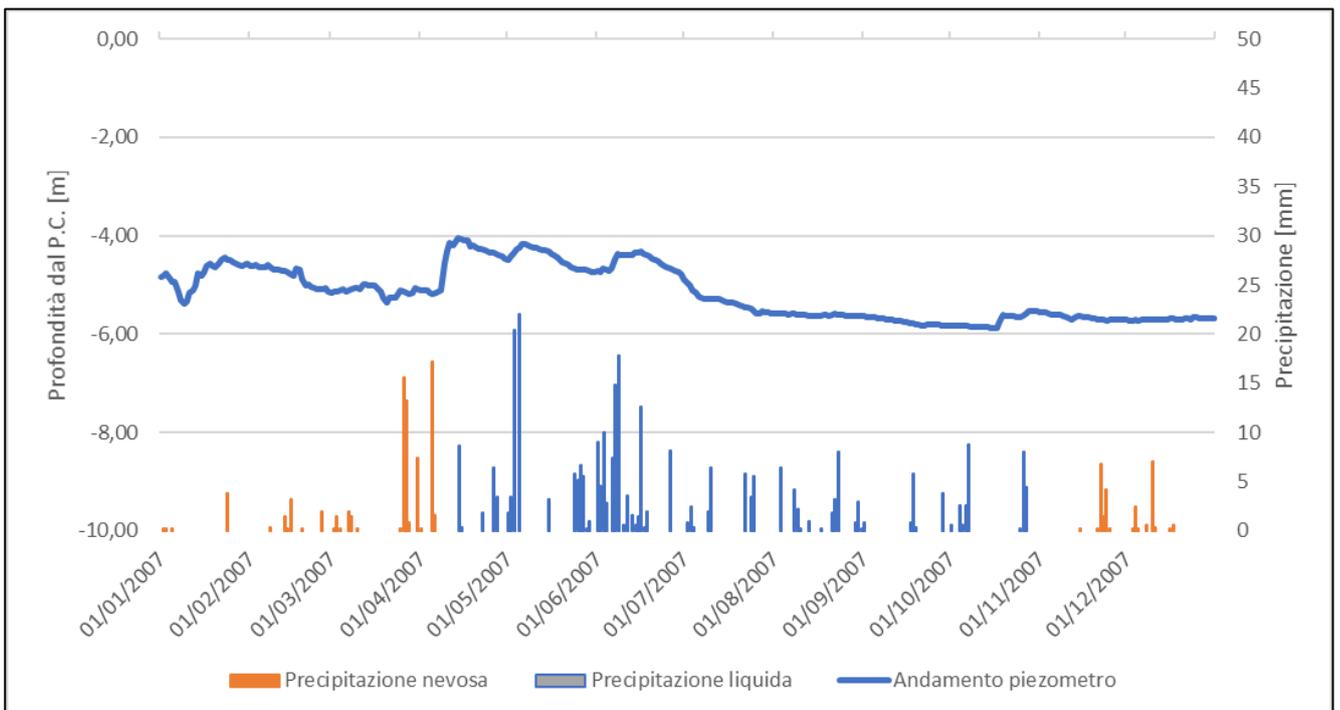


Figura 10.49: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2013

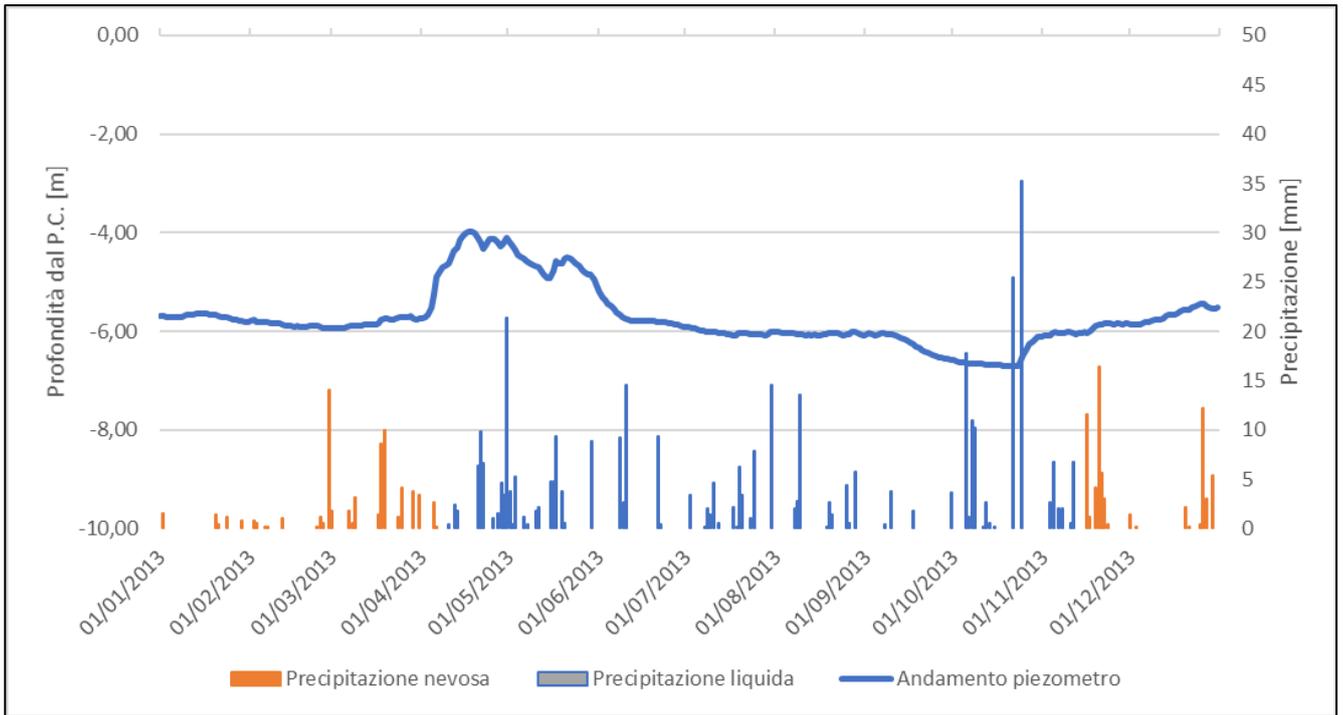


Figura 10.50: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2014

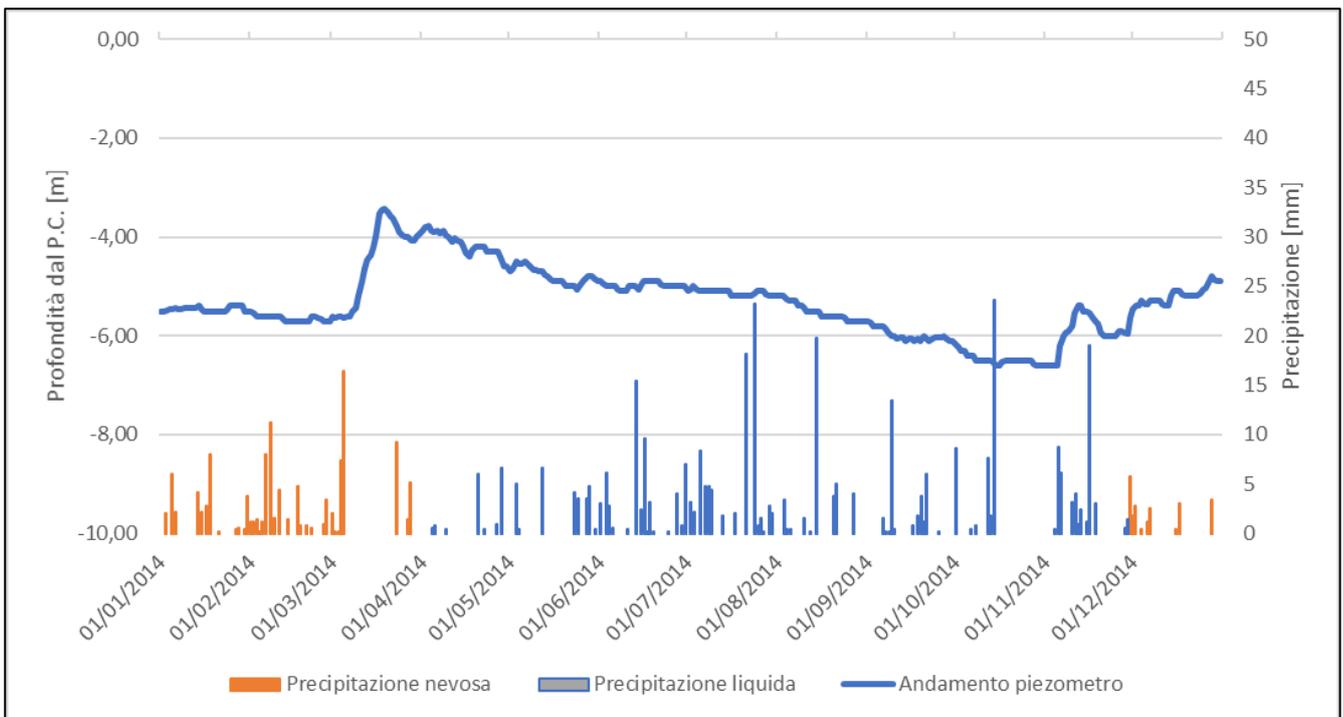
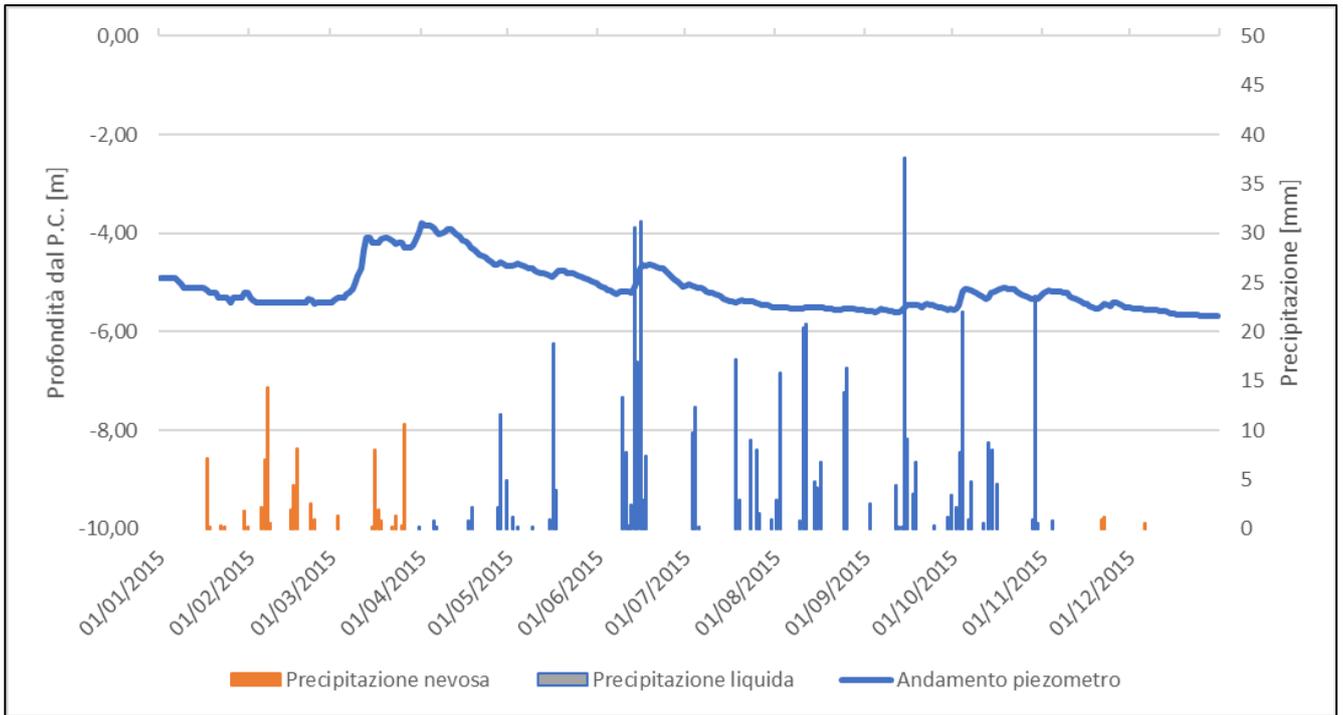


Figura 10.51: Relazione tra precipitazione e livello di falda – Anno 2015



10.8 Allegato VIII: relazioni tra gli spostamenti e il livello di falda per il sito di Bardonecchia Tre Croci

Figura 10.52: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2010

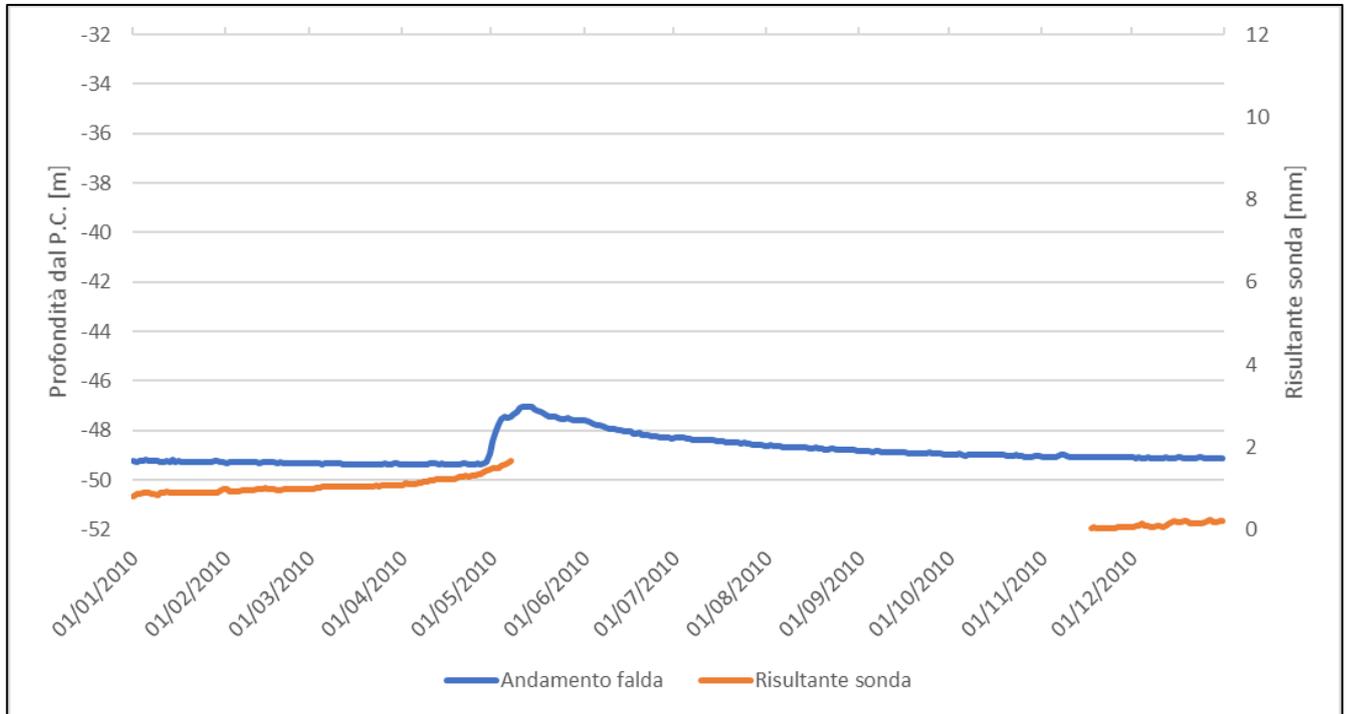


Figura 10.53: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2011

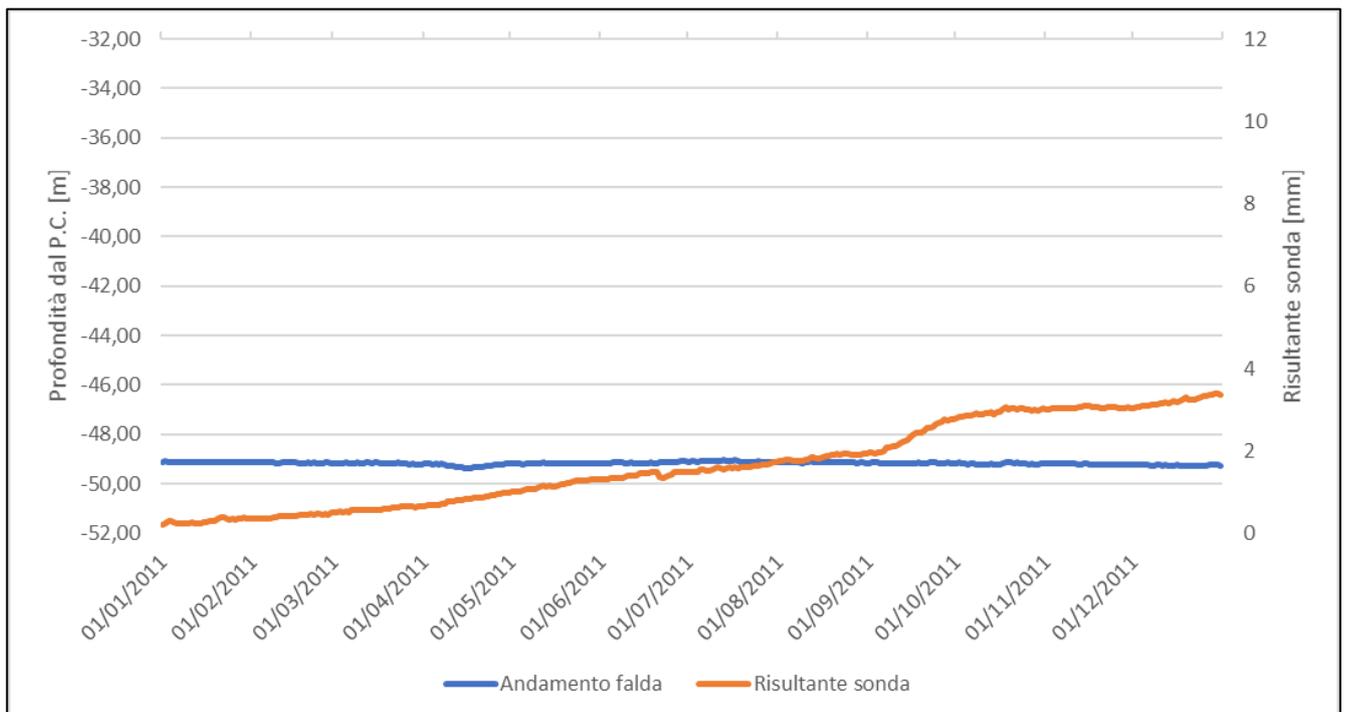


Figura 10.54: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2012

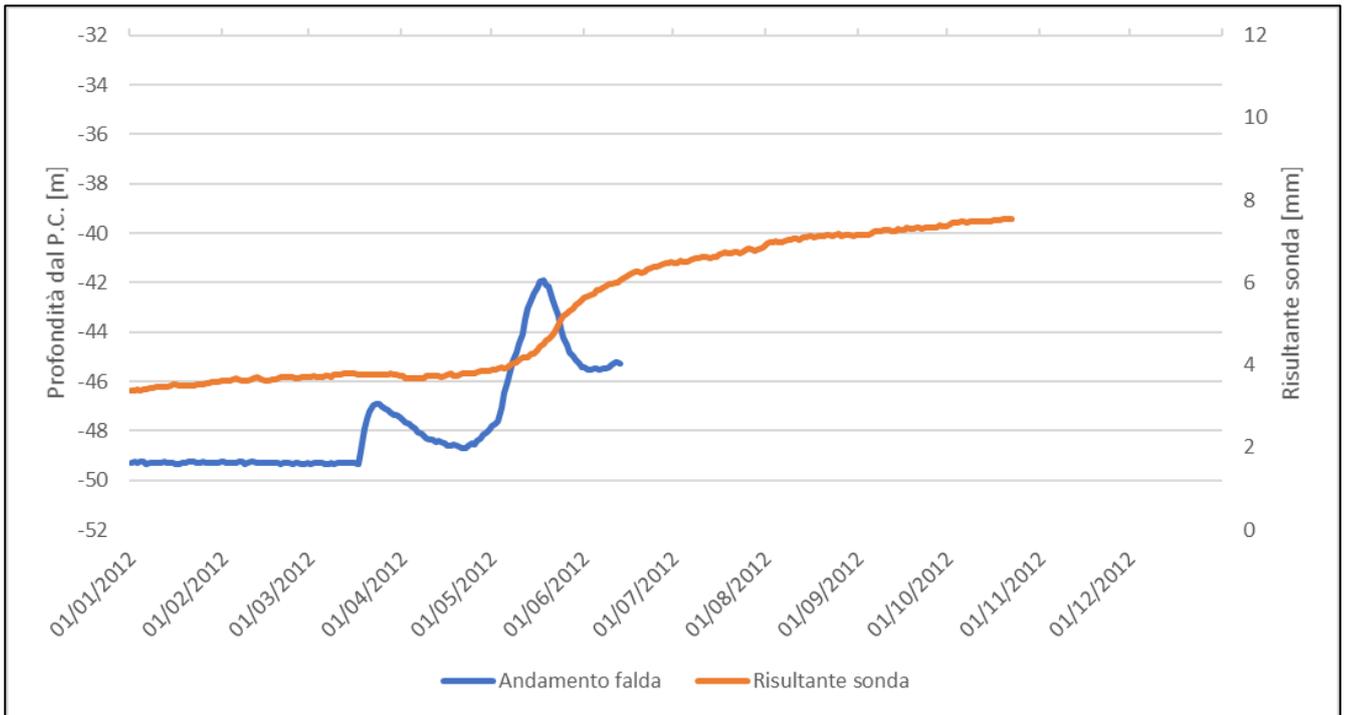
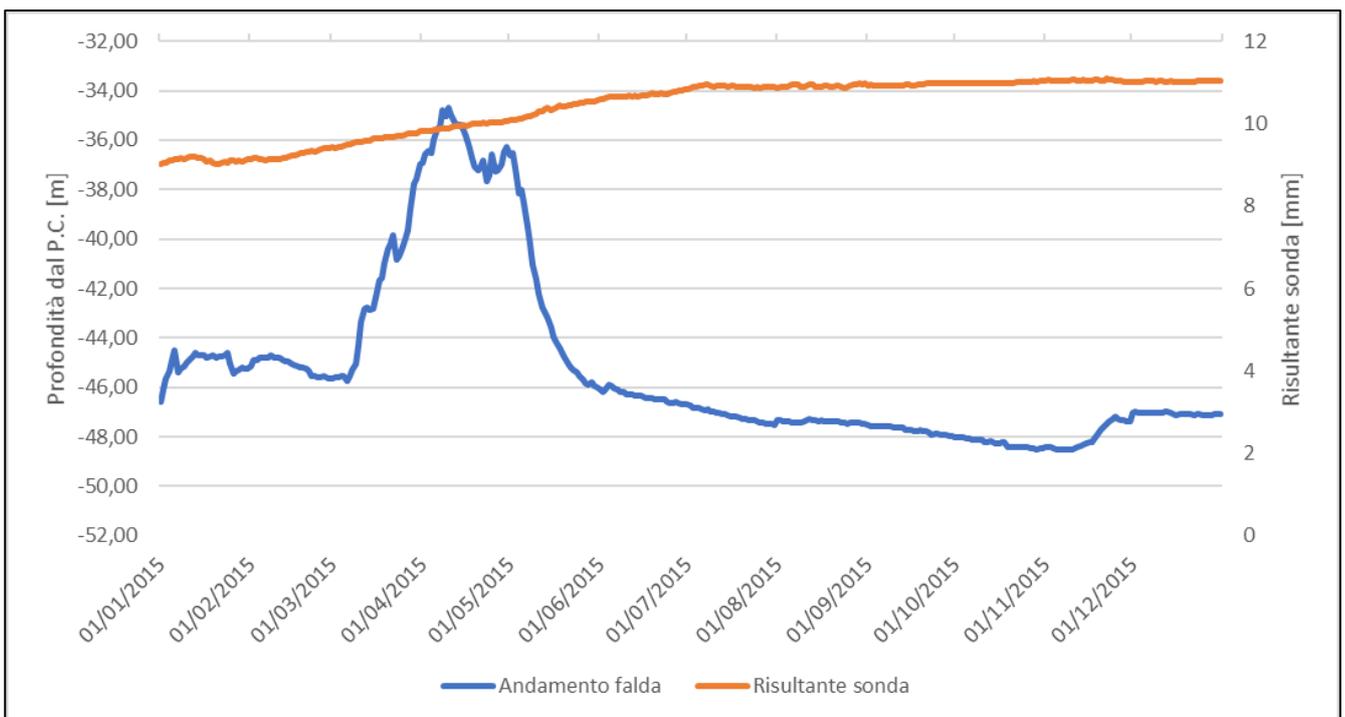


Figura 10.55: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2015



10.9 Allegato IX: relazioni tra gli spostamenti e il livello di falda per il sito di Bardonecchia Rho

Figura 10.56: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2005

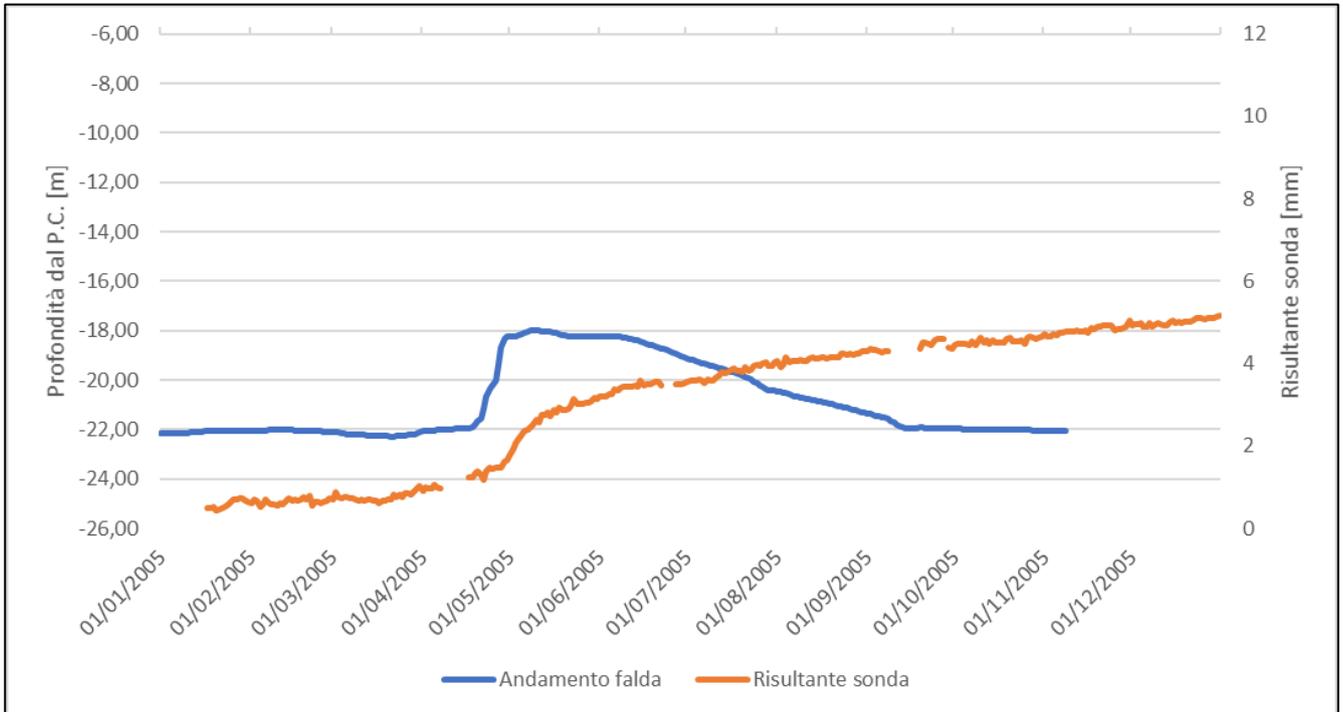


Figura 10.57: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2006

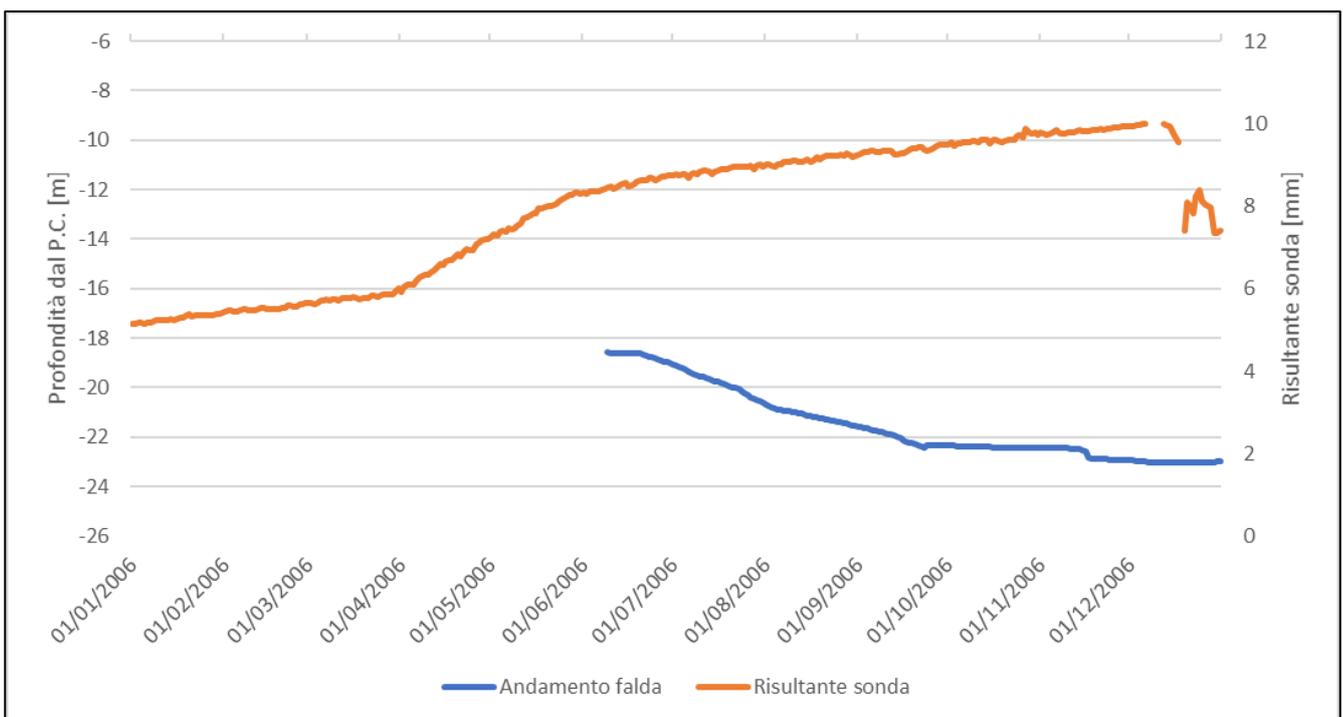


Figura 10.58: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2008

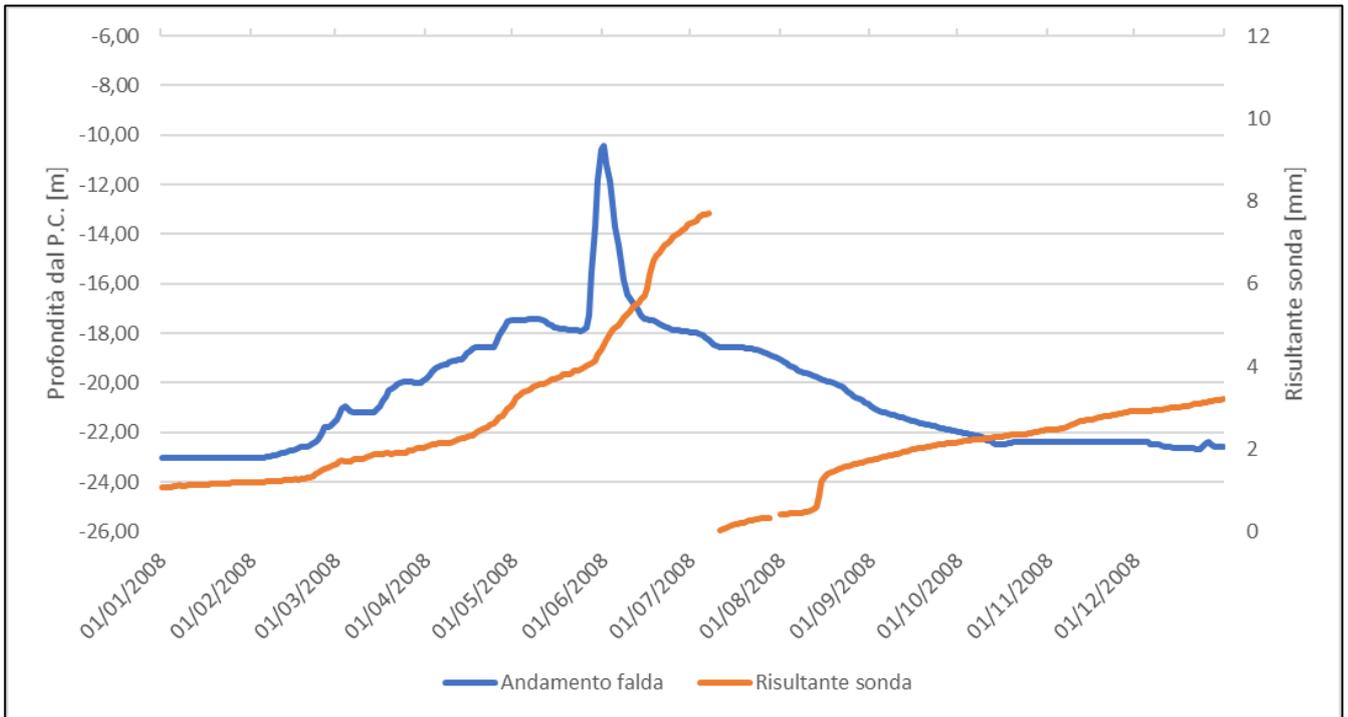


Figura 10.59: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2009

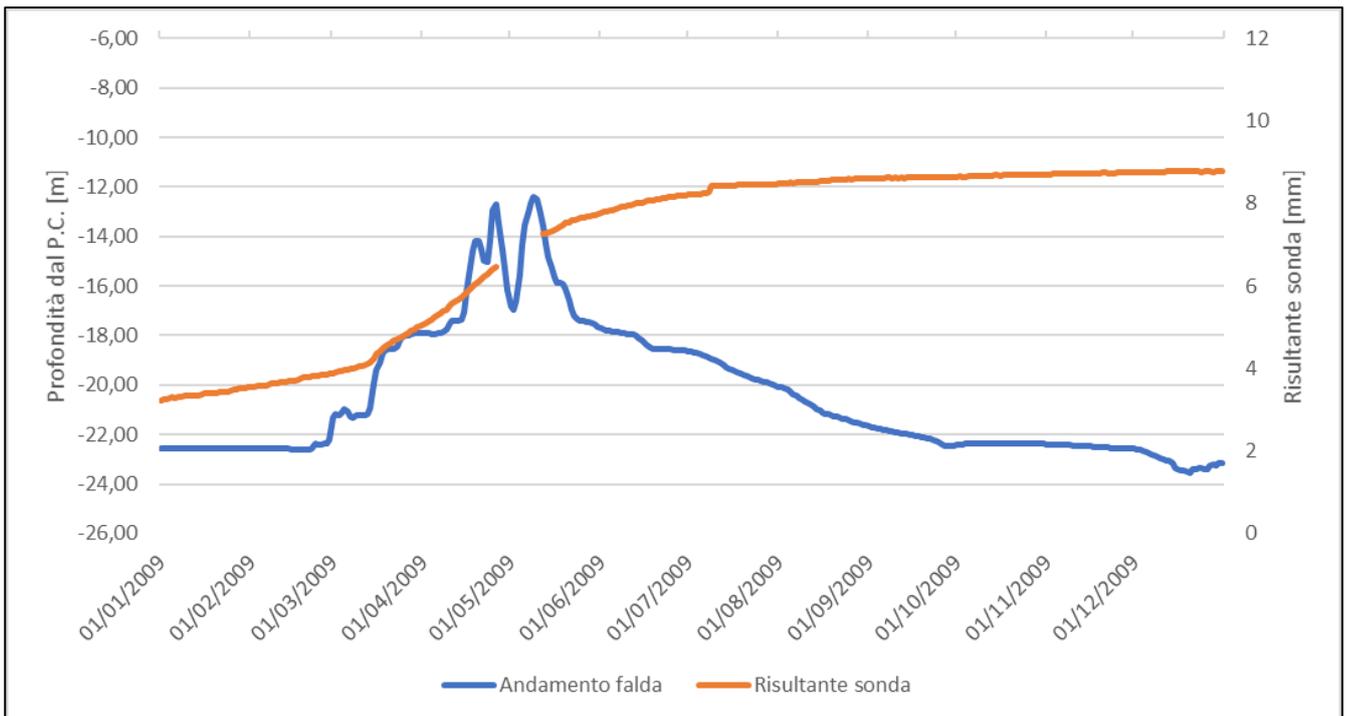


Figura 10.60: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2014

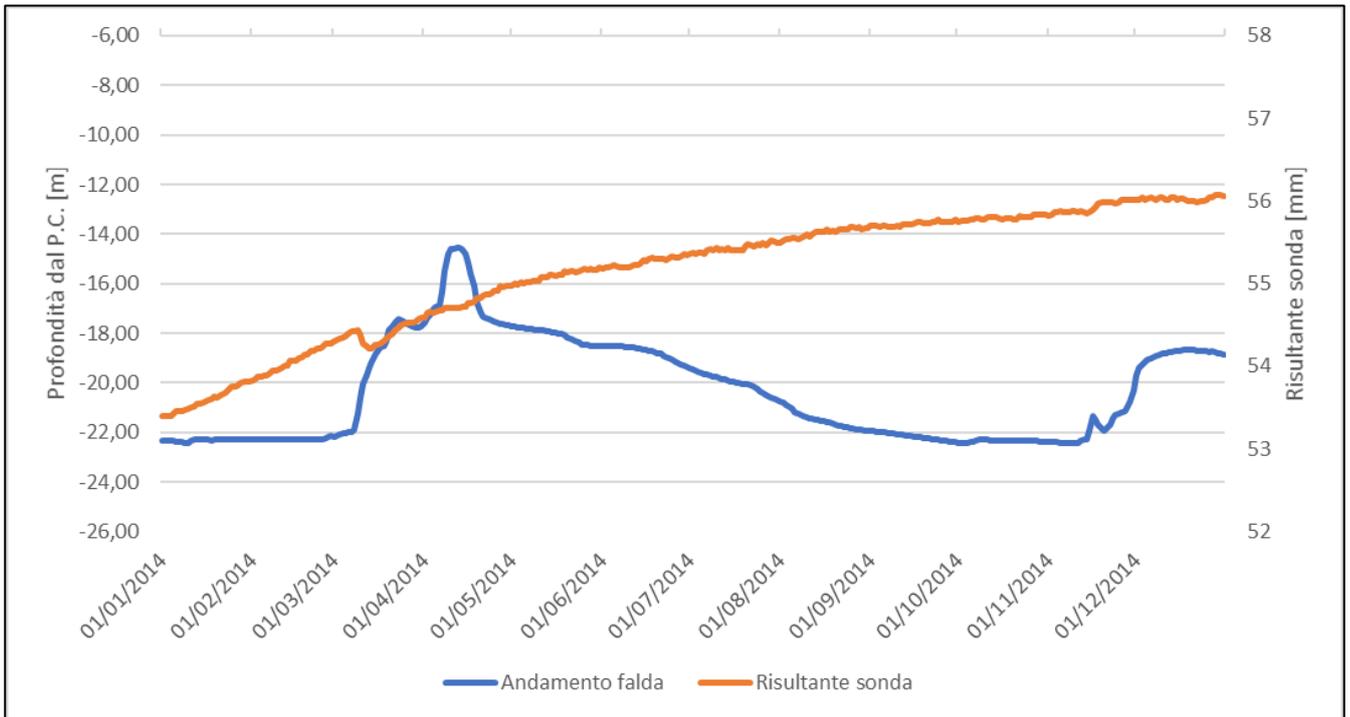


Figura 10.61: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2015

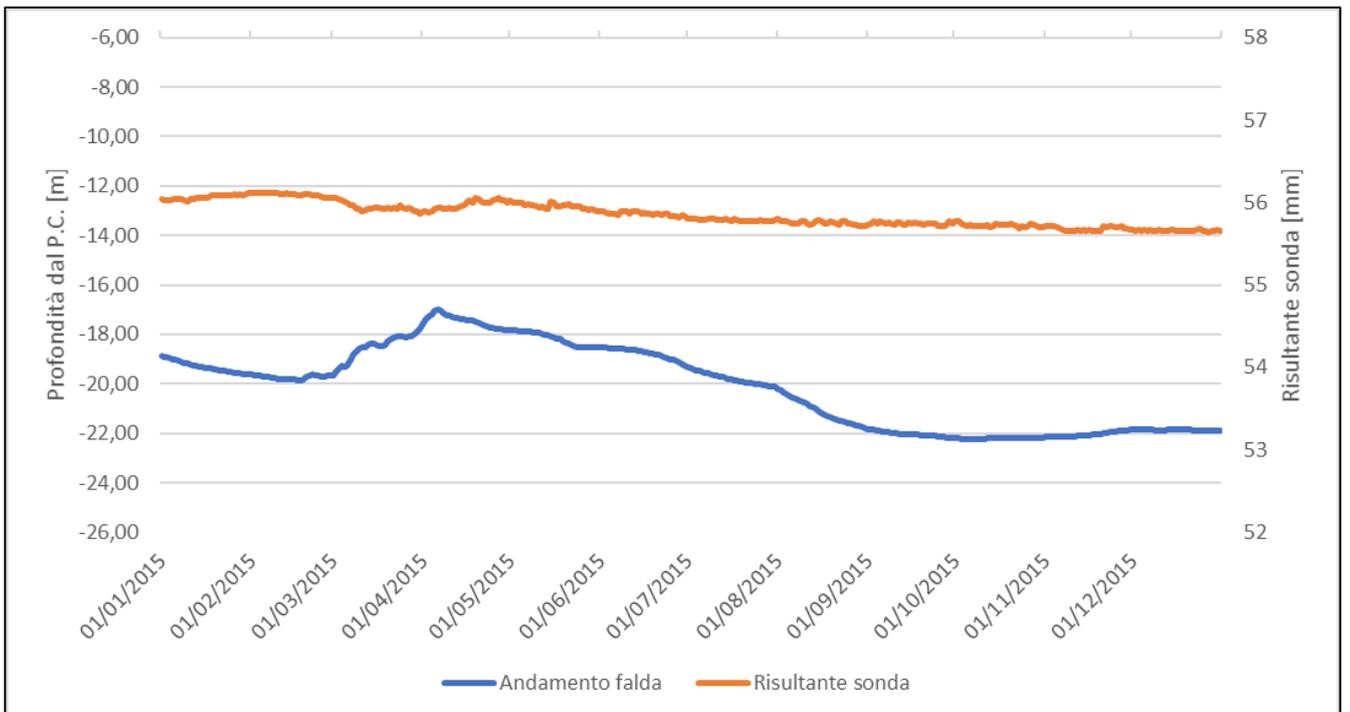
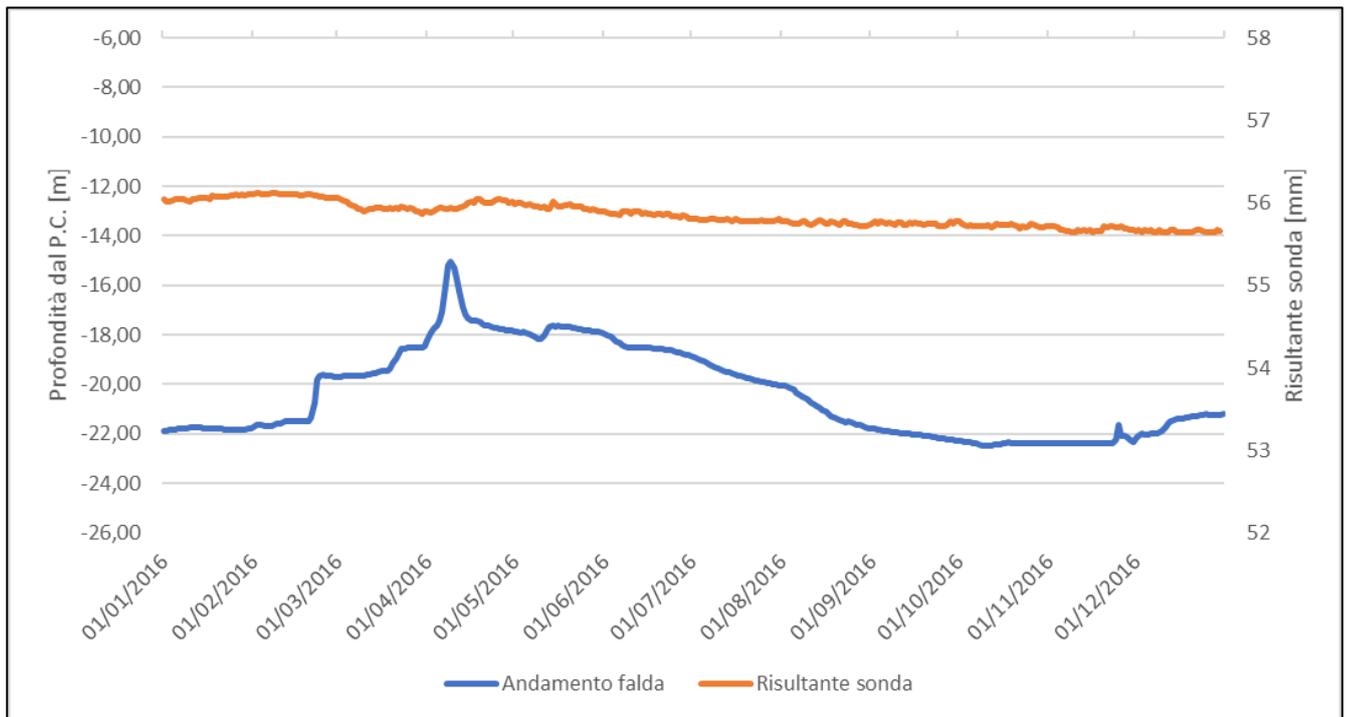


Figura 10.62: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2016



10.10 Allegato X: relazioni tra gli spostamenti e il livello di falda per il sito di Sestriere Borgata

Figura 10.63: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2005

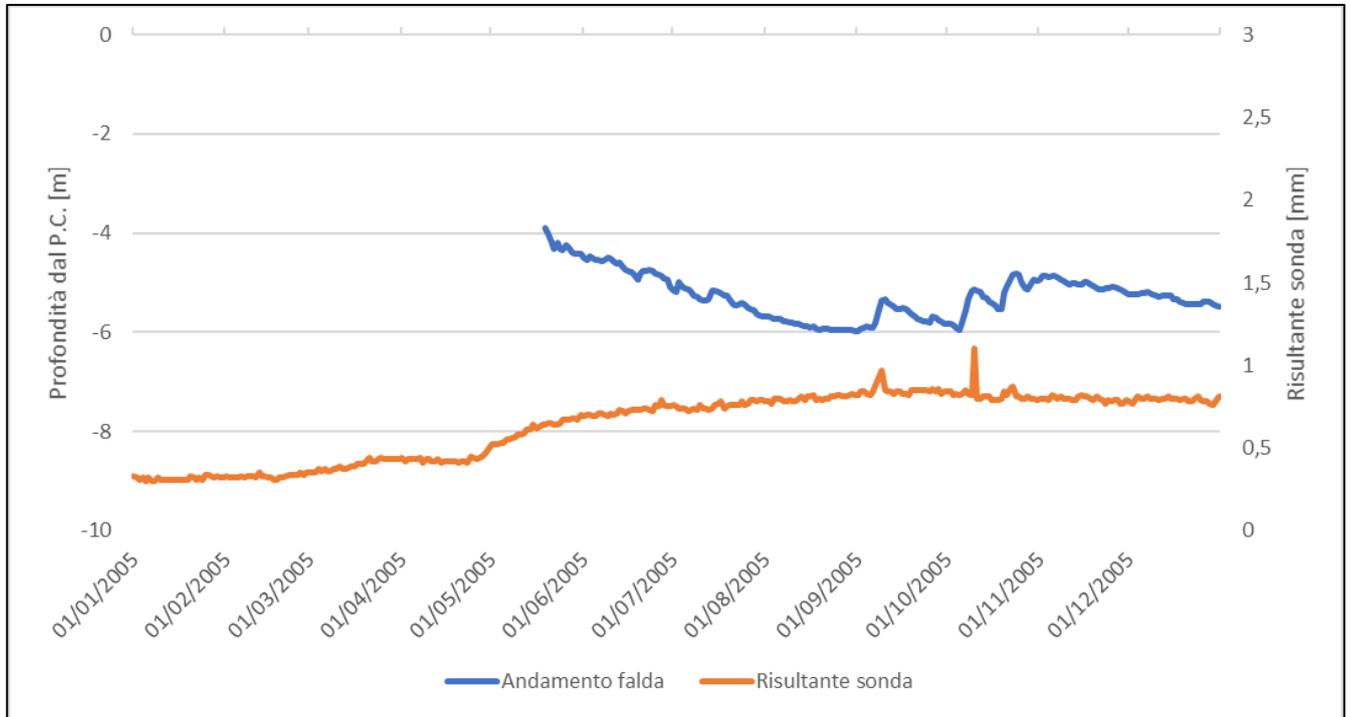


Figura 10.64: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2006

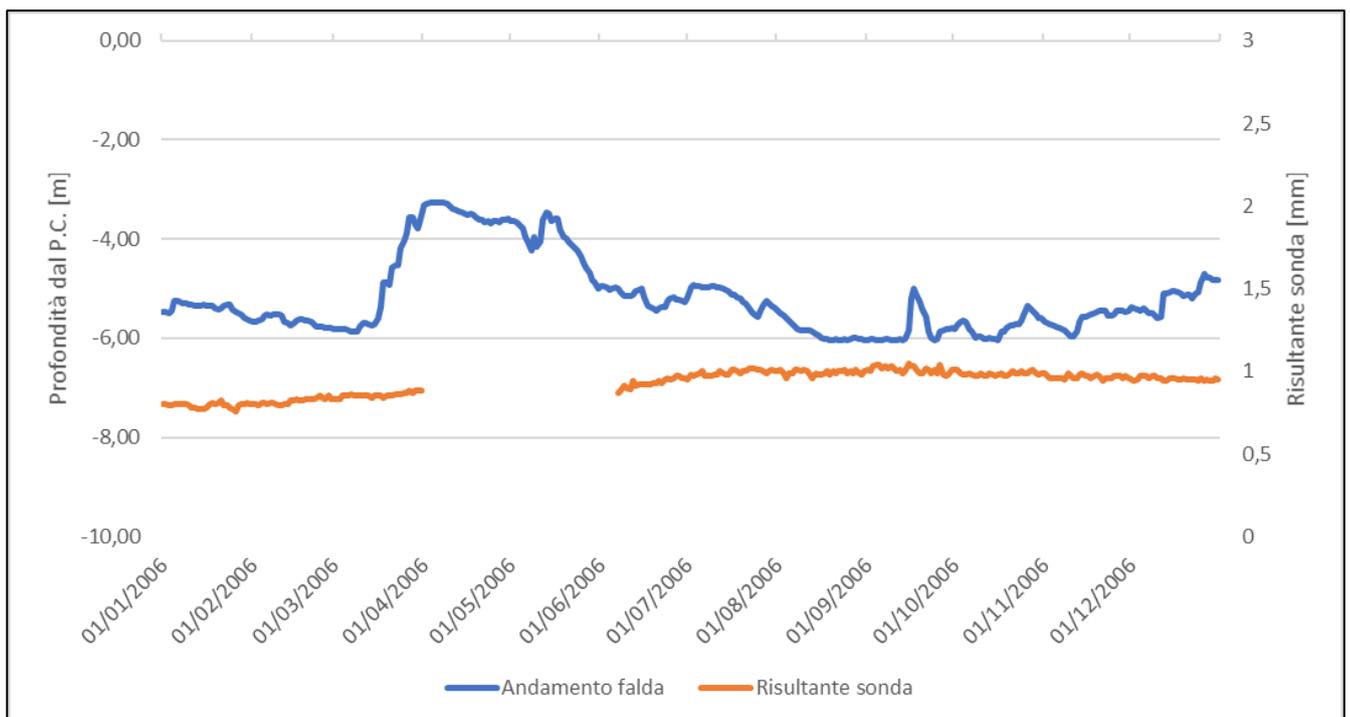


Figura 10.65: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2007

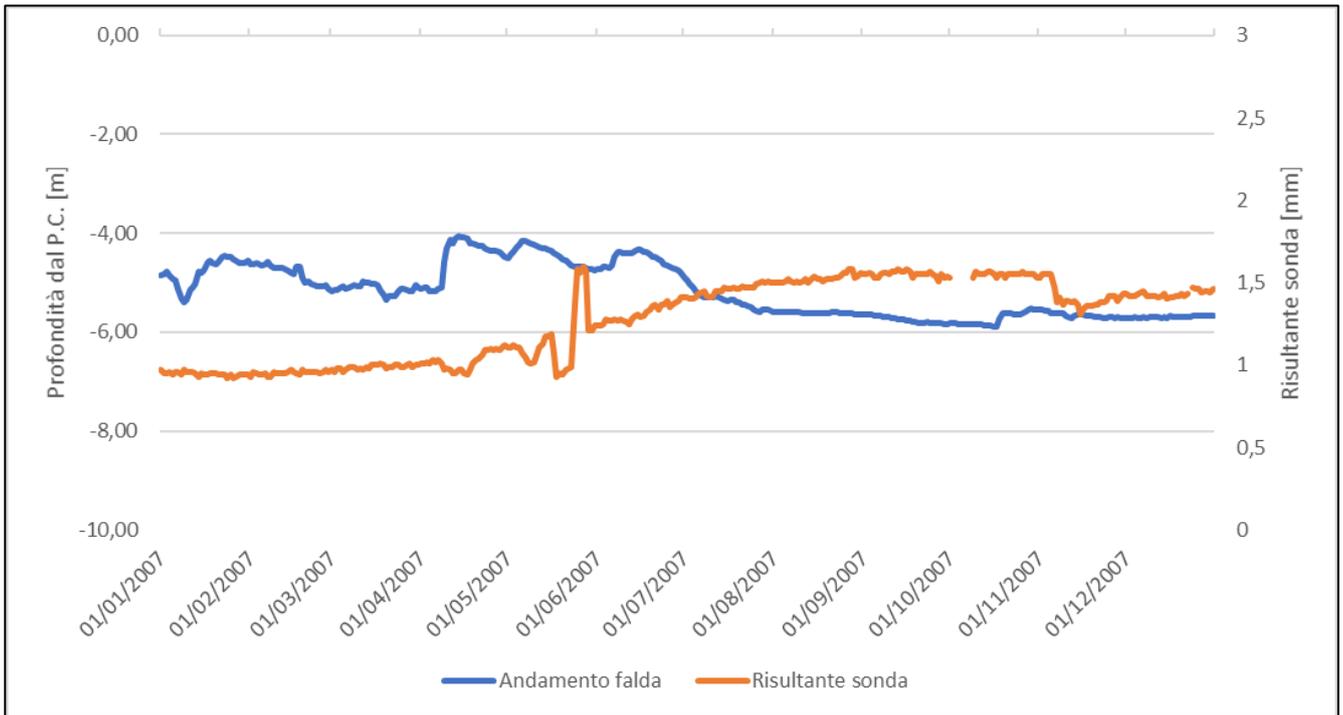


Figura 10.66: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2008

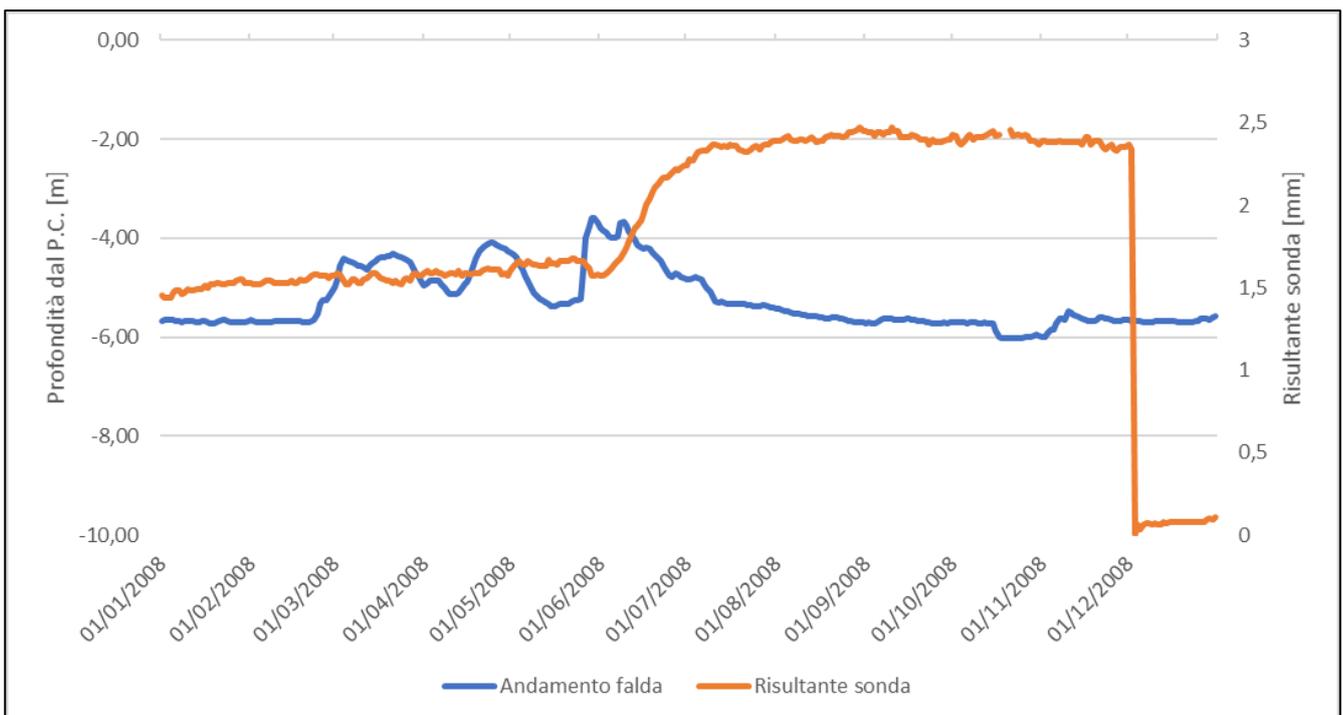


Figura 10.67: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2010

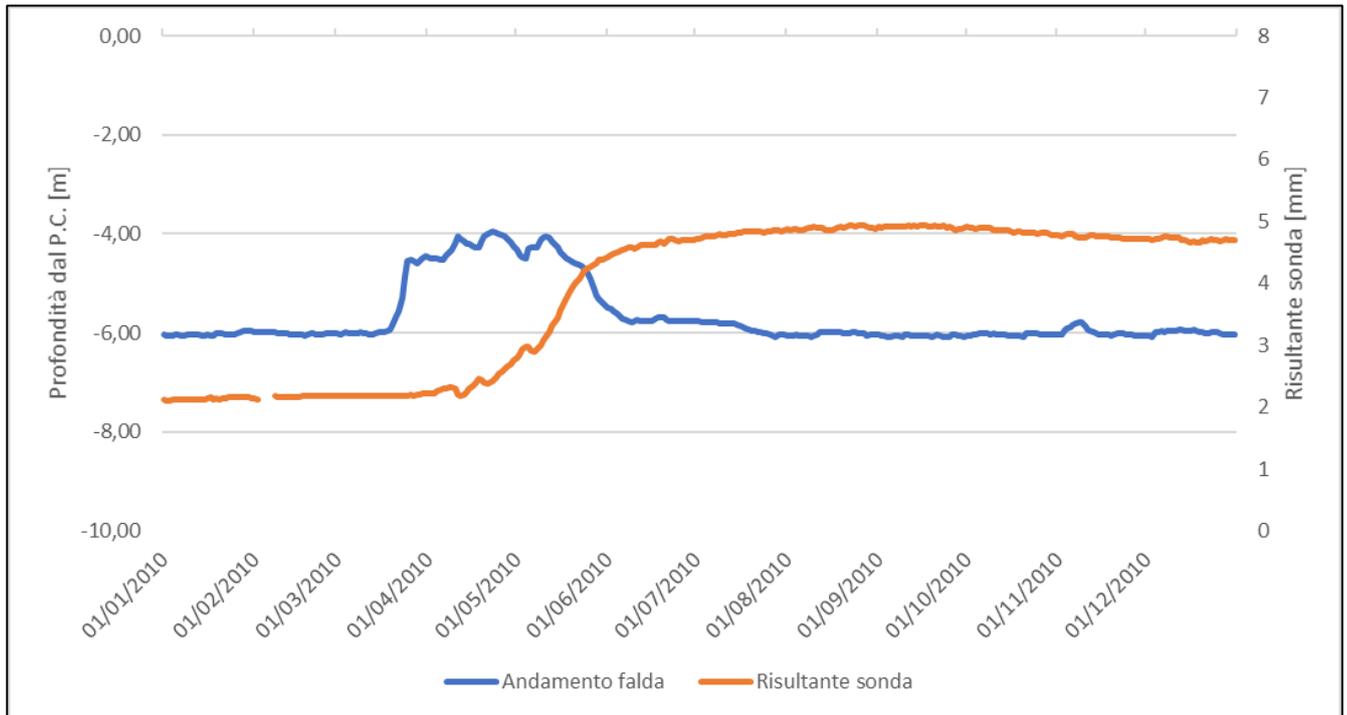


Figura 10.68. Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2011

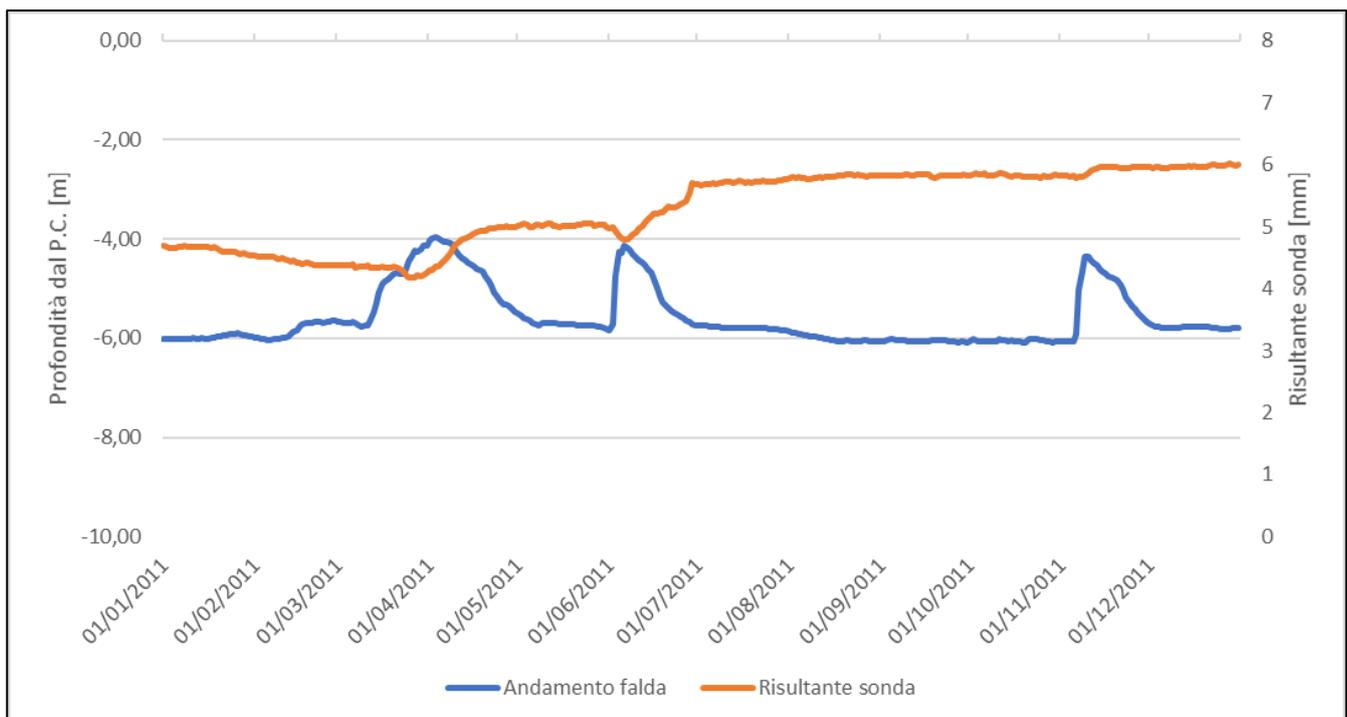


Figura 10.69: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2012

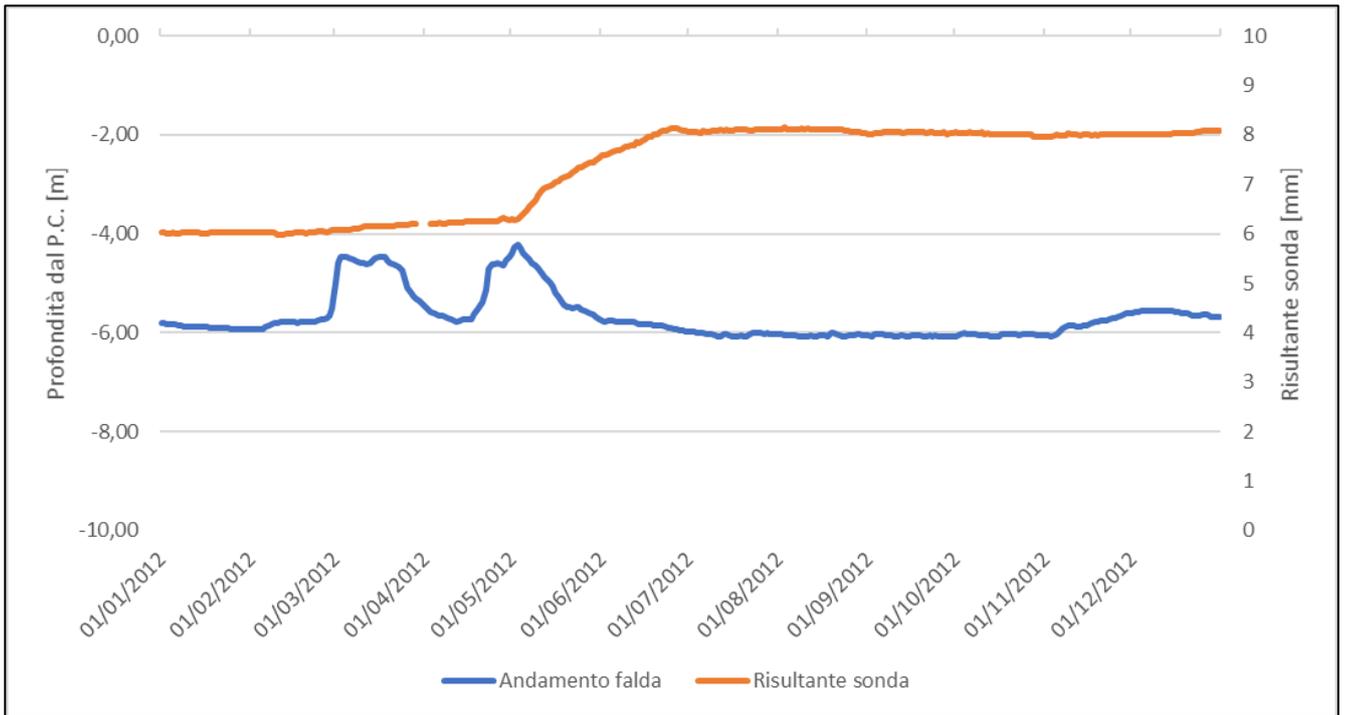


Figura 10.70: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2013

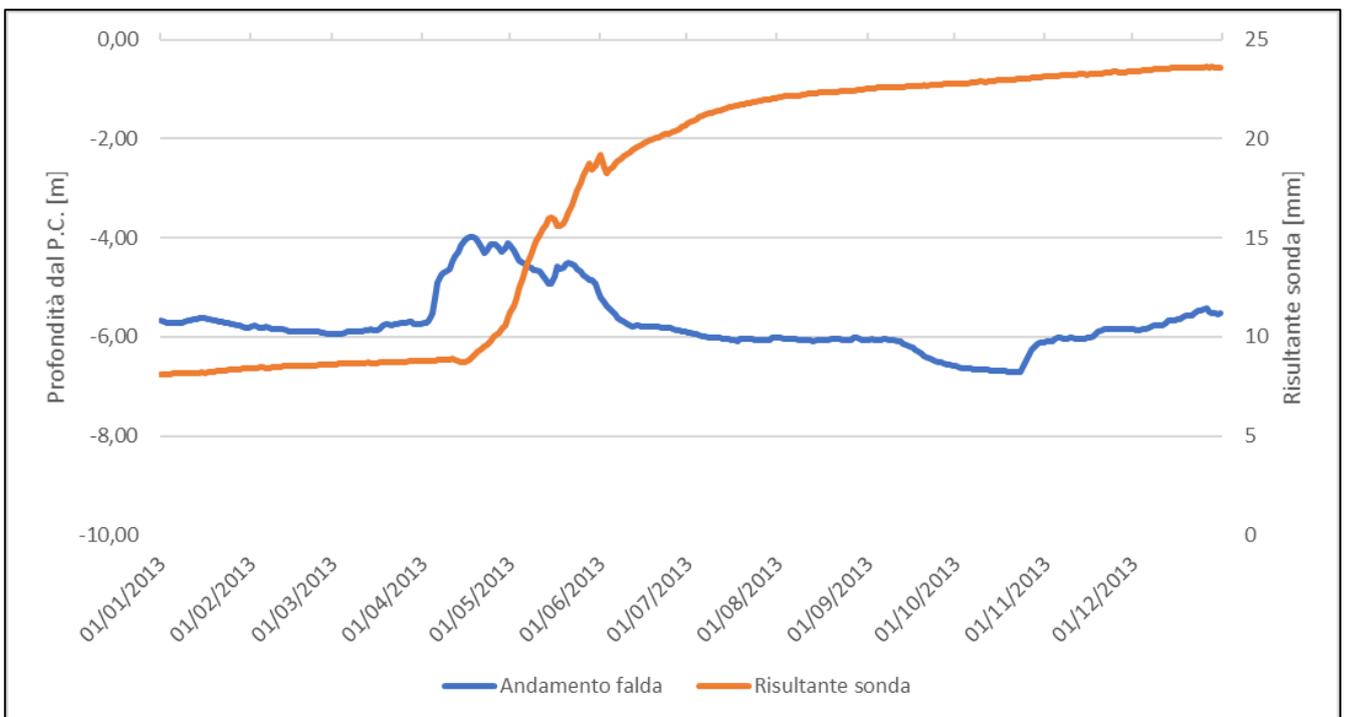


Figura 10.71: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2014

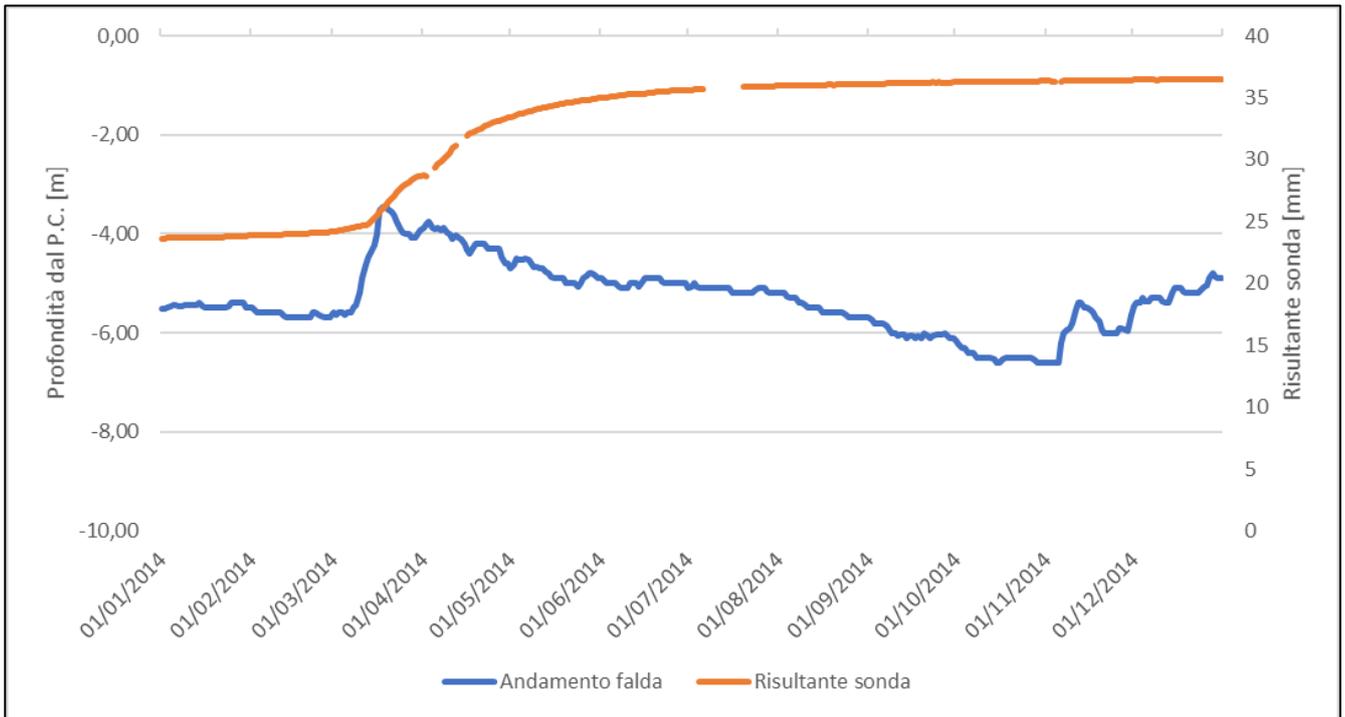


Figura 10.72: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2015

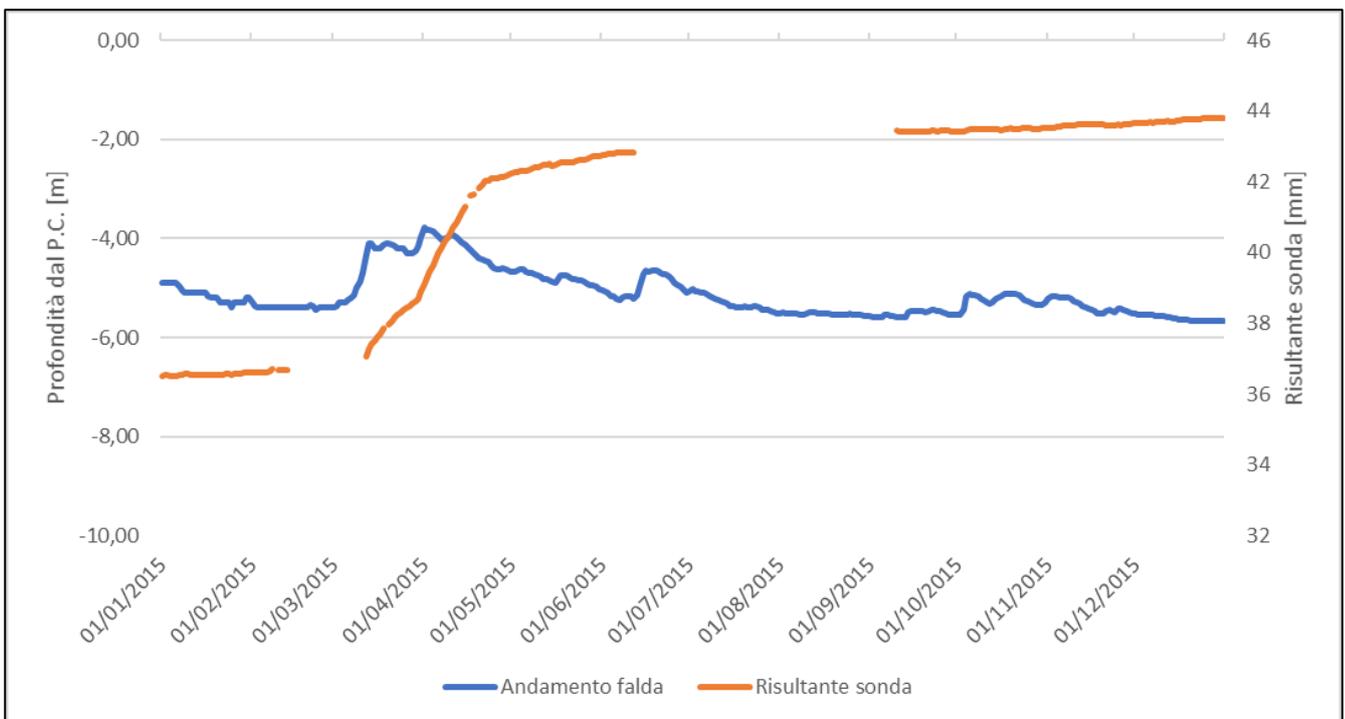
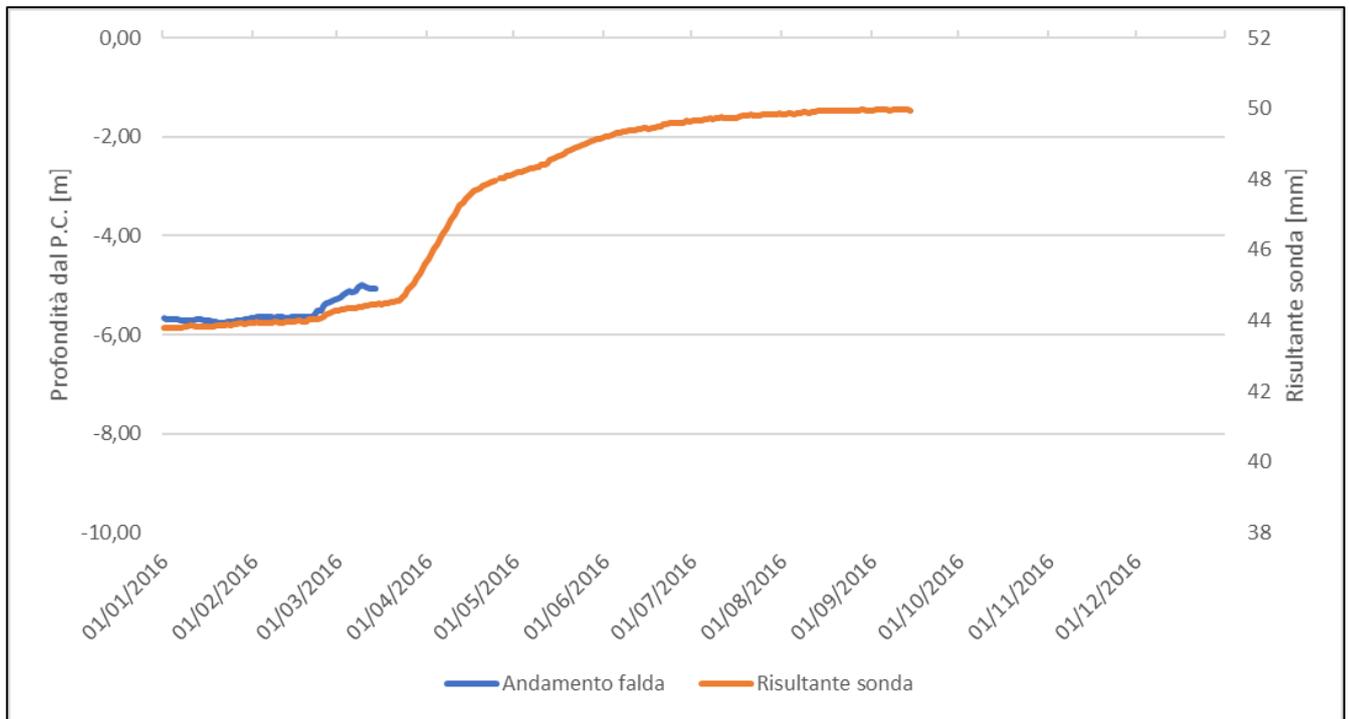


Figura 10.73: Relazione tra sonda inclinometrica fissa e livello di falda - Anno 2016



10.11 Allegato XI: Sondaggio e prova penetrometrica dinamica continua legati al sito di Sauze d'Oulx

Figura 10.74: Sondaggio P1 relativo alla zona di Sauze d'Oulx

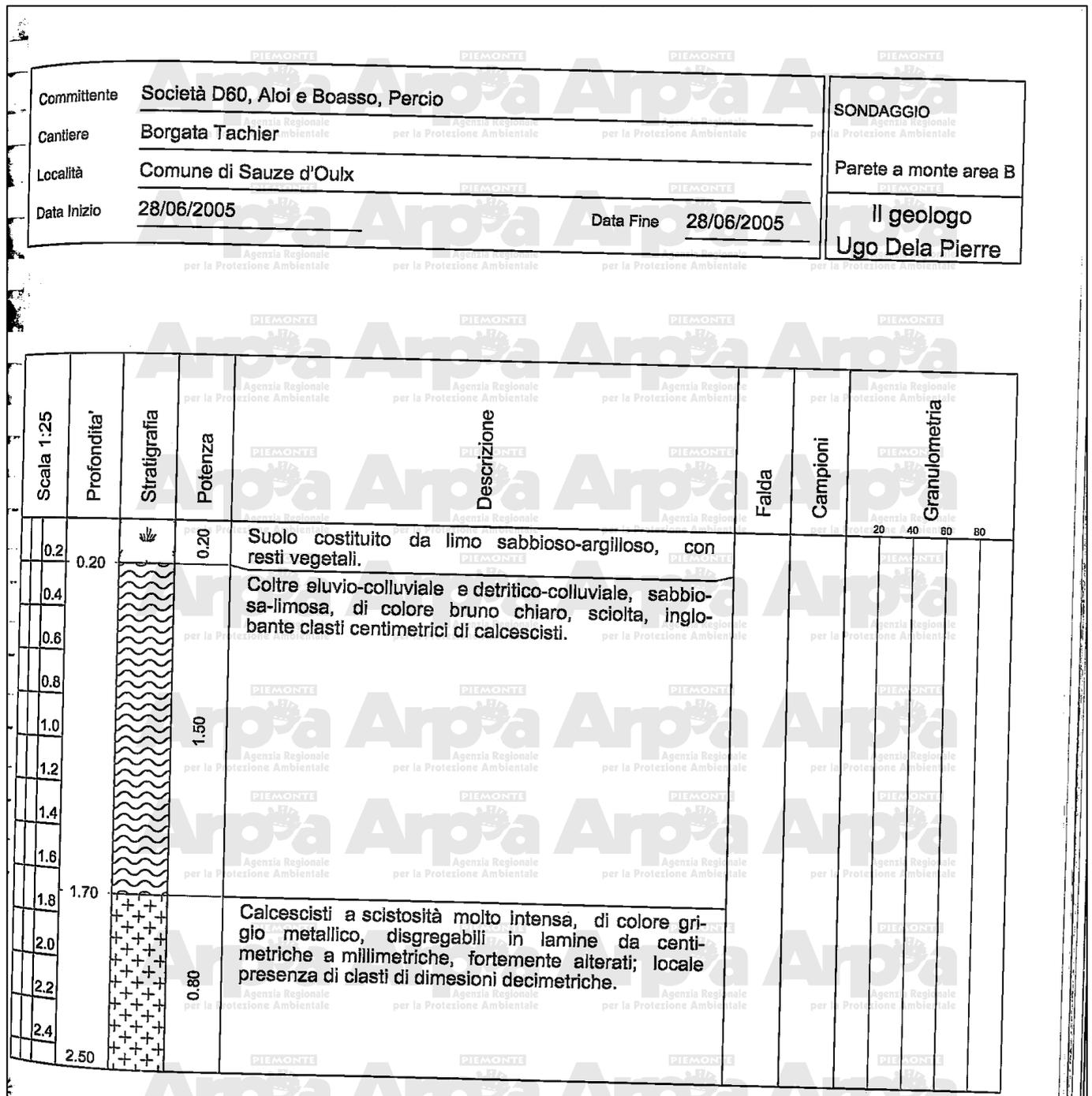
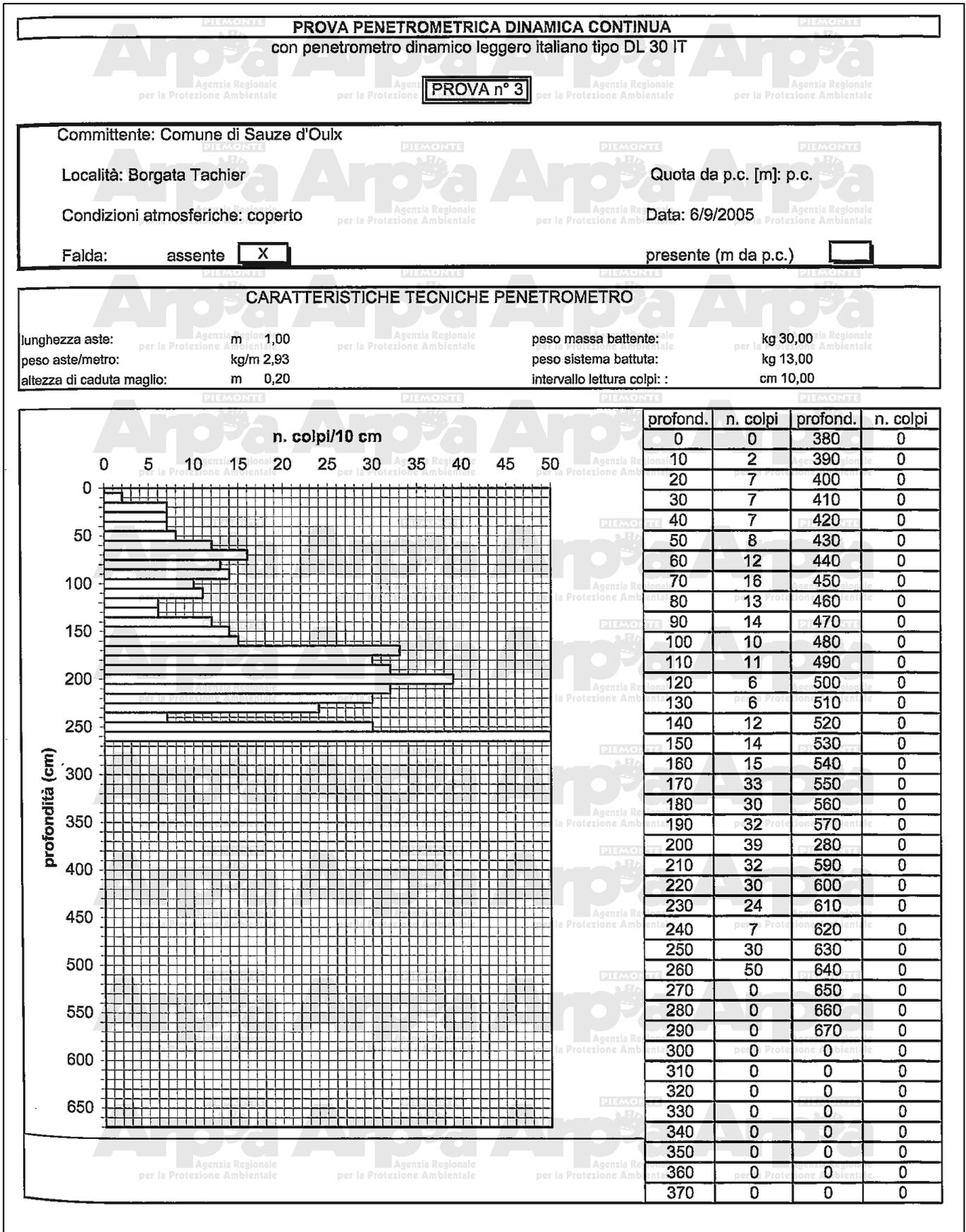


Figura 10.75: Risultato della prova penetrometrica dinamica continua relativa alla zona di Sauze d'Oulx



Allegato XII: Sondaggi relativi al sito di Bardonecchia località Rho

Figura 10.76: Sondaggio 5 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 1/2

 Via Giovanni Agnelli, 71 - 10022 Camagnola (To) Tel. 0119724411 r.a. - Fax 0119771889 http://www.abrate.it - E-mail: info@abrate.it		Committente Comune di Bardonecchia Cantiere Monitoraggio versante a Ovest del concentrico Localita' Bardonecchia (TO) - Valle della Rho Perforazione iniziata il 06/11/2001 Terminata il 13/11/2001 Dep. cassette magazzino comunale Scala 1:100		SONDAGGIO	FOGLIO												
				5	1/2												
				Il compilatore dott. A. Cantù													
profondita' dal p.c. (m)	potenza dello strato	sezione stratigrafica	descrizione litologica	livello stab. della falda	metodo e diam. di perforazione	diametro rivestimenti	percentuale di carotaggio	RQD (%)	piezometro tipo standpipe	inclinometro	cavo coassiale TDK	S.P.T.	pocket penetrometer	pocket vare test	campioni ind. Shelby	campioni rimaneggiati	permeabilità (cm/s)
0.50	0.50		Terreno vegetale.														
1.90	1.90		Limo argilloso debolmente sabbioso con subordinati clasti e frammenti rocciosi centimetrici (max. 2-3 cm), intensa ossidazione ed alterazione, colore nocciola con screziature.		carotaggio continuo 131 mm seripi.												
2.40	2.40		Frammenti e clasti rocciosi prevalentemente di calcescisti, intensamente ossidati, alterati e parzialmente argillificati, in matrice limoso-sabbiosa debolmente argillosa a tratti prevalente, colore nocciola con screziature.		carotaggio continuo 131 mm seripi.												
6.00	6.00		Come sopra, con minore ossidazione ed alterazione, colore da grigio-nocciola a grigio scuro.		carotaggio continuo 101 mm seripi.	162 mm											
8.40	8.40																
15.30	15.30		Calcescisto grafítico intensamente alterato, talora fogliettato con numerose passate decimetriche sfatte e/o argillificate, colore grigio nerastro.		rotazione con carotaggio continuo 131 mm seripi.	127 mm		100 %									
20.00	20.00																
17.40	17.40																
32.70	32.70																

Figura 10.77: Sondaggio 5 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 2/2

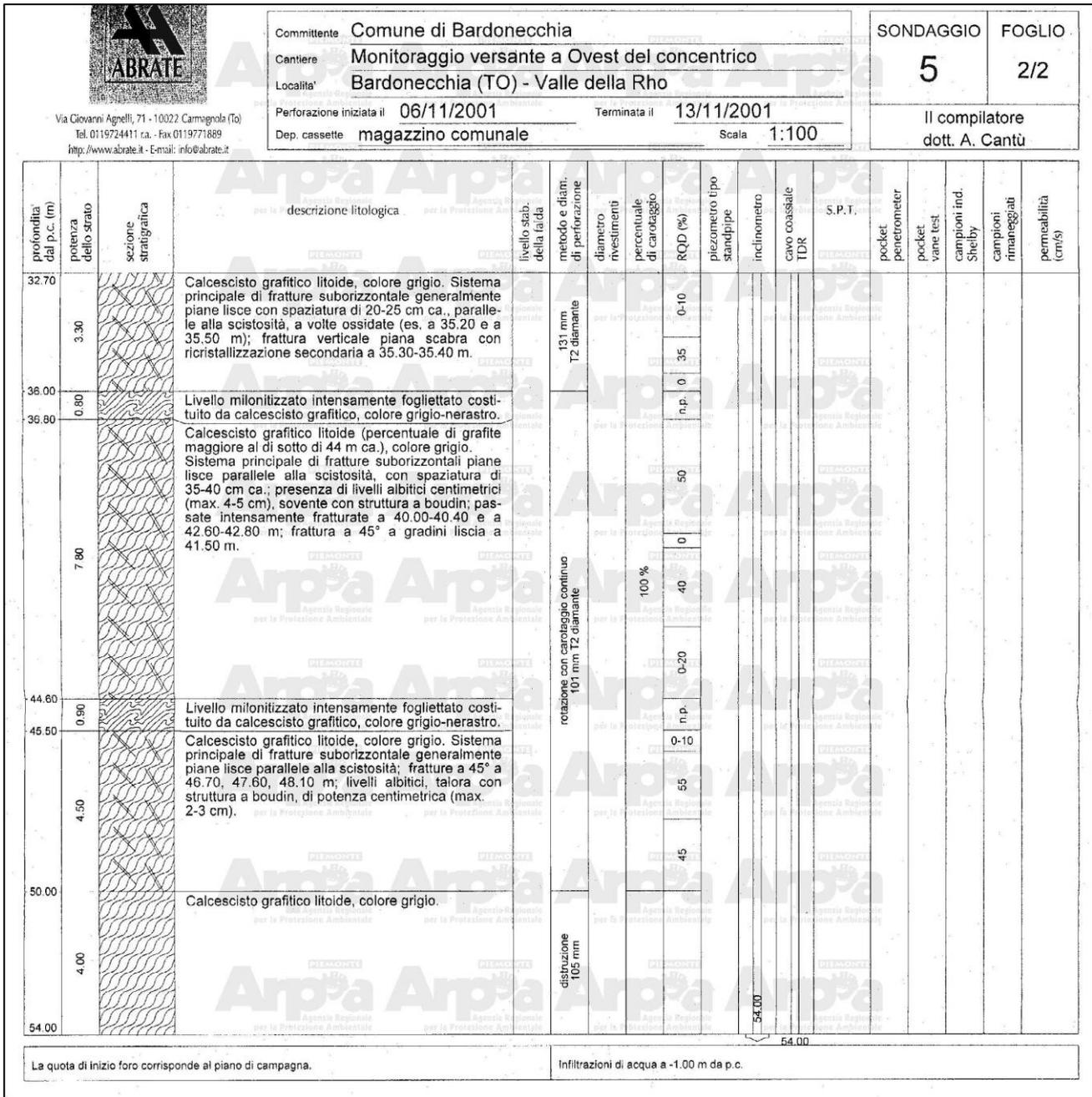


Figura 10.78: Sondaggio 4 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 1/1

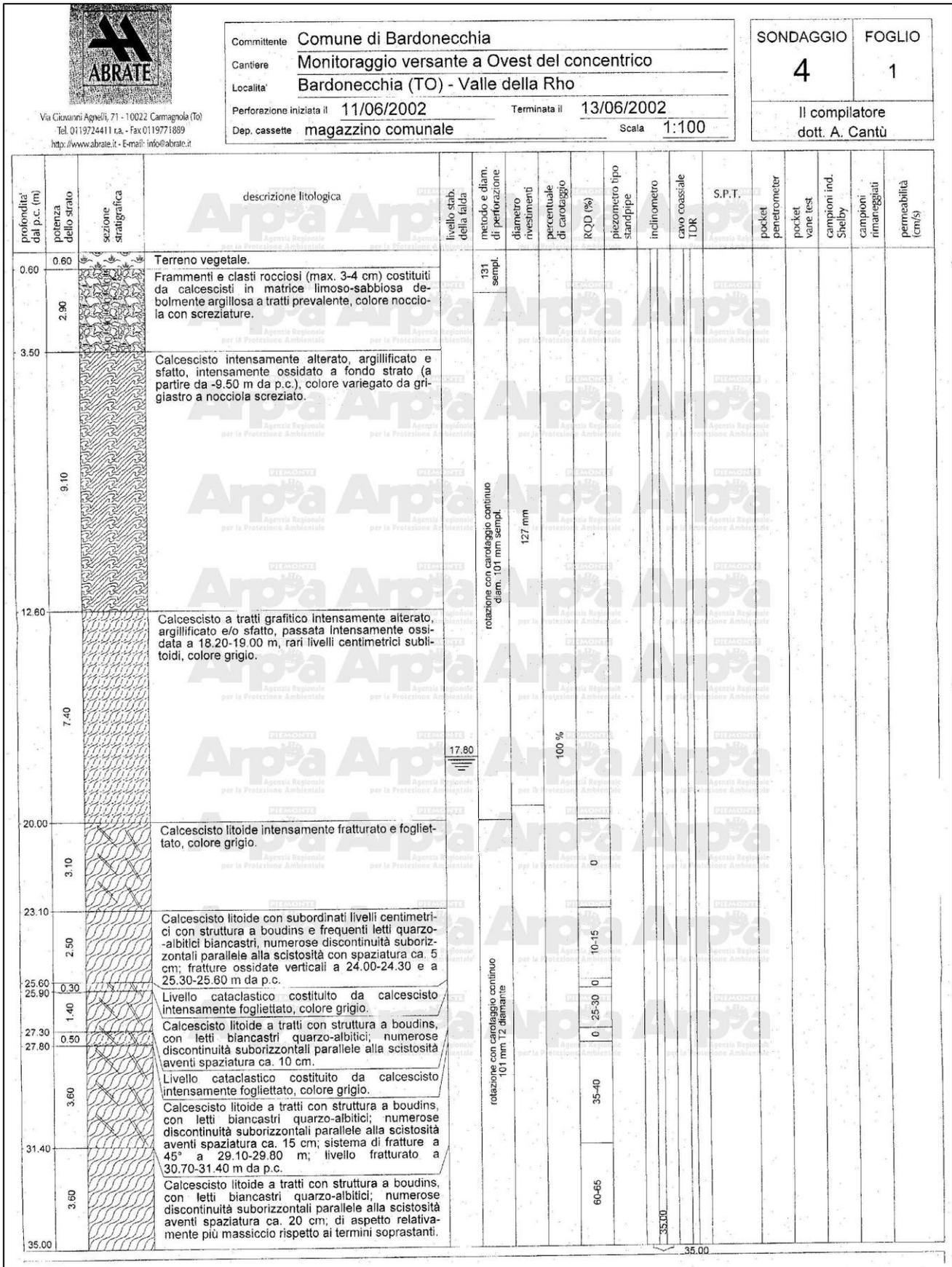


Figura 10.79: Sondaggio 6 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 1/3

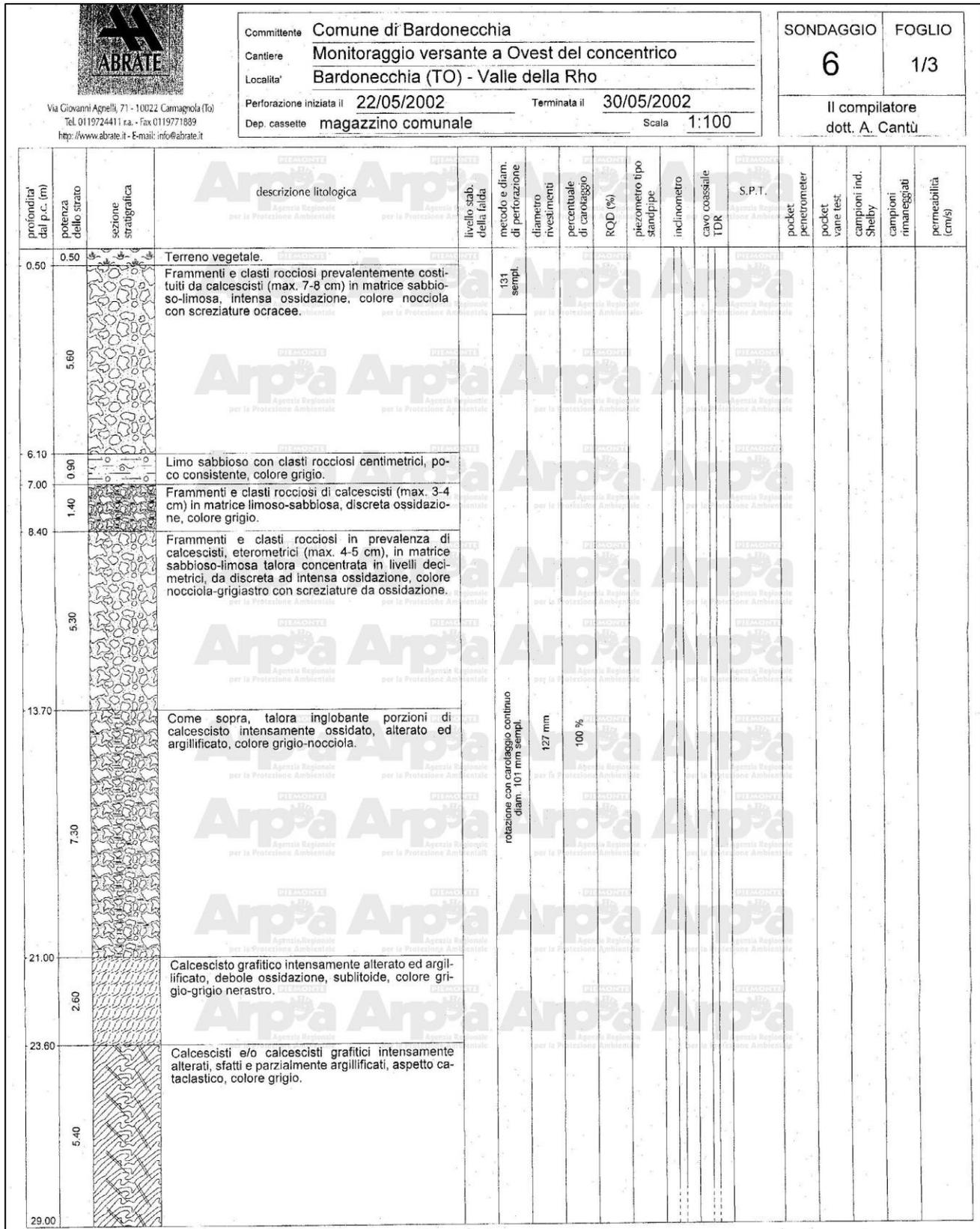


Figura 10.80: Sondaggio 6 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 2/3

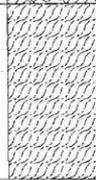
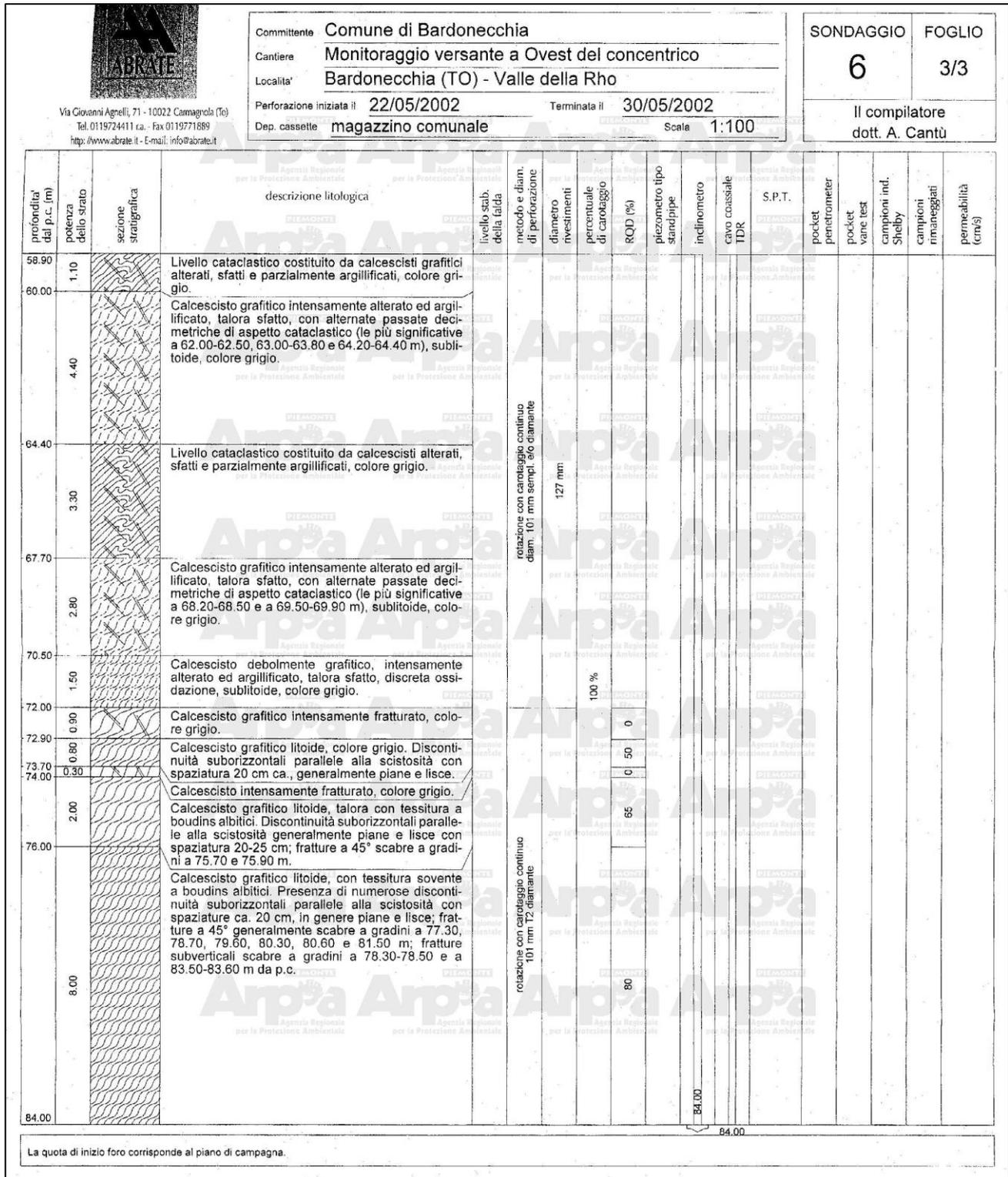
 Via Giovanni Agnelli, 71 - 10022 Camagiola (To) Tel. 0119724411 ca. - Fax 0119771889 http://www.abrate.it - E-mail: info@abrate.it		Committente Comune di Bardonecchia Cantiere Monitoraggio versante a Ovest del concentrico Localita' Bardonecchia (TO) - Valle della Rho Perforazione iniziata il 22/05/2002 Terminata il 30/05/2002 Dep. cassette magazzino comunale Scala 1:100		SONDAGGIO 6	FOGLIO 2/3	Il compilatore dott. A. Cantù											
profondita' dal p.c. (m)	potenza dello strato	sezione stratigrafica	descrizione litologica	livello stab. della falda	metodo e diam. di perforazione	diametro rivestimenti	percentuale di carotaggio	RQD (%)	piezometro tipo standpipe	incinometro	cavo coassiale TDR	S.P.T.	pocket penetrometer	pocket vane test	campioni ind. Shelby	campioni rimaneggiati	permeabilità (cm/s)
29.00	7.60		Calcescisto debolmente graffito, intensamente alterato ed argillificato, talora sfatto, discreta ossidazione, sublitoidi, colore grigio.														
36.60	1.60		Livello cataclastico costituito da calcescisti alterati, sfatti e parzialmente argillificati, colore grigio.														
36.20	0.90		Calcescisto debolmente graffito, intensamente alterato ed argillificato, talora sfatto, discreta ossidazione, sublitoidi, colore grigio.														
39.00	0.50		Calcescisto debolmente graffito, intensamente alterato ed argillificato, talora sfatto, discreta ossidazione, sublitoidi, colore grigio.														
39.50	4.80		Livello cataclastico costituito da calcescisti alterati, sfatti e parzialmente argillificati, colore grigio. Calcescisto debolmente graffito, intensamente alterato ed argillificato, talora sfatto, discreta ossidazione, sublitoidi, colore grigio.		rotazione con carotaggio continuo diam. 101 mm semp.												
44.10	7.90		Calcescisto graffito intensamente alterato ed argillificato, talora sfatto, con alternate passate decimetriche di aspetto cataclastico (le più significative a 44.00-44.80, 45.80-47.20, 47.80-48.30 e 49.50-50.40 m), sublitoidi, colore grigio.			127 mm	100 %										
52.00	3.00		Livello cataclastico costituito da calcescisto alterato, sfatto e parzialmente argillificato, colore grigio.														
55.00	3.90		Calcescisto graffito intensamente alterato ed argillificato, talora sfatto, sublitoidi con rari livelli litoidi, colore grigio.														
58.90																	

Figura 10.81: Sondaggio 6 relativo al sito di Bardonecchia Rho, foglio 3/3



10.12 Allegato XII: Screenshot dal software Rockscience dei parametri utilizzati nel modello

Figura 10.82: Parametri relativi allo Strato 1 (fase elastica del materiale)

1_EL

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent **Unsaturated Shear Strength**

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

Figura 10.83: Parametri relativi allo Strato 2 (fase elastica del materiale)

2_EL

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent **Unsaturated Shear Strength**

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

Figura 10.84: Parametri relativi allo Strato 3 (fase elastica del materiale)

3_EL

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent **Unsaturated Shear Strength**

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

Figura 10.85: Parametri relativi allo Strato 4 (fase elastica del materiale)

4_EL

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent **Unsaturated Shear Strength**

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

Figura 10.86: Parametri relativi allo Strato 5 (fase elastica del materiale)

5_EL

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m³):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent **Unsaturated Shear Strength**

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

Figura 10.87: Parametri relativi allo Strato 1 (fase elastica perfettamente plastica del materiale)

1_ELPLA

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m³):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent **Unsaturated Shear Strength**

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

Figura 10.88: Parametri relativi allo Strato 2 (fase elastica perfettamente plastica del materiale)

2_ELPLA

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

Figura 10.89: Parametri relativi allo Strato 3 (fase elastica perfettamente plastica del materiale)

3_ELPLA

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

Figura 10.90: Parametri relativi allo Strato 4 (fase elastica perfettamente plastica del materiale)

4_ELPLA

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m³):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

Stage Properties Datum Dependent Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

11. Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Vigna e la Prof. Barbero per i preziosi insegnamenti ricevuti in questi anni e per le numerose ore dedicate alla mia tesi. Entrambi voi Professori mi avete permesso di amare la professione dell'Ingegnere ma soprattutto di capire le grandi responsabilità che questo mestiere impone.

Nel contempo ringrazio il Dott. Mauro Tararbra che, con grande pazienza, mi ha fornito i dati di monitoraggio che mi hanno permesso di iniziare il mio lavoro di Tesi ma soprattutto per la sua disponibilità nel chiarirmi incertezze e dubbi.

Raggiungere questo obiettivo è per me motivo di grande orgoglio, ma a questo traguardo non sono giunto da solo. Alle mie spalle ci sono tante persone che, in misura differente e con tante modalità, hanno contribuito a tutto questo.

Il più grande ringraziamento va alla mia famiglia, che mi ha sempre supportato, soprattutto nei momenti particolarmente difficili e nelle mie sconfitte.

Non posso che iniziare a ringraziare mio nonno, il perno principale della mia vita, un uomo meraviglioso. Oltre al nome mi hai regalato la tua presenza costante, il tuo modo di fare, la tua bontà e il tuo modo di ragionare. I tuoi consigli sono fondamentali e ho sempre cercato di metterli in pratica. Con i tuoi infiniti racconti, che ormai conosco a memoria, mi hai insegnato il valore del sacrificio e di quanto sia importante rispettare gli altri prima di noi stessi. Per me rappresenti la mia totalità, amore allo stato puro, una persona da difendere e proteggere con tutte le mie forze. Nonostante la tua età, sei sempre stato un nonno all'avanguardia con una capacità enorme di non cadere in banali luoghi comuni. Ho pregato tanti affinché il Signore potesse farti godere di questo nostro traguardo e per questo non finirò mai di ringraziarlo.

Un altro immenso ringraziamento va a mia madre, una donna a dir poco straordinaria. Mi hai messo al mondo nonostante sapevi che non saremmo mai stati la classica famiglia degli spot pubblicitari. In un tempo in cui andare controcorrente non era facile, tu lo hai fatto con enorme coraggio e per questo non finirò mai di ringraziarti. Hai sempre creduto in me, mi ha incoraggiato e consigliato continuamente dandomi la forza di rialzarmi. Alcune volte penso tu abbia qualche particolare dono perché, con grande pazienza, gestisci tutti noi e i nostri problemi ma soprattutto ti prendi cura del nonno con grandissimo amore.

Ringrazio mia zia Tina, sei una seconda mamma per me e sai che l'affetto che provo nei tuoi confronti è immenso. Mi hai guidato fin da piccolo al corretto approccio allo studio, insieme abbiamo raggiunto tanti obiettivi e tanti ne raggiungeremo. Mi hai fatto capire l'importanza di "fare squadra" e di cosa significhi lavorare per obiettivi. Tutti i miei passi più importanti li ho fatti dietro tua approvazione, il tuo giudizio riveste per me un ruolo principale.

Ringrazio mio zio Valter perché come un figlio cerca di seguire le orme del proprio padre, anche io ho seguito le tue e questo è il motivo per cui ho scelto questa bellissima branca dell'Ingegneria. Tutte le volte che fin da piccolo mi hai accompagnato con te sui cantieri, sono stati un motivo in più per apprezzare questo mondo. Silenzioso ho sempre osservato con occhi ben aperti tutti i dettagli con l'obiettivo di imparare il più possibile. A te va il mio grazie per essere una spalla sicura su cui aggrapparmi per non cadere. Generalmente si pensa a un padre come ad una persona burbera che non mostra alcun affetto invece noi con te noi figli siamo stati abituati diversamente, con le tue infinite attenzioni nei nostri confronti sei un padre straordinario, un elemento cardine.

Ringrazio zia Maria perché so bene che hai tifato per me. Mi autodefinisco il nipote a cui vuoi più bene e anche in questa circostanza lo ribadisco con ulteriore vigore. In questi anni, ad ogni mio rientro e ad ogni mia partenza c'erano sempre le mie pietanze preferite pronte ad aspettarmi. Mi hai donato tante dimostrazioni di affetto, ed io le ho apprezzate tutte, ti voglio bene.

Ringrazio Anna e Tiziana, le mie sorelle, l'amore incondizionato che ci lega durerà per sempre. Mi avete insegnato quanto sia bello non essere figli unici e quanto sia straordinario condividere. La mia ricerca di una vostra approvazione, anche per le scelte più banali, dimostra la fiducia totale che riservo nei vostri confronti. Siamo una bella squadra e insieme sono sicuro che realizzeremo tante cose belle, siete la mia guida.

Ringrazio Pino per le tante dimostrazioni di fiducia e affetto che mi hai donato ma soprattutto per le tante attenzioni che regali a me e alla mia famiglia. Sei una persona meravigliosa.

Ringrazio i miei cari amici Simone, Daniele, Francesco e Alessandro per aver sempre creduto nelle mie capacità. La nostra amicizia è vera e sincera e ogni giorno si fortifica sempre più. Durante la mia permanenza a Torino siete stati sempre presenti e con le tante telefonate nelle quali si parlava di argomenti importanti ma anche di temi più leggeri, mi avete reso partecipe delle vostre vite nella mia amata Taranto facendomi sentire, senza alcuna ombra di dubbio, più vicino a casa.

Un ulteriore ringraziamento va a Giorgio, Paolo, Roberto e Giovanni, siete la mia seconda famiglia e credo che tra noi sia nato un legame speciale che ricorderemo sempre. Abbiamo condiviso i momenti belli e quelli meno piacevoli, abbiamo sorriso e pianto insieme, ci siamo stretti la mano per incoraggiarci. Siano benedetti i giorni in cui, del tutto casualmente, ci siamo incontrati perché non avrei potuto conoscere persone più buone e brave. Noi smetterò mai di mostrarvi la mia stima e il mio affetto.

Infine, un grazie va ad una persona che non è più tra noi ovvero Daniele, un padre per me. Penso a te e mi scendono immediatamente le lacrime perché nel mio immaginario eri indistruttibile e immortale, persone con un cuore così grande non dovrebbero mai andare via perché sono un esempio per l'umanità, hai fatto del bene a tutti coloro i quali hai incontrato lungo il tuo cammino. Sono sicuro che la tua vita terrena si sia conclusa con un biglietto di accesso diretto al Paradiso, in uno di quei posti comodi riservati a gente speciale che nasce una volta ogni millennio. Dio solo sa quanto mi hai insegnato e quante volte l'ho ringraziato per aver dato la possibilità a me e alla mia famiglia di conoscerti. Per quanto mi riguarda, ho dei ricordi bellissimi e indelebili che conservo con estrema gelosia nel mio cuore ma che spesso riaffiorano con vigore e mi regalano un sorriso.

Con te ho fatto i miei viaggi più belli, con te ho visto alcuni dei posti più belli del mondo, con te ho imparato alcuni termini napoletani, con te ho scoperto la bellezza del teatro, con te ho visto le macchine più belle e potenti, con te ho capito quanto sia importante lavorare ma anche godersi la vita. Ancora oggi, in tanti momenti ti penso e tu, in qualche modo, lo sai e mi vieni a trovare nei sogni. Sono sicuro che oggi saresti stato qui con me, orgoglioso e felice, ma sono sicuro che in questo momento sei in un altro posto, sicuramente più bello, e starai festeggiando a modo tuo con uno di quei piatti semplici ma immensamente gustosi che solo tu sapevi fare.

Se guardo con orgoglio e sicurezza il mondo è perché ho una marcia in più: la mia famiglia meravigliosa.