



**Istituto Nazionale di Geofisica
e Vulcanologia
AOO INGV**

Protocollo Generale - U
N. 0017510
del 18/12/2017



ITW&LKW Geotermia Italia SpA

Via di Porta Pinciana 4

00186 ROMA

Oggetto: Trasmissione relazione scientifica sul monitoraggio del flusso di CO₂ dal suolo da
aree target nella zona di Castel Giorgio-Torre Alfina - dicembre 2017

In riferimento alla Convenzione di monitoraggio geochimico e sismico nella zona di Castel
Giorgio-Torre Alfina (prot. 0003095 del 15/03/2013) si trasmettono le informazioni
aggiuntive sul monitoraggio del flusso diffuso di CO₂ dal suolo richieste da ARPA Umbria
con nota prot. 0020383 del 16/11/2017.

Distinti saluti

Il responsabile scientifico

Dr. Maria Luisa Carapezza



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

**MONITORAGGIO DEL FLUSSO DI CO₂ DAL SUOLO DA
AREE TARGET NELL'AREA GEOTERMICA DI TORRE
ALFINA – CASTEL GIORGIO**

**Informazioni aggiuntive richieste dall'ARPA Umbria
(nota prot. 002083 del 16/11/2017)**

14 dicembre 2017

SEZIONE ROMA 1

Via di Vigna Murata, 605 | Roma 00145 | Italia | tel. +39.0651860426
aoo.roma1@pec.ingv.it | www.ingv.it

MONITORAGGIO DEL FLUSSO DI CO₂ DAL SUOLO DA AREE TARGET NELL'AREA GEOTERMICA DI TORRE ALFINA – CASTEL GIORGIO

Informazioni aggiuntive richieste dall'ARPA Umbria (nota prot. 002083 del 16/11/2017)

Con la presente Relazione, redatta su richiesta di ITW&LKW Geotermia Italia S.p.A., si trasmettono le informazioni aggiuntive sul monitoraggio del flusso diffuso di CO₂ dal suolo richieste da ARPA Umbria con nota prot. 0020383 del 16/11/2017.

Nella nota di ARPA Umbria, dopo aver dichiarato che la frequenza delle campagne di monitoraggio risultava pienamente soddisfacente, veniva richiesto quanto segue:

- *Secondo il parere n. 2455 del 07.07.2017 della CTVA, che tiene conto della prescrizione A.1, lettera n), dovevano essere misurate la Pressione atmosferica, la Temperatura e l'Umidità dell'aria e del suolo; tale prescrizione è solo parzialmente soddisfatta perché non tutti i parametri richiesti sono riportati nel rapporto trasmesso. Si chiede pertanto di inserire un tabella riassuntiva, con i valori massimi, minimi e medi di tutti i parametri richiesti, per ogni campagna di misura dei flussi di CO₂.*
- *Osservato che molte delle considerazioni contenute nel rapporto trasmesso si basano sul confronto dei dati con il valore di background biologico di 48 g m⁻²d⁻¹, per una migliore comprensione delle variazioni rilevate si chiede di esplicitare come è stato calcolato tale valore.*
- *Si nota una distribuzione polimodale nei dati tale da consentire l'individuazione di due famiglie di valori; si chiede di spiegare se una è di background e l'altra anomala, e se la distribuzione dei dati sia normale o logaritmica.*
- *Considerando la variabilità stagionale dell'attività biologica nel suolo, il valore di background non può restare lo stesso in ogni stagione; si richiede pertanto di ricalcolare tale valore per ogni campagna di misura sulla base dei dati rilevati.*

1. PARAMETRI AMBIENTALI DURANTE LE CAMPAGNE DI MISURA DEL FLUSSO DI CO₂ DAL SUOLO

Come richiesto, nella Tab. 1 sono riportati i valori minimi, medi e massimi dei seguenti parametri ambientali misurati durante le campagne del flusso di CO₂ dal suolo: pressione atmosferica (PA), temperatura dell'aria (TA), umidità dell'aria (UA), temperatura del suolo (TS) e umidità del suolo (US).

Tab. 1. Parametri ambientali durante le campagne di misura del flusso di CO₂ dal suolo nelle aree target di Torre Alfina-Castel Giorgio, nel periodo da gennaio 2016 ad ottobre 2017

Campagna gg/m/aa	PA (hPa)			TA (°C)			UA (%)			TS (°C)			US (%)		
	min	med	max	min	med	max	min	med	max	min	med	max	min	med	max
20-21/1/16	1015,1	1016,1	1017,5	4,0	5,0	5,9	61,0	72,2	86,0	2,5	5,8	8,9	25,7	26,4	27,8
18-20/4/16	1015,8	1017,5	1018,5	14,5	20,2	23,3	60,0	68,4	86,0	14,0	21,3	25,7	3,0	16,1	39,0
1-3/8/16	1014,4	1014,6	1015,5	23,1	26,3	27,7	55,0	61,9	73,0	23,8	30,1	38,3	2,3	15,0	28,1
11-13/10/16	1010,0	1013,0	1016,0	8,9	15,0	20,7	64,0	74,3	82,0	8,6	13,2	19,5	12,2	30,4	42,4
25-27/1/17	1017,6	1023,6	1027,3	3,3	8,7	11,1	51,0	59,3	65,0	-4,4	1,2	4,6	26,0	26,9	28,7
5-6/4/17	1015,5	1016,4	1017,2	13,6	18,3	19,5	43,0	47,7	59,0	13,2	20,9	24,0	3,6	17,4	39,9
26-27/6/17	1009,7	1013,2	1016,1	23,8	28,6	30,2	38,0	50,0	77,0	24,1	30,6	39,0	2,2	14,3	26,4
25-27/10/17	1023,9	1024,6	1025,3	11,9	17,9	20,9	20,0	32,7	57,0	9,2	14,4	19,6	11,0	29,8	39,6

2. SCELTA DEL VALORE STATISTICO DI BACKGROUND PER LA CAMPAGNA GENERALE DEL 2011

La campagna generale di misura del flusso diffuso dal suolo di CO₂ del 2011 a Torre Alfina (VT) e Castel Giorgio (TR) è stata condotta su un ampio areale di circa 12,6 km². Sono state eseguite 1.336 misure del flusso di CO₂ dal suolo, trovando valori da un minimo di 5,2 ad un massimo di 30,258 g*m⁻²giorno⁻¹; il valore medio è risultato pari a circa 104 g*m⁻²giorno⁻¹ (Carapezza et al., 2015).

Esistono vari metodi per la selezione di una soglia statistica tra sottopopolazioni campionarie. Nel nostro caso è stato utilizzato il metodo grafico del normal probability plot (NPP) (Howarth, 1984; Garrett, 1988; Chork & Salminen, 1993; Macdonald & Boner, 1993; Cheng et al., 1994; Yusta et al., 2011) che consiste nell'individuare salti o cambi di pendenza in un grafico binario in cui sono rappresentate le misure sperimentali contro i punteggi di una distribuzione normale standardizzata.

In Fig. 1 si mostra il NPP per l'intero set di dati e in Fig. 2 uno zoom sull'intervallo di dati fino a 100 g*m⁻²giorno⁻¹. Il fatto che la curva dei dati non abbia andamento rettilineo -a confronto con una distribuzione gaussiana standard- indica che il campione non segue una distribuzione normale ma una qualche distribuzione asimmetrica, o anche che il campione è plurimodale.

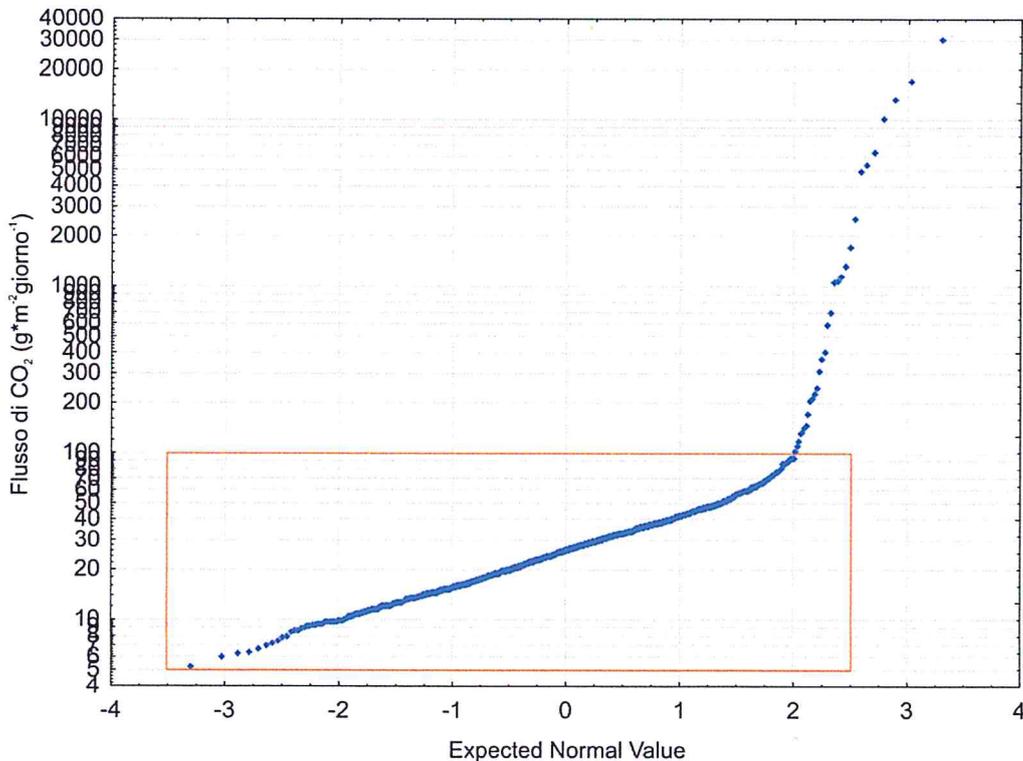


Fig. 1. Normal probability plot dei dati di flusso diffuso di CO₂ dal suolo della campagna generale a Torre Alfina-Castel Giorgio del 2011. Il rettangolo rosso racchiude i dati riportati in Fig. 2.

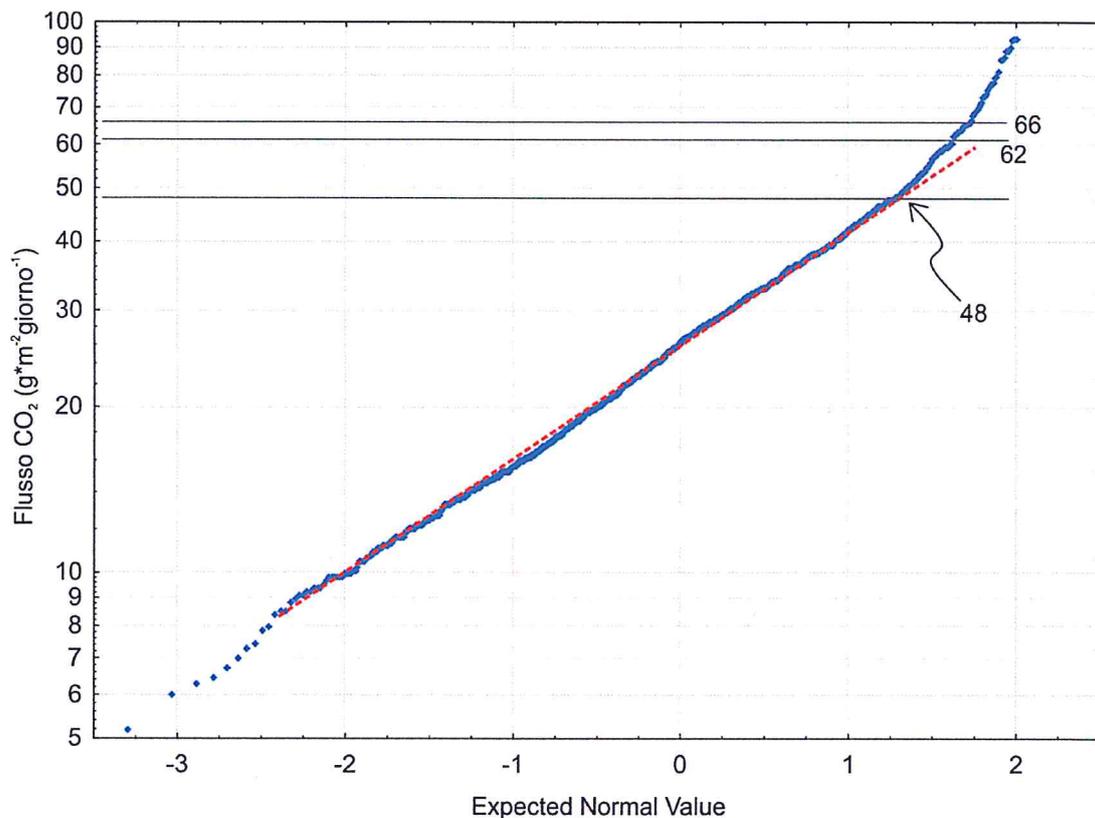


Fig. 2. Estratto del normal probability plot dei dati di flusso di CO₂ dal suolo (vd. rettangolo rosso in Fig. 1) nell'intervallo tra 5 e 100 g*m⁻²giorno⁻¹. Le linee orizzontali grigio scuro mostrano i valori di 48, 62 e 66 g*m⁻²giorno⁻¹.

Come si vede in Fig. 2, il primo possibile valore di soglia statistica si ha a circa 48 g*m⁻²giorno⁻¹ dove si osserva un cambio di pendenza. Si osserva un salto a circa 62 g*m⁻²giorno⁻¹ e un secondo cambio di pendenza a circa 66 g*m⁻²giorno⁻¹.

Questi valori individuati nel grafico del normal probability plot possono corrispondere alla soglia tra flussi di origine biologica (conseguenza di processi genericamente noti come “respirazione del suolo”) e flussi di origine endogena (conseguenza di risalita di gas geotermici o magmatici). Per quanto riguarda la respirazione del suolo, essa varia in funzione di diversi componenti, ad es. il tipo di vegetazione e micorrize associate, il contenuto in materiale organico, la latitudine, il clima, la stagione. Ad esempio, si mostra in Fig. 3 il grafico delle variazioni della respirazione del suolo misurate nell'arco del 2000 in una foresta cedua di querce nel Comune di Monteromano (Lazio) a SW del Lago di Bracciano. Si osserva come il flusso di CO₂ vari nell'arco dell'anno in funzione della stagione, del tipo di suolo (C= indisturbato; NL= materiale organico superficiale rimosso; NR= lontano da radici; NLNR= senza materiale organico e senza radici) e del clima (alcuni eventi piovosi causano picchi nei periodi estivo).

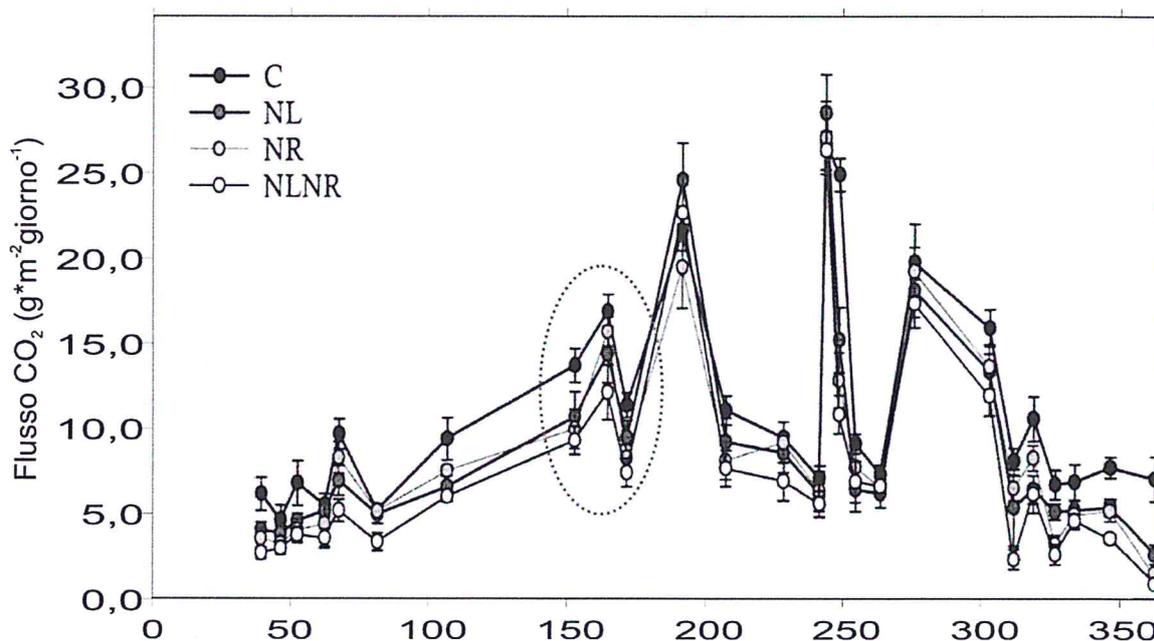


Fig. 3. Variazione della respirazione del suolo a Monteromano nell'arco di 366 giorni del 2000 (modificato da Rey et al., 2002). L'ellisse a tratteggio indica il periodo di fine primavera – inizio estate.

Nella Fig. 3 è evidente la variazione della respirazione del suolo nel corso di un anno; in questo specifico caso i valori non superano mai i 30 g*m⁻²*giorno⁻¹.

Nella letteratura scientifica ci sono tuttavia esempi di flussi di respirazione del suolo con valori maggiori, e confrontabili con quelli da noi individuati nel normal probability plot della campagna generale del 2011. Ad esempio, nella zona di Latera, vicina e geologicamente simile a quella di Torre Alfina-Castel Giorgio, Chiodini et al. (2007) hanno individuato una soglia di background di 50 g*m⁻²*giorno⁻¹, per campagne di misura del flusso diffuso di CO₂ dal suolo eseguite in luglio ed in ottobre 2003 (Fig. 4 a destra). Anche alla Solfatara di Pozzuoli, Chiodini et al. (2008) hanno individuato una soglia statistica di background del flusso diffuso di CO₂ dal suolo pari a 50 g*m⁻²*giorno⁻¹ (Fig. 4 a sinistra). Sulla base del rapporto isotopico del carbonio della CO₂, gli autori hanno individuato qui tre sottopopolazioni di flusso: una di flusso idrotermale (HF) a valori maggiori di 140 g* m⁻²*giorno⁻¹; una di mixing a valori tra 50 e 140; ed una biogenica con valori fino a 50 g*m⁻²*giorno⁻¹.

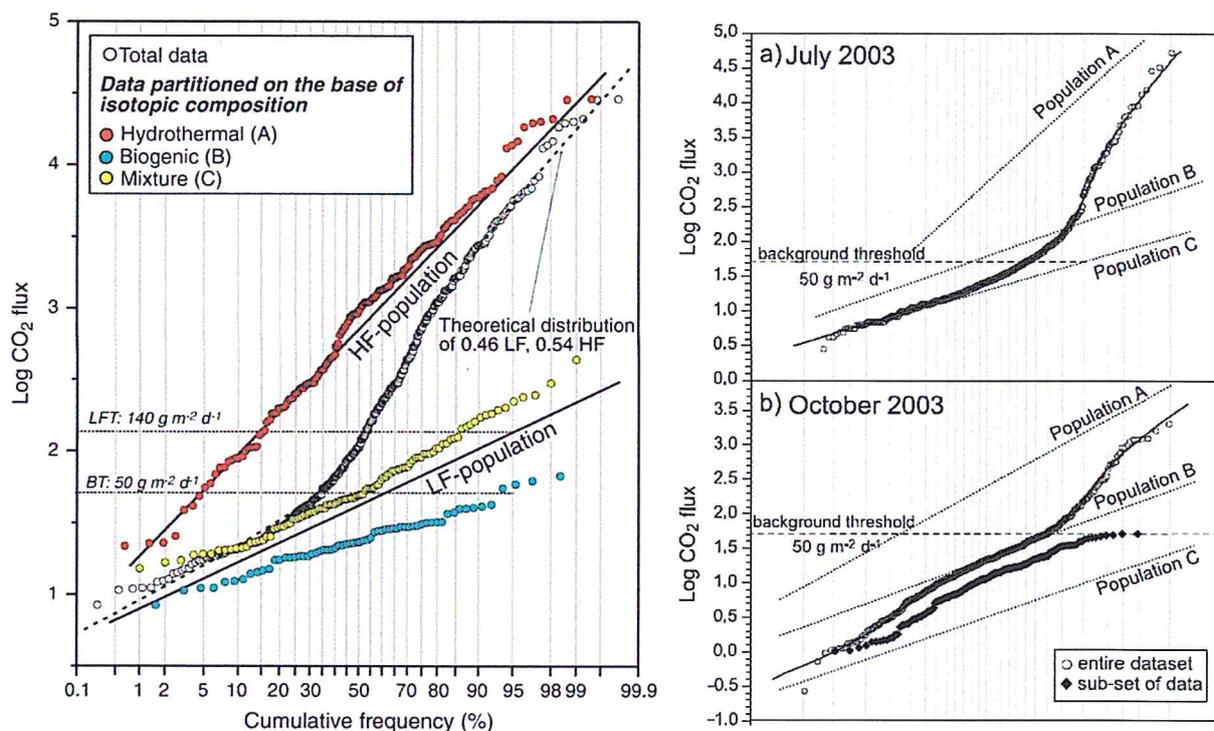


Fig. 4. A sinistra: partizione dei dati di flusso di CO₂ dal suolo alla Solfatara di Pozzuoli eseguita col metodo grafico statistico di Chiodini et al. 1998, sulla base dei rapporti isotopici del carbonio della CO₂ emessa (da Chiodini et al., 2008). A destra: partizione del flusso di CO₂ dal suolo misurato in due campagne a Latera in luglio e ottobre 2003 (da Chiodini et al., 2007).

Per la zona di Torre Alfina-Castel Giorgio è stato scelto il valore di $48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$ come soglia statistica di background della campagna generale del 2011, sulla base del normal probability plot di Figg. 1 e 2. Tale soglia distingue flussi diffusi di CO₂ originati da respirazione del suolo da flussi di origine endogena, conseguenti al rilascio di CO₂ dal serbatoio geotermico profondo di Torre Alfina-Castel Giorgio. Questo ultimo tipo di flussi è stato trovato solo nell'area delle manifestazioni naturali delle Solfanare a sud di Torre Alfina, dove il gas emesso ha in effetti la stessa composizione chimica e isotopica del gas presente al tetto del reservoir geotermico (Carapezza et al., 2015).

3. ANALISI STATISTICA AGGIUNTIVA

Per controllare il valore di background prima indicato, i dati di flusso di CO₂ del 2011 sono stati analizzati, per la presente relazione, anche con il software ProUCL5.0 del Servizio Geologico degli Stati Uniti (USGS). È stata prima condotta un'analisi degli outlier che ha evidenziato il valore massimo (30.258) come possibile outlier a livello di significatività sia del 5% che dell'1%. È stata successivamente condotta un'analisi dei limiti superiori per stimare un valore di soglia statistica. I risultati sono mostrati in Tab. 2. I risultati indicano che i dati non seguono una delle principali

distribuzioni statistiche presenti nel software: né una distribuzione normale, né una gamma, né una lognormale, né una distribuzione non-parametrica.

Tab. 2. Principali risultati statistici dei dati di flusso di CO₂ del 2011 senza potenziale outlier

General Statistics			
Total Number of Observations	1.363	Number of Distinct Observations	389
		Number of Missing Observations	1
Minimum	5,18	First Quartile	18,34
Second Largest	13.244	Median	26,18
Maximum	16.902	Third Quartile	35,98
Mean	79,21	SD	700,6
Coefficient of Variation	8,845	Skewness	18,45
Mean of logged Data	3,302	SD of logged Data	0,704

Critical Values for Background Threshold Values (BTVs)

Tolerance Factor K (For UTL)	1,715	d2max (for USL)	3,954
------------------------------	-------	-----------------	-------

Normal GOF Test

Shapiro Wilk Test Statistic	0,0748	Normal GOF Test	
5% Shapiro Wilk P Value	0	Data Not Normal at 5% Significance Level	
Lilliefors Test Statistic	0,471	Lilliefors GOF Test	
5% Lilliefors Critical Value	0,024	Data Not Normal at 5% Significance Level	

Data Not Normal at 5% Significance Level

Background Statistics Assuming Normal Distribution

95% UTL with 95% Coverage	1.281	90% Percentile (z)	977
95% UPL (t)	1.233	95% Percentile (z)	1.232
95% USL	2.850	99% Percentile (z)	1.709

Gamma GOF Test

A-D Test Statistic	7,34E+27	Anderson-Darling Gamma GOF Test	
5% A-D Critical Value	0,815	Data Not Gamma Distributed at 5% Significance Level	
K-S Test Statistic	0,363	Kolmogrov-Smirnoff Gamma GOF Test	
5% K-S Critical Value	0,0275	Data Not Gamma Distributed at 5% Significance Level	

Data Not Gamma Distributed at 5% Significance Level

Gamma Statistics

k hat (MLE)	0,58	k star (bias corrected MLE)	0,579
Theta hat (MLE)	136,5	Theta star (bias corrected MLE)	136,7
nu hat (MLE)	1582	nu star (bias corrected)	1.579
MLE Mean (bias corrected)	79,21	MLE Sd (bias corrected)	104,1

Background Statistics Assuming Gamma Distribution

95% Wilson Hilferty (WH) Approx.			
Gamma UPL	165,8	90% Percentile	207,6
95% Hawkins Wixley (HW) Approx.			
Gamma UPL	132,3	95% Percentile	288,6
95% WH Approx. Gamma UTL with			
95% Coverage	174,9	99% Percentile	485,1
95% HW Approx. Gamma UTL with			
95% Coverage	139,3		
95% WH USL	684,4	95% HW USL	567,3

Lognormal GOF Test

Shapiro Wilk Test Statistic	0,77	Shapiro Wilk Lognormal GOF Test
5% Shapiro Wilk P Value	0	Data Not Lognormal at 5% Significance Level
Lilliefors Test Statistic	0,116	Lilliefors Lognormal GOF Test
5% Lilliefors Critical Value	0,024	Data Not Lognormal at 5% Significance Level

Data Not Lognormal at 5% Significance Level

Background Statistics assuming Lognormal Distribution

95% UTL with 95% Coverage	90,83	90% Percentile (z)	66,95
95% UPL (t)	86,57	95% Percentile (z)	86,46
95% USL	439,4	99% Percentile (z)	139,7

Nonparametric Distribution Free Background Statistics

Data do not follow a Discernible Distribution (0.05)

Nonparametric Upper Limits for Background Threshold Values

Order of Statistic, r	1307	95% UTL with 95% Coverage	65,8
Approximate f	1,207	Confidence Coefficient (CC) achieved by UTL	0,929
95% Percentile Bootstrap UTL with 95% Coverage	65,8	95% BCA Bootstrap UTL with 95% Coverage	65,8
95% UPL	62,24	90% Percentile	47,85
90% Chebyshev UPL	2.182	95% Percentile	62,02
95% Chebyshev UPL	3.134	99% Percentile	474
95% USL	16.902		

Per il calcolo del valore statistico di soglia (background threshold value; BTV) sono stati comunque utilizzati i risultati dei calcoli non-parametrici. A seconda del metodo statistico, il software ha calcolato i differenti valori di soglia mostrati in Tab. 3. Come si vede, i BTV variano a seconda del metodo statistico utilizzato da 47,85 a 16.902 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{giorno}^{-1}$.

Tab. 3. Limiti superiori non-parametrici per il valore soglia di background (BTV)

N-P	BTV
90% Percentile	47,85
95% Percentile	62,02
95% UPL	62,24
95% Percentile Bootstrap UTL with 95% Coverage	65,8
95% UTL with 95% Coverage	65,8
95% BCA Bootstrap UTL with 95% Coverage	65,8
99% Percentile	474
90% Chebyshev UPL	2.182
95% Chebyshev UPL	3.134
95% USL	16.902

Sulla base della letteratura scientifica e in particolare delle conoscenze acquisite nello studio dei sistemi vulcanici e geotermici, i valori di BTV da 474 a 16.902 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{giorno}^{-1}$ sono da ritenersi del tutto improbabili come soglia statistica di background, perché flussi di CO_2 di origine endogena in aree vulcaniche e geotermiche sono tipicamente superiori a poche decine di $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{giorno}^{-1}$. Si noti come i valori BTV tra 47,85 e 65,8 sono invece gli stessi valori individuati dall'analisi del NPP di Fig. 2 (48, 62 e 66 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{giorno}^{-1}$).

In ogni caso, la scelta del valore più basso per la soglia di background (48 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{giorno}^{-1}$) per l'area di Castel Giorgio-Torre Alfina è del tutto cautelativa dal punto di vista ambientale.

4. CALCOLO DEL VALORE DI BACKGROUND NELLE CAMPAGNE DI MISURA DEL FLUSSO DIFFUSO DI CO_2 DAL SUOLO DALLE AREE TARGET

A partire da aprile 2013 e fino ad ottobre 2017, sono state eseguite 18 campagne di misura del flusso diffuso di CO_2 dal suolo su aree target definite da ITW&LKW intorno ai siti dove è prevista la perforazione in futuro di pozzi geotermici profondi sia produttivi che di reiniezione. Questo monitoraggio è iniziato dapprima sulle aree target intorno ai pozzi del Progetto geotermico Castel Giorgio (A2, A4, A14 in Fig. 5), poi esteso dal 2014 anche alle aree target intorno ai pozzi del progetto geotermico Torre Alfina (AT0, A1, A7 in Fig. 5).

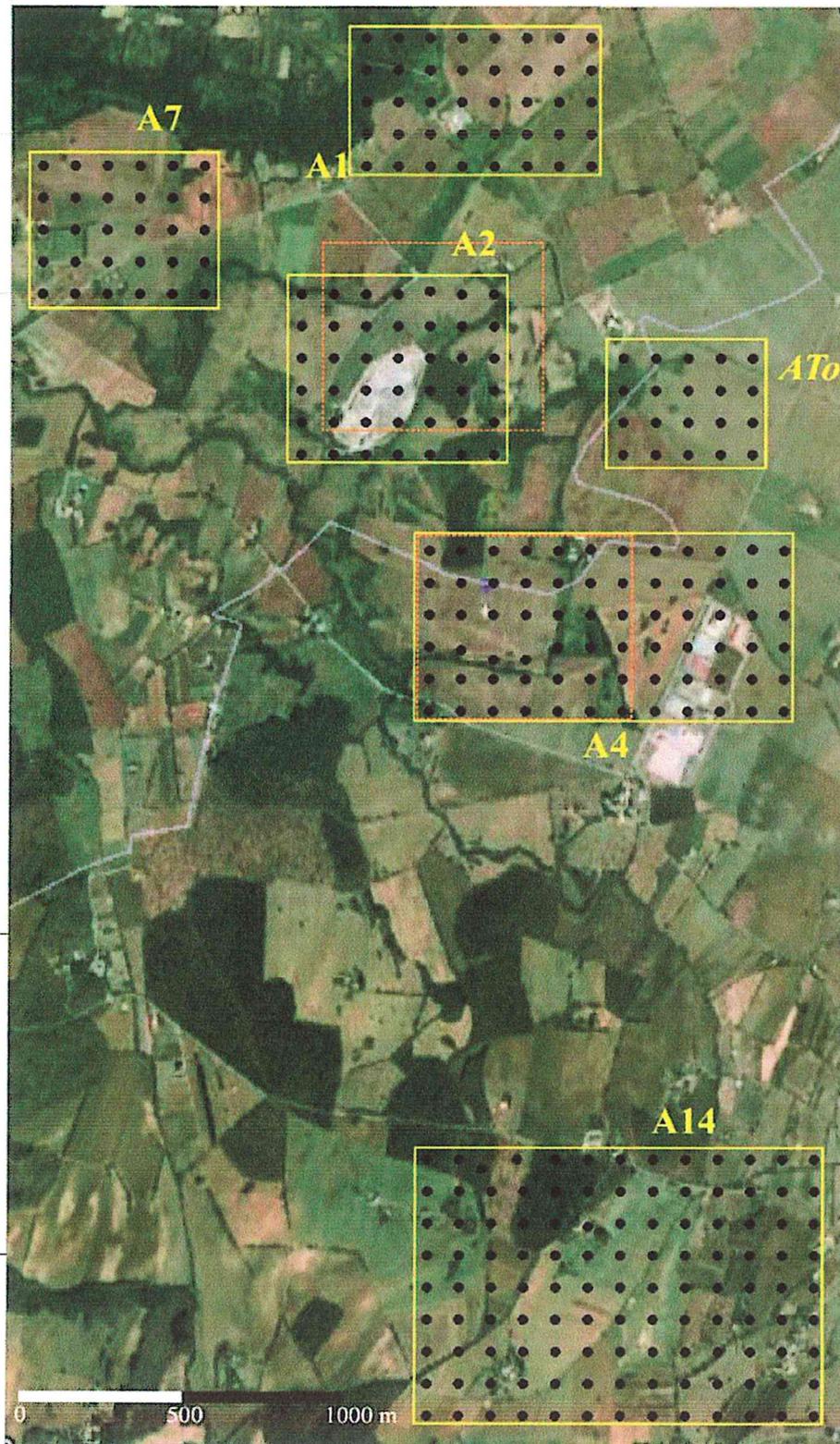


Fig. 5. Ubicazione delle aree target per il monitoraggio del flusso di CO₂ dal suolo nell'area geotermica di Castel Giorgio-Torre Alfina. I perimetri delle aree target A2 e A4 relative alle prime 3 campagne di misura (4/2013-3/2014) sono indicati dal tratteggio arancione. I rettangoli gialli indicano i limiti definitivi delle aree target investigate da luglio 2014 a giugno 2017. I puntini neri indicano l'ubicazione dei punti di misura.

Nella precedente relazione, relativa al monitoraggio del flusso di CO₂ dal suolo da aree target nel periodo aprile 2013-giugno 2017 (INGV, 2017), sono riportati –distinti per ognuna delle aree target– i principali risultati delle misure di flusso eseguite (minimi, massimi e medie), assieme al numero di misure e alle dimensioni dell’area totale investigata.

Per ciascuna campagna è stata realizzata la mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo delle aree target. Le varie mappe sono state prodotte con scale di colori standardizzati: in particolare, il valore di background statistico di 48 g*m⁻²giorno⁻¹ della campagna generale del 2011 è stato utilizzato come valore di riferimento per rendere più evidenti le eventuali variazioni rilevate in ogni campagna, in particolare l’eventuale presenza di flussi endogeni.

Considerato che, in ogni campagna, la maggior parte delle misure era inferiore alla soglia di background, si è ritenuto utile distinguere due famiglie di bassi flussi; di conseguenza, in ciascuna mappa sono colorate in verde chiaro le aree in cui il flusso stimato varia tra il minimo misurato nella relativa campagna sull’area target e 20 g*m⁻²giorno⁻¹; in giallo chiaro le aree caratterizzate da un flusso variabile tra 20 e 48 g*m⁻²giorno⁻¹.

Sono poi state distinte le poche misure con flussi più alti: in arancione chiaro le aree con flusso tra 48 e 100 g*m⁻²giorno⁻¹; in arancione scuro le aree in cui il flusso stimato è superiore a 100 g*m⁻²giorno⁻¹ fino al massimo misurato.

Il valore di 48 g*m⁻²giorno⁻¹ è da intendersi esclusivamente come valore di riferimento per mostrare le variazioni del flusso di CO₂ in ogni campagna eseguita, e non è da intendersi come valore di background stagionale di ciascuna campagna.

Come dalla citata richiesta di ARPA Umbria, si riportano di seguito i calcoli del valore di background relativo ad ognuna delle campagne stagionali effettuate sulle aree target di Torre Alfina-Castel Giorgio. Per l’analisi della distribuzione statistica e del valore di background di ciascuna campagna è stato utilizzato il software ProUCL5.0 dello USGS.

Si è ritenuto utile includere nel confronto anche la campagna generale del 2011; pertanto sono state estratte e processate le misure di flusso di CO₂ di questa campagna che erano state eseguite sulle aree target. Per ciascuna campagna è stata condotta un’analisi della potenziale presenza di outlier. In caso di presenza di outlier a Livello di Significatività del 5%, questi sono stati scartati per le successive analisi di Goodness of Fit e di stima del più appropriato Background Threshold Value. In Tab. 4 si riportano i risultati delle elaborazioni condotte.

Tab. 4. Principali risultati del calcolo del Background Threshold Value delle campagne di misura del flusso di CO₂ dalle aree target

Survey	giu-11	apr-13	set-13	mar-14	lug-14	ott-14	feb-15	giu-15	set-15
Minimum	5,2	0,8	0,6	1,7	2,9	1,5	0,4	2,1	2,2
Average	29,2	18,7	10,0	10,7	17,2	17,1	10,7	20,6	21,6
Maximum	131,0	49,8	43,1	65,0	59,8	76,2	40,5	57,7	65,7
Potential Outlier 5%S.L.	131,0	N.O.	43,1	65,0	59,8	76,2	40,5	N.O.	65,7
Potential Outlier 1%S.L.	131,0	N.O.	43,1	65,0	59,8	76,2	40,5	N.O.	65,7
Approx Distribution	Gamma	N.D.	Norm.	Logn.	Gamma	Gamma	N.D.	Gamma	Gamma
Upper Tolerance Limit -1	57,38	39,34	19,35	29,06	36,92	38,44	24,92	42,37	44,2
Upper Tolerance Limit -2	58,24	39,34			37,72	39,75	24,92	43,44	45,4

Survey	gen-16	apr-16	04-giu-16	09-giu-16	ago-16	ott-16	gen-17	apr-17	giu-17	ott-17
Minimum	1,5	2,5	1,7	2,5	3,4	3,1	0,5	1,7	1,4	1,8
Average	17,0	18,8	29,3	33,2	20,7	19,1	6,0	16,5	7,8	8,5
Maximum	49,7	51,9	112,0	93,0	49,8	48,6	18,1	46,2	29,7	57,5
Potential Outlier 5%S.L.	N.O.	51,9	112,0	93,0	N.O.	N.O.	18,1	46,2	29,7	57,5
Potential Outlier 1%S.L.	N.O.	N.O.	112,0	93,0	N.O.	N.O.	N.O.	N.O.	29,7	57,5
Approx Distribution	Gamma	N.D.	Gamma	Norm.	Gamma	N.D.	Gamma	Gamma	Gamma	Logn.
Upper Tolerance Limit -1	41,62	35,98	61,67	59,65	42,06	39,06	12,55	33,63	16,85	18,51
Upper Tolerance Limit -2	43,01	36,26	63,38		42,99	38,96	12,83	34,55	17,14	

Note: N.O.= Non Outlier a livello di significatività del 5% o dell'1%;

N.D.= distribuzione statistica Non Distinguibile col software;

UTL-1= metodo principale di calcolo utilizzato: 95%UTLwith95%Coverage & 95%WH Approx.GammaUTLwith95%Coverage;

UTL-2= metodo secondario di calcolo utilizzato: 95%HW Approx.GammaUTLwith95%Coverage & 95%PercentileBootstrapUTLwith95%Coverage (vd. anche Tab. 5);

I valori minimum, average, maximum, potential outlier e upper tolerance limits si riferiscono al flusso di CO₂ dal suolo misurato nel survey, espresso in g*m⁻²giorno⁻¹.

In Tab. 4 sono riportati minimi, medie e massimi delle misure effettuate in ciascun survey, espressi in $g \cdot m^{-2} \cdot giorno^{-1}$. I test di Rosner mostrano che in alcuni casi esistono potenziali outlier (sempre un solo valore per ogni set) già a livello di significatività del 5%. In questi casi, gli outlier sono stati esclusi dalle analisi statistiche successive. L'analisi della Goodness of Fit mostra che nella maggior parte dei casi –undici su diciannove- le misure sono approssimativamente riconducibili alla distribuzione Gamma. In due casi la distribuzione è approssimativamente normale. In altrettanti casi la distribuzione è approssimativamente lognormale. Nei restanti quattro, la distribuzione non è distinguibile col software. Quando la distribuzione statistica non era distinguibile, sono stati utilizzati i calcoli delle distribuzioni non parametriche.

Per la scelta del Background Threshold Value sono stati utilizzati gli Upper Tolerance Limit (UTL) calcolati con i metodi indicati nella Tab. 5. Nella stessa Tab. 5 sono riportati altri metodi di calcolo alternativi per gli UTL. Per completezza, in Tab. 4 sono riportati anche i risultati degli UTL calcolati con i suddetti altri metodi disponibili in ProUCL 5.0.

Tab. 5. Metodi di calcolo dei Limiti Superiori di Tolleranza in funzione della distribuzione

Distribuzione	Upper Tolerance Limit utilizzato
Normale; Lognormale; Non Parametrica	95%UTL with 95% Coverage
Gamma	95%WH Approx.GammaUTLwith95%Coverage
Distribuzione	Upper Tolerance Limit secondario
Non Parametrica	95%PercentileBootstrapUTLwith95%Coverage
Gamma	95%HW Approx.GammaUTLwith95%Coverage

I risultati del calcolo degli UTL per la stima dei valori di soglia di background di ciascuna campagna di misura del flusso di CO₂ sono riportati per sintesi in Fig. 6.

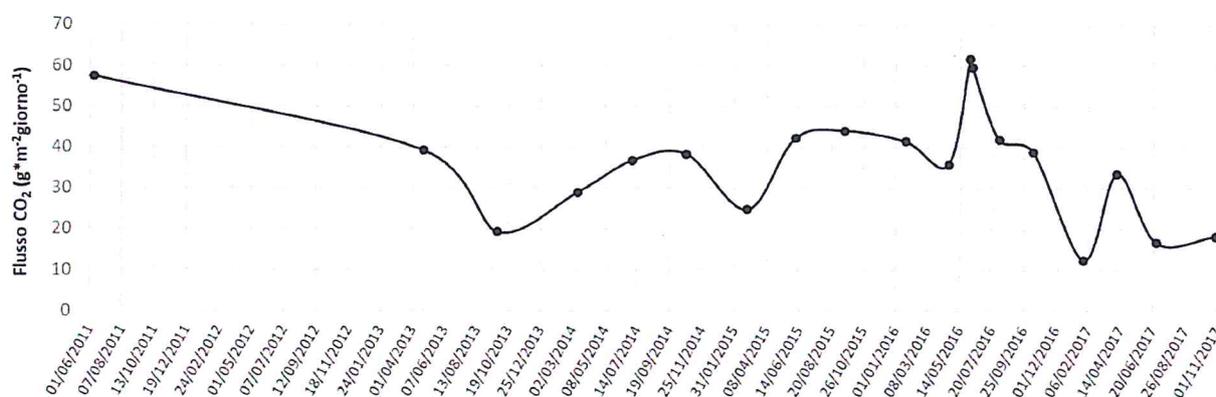


Fig. 6. Variazione dei valori di soglia di background naturale del flusso di CO₂ dell'area geotermica di Torre Alfina-Castel Giorgio da giugno 2011 a ottobre 2017 ottenuti dal calcolo degli UTL (vedi Tab. 4).

Come si vede in Fig. 6, i valori di soglia di background variano da un minimo di 12,55 g*m⁻²giorno⁻¹ nel gennaio 2017, ad un massimo di 61,67 g*m⁻²giorno⁻¹ del 4 giugno 2016. Il secondo valore più alto è 59,65 g*m⁻²giorno⁻¹ del 9 giugno 2016. Da notare che questi due massimi sono stati misurati durante la crisi sismica di fine maggio-inizio giugno 2016 che ha interessato la zona di Castel Giorgio. Da osservare anche che il valore relativamente alto della campagna del 2011 è poco rappresentativo perché riferito ad un numero di misure nelle aree target inferiore e con diversa distribuzione spaziale, rispetto alle altre campagne eseguite su maglia fissa.

A titolo di esempio, è stata eseguita la stessa elaborazione statistica sui dati del flusso di CO₂ misurati da Chiodini et al. (2008) alla Solfatarata di Pozzuoli nel Marzo 2007. In particolare, l'elaborazione è stata condotta su un subset di dati di flusso di CO₂ a carbonio "leggero", cioè con rapporto isotopico $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} < -16\text{‰}$ vs. PBD. Secondo gli Autori, un rapporto isotopico così negativo sottintende che la CO₂ emessa non deriva da rilascio dal sistema geotermico della Solfatarata o dal sistema magmatico sottostante, ma è di origine biogenica. Invece, il rapporto isotopico del carbonio della CO₂ delle fumarole della Solfatarata, rappresentative del sistema idrotermale sottostante, ha valori compresi tra -2 ‰ e -1 ‰, e un valore medio di -1,48 ‰ vs. PBD.

I risultati sono mostrati in Tab. 6.

Tab. 6. Principali risultati del calcolo del Background Threshold Value del flusso di CO₂ biogenico alla Solfatarata di Pozzuoli (NA).

Survey	mar-07
Minimum	8,41
Average	25,44
Maximum	67,20
Potential Outlier 5%S.L.	67,20
Potential Outlier 1%S.L.	No
Approx Distribution	Gamma
Upper Tolerance Limit -1	59,00
Upper Tolerance Limit -2	58,45

Dati in g*m⁻²giorno⁻¹, da Chiodini et al. (2008)

Come si vede in Tab. 6, i valori di flusso di CO₂ a carbonio leggero, cioè di origine non endogena, variavano tra 8,4 e 67,2 g*m⁻²giorno⁻¹. Il test di Rosner sugli outlier mostra la presenza di un solo potenziale valore (quello massimo del dataset) a livello di significatività del 5%. I dati di Chiodini et al. (2008) seguono approssimativamente una distribuzione Gamma, e l'Upper Tolerance Limit per il calcolo del Background Threshold Value è di 59,0 g*m⁻²giorno⁻¹. Questo valore è leggermente

superiore alla soglia di background adottata di $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$ e calcolata però sulla base dell'intero campione di dati (Chiodini et al., 2008).

In Fig. 7 si mostra il grafico delle variazioni temporali del flusso di CO_2 e della soglia di background dell'area di Torre Alfina-Castel Giorgio, con l'aggiunta dell'indicazione del valore di background di $48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$.

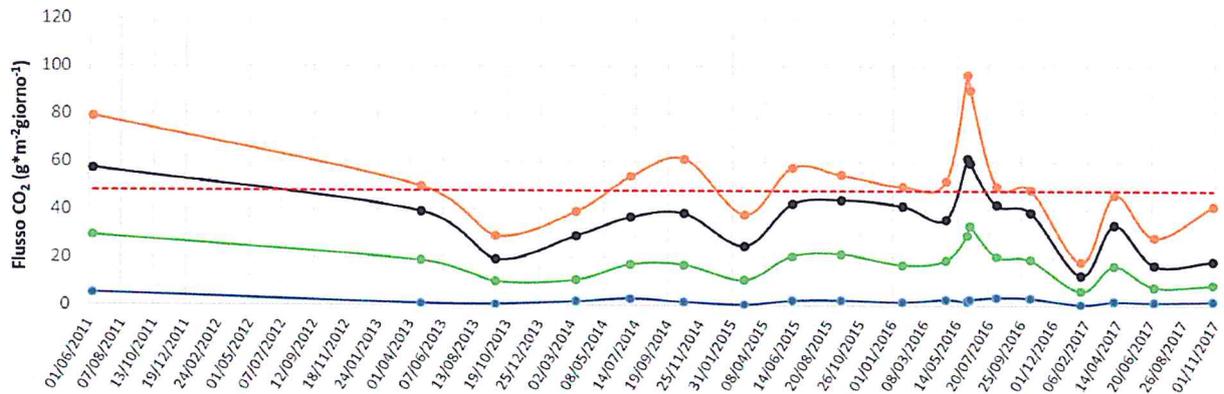


Fig. 7. Crono-diagramma della variazione dei minimi (linea blu) delle medie (linea verde), dei massimi (linea arancione) delle misure di flusso di CO_2 dal suolo effettuate nelle aree target, e dei valori soglia di background (linea nera) dell'area di Torre Alfina-Castel Giorgio. Per confronto si mostra il valore soglia di background per la campagna del 2011 ($48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$; linea rossa tratteggiata).

È da notare che tutti i valori di background stimati per le aree target dell'area geotermica di Torre Alfina-Castel Giorgio risultano vicini o inferiori alla soglia di background stimata nella campagna del 2011, con esclusione dei due valori del 4 e del 9 giugno 2016 (cfr. Tabb. 4 e 6). Queste due campagne sono state eseguite durante lo sciame sismico verificatosi a Castel Giorgio nel periodo tra il 30 maggio 2016 ed il 14 giugno 2016; i dati suggeriscono che lo scuotimento sismico ha determinato un rilascio leggermente anomalo di gas dal suolo, sia pure di breve durata e con valori di flusso comunque bassi.

In conclusione, si ritiene di poter affermare che il monitoraggio del flusso diffuso di CO_2 dal suolo, eseguito dal 2013 al 2017, fornisce una conoscenza molto precisa e dettagliata del degassamento naturale dell'area geotermica di Torre Alfina-Castel Giorgio, comprendente anche la stima degli effetti della sismicità locale, che appare del tutto idonea a poter riconoscere l'insorgenza di eventuali anomalie connesse al futuro sfruttamento industriale della risorsa geotermica. Questo era precisamente l'obiettivo dello studio e si ritiene che corrisponda pienamente alle richieste del MATTM.

5. ESTENSORI DELLA PRESENTE RELAZIONE

Dr.ssa Maria Luisa Carapezza, primo ricercatore INGV, Sezione Roma1 (responsabile scientifico)

Dr. Luca Tarchini, Dipartimento di Scienze, Università Roma TRE, associato a INGV-Roma1

Dr. Massimo Ranaldi, Dipartimento di Scienze, Università Roma TRE, associato a INGV-Roma1

6. BIBLIOGRAFIA CITATA

- M.L. Carapezza, M. Ranaldi, A. Gattuso, N.M. Pagliuca, L. Tarchini (2015). *The sealing capacity of the cap rock above the Torre Alfina geothermal reservoir (Central Italy) revealed by soil CO₂ flux investigations*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 291, 25-34. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.12.011.
- Cheng Q., Agterberg F. P. and Ballantyne S. B. (1994). *The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods*. J. Geochem. Explor. 51, 109-130.
- Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., Marini, L., (1998). *Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas*. Appl. Geochem. 13, 543–552.
- Chiodini, G., Baldini, A., Barberi, F., Carapezza, M. L., Cardellini, C., Frondini, F., Granieri D., Ranaldi, M. (2007). *Carbon dioxide degassing at Latera caldera (Italy): evidence of geothermal reservoir and evaluation of its potential energy*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112, B12204.
- Chiodini, G., Caliro, S., Cardellini, C., Avino, R., Granieri, D., & Schmidt, A. (2008). *Carbon isotopic composition of soil CO₂ efflux, a powerful method to discriminate different sources feeding soil CO₂ degassing in volcanic-hydrothermal areas*. Earth and Planetary Science Letters, 274(3), 372-379.
- Chork C. Y. and Salminen R. (1993) *Interpreting exploration geochemical data from Outokumpu, Finland: a MVE-robust factor analysis*. J. Geochem. Explor. 48, 1-20.
- Garrett R. G. (1988) *IDEAS: an interactive computer graphics tool to assist the exploration geochemist*. In Current Research, Part F. Geological Survey of Canada, Paper 88-1F, 1-13.
- Howarth R. J. (1984) *Statistical applications in geochemical prospecting: a survey of recent developments*. J. Geochem. Explor. 21, 41±61.
- INGV (2017). *Monitoraggio del flusso di CO₂ dal suolo da aree target nell'area geotermica di Castel Giorgio-Torre Alfina, periodo aprile 2013-giugno 2017*. Rapporto scientifico per ITW&LKW Geotermia Italia S.p.A., ottobre 2017.

- Macdonald M. A. and Boner F. J. (1993) *Multi-media geochemistry and surficial geology of the Yava Pb deposit, southeastern Cape Breton island, Nova Scotia, Canada*. J. Geochem. Explor. 48, 39-69.
- Rey, A., Pegoraro, E., Tedeschi, V., De Parri, I., Jarvis, P. G., & Valentini, R. (2002). *Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy*. Global Change Biology, 8(9), 851-866.
- Yusta, I., Velasco, F., & Herrero, J. M. (1998). *Anomaly threshold estimation and data normalization using EDA statistics: application to lithogeochemical exploration in Lower Cretaceous Zn-Pb carbonate-hosted deposits, northern Spain*. Applied geochemistry, 13(4), 421-439.

Roma, 14 dicembre 2017

Il Ricercatore responsabile



Maria Luisa Carapezza