

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale
***«Studio di fattibilità di un sensore resistivo di
umidità sul simulante di regolite lunare LMS-1»***

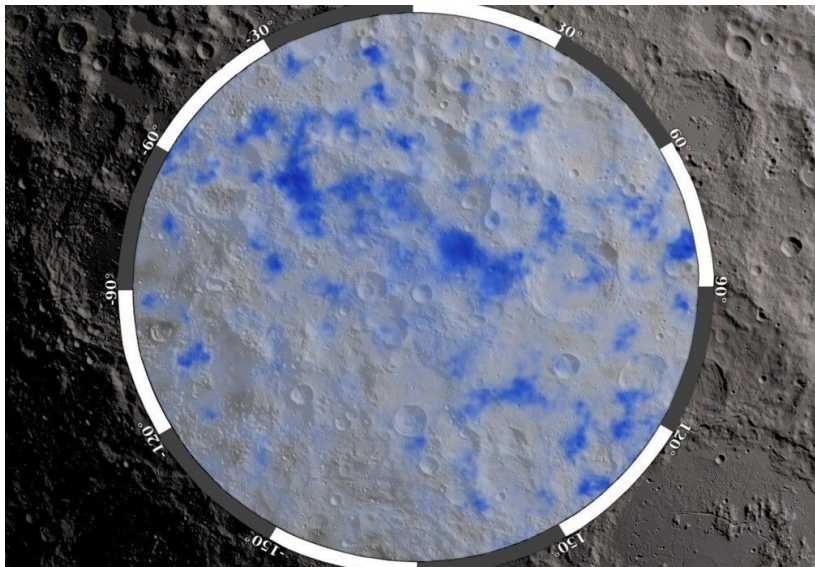
Tutor universitario: Prof. Colombatti Giacomo

Laureando: Piccin Marco

Padova, 24/07/2026

Negli ultimi decenni è stata confermata la presenza di grandi quantità di ghiaccio d'acqua nelle regioni permanentemente in ombra della Luna.

Nel contesto di missioni di esplorazione umana, l'acqua è una risorsa essenziale sia per il sostentamento dell'essere umano, sia per poter generare carburante in loco.



Mapa del polo sud lunare basata sui dati raccolti dal Lunar Reconnaissance Orbiter della NASA

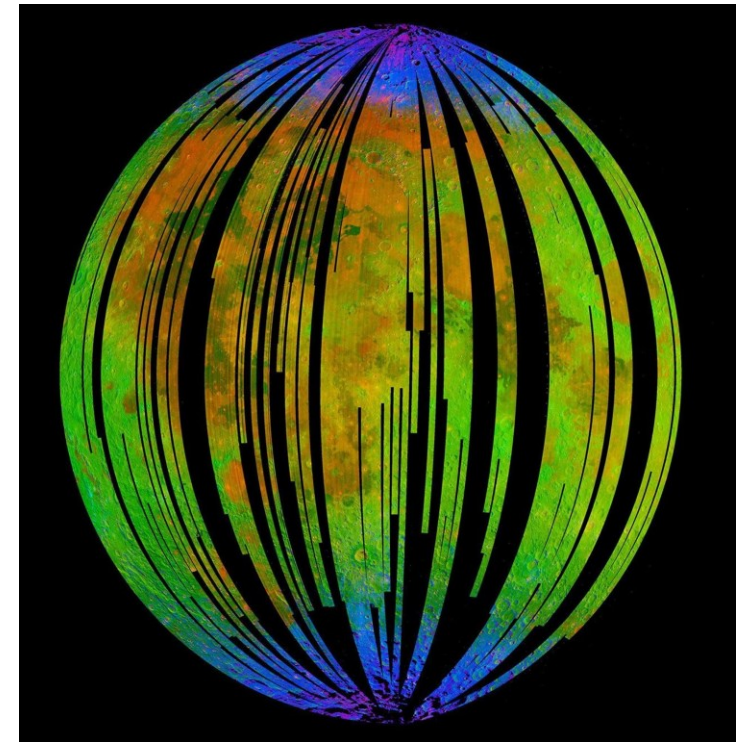
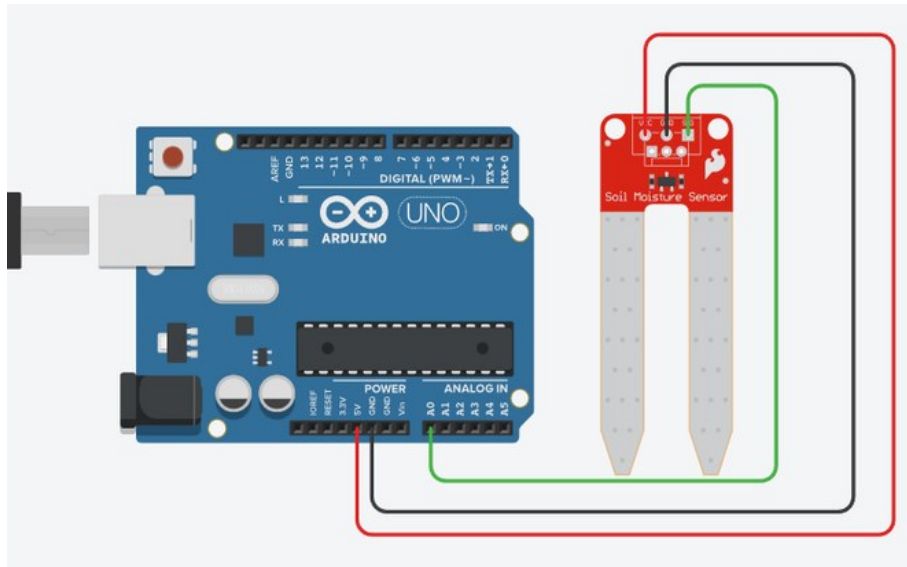
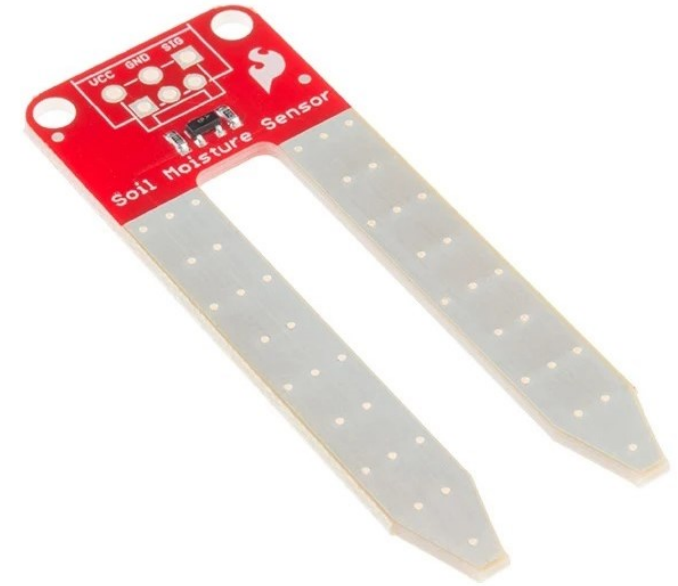


Immagine composita ottenuta dai dati del Moon Mineralogy Mapper della NASA

L'obiettivo di questa relazione è testare un sensore resistivo di umidità commerciale per verificare la validità dei risultati prodotti nel cercare tracce di acqua in un ambiente lunare simulato.



Per rilevare l'umidità è stato usato un sensore **resistivo** di umidità a forza.

Questo funziona stimando la quantità di acqua nel suolo misurandone la **conducibilità elettrica**, facendo passare una corrente elettrica diretta attraverso il terreno bagnato.

Il codice su Arduino è stato impostato per eseguire una misurazione ogni 20 millisecondi.

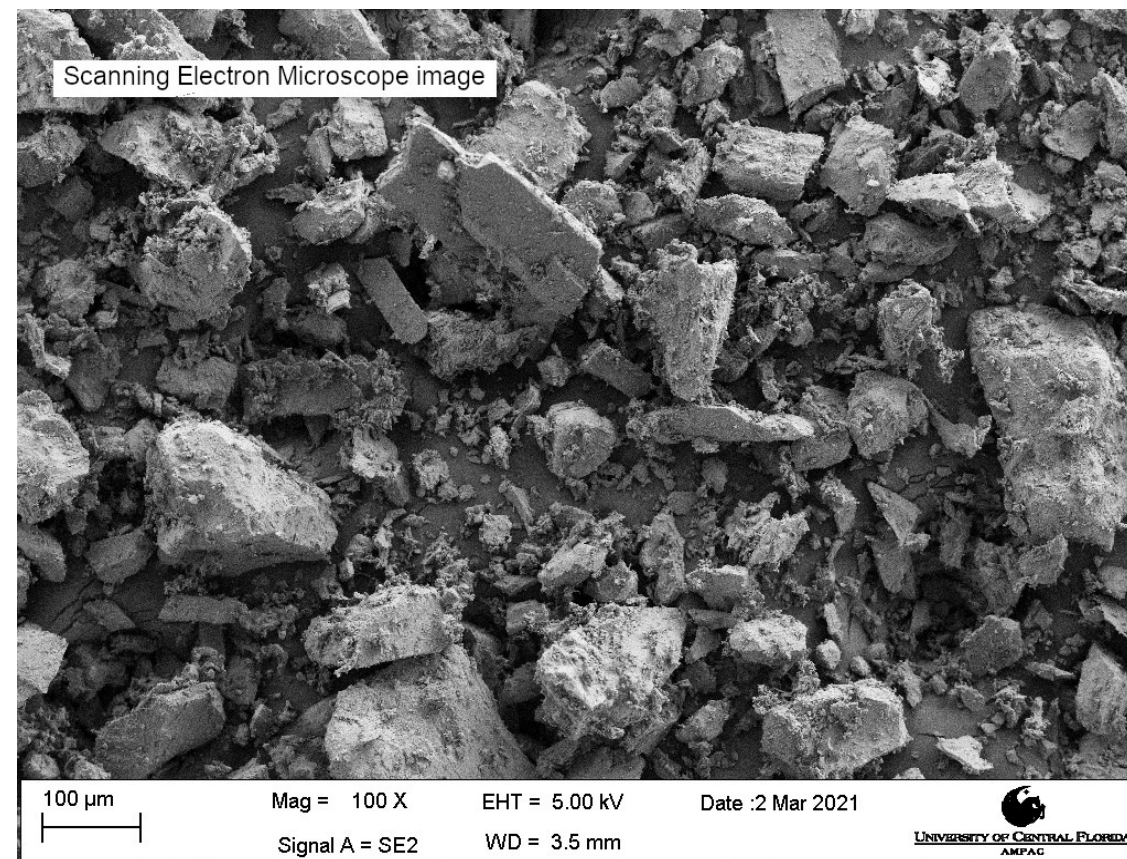
Il sensore è stato calibrato sul simulante, ottenendo un range di valori tra 1 e 1023.

È stato impostato in modo che stampi ripetutamente la **media delle ultime 100 misurazioni dei valori RAW** e il relativo **valore percentuale** (proporzione lineare basata su calibrazione) definito come Indice di umidità del terreno.

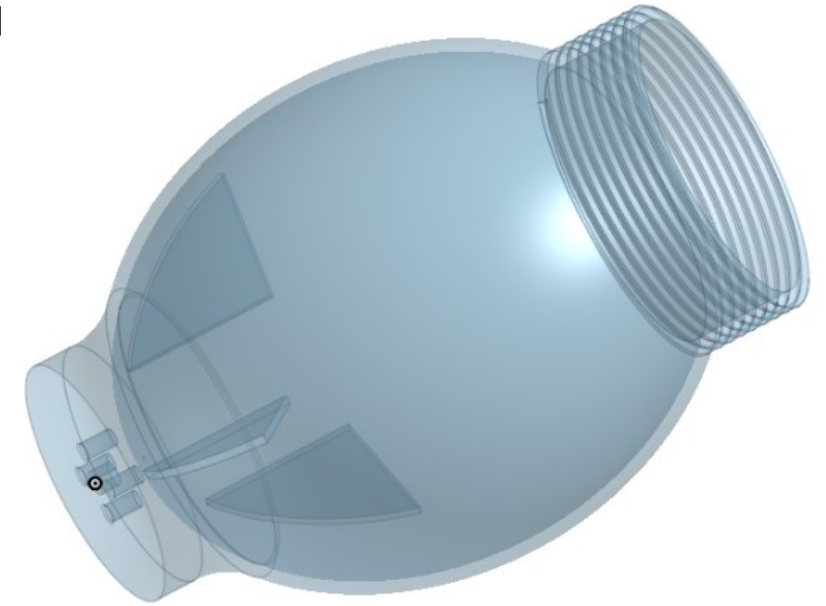
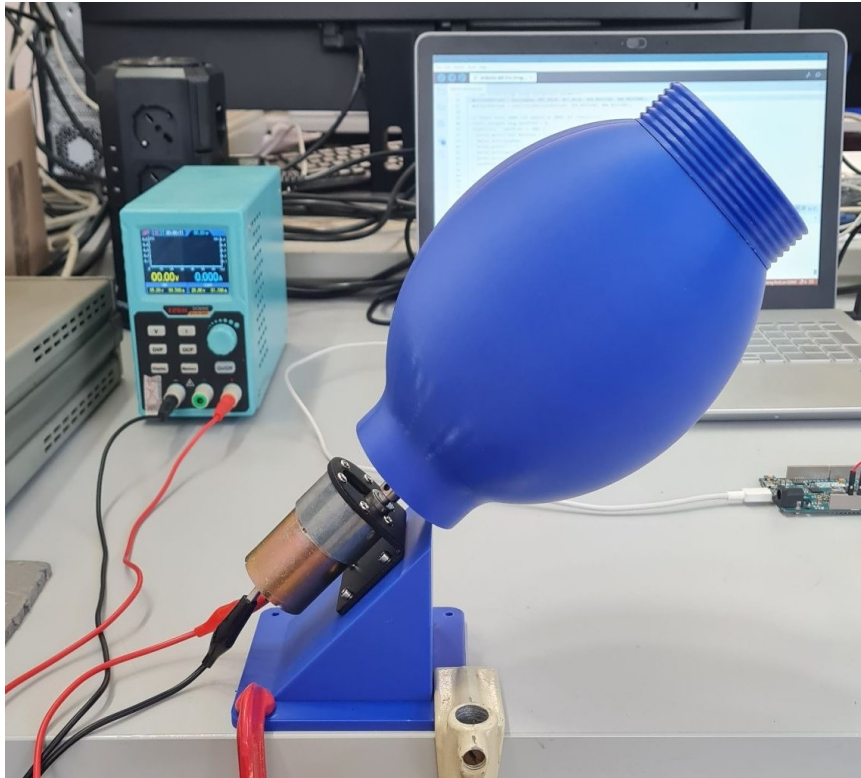
Il codice aspetta di raggiungere una **stabilità** nei valori stampati, che si ottiene con almeno 500 misurazioni consecutive con massima differenza di ± 5 valori RAW.

Dopo aver raggiunto la stabilità, vengono stampate 1000 misurazioni e il codice si ferma, in modo da poter salvare i dati ottenuti.

Per simulare la regolite lunare è stato usato il simulante ad alta fedeltà **“Lunar Mare Simulant” (LMS-1)**, che replica le proprietà fisiche, chimiche e meccaniche del terreno lunare.

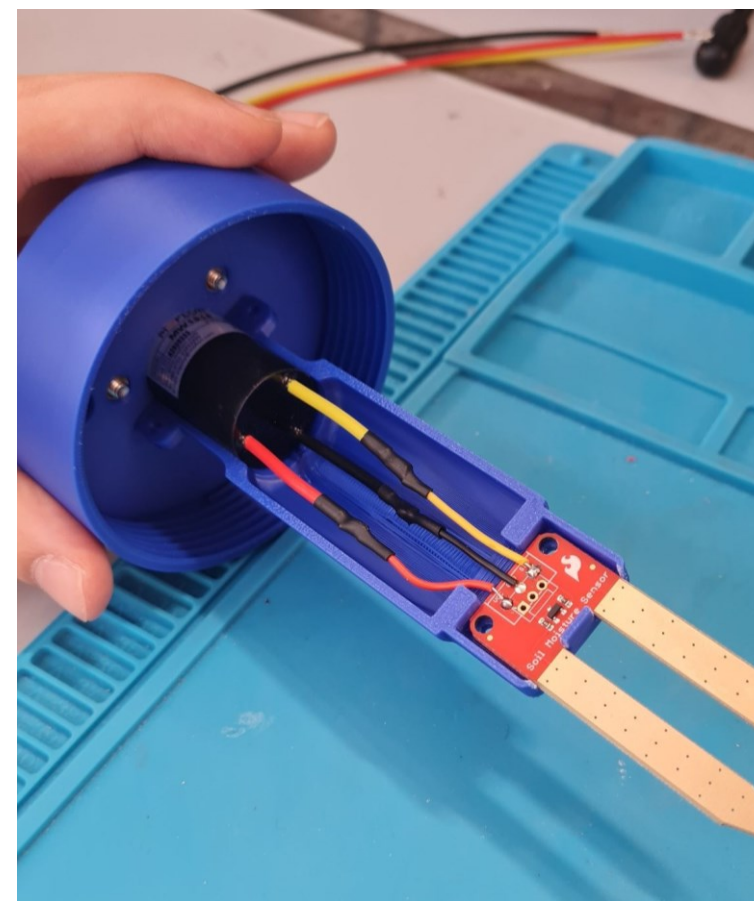
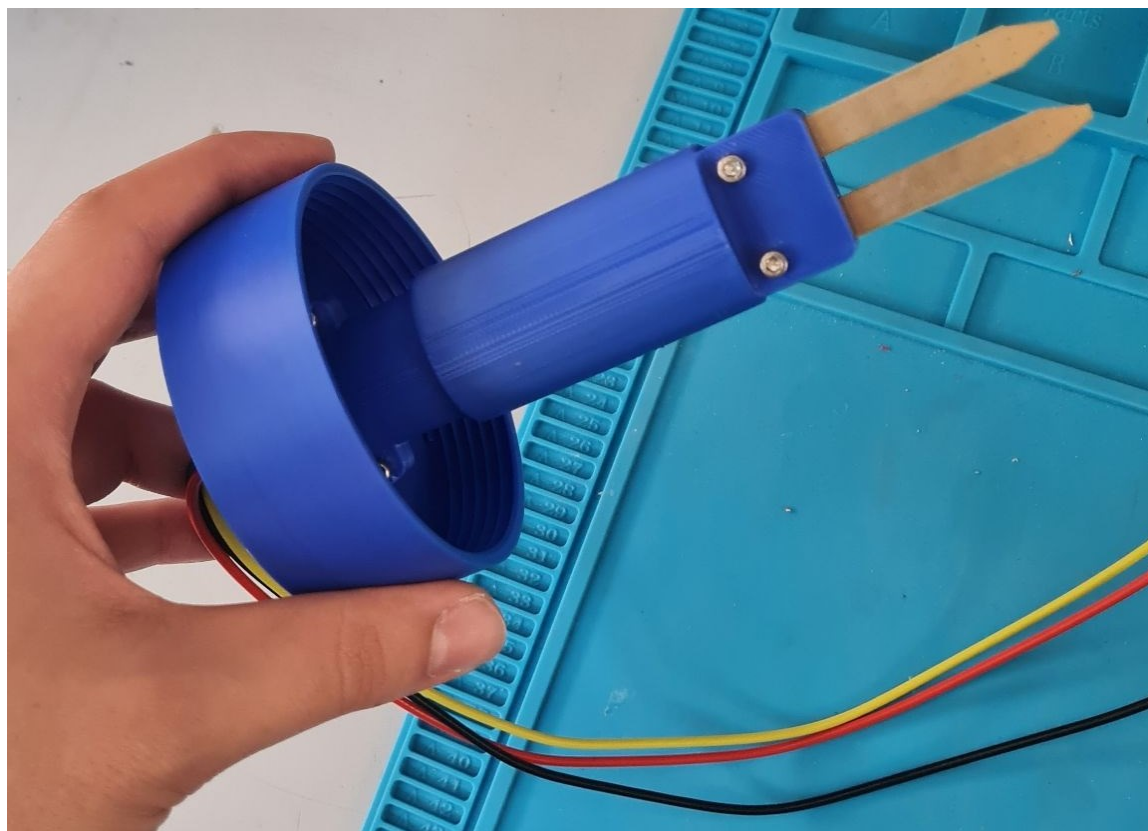


I test sono stati effettuati in un contenitore, progettato su CAD e stampato in 3D, che riprende la funzione di un miscelatore.



Questo è stato collegato a un motore rotante per far incorporare uniformemente l'acqua al materiale simulante.

Per evitare la fuoriuscita di materiale durante i test, la bocca del contenitore è stata chiusa con un tappo, al quale è stato attaccato il sensore di umidità tramite un connettore rotante.



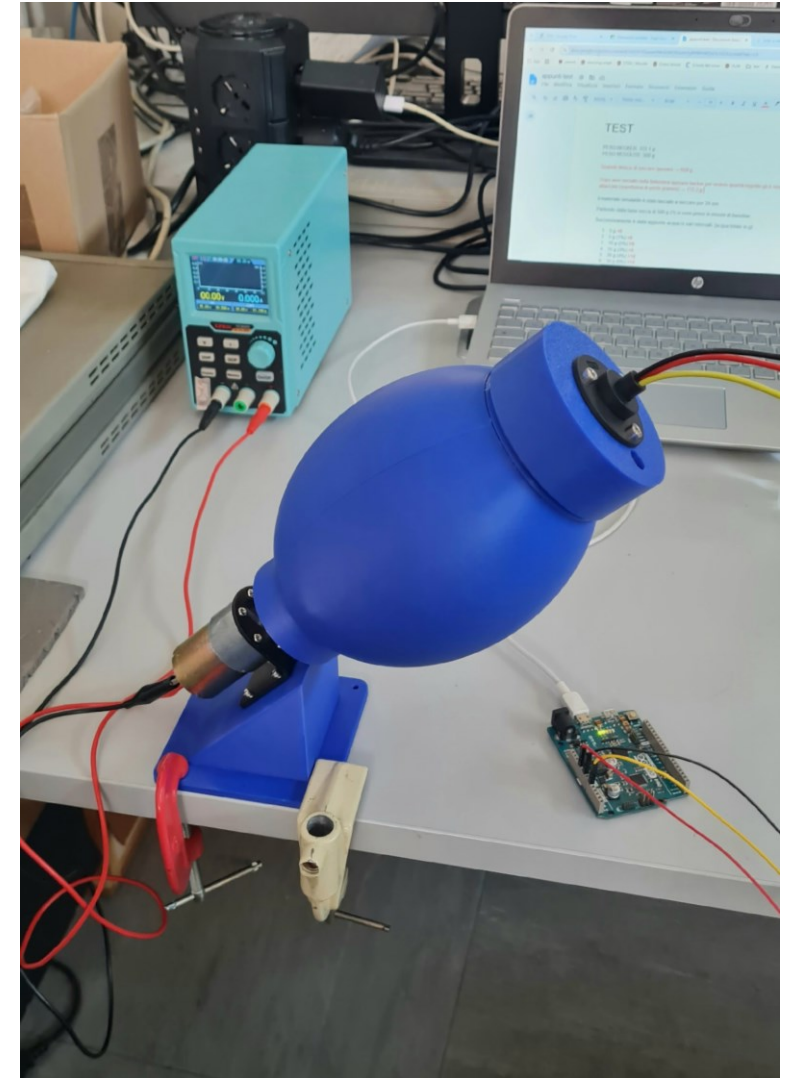
I test sono stati effettuati in condizioni di pressione e temperatura ambiente.

Durante il test sono stati utilizzati 100 g di regolite, precedentemente essiccati per oltre 24 ore.

Iniziando dalla base secca è stata aggiunta acqua in vari intervalli, partendo da un minimo di 0,1 ml fino a 3,0 ml di acqua totale.

Fino a 0,6 ml sono state prese le misure mentre la betoniera era in rotazione.

Da 0,8 ml in poi le misure sono state prese con betoniera ferma, dopo aver fatto incorporare l'acqua.



Il rumore di misura è molto basso: CV tra 0,4-5%.

Il sensore risulta preciso e stabile nelle misurazioni.

Per individuare i valori outlier è stato usato il metodo IQR con fattore 1,5.

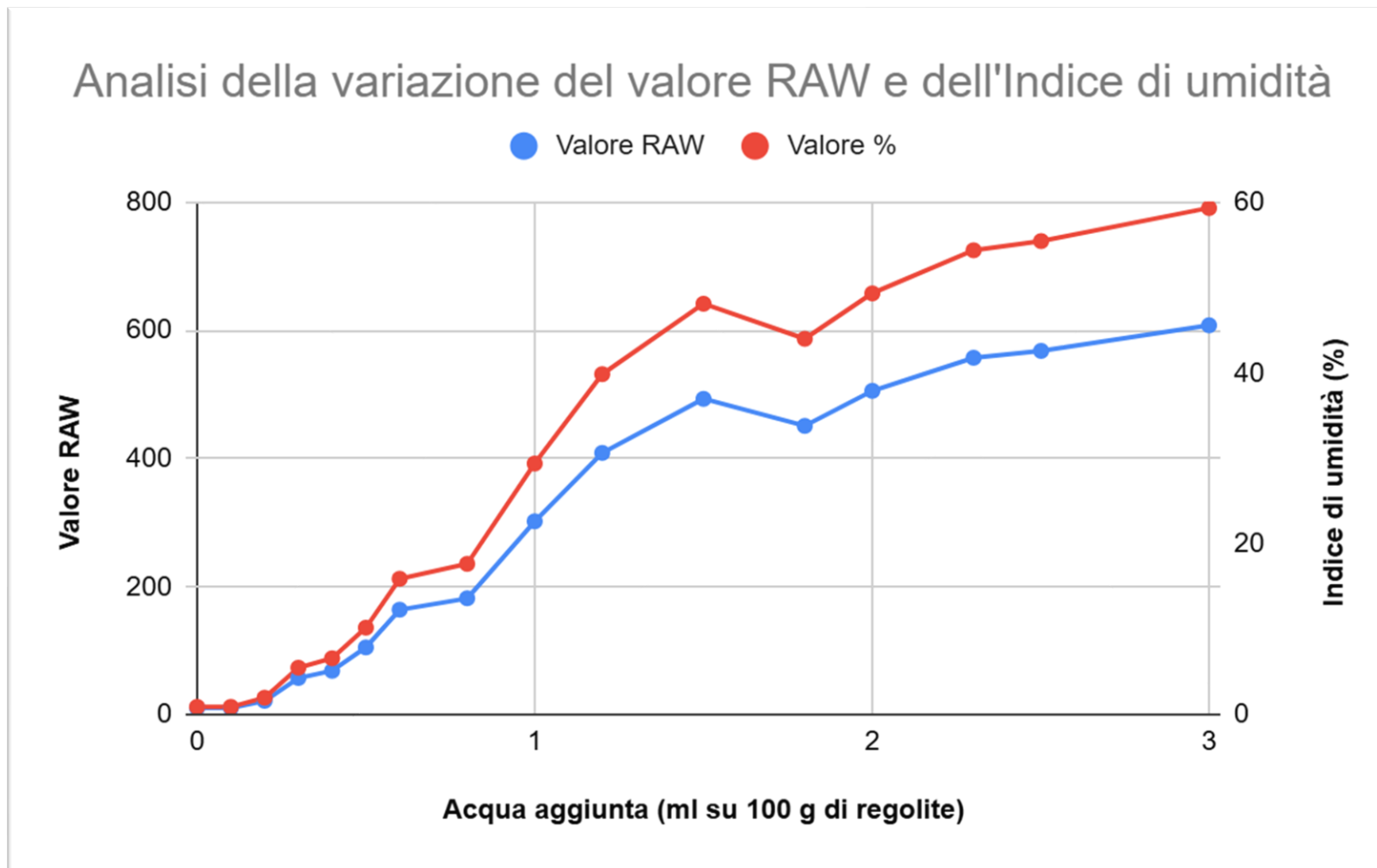
Si individuano outlier reali solo a 0,3 ml (rimuovendoli la media scende da 62,6 a 57,1 RAW e la deviazione standard da 30,9 a 2,8).

MEDIE SENZA OUTLIER		
Acqua (ml)	RAW medio	% media
0,0	10,00	0,88
0,1	10,00	0,88
0,2	21,23	1,98
0,3	57,14	5,49
0,4	68,54	6,60
0,5	105,34	10,20
0,6	164,14	15,95
0,8	182,00	17,69
1,0	302,18	29,44
1,2	408,92	39,87
1,5	493,28	48,12
1,8	451,22	44,01
2,0	505,72	49,34
2,3	557,11	54,36
2,5	568,16	55,44
3,0	607,82	59,32

Acqua (ml)	Contenuto acqua (% p/p)	N	Media	Dev. std	Mediana	Min	Max	Q1	Q3	Limite inf. (IQR)	Limite sup. (IQR)	N outlier	Media senza outlier	Dev. std senza outlier	SEM senza outlier	CV% senza outlier
0,0	0,0	1000	9,99	0,11	10,00	9,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	13,00	10,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,1	1000	10,00	0,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,2	1000	21,15	0,85	21,00	19,00	23,00	21,00	22,00	19,50	23,50	37,00	21,23	0,75	0,02	3,54
0,3	0,3	1000	62,64	30,88	58,00	50,00	285,00	56,00	60,00	50,00	66,00	43,00	57,14	2,78	0,09	4,86
0,4	0,4	1000	68,55	2,35	68,00	63,00	75,00	67,00	70,00	62,50	74,50	2,00	68,54	2,34	0,07	3,41
0,5	0,5	1000	105,34	5,47	107,00	92,00	114,00	101,00	110,00	87,50	123,50	0,00	105,34	5,47	0,17	5,19
0,6	0,6	1000	164,14	3,51	165,00	155,00	170,00	161,00	167,00	152,00	176,00	0,00	164,14	3,51	0,11	2,14
0,8	0,8	1000	182,02	0,60	182,00	181,00	183,00	182,00	182,00	182,00	182,00	366,00	182,00	0,00	0,00	0,00
1,0	1,0	1000	302,18	3,12	302,00	295,00	309,00	300,00	304,00	294,00	310,00	0,00	302,18	3,12	0,10	1,03
1,2	1,2	1000	408,92	4,56	409,00	400,00	416,00	405,00	413,00	393,00	425,00	0,00	408,92	4,56	0,14	1,12
1,5	1,5	1000	493,28	4,97	494,00	483,00	501,00	490,00	497,00	479,50	507,50	0,00	493,28	4,97	0,16	1,01
1,8	1,8	1000	451,22	4,07	452,00	442,00	457,00	448,00	455,00	437,50	465,50	0,00	451,22	4,07	0,13	0,90
2,0	2,0	1000	505,72	5,34	506,00	494,00	514,00	502,00	510,00	490,00	522,00	0,00	505,72	5,34	0,17	1,06
2,3	2,3	1000	557,11	5,88	558,00	545,00	566,00	552,00	562,00	537,00	577,00	0,00	557,11	5,88	0,19	1,05
2,5	2,5	1000	568,16	2,15	568,00	565,00	572,00	566,00	570,00	560,00	576,00	0,00	568,16	2,15	0,07	0,38
3,0	3,0	1000	607,82	4,08	608,00	600,00	614,00	605,00	611,00	596,00	620,00	0,00	607,82	4,08	0,13	0,67

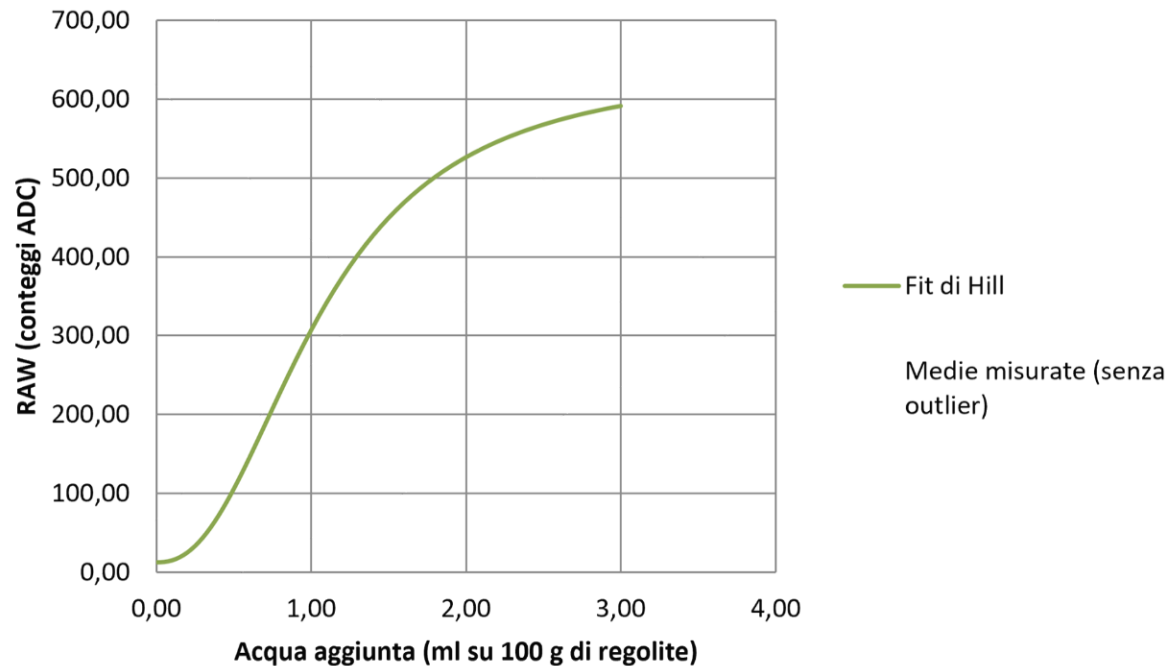
Acqua (ml)	Contenuto acqua (% p/p)	N	Media	Dev. std	Mediana	Min	Max	Q1	Q3	Limite inf. (IQR)	Limite sup. (IQR)	N outlier	Media senza outlier	Dev. std senza outlier	SEM senza outlier	CV% senza outlier
0,0	0,0	1000	0,88	0,01	0,88	0,78	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	13,00	0,88	0,00	0,00	0,00
0,1	0,1	1000	0,88	0,00	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00
0,2	0,2	1000	1,97	0,08	1,96	1,76	2,15	1,96	2,05	1,83	2,19	37,00	1,98	0,07	0,00	3,58
0,3	0,3	1000	6,03	3,02	5,57	4,79	27,76	5,38	5,77	4,80	6,36	47,00	5,49	0,27	0,01	4,89
0,4	0,4	1000	6,60	0,23	6,55	6,06	7,23	6,45	6,74	6,02	7,18	2,00	6,60	0,23	0,01	3,46
0,5	0,5	1000	10,20	0,53	10,36	8,90	11,05	9,78	10,65	8,48	11,96	0,00	10,20	0,53	0,02	5,24
0,6	0,6	1000	15,95	0,34	16,03	15,05	16,52	15,64	16,23	14,76	17,12	0,00	15,95	0,34	0,01	2,15
0,8	0,8	1000	17,69	0,06	17,69	17,60	17,79	17,69	17,69	17,69	17,69	366,00	17,69	0,00	0,00	0,00
1,0	1,0	1000	29,44	0,31	29,42	28,74	30,11	29,23	29,62	28,65	30,21	0,00	29,44	0,31	0,01	1,04
1,2	1,2	1000	39,87	0,45	39,88	39,00	40,57	39,49	40,27	38,32	41,44	0,00	39,87	0,45	0,01	1,12
1,5	1,5	1000	48,12	0,49	48,19	47,12	48,88	47,80	48,48	46,78	49,50	0,00	48,12	0,49	0,02	1,01
1,8	1,8	1000	44,01	0,40	44,09	43,11	44,57	43,70	44,38	42,68	45,40	0,00	44,01	0,40	0,01	0,90
2,0	2,0	1000	49,34	0,52	49,36	48,19	50,15	48,97	49,76	47,79	50,95	0,00	49,34	0,52	0,02	1,06
2,3	2,3	1000	54,36	0,57	54,45	53,18	55,23	53,86	54,84	52,39	56,31	0,00	54,36	0,57	0,02	1,06
2,5	2,5	1000	55,44	0,21	55,43	55,13	55,82	55,23	55,62	54,65	56,21	0,00	55,44	0,21	0,01	0,38
3,0	3,0	1000	59,32	0,40	59,34	58,55	59,92	59,04	59,63	58,16	60,52	0,00	59,32	0,40	0,01	0,67

ANOMALIA A 1,5/1,8 ml: la risposta non è monotona. Probabilmente dovuto a un contatto sensore-regolite, compattazione o distribuzione dell'acqua diversa in quel test.

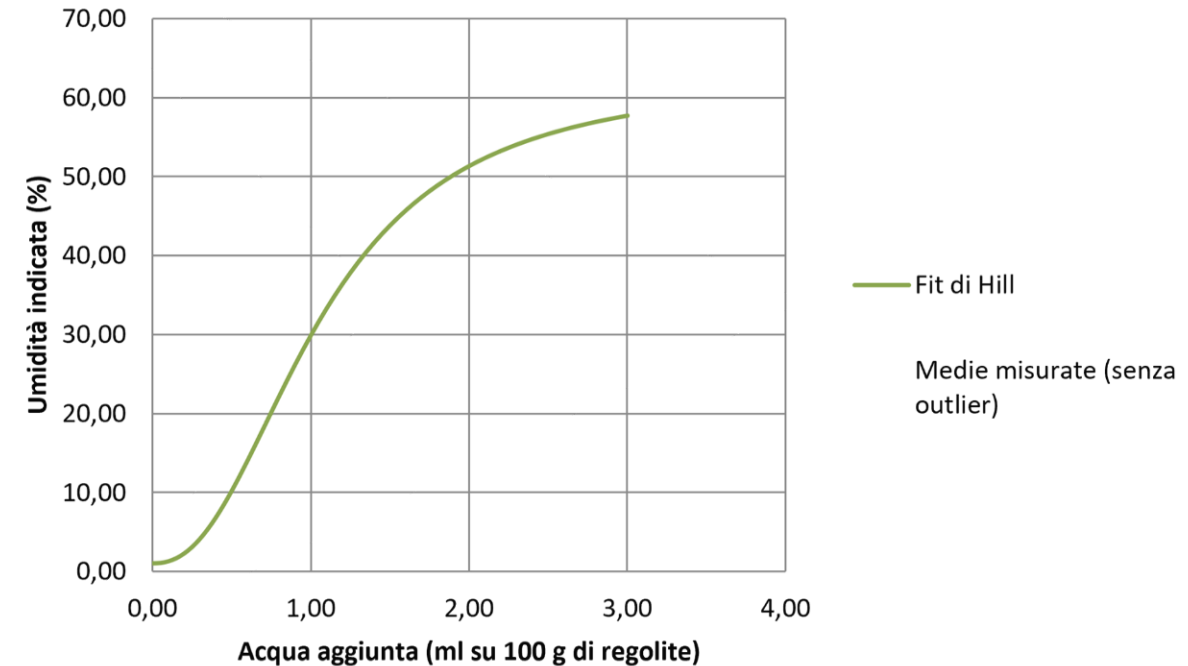


Curva di calibrazione creata con modello della sigmoide di Hill. Si riscontrano 3 zone:
zona morta sotto 0,15 ml, **tratto quasi lineare** tra 0,3 e 1,5 ml, **saturazione** oltre 2 ml.

Calibrazione RAW vs acqua aggiunta



Calibrazione % vs acqua aggiunta



L'analisi statistica condotta su 1000 misurazioni mostra un' **ottima validità e precisione** del sensore, che presenta un rumore di fondo estremamente ridotto.

La risposta dello strumento si adatta fedelmente al modello della sigmoide di Hill ($R^2 = 0,988$), evidenziando una zona morta iniziale e una progressiva saturazione agli estremi.

In successive fasi sperimentali, si consiglia di ripetere la misura nei valori attorno ai 1,8 ml, per chiarire l'anomalia riscontrata.

In futuri studi sul materiale, risulterebbe di grande interesse continuare i test sperimentali eseguendo misurazioni in **condizioni di vuoto e a basse temperature**, utilizzando sensori alternativi idonei.

K. Watson, B. C. Murray e H. Brown, «The behavior of volatiles on the lunar surface,» *Journal of Geophysical Research*, vol. 66, n. 9, pp. 3033–3045, 1961. doi: 10.1029/JZ066i009p03033.

A. Colaprete et al., «Detection of water in the LCROSS ejecta plume,» *Science*, vol. 330, n. 6003, pp. 463–468, 2010. doi: 10.1126/science.1186986.

S. Li et al., «Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, n. 36, pp. 8907–8912, 2018. doi: 10.1073/pnas.1802345115.

S. S. Schreiner, S. D. Domagal-Goldman e J. C. Rask, «The economic and logistical case for Lunar ISRU» *Space Policy*, vol. 37, pp. 44–51, 2016. doi: 10.1016/j.spacepol.2016.05.006.

G. F. Sowers e C. B. Dreyer, «Ice mining on the Moon,» *Space Policy*, vol. 48, pp. 37– 44, 2019. doi: 10.1016/j.spacepol.2019.01.00

M. Naser, «Space-native construction materials for earth-independent and sustainable infrastructure,» *Acta Astronautica*, vol. 155, pp. 264–273, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.12.014>.