

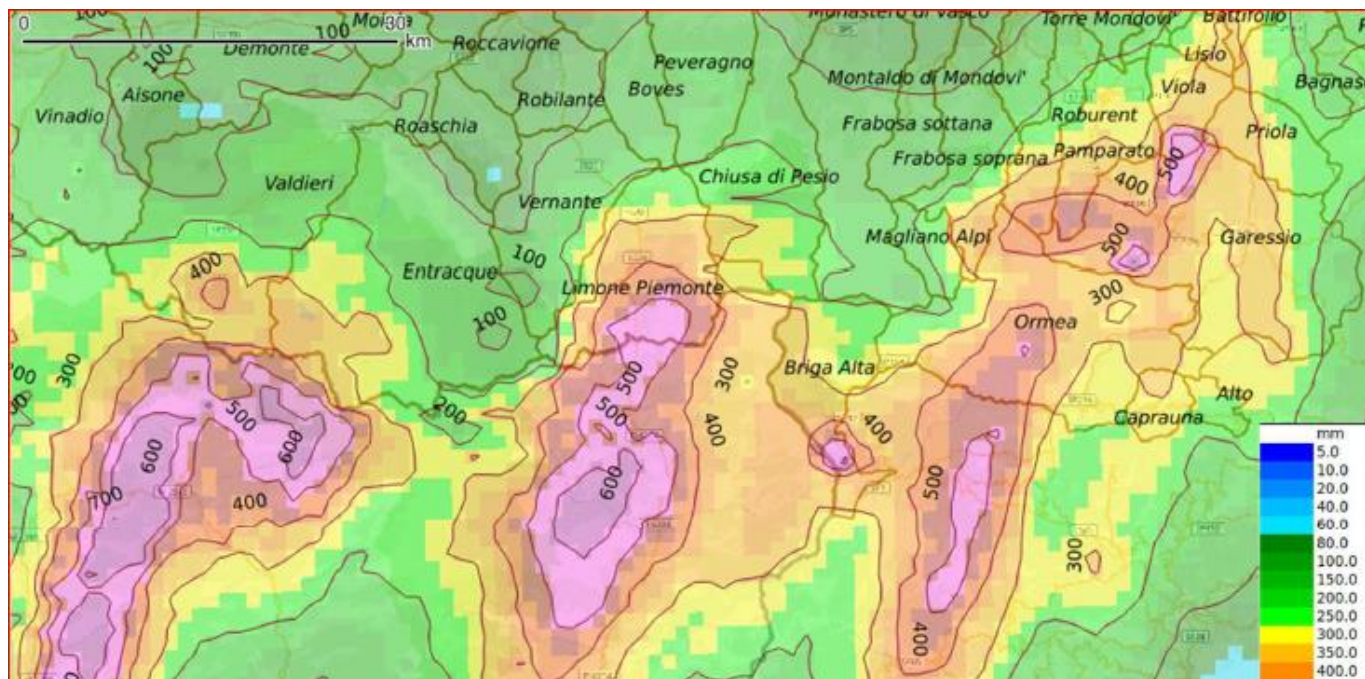
ITCOLD Dighe a volta

*La risposta della diga di CHIOTAS al rapido invaso per la laminazione
della piena conseguente l'evento meteo del 2-3 ottobre 2020*

*Francesco Fornari
Mirko Corigliano*

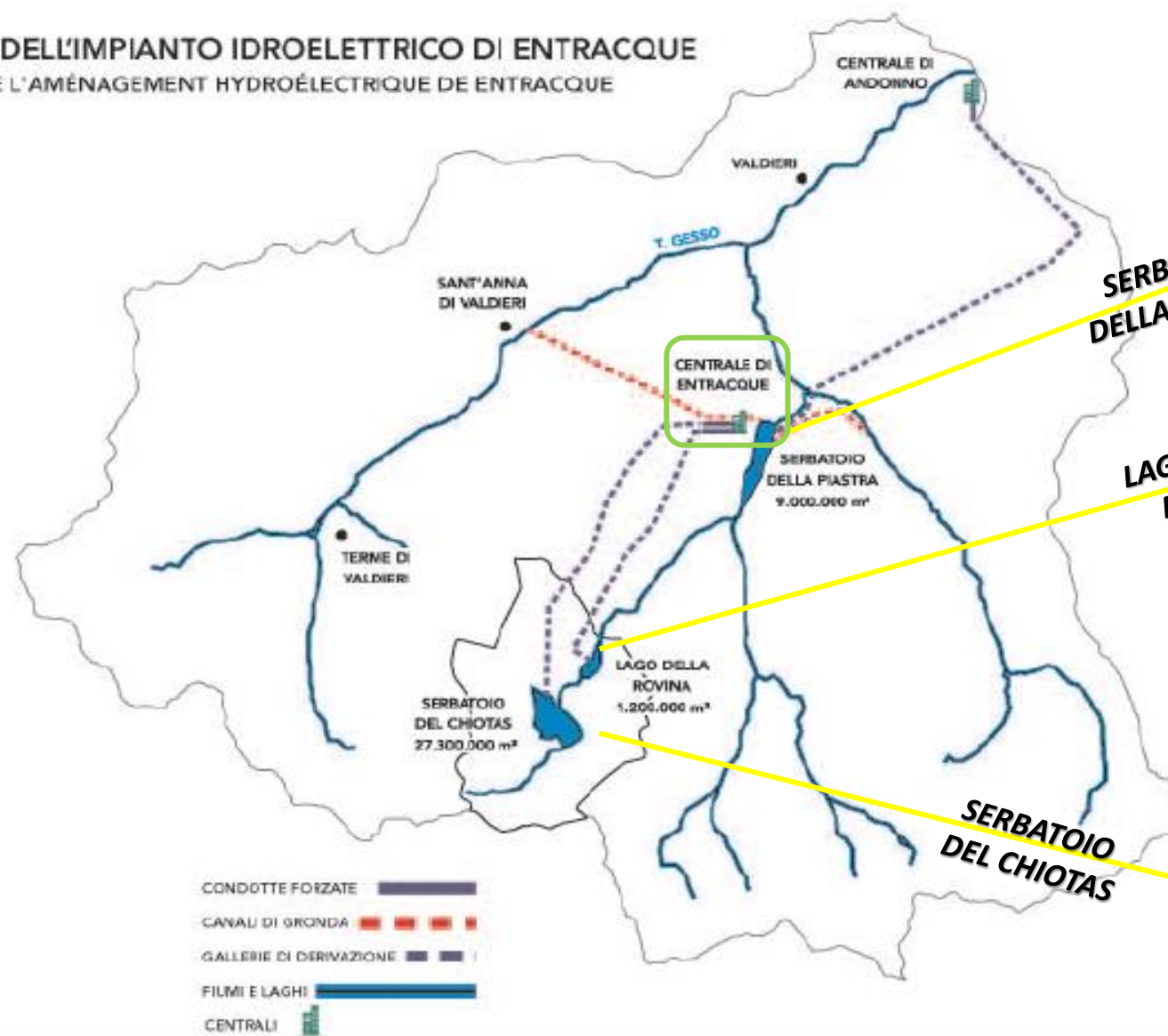


Dettaglio delle precipitazioni, stimate dai sistemi radarmeteorologici (ARPA), nei giorni 2-3 ottobre 2020



Luino et al. (2021). Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 4/2021

CARTA DELL'IMPIANTO IDROELETTRICO DI ENTRACQUE
CARTE DE L'AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE ENTRACQUE



SERBATOIO
DELLA PIASTRA

LAGO DELLA
ROVINA

SERBATOIO
DEL CHIOTAS





**Diga ad arco-gravità
in calcestruzzo a doppia curvatura**

Altezza: 120 m

Lunghezza al coronamento: circa 230 m

Spessori alle imposte: variano da 5 m al coronamento a 37,50 m alla base

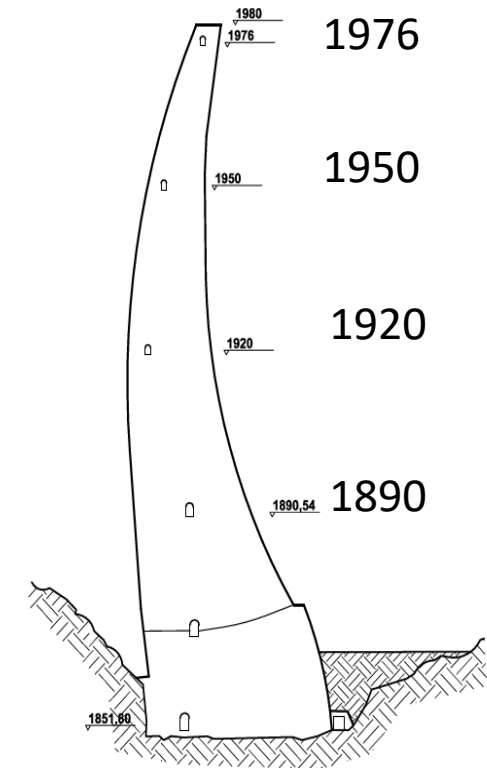
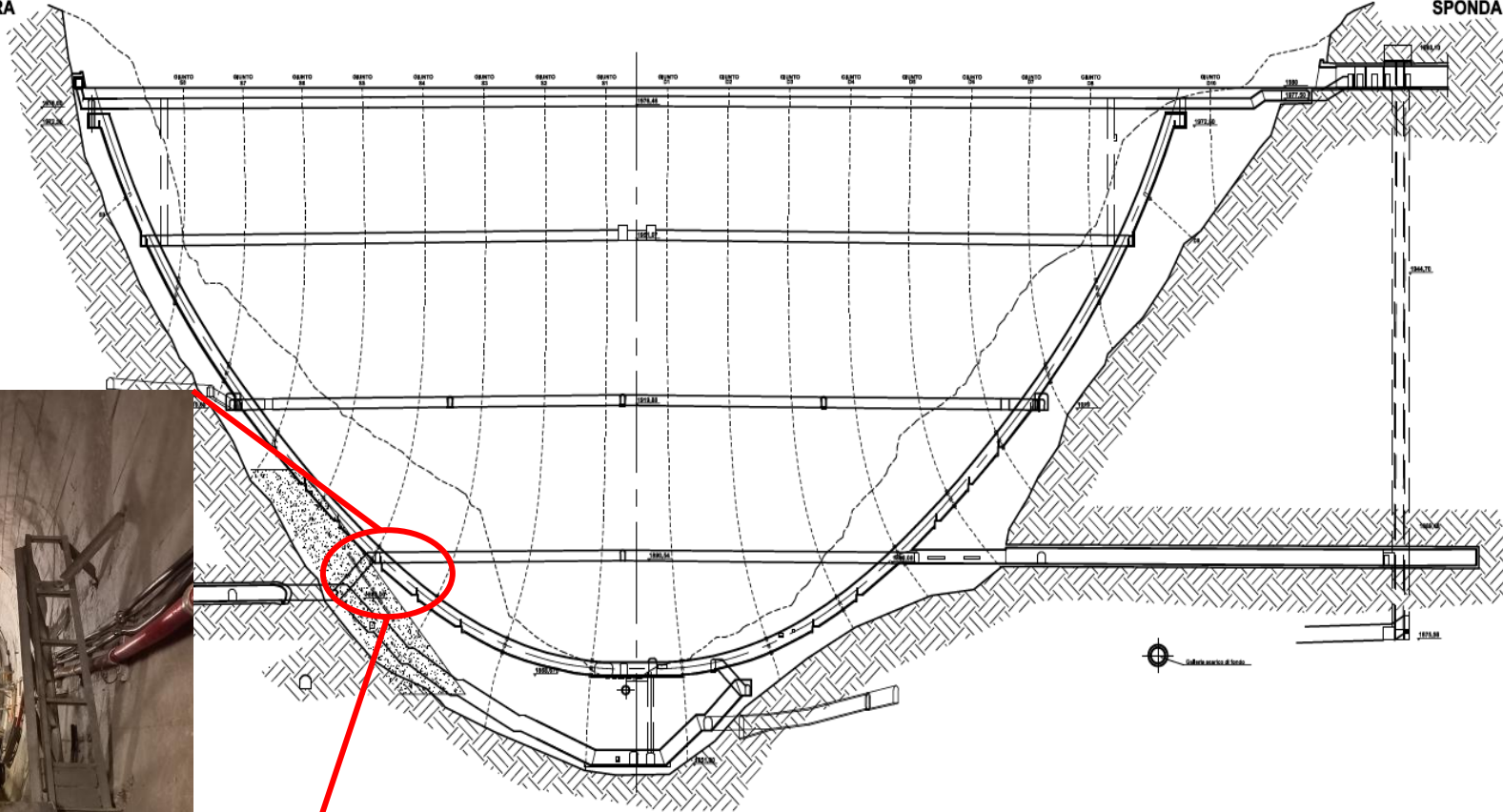


SPONDA SINISTRA

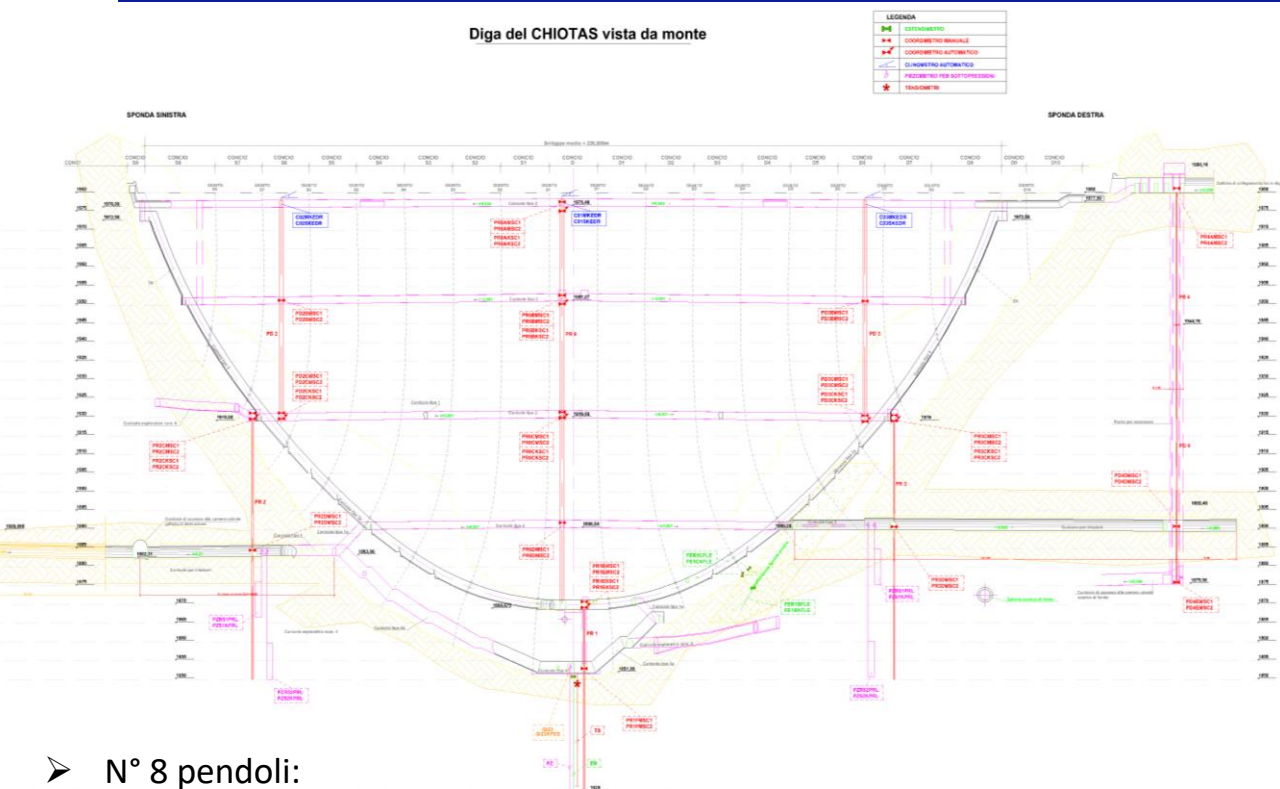
SPONDA DESTRA

MONTE

VALLE

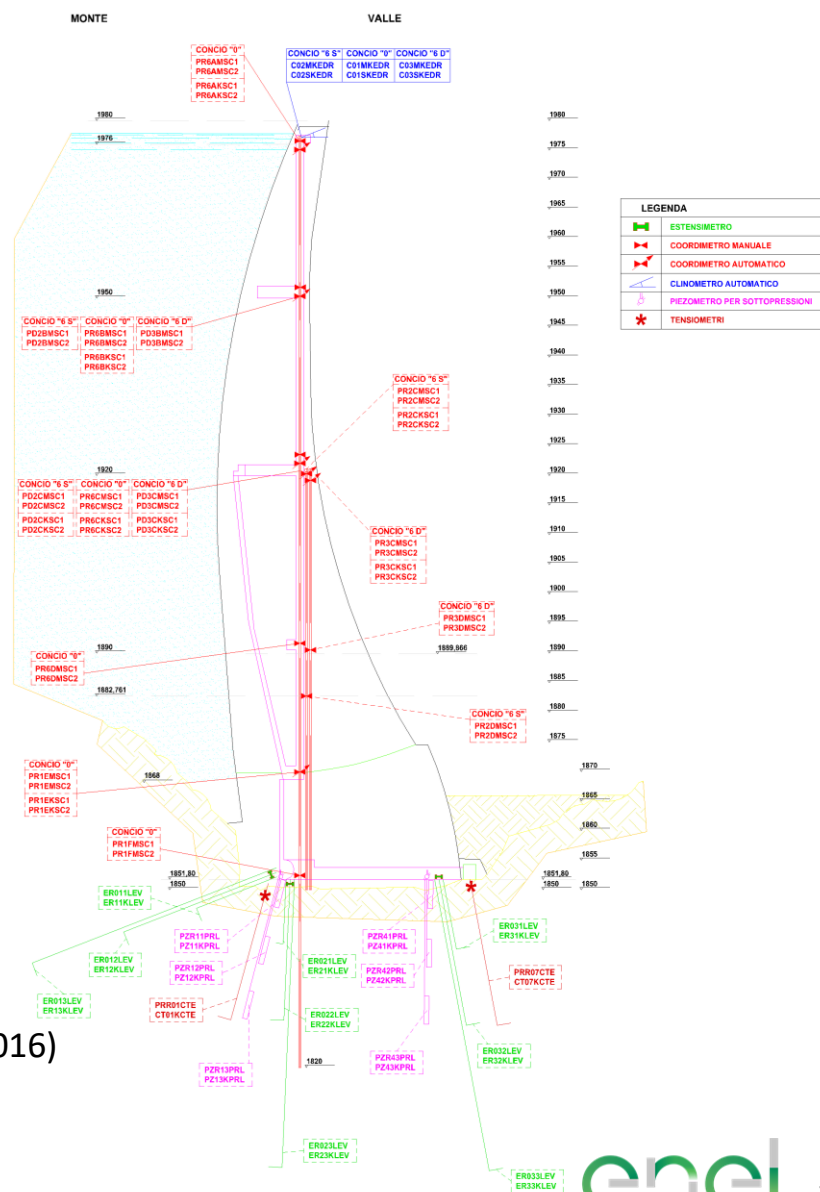


Diga del CHIOTAS vista da monte



- N° 8 pendoli:
 - 11 postazioni di misura ai pendoli dritti di cui 6 con misura automatica
 - 6 postazioni di misura ai pendoli rovesci di cui 2 con misura automatica
- N° 3 clinometri automatici
- N° 11 punti di livellazione sul coronamento diga
- N° 9 estensimetri in fondazione
- N° 2 teledilatometri elettroacustici su spalla sinistra
- N° 2 rosette estensimetriche costituite da 5 estensimetri elettroacustici per misura deformazione
- N° 5 termoresistenze al rame solo automatici (nel calcestruzzo e sui paramenti di cui 2 fuori servizio dal 2016)
- N° 2 rosette estensimetriche elettroacustiche per misura temperatura solo rilievo automatico
- N° 2 pressimetri manuali in roccia
- N° 11 piezometri
- N° 1 perdita

Diga del CHIOTAS sezione trasversale



Pendoli Manuali

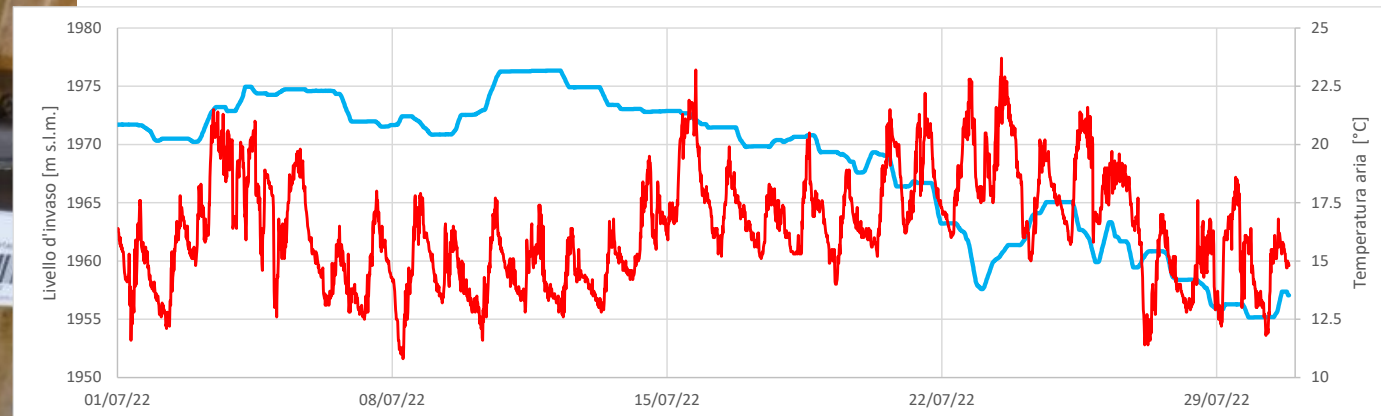


Pendolo postazione intermedia



Pendolo rovescio, postazione
sommitale

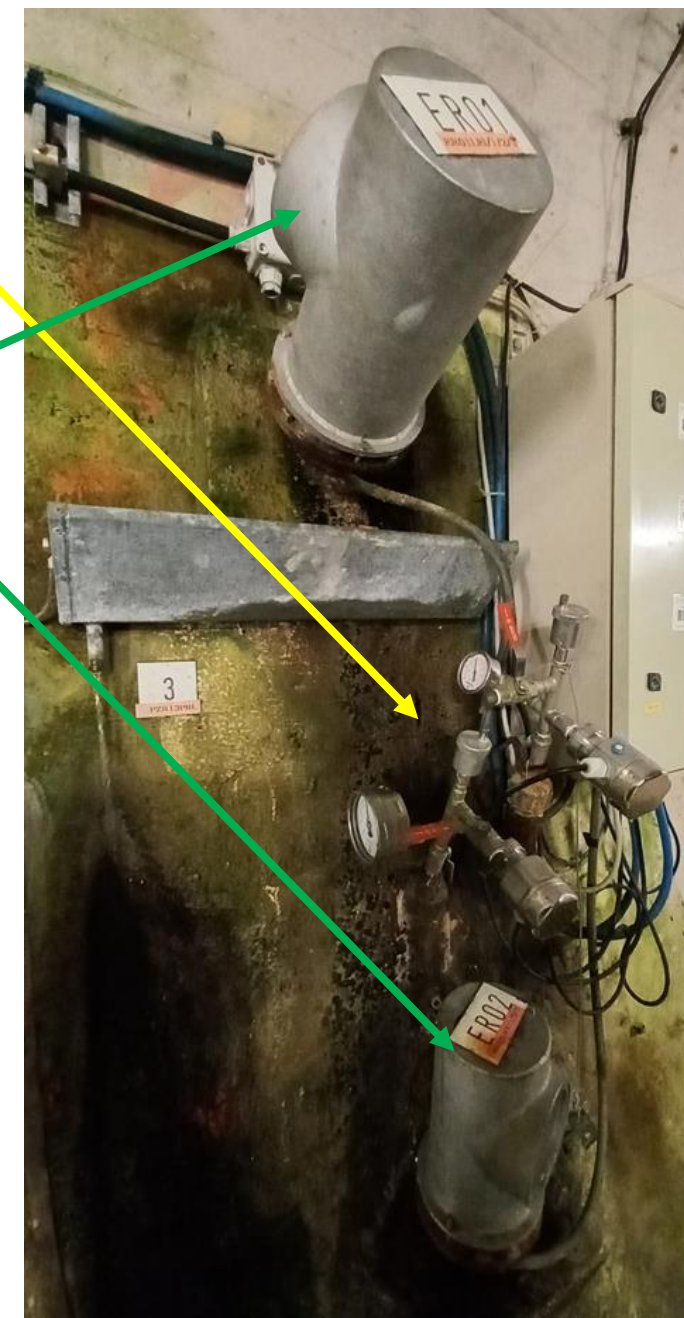
Pendoli Automatici





Piezometri

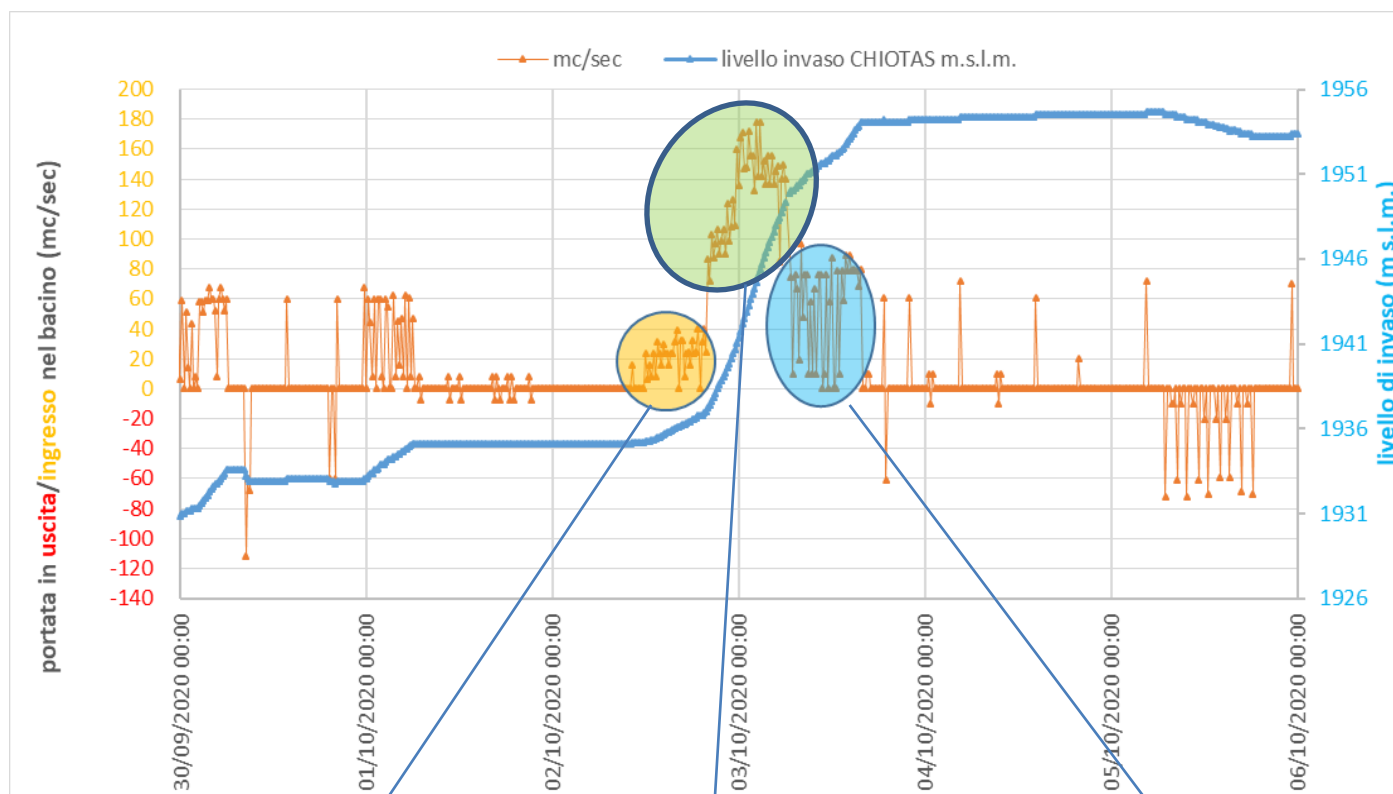
Estensimetri a lunga base



Base per misure clinometriche



Variazione del livello invaso e delle portate prima, durante e dopo l'evento meteo



Prima fase di afflusso solo naturale
 $\Delta V_{\text{invaso}} = 635'000 \text{ m}^3$

Seconda fase apporto combinato naturale/pompaggio
 $\Delta V_{\text{invaso}} = 5'368'000 \text{ m}^3$

Terza fase di afflusso con numero ridotto di pompe
 $\Delta V_{\text{invaso}} = 1'215'000 \text{ m}^3$

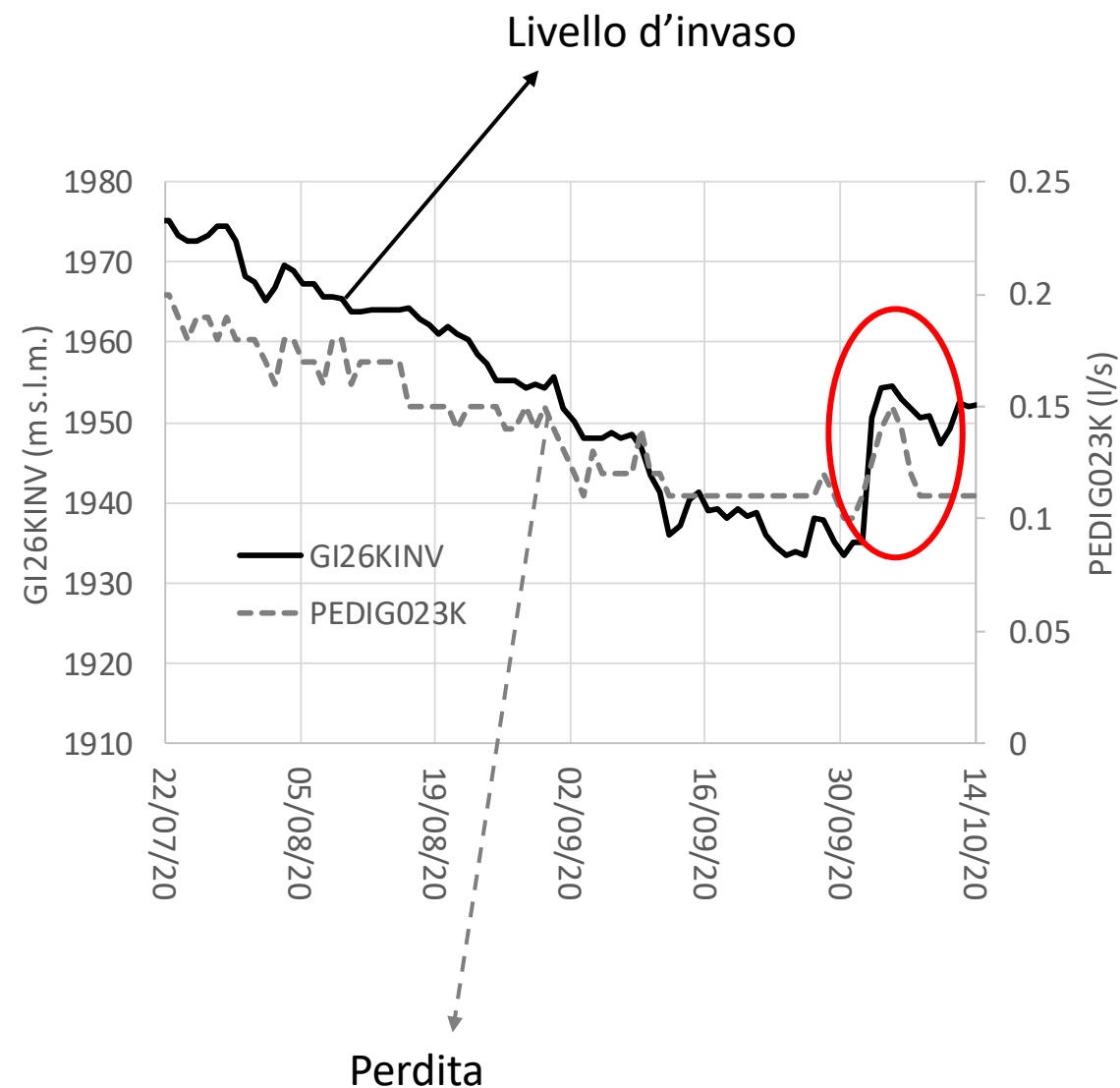
- Inizio dell'evento meteorologico (15:45 del 2 ottobre):
 - Livello del bacino a quota 1936.00 m s.l.m.
 - Volume invaso pari a 7.355.000 mc.
- Prima fase dell'evento (tra le 15:45 e le 19:45 del 2 ottobre):
 - l'invaso ha subito un aumento di volume dovuto esclusivamente ad afflussi naturali provenienti dal bacino imbrifero direttamente sotteso, con massimi valori di portate in ingresso pari a 40 mc/sec
- Laminazione della piena in atto (serata del giorno 2 ottobre):
 - Attivato il pompaggio da parte dei gruppi della Centrale di Entracque dalla diga di Piastra verso la diga di Chiotas
 - Alle ore 20:00 sono state avviate 5 delle 8 pompe disponibili;
 - alle ore 24:00 sono state avviate ulteriori 2 pompe (fino alle ore 7:00 del 3 ottobre).
 - Alle ore 2:15 del 3 ottobre si è raggiunta la portata massima in ingresso nel bacino di Chiotas pari a 178 mc/sec.

Alla conclusione dell'evento, alle ore 15:45 del 3 ottobre, il lago ha raggiunto quota 1954.03 m s.l.m. (invaso pari a 14'573'000 mc).

Nel corso dell'evento del 2-3 ottobre 2020 è stato raggiunto un valore massimo della variazione del livello pari a 7'218'000 mc nell'arco di 24h.



Stramazzo per la misura delle perdite



Aspetti introduttivi: obiettivi della modellazione

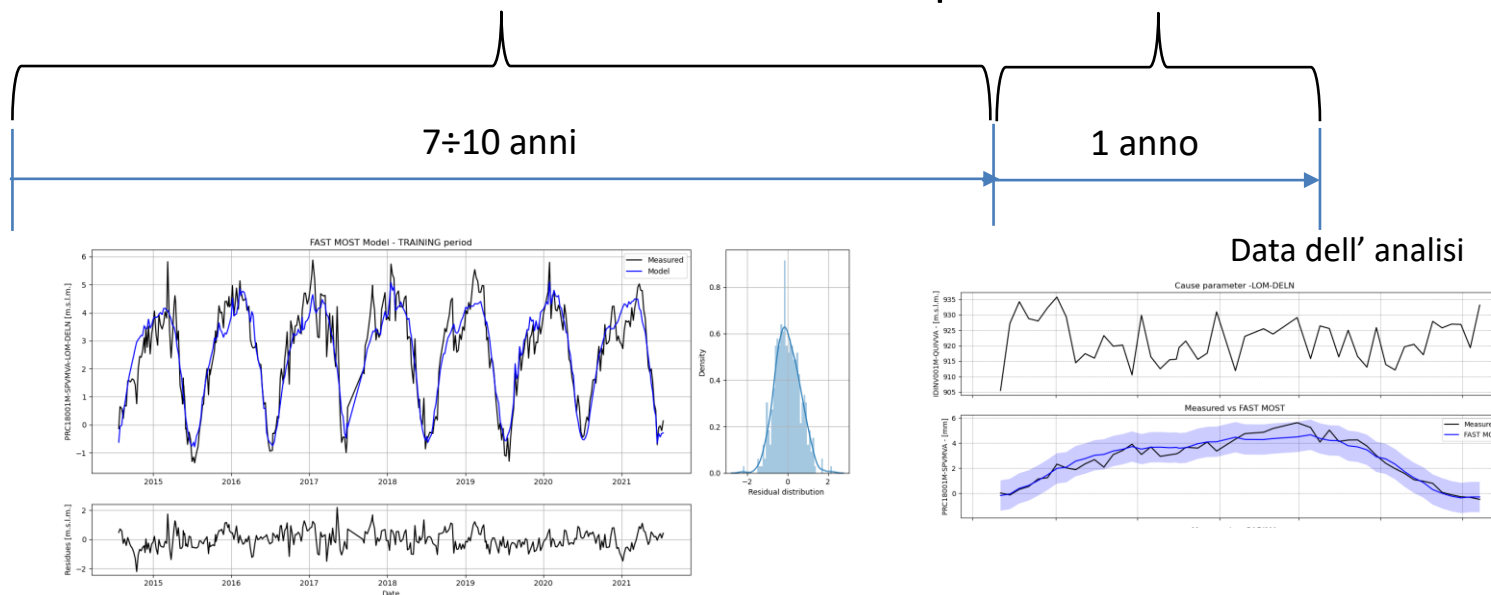
TRAINING: Periodo di
addestramento del modello

TEST: Periodo di
previsione del modello

➔ **Identificazione delle anomalie**

Anomalia ➔ scostamento rispetto al
comportamento misurato nel passato e
riproducibile con un modello statistico

Analisi delle differenze tra il parametro
misurato e la stima del parametro stesso
prodotta dal modello predittivo applicato
all'intervallo temporale di test



Modello non
rappresentativo

NO

Calibrazione
del modello
(Training)

**Goodness
of Fit**

OK

Modello rappresentativo
delle condizioni di
"normale"
comportamento del
parametro considerato

Identificazione
anomalie (Test)

OK

NO

**Verifica
anomalie**

SI

Analisi di
dettaglio

Regressione lineare multivariata

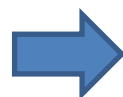
La regressione lineare con variabili multiple (i.e. regressione lineare multivariata) è uno degli algoritmi di base delle tecniche di apprendimento automatico (“machine learning”) di tipo supervisionato. Il valore stimato \hat{Y} , attraverso una regressione lineare multivariata, può essere espresso dalla relazione:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n = \beta_0 + \sum_{j=1}^n X_j \cdot \beta_j$$

Le incognite del problema sono costituite
dal vettore dei coefficienti del modello β_j

Uno dei parametri predittivi considerati è il tempo, che viene opportunamente normalizzato in modo che nel periodo di training del modello esso vari in un intervallo compreso tra 0 e 1.

Modello statistico HST (Hydro-Seasonal-Time)



Valore predetto

$$y = y_h + y_s + y_\theta + \varepsilon$$

Contributo del tempo

$$y_\theta(t) = c_1 t$$

Errore del modello

Contributo
idrostatico

$$y_h(h) = \sum_{i=1}^N a_i h^i$$

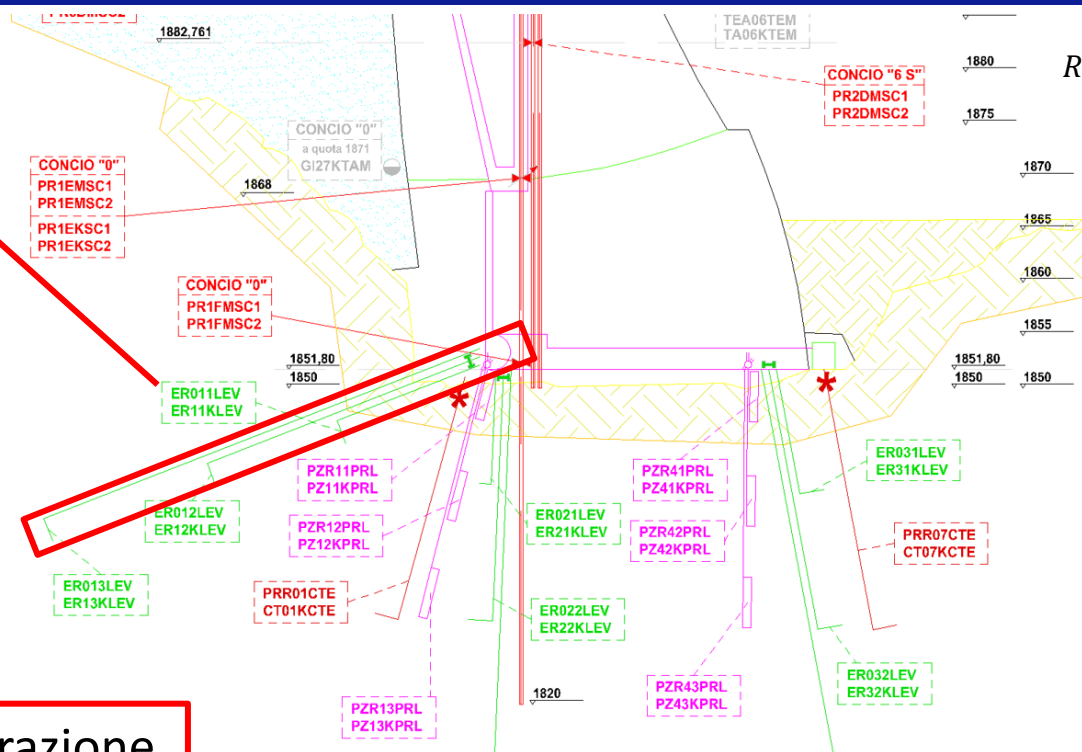
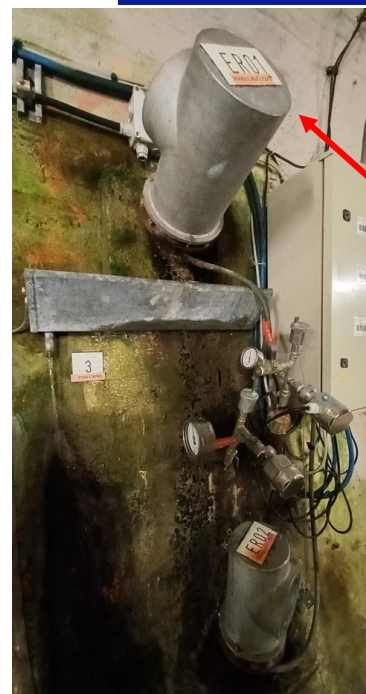
Contributo stagionale

Rappresentata da un modello armonico attraverso una serie di Fourier:

$$y_s(t) = c_0 + \sum_{n=1}^N \left[c_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot t}{P}\right) + d_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot t}{P}\right) \right]$$

Funzione polinomiale del carico idrostatico $h \rightarrow a_1; a_2; \dots; a_N$ sono coefficienti, N rappresenta il grado polinomiale e h è il livello dell'acqua del serbatoio.

In cui P è il periodo della serie, che per una stagionalità annuale è pari a 365.25 giorni, mentre N è il grado della serie di Fourier i cui coefficienti sono c_0 , c_n e d_n .



Periodo di calibrazione



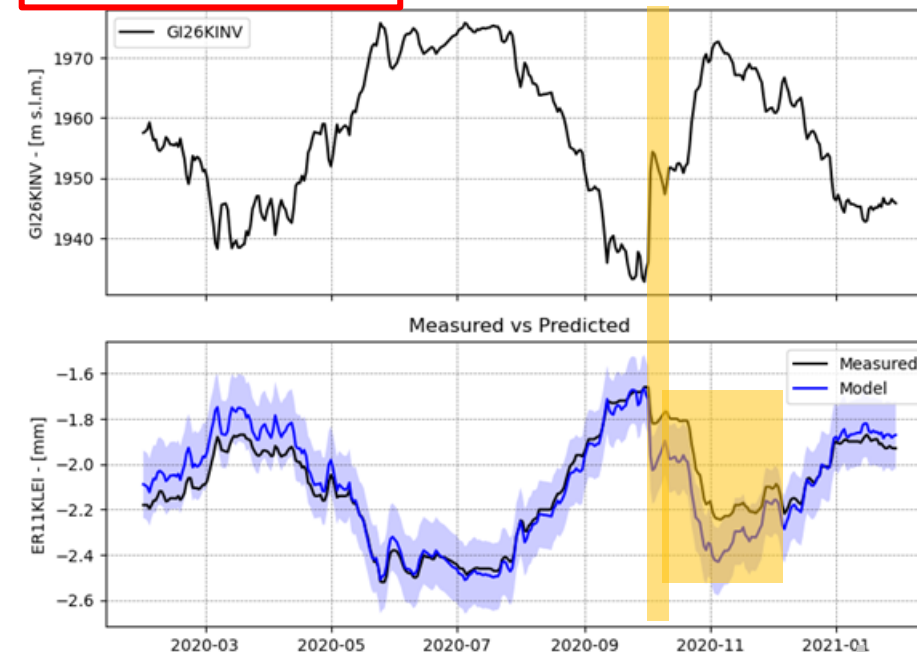
$$RMSE(y, \hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

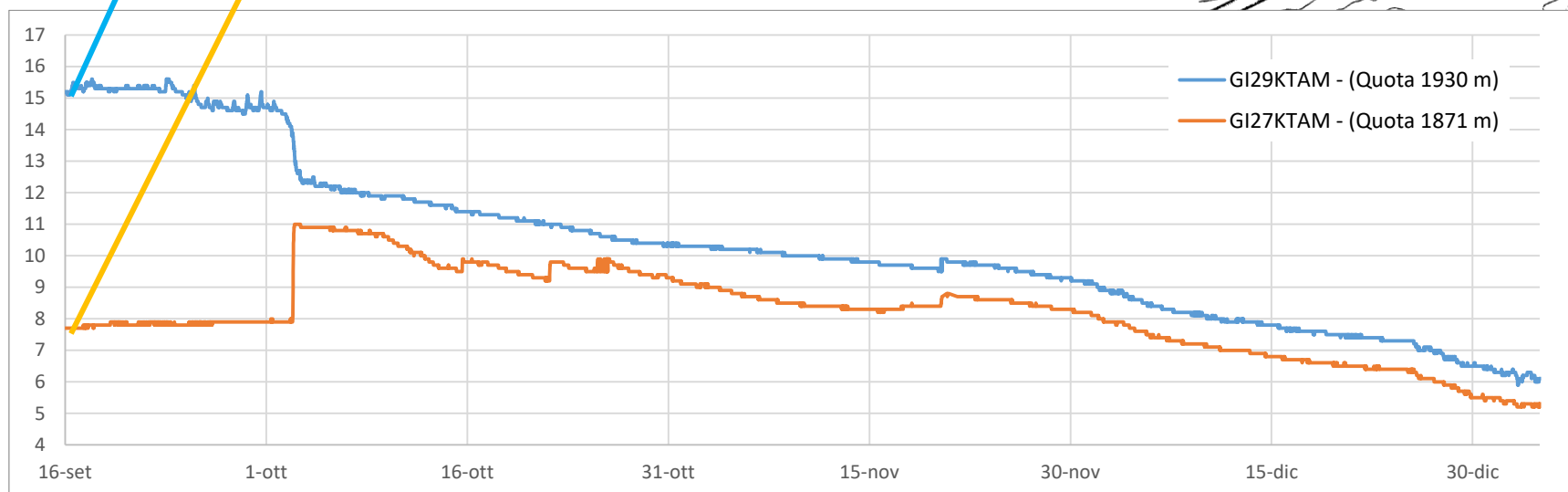
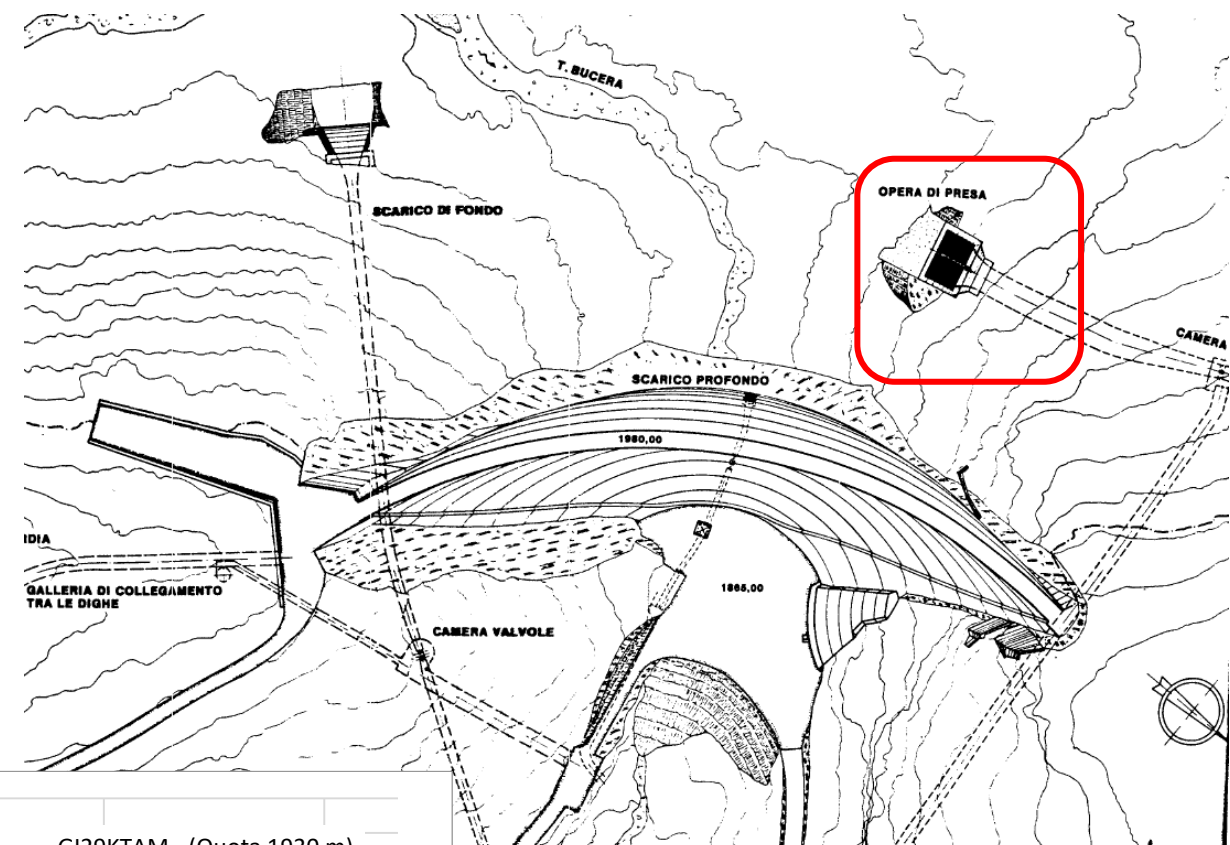
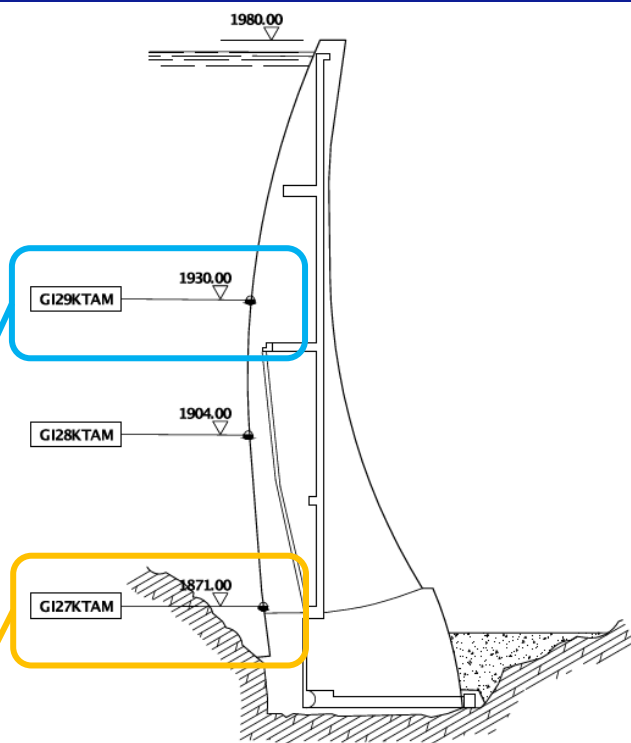
$$RMSE_{\text{norm}} = \frac{RMSE}{(y_{\text{max}} - y_{\text{min}})}$$

	Training	Test
RMSE (mm)	0.076	0.085
RMSE _{norm}	0.062	0.099
r ²	0.948	0.850
% misure entro il 95% dell'intervallo di previsione	89.8%	

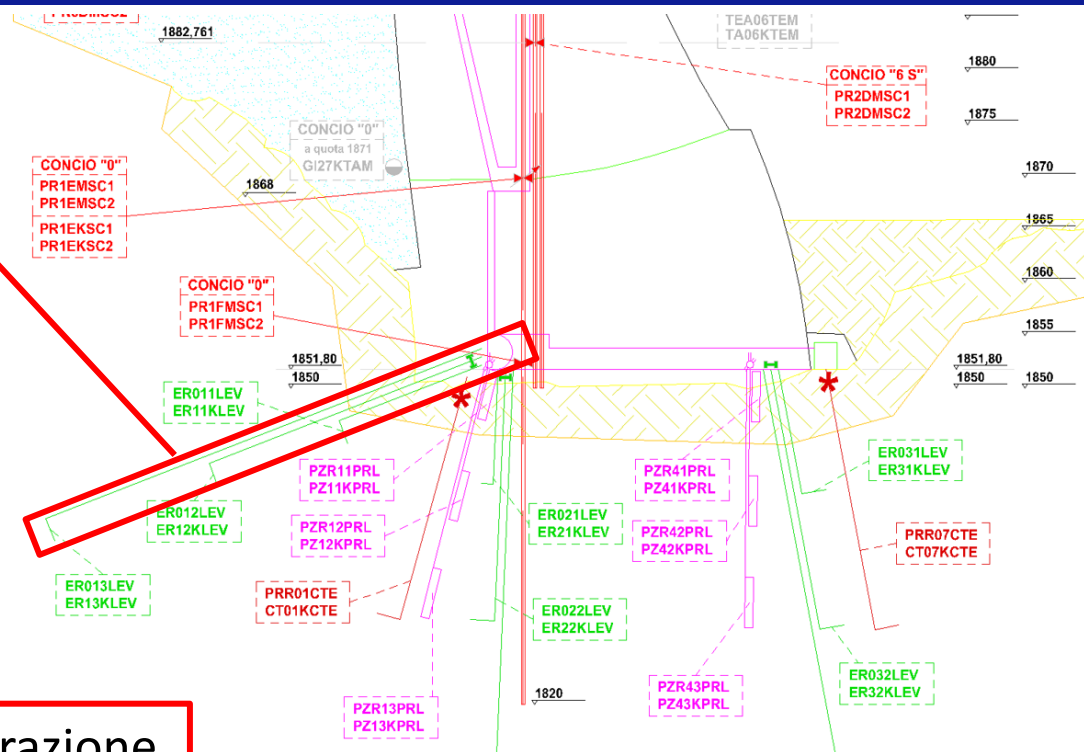
$$r^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Periodo di test





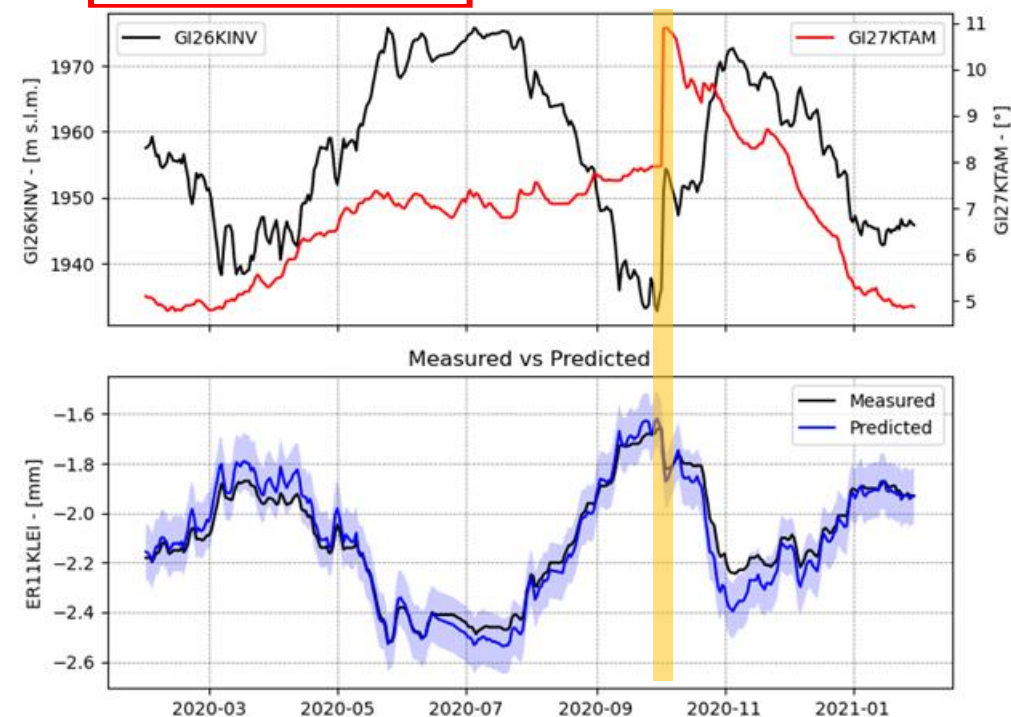
**L'acqua nel serbatoio di
Piastra si trovava a 14°C**



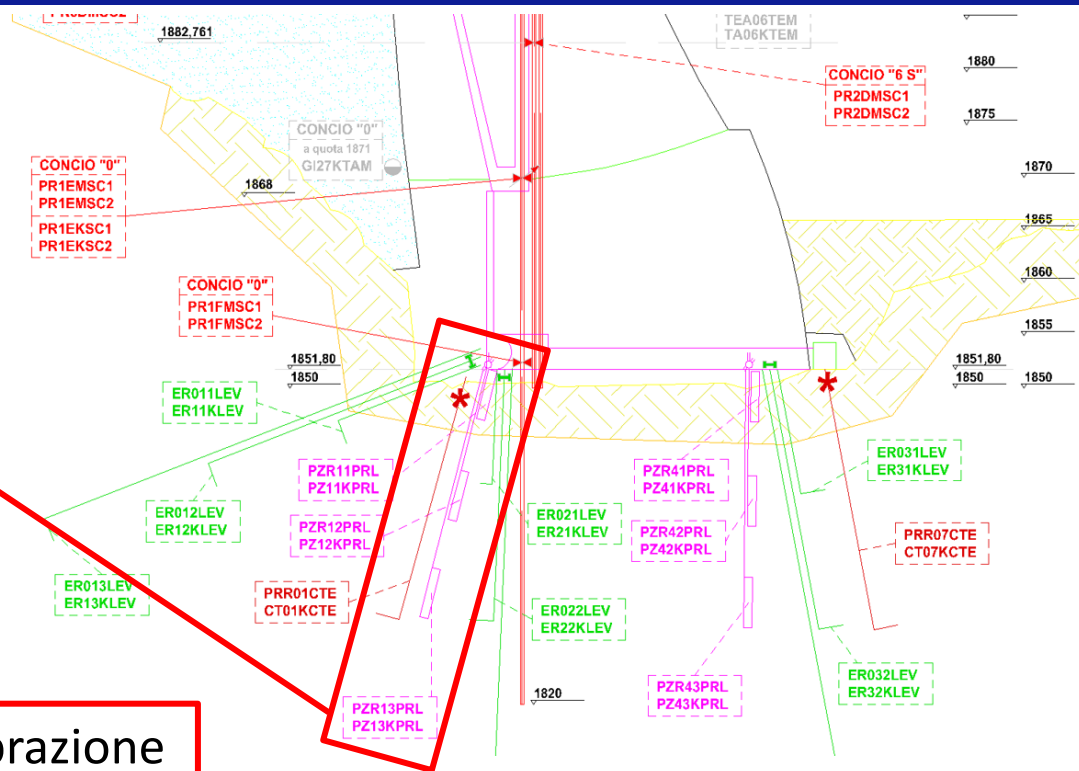
Periodo di calibrazione



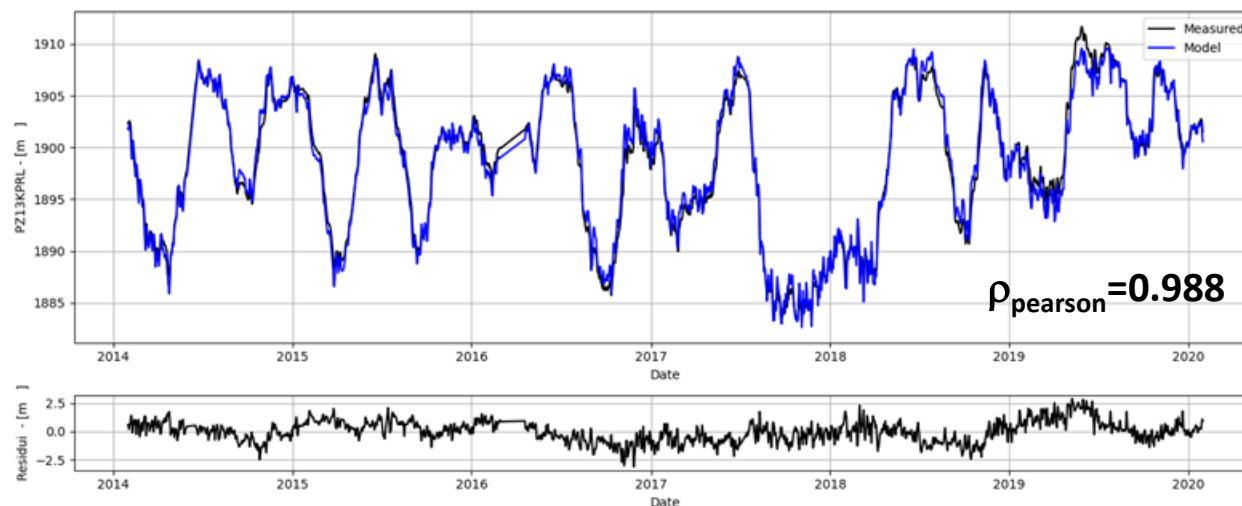
Periodo di test



	Training	Test
RMSE (mm)	0.057	0.055
RMSE _{norm}	0.047	0.065
r ²	0.970	0.935
% misure entro il 95% dell'intervallo di previsione		94.4%

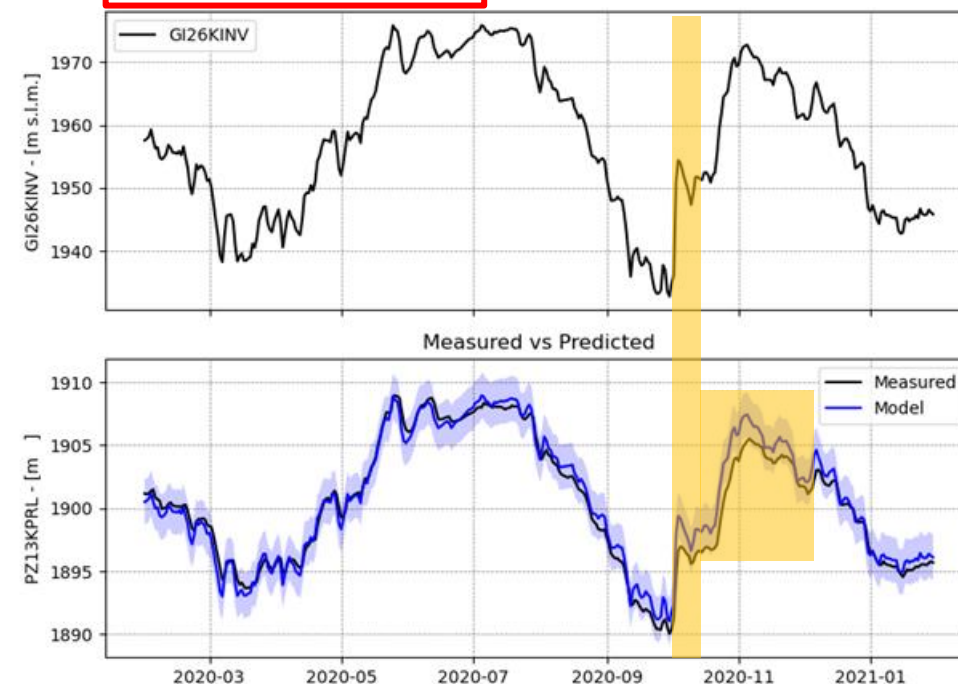


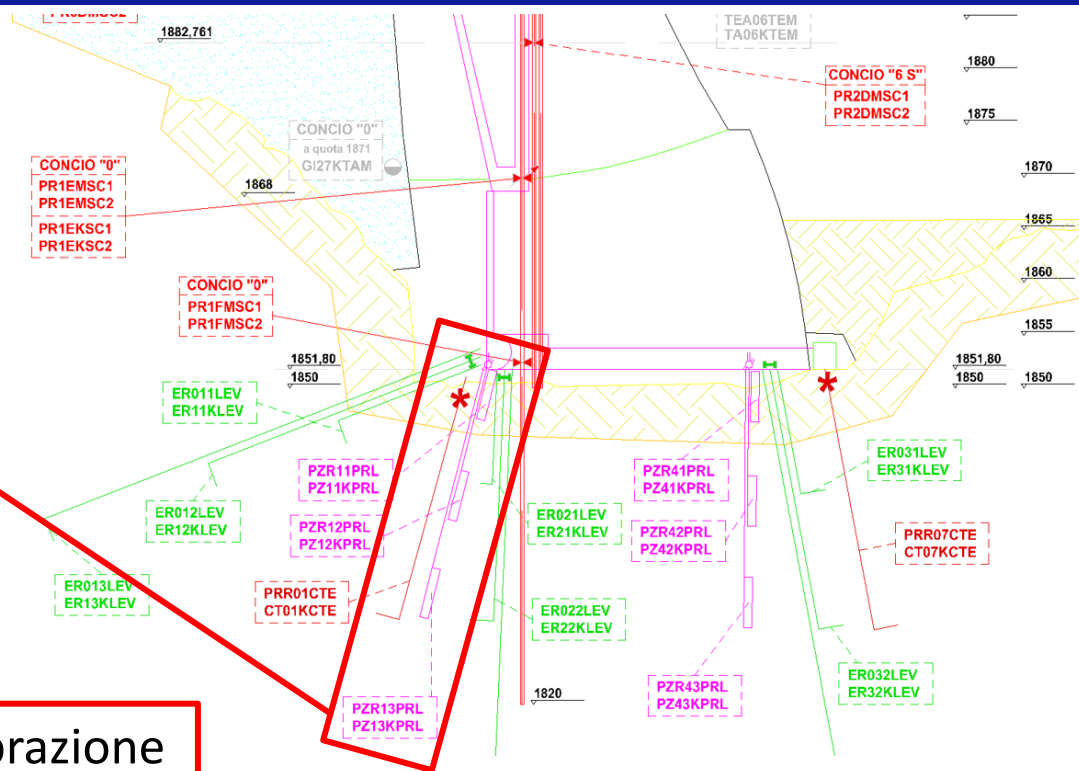
Periodo di calibrazione



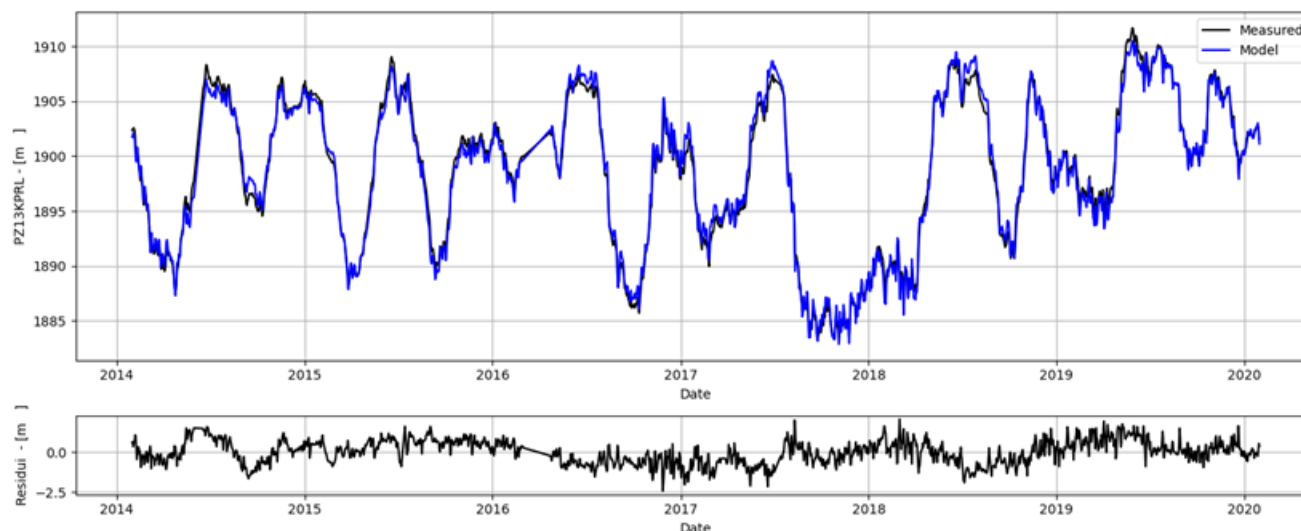
	Training	Test
RMSE (m)	0.916	0.963
RMSE _{norm}	0.032	0.051
r ²	0.982	0.739
% misure entro il 95% dell'intervallo di previsione	93.6%	

Periodo di test



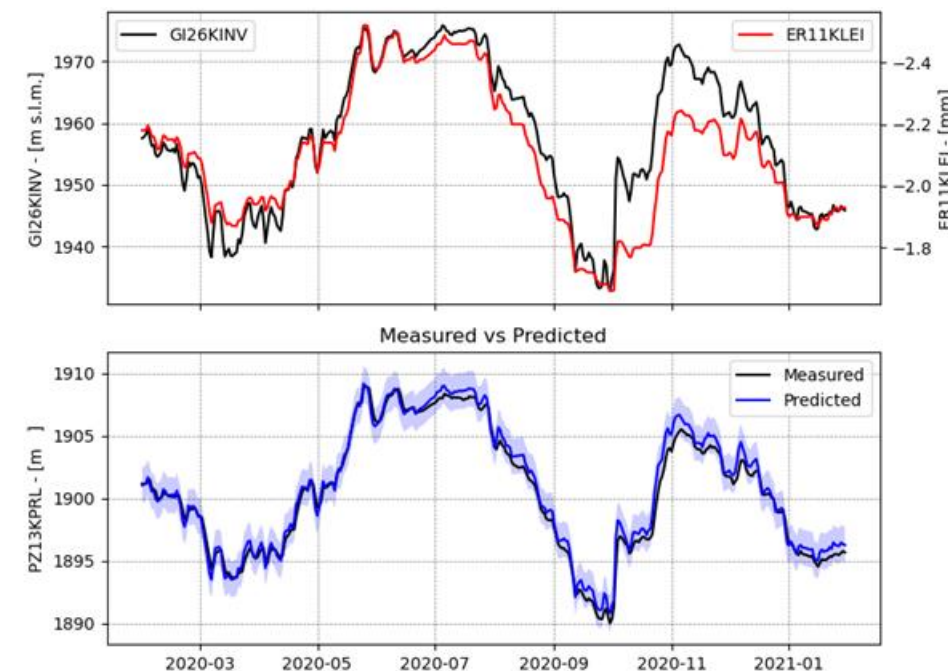


Periodo di calibrazione



	Training	Test
RMSE (m)	0.730	0.672
RMSE _{norm}	0.025	0.036
r ²	0.989	0.981
% misure entro il 95% dell'intervallo di previsione		95.9%

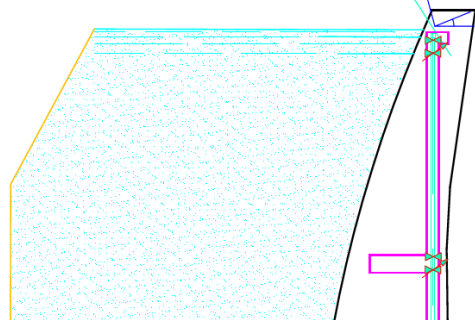
Periodo di test



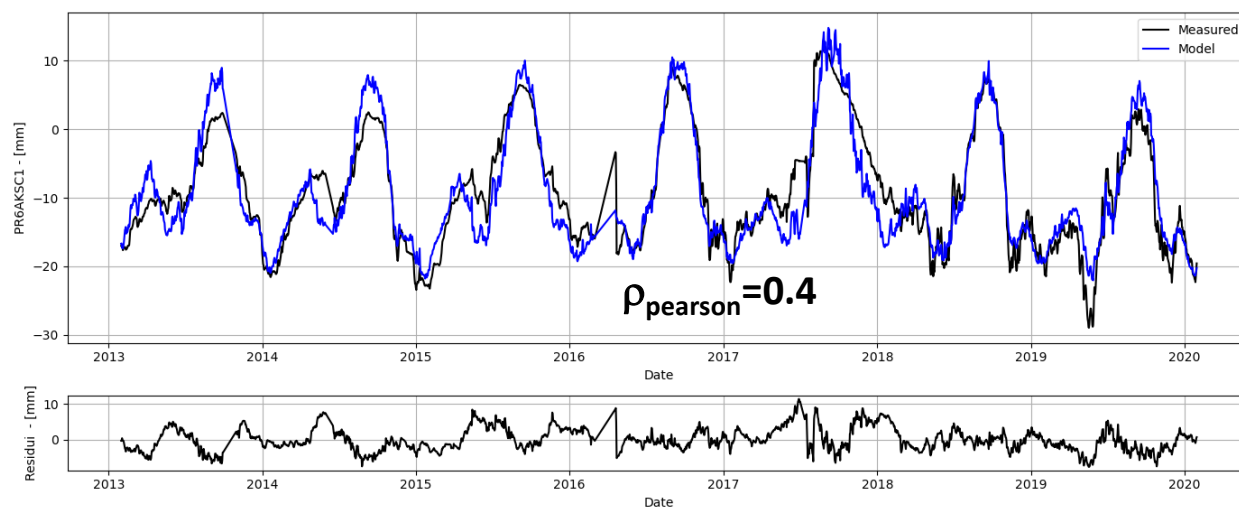
MONTE

VALLE

CONCIO "0"
PR6AMSC1
PR6AMSC2
PR6AKSC1
PR6AKSC2

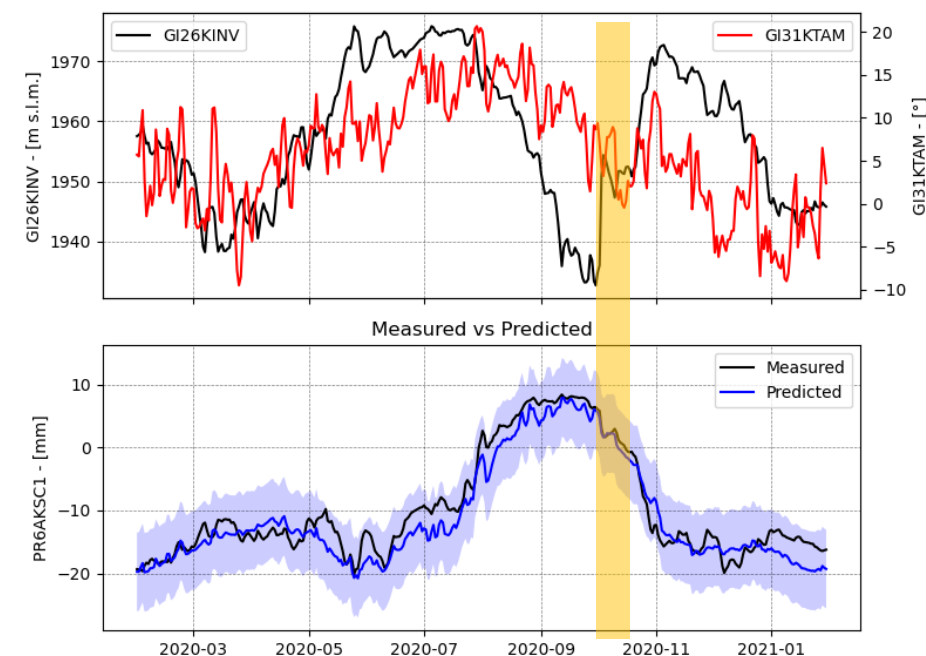


Periodo di calibrazione



	Training	Test
RMSE (mm)	3.182	2.398
RMSE _{norm}	0.078	0.084
r^2	0.855	0.920
% misure entro il 95% dell'intervallo di previsione		100.0%

Periodo di test



- Questo lavoro descrive l'analisi della risposta della diga di Chiotas a seguito dell'intenso evento meteorologico che ha colpito la valle del Gesso tra il 2 e 3 ottobre 2020. L'invaso di Chiotas è stato utilizzato per laminare gli effetti della piena conseguenti, e questo ha prodotto un rapido aumento del livello d'invaso.
- I parametri significativi rappresentativi del comportamento della diga sono stati analizzati utilizzando dei modelli statistici mediante un approccio costituito da due passi: In primo luogo vengono ricercate le eventuali anomalie rispetto al comportamento passato, e in presenza di una anomalia l'analisi viene approfondita per identificarne le cause.
- Dall'analisi delle diverse misure si osserva che nonostante l'eccezionalità dell'evento dell'ottobre 2020, la risposta della diga non ha evidenziato criticità di comportamento.
- L'algoritmo per l'identificazione delle anomalie ha individuato in corrispondenza del periodo di rapido invaso per due parametri, un estensimetro in fondazione e un piezometro posto a contatto con la roccia, uno scostamento rispetto al comportamento atteso. L'analisi di dettaglio per comprendere le ragioni di questo scostamento ha evidenziato che il pompaggio di un elevato volume d'acqua dal serbatoio di Piastra ha prodotto una minor diminuzione della temperatura media del corpo murario nella parte bassa della diga per effetto del maggior livello invaso. Questa variazione di temperatura ha avuto un effetto opposto in termini di spostamento dell'estensimetro in fondazione rispetto a quello conseguente all'incremento del livello d'invaso. Come conseguenza di questo la parte di ammasso roccioso ha subito una modifica dello stato tensionale che ha condizionato la risposta del piezometro.
- L'analisi dei parametri rappresentativi della risposta della diga ha evidenziato che la rapida variazione d'invaso può produrre in alcuni casi uno scostamento dal comportamento atteso in condizioni ordinarie spiegabili introducendo le opportune variabili nei modelli statistici, ma che nonostante la rapidità di variazione del livello d'invaso verificatasi durante l'evento dell'ottobre 2020, la diga abbia risposto senza evidenze di irregolarità.
- Naturalmente il pompaggio e la ritenzione dei volumi idrici in occasione di tali eventi hanno comportato una maggiore usura delle macchine a causa del materiale in sospensione. I tre serbatoi hanno dovuto sopportare un carico solido che non si è rilasciato a valle e che quindi ha contribuito all'interrimento dei bacini.

Ringraziamenti:

Roberta Lezzi, Francesco Bernardi, Danilo Torasso, Mario Sciolla, Pier Luigi Mossa, Isabella Scuppa, Alberto Bonafè, Matteo Moscariello, Alessandro Benanti, Edoardo L'Aurora, Stefano Basano (Enel Green Power).

Riferimenti bibliografici:

- ✓ Corigliano M., Torasso D., Sciolla M., Scuppa I., Fornari F., Lezzi R., Moscariello M., Benanti A., Bernardi F. (2022). La risposta della diga di Chiotas al rapido invaso per la laminazione della piena conseguente l'evento meteo del 2-3 ottobre 2020. L'Acqua (5).
- ✓ Basano S., Bernardi F., Bonafè A., Fornari F. (2021). L'evento del 2-3 ottobre 2020 nel bacino del Gesso dal punto di vista del gestore idroelettrico. L'Acqua (4).