

IL FRANCO IDROGEOLOGICO DI SICUREZZA

(Luigi Fanizzi – ECOACQUE®)

1. Premessa

Al fine di progettare un'opera idraulica di smaltimento sotterraneo delle acque, negli strati superficiali del sottosuolo anidro (*intesi ai sensi del Parere del Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio N. Prot. 6983/TAI/DI/PRO del 07.08.2002*), è importante stabilire il valore del cosiddetto "**franco idrogeologico di sicurezza**" ossia il valore da attribuire allo strato posto sopra il **livello di massima escursione delle acque sotterranee** che, per sua natura litologica e spessore, garantisce la salvaguardia qualitativa, delle stesse, da sostanze inquinanti (Elenco *indicativo* di cui all'Allegato 8, Parte III, del D. Lgs. 3 aprile 2006, N. 152 e s.m.i.). Tale livello idrico di **massima risalita**, sopra il livello piezometrico delle acque sotterranee, dovrà tenere conto della "**risalita per marea viva perigea**", intesa come il dislivello massimo tra le ampiezze d'altezza d'onda, raggiungibili durante le fasi gravitazionali "Terra/Luna/Sole" e della "**risalita per infiltrazione delle precipitazioni piovose**", intesa come il dislivello massimo tra le ampiezze d'altezza idrica d'infiltrazione, apportata con le piogge. Il calcolo del franco idrogeologico di sicurezza è un passaggio cruciale per garantire la protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dalla contaminazione di *sostanze ambientalmente pregiudizievoli*. In particolare la normativa regionale pugliese stabilisce che il franco idrogeologico di sicurezza rappresenta lo strato di suolo e sottosuolo necessario per la salvaguardia qualitativa delle acque sotterranee, tenendo conto di vari fenomeni idrologici e geologici.

2. Obiettivi

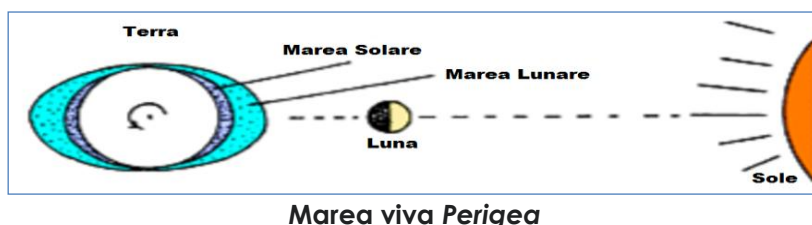
L'obiettivo di questa relazione è il calcolo del franco idrogeologico di sicurezza considerando:

- ☐ L'ampiezza della marea, legata alle variazioni del potenziale terrestre.
- ☐ L'innalzamento del livello della falda a seguito delle massime precipitazioni.
- ☐ La profondità della falda acquifera rispetto al piano campagna.

3. Dati di Progetto

I dati noti per il calcolo sono i seguenti:

- ☐ Quota del piano campagna;
- ☐ Quota della falda acquifera;
- ☐ Accelerazione di gravità $g = 9,80665$ [m/s²];
- ☐ Potenziale gravitazionale terrestre.



4. Effetto di marea del sistema planetario Terra-Luna

In un qualunque punto della superficie terrestre, il **potenziale gravitazionale** esercitato dai pianeti Terra e Luna (J. L. Margot, 2015), è:

$$P_G = - \frac{GM_T}{r_T} - \frac{GM_L}{r_L}$$

dove G è la [costante di gravitazione universale](#), M_T la massa della Terra, M_L la massa della Luna, r_T la distanza dal centro della Terra, r_L la distanza dal centro della Luna. Ad esso va aggiunto il potenziale della forza centrifuga:

$$P_c = - \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot r^2$$

dove ω è la velocità di rotazione del sistema Terra-Luna ($2,66 \cdot 10^{-6}$ rad/s), mentre r è la distanza dal [centro di massa](#) di tale sistema ($4'675$ km) che, sviluppando in serie di *Mc Laurin* e sostituendo nell'espressione del potenziale, si ottiene l'espressione:

$$P = P_G + P_c = \text{Costante} + 0,08717 \frac{m^2}{s^2} \cdot \cos\theta - 5,2560 \frac{m^2}{s^2} \cdot \cos^2\theta - 0,14520 \frac{m^2}{s^2} \cdot \cos^3\theta + \dots$$

dove θ è l'angolo tra la linea che congiunge il centro della Terra con il punto in cui si calcola il potenziale e quella che congiunge il centro della Terra con quello della Luna (si noti che anche il centro di massa del sistema si trova su quest'ultima linea), avendo utilizzato i seguenti valori numerici:

$$G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ [kg}^{-1}\text{m}^3\text{s}^{-2}\text{]}$$

$$M_L = 7,348 \cdot 10^{22} \text{ [kg]}$$

$$r_T = 6,3728 \cdot 10^6 \text{ [m]} \text{ (valore medio)}$$

$$d_{TL} = 3,844 \cdot 10^8 \text{ [m]} \text{ (valore medio)}$$

Indicando, pertanto, con ΔP i termini non costanti del potenziale, si ottiene:

$$\Delta P(\cos\theta = 0,0083) = 0,00036 \left[\frac{m^2}{s^2} \right] \text{ (valore massimo)}$$

$$\Delta P(\cos\theta = 1,00) = -5,3140 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$$

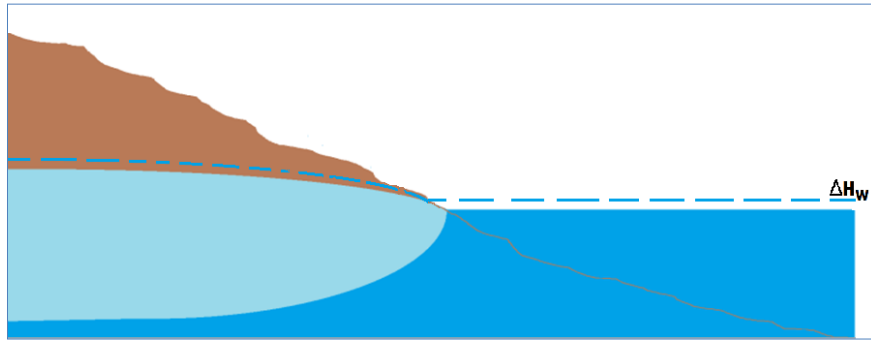
$$\Delta P(\cos\theta = -1,00) = -5,1980 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$$

Per cui il potenziale è minimo nel punto della superficie terrestre rivolto verso la Luna e nel punto opposto, mentre è massimo nella direzione approssimativamente perpendicolare ($\cos\theta = 0,0083$ corrisponde a un angolo di $89^\circ 30'$). Ai minimi corrisponde l'alta marea (il livello dell'acqua s'innalza per compensare la differenza di potenziale), al massimo la bassa marea. Dividendo per il valore medio dell'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre, $g = 9,80665 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, otteniamo anche il valore teorico dell'ampiezza di marea $\Delta H'_w$:

$$\Delta H'_w = \frac{\Delta P(\cos\theta = 1,00) - \Delta P(\cos\theta = 0,0083)}{g} = 0,5419 \text{ [m]}$$

5. Effetto implementativo di marea del Sole

Il Sole, quando è in accordo di fase con la Luna al suo punto orbitale di *perigeo* (maree vive durante la luna piena e la luna nuova: cd. *maree di sigizia*), ossia è con essa ivi allineato, dallo stesso lato, rispetto alla Terra, esercita su di essa, un effetto implementativo di marea, analogo a quello esercitato dalla Luna; poiché, però, la distanza Terra-Sole è maggiore (mediamente circa **390** volte) della distanza Terra-Luna, sebbene il Sole abbia una massa molto maggiore della Luna, tal effetto del Sole risulta pari solo al **46** %, circa, di quella della Luna ($\Delta H''_w \cong 0,2493 \text{ m}$).



Innalzamento dell'acquifero per marea di sigizia

6. Calcolo dell'innalzamento dell'acquifero dovuto all'infiltrazione delle precipitazioni piovose

Le massime precipitazioni che s'infiltrano nel sottosuolo contribuiscono all'innalzamento del livello della falda acquifera. Per il loro calcolo occorre effettuare un bilancio idrologico che tenga conto delle perdite per evaporazione e per ruscellamento superficiale.

L'equazione del bilancio idrologico è espressa dall'equazione di continuità dei volumi entranti, uscenti ed invasati nel bacino superficiale, definiti in base alla perimetrazione prescelta (M. Civita, 2005), in un intervallo di tempo Δt prefissato (*anno idrologico*):

$$P - ETR = I + R + \Delta V$$

dove:

P = volume di acqua di precipitazione affluita al bacino [mm]

ETR = volume di acqua sottratta al bacino per evapotraspirazione [mm]

R = volume di acqua di origine meteorica che contribuisce al deflusso superficiale (o ruscellamento) [mm]

I = volume di acqua che s'infiltra nel sottosuolo [mm]

ΔV = variazione del volume degli invasi nel bacino imbrifero $\cong 0$ [mm].

Calcolo delle perdite per Evapotraspirazione per la valutazione dell'evapotraspirazione reale (ETR) è stata utilizzata la formula del L. Turc (1954) :

$$ETR = P / [0,9 + (P/L)^2]^{1/2}$$

dove:

P = precipitazione media annua [mm/anno];

L = **potere evaporante** dell'atmosfera, uguale a: $L = 300 + 25 \cdot T_p + 0,05 \cdot T_p^3$ (G. Castany, 1968);

Se $P/L \leq 0,316$ [mm/mm] $\Rightarrow ETR = P$

$T_p = \sum_i (P_i \times T_i) / P$ con T_p = temperatura media annua corretta in funzione della precipitazione P [°C];

P_i = precipitazione media mensile del mese i -mo [mm/anno];

T_i = temperatura media mensile del mese i -mo [°C].

Introducendo nei calcoli il valore T_p , si è inteso correggere i valori di temperatura in funzione delle precipitazioni medie mensili, tenendo così conto dell'influenza che l'umidità dell'aria esercita sul potere evaporante dell'atmosfera. Dalla differenza tra la precipitazione media annua e quella dell'evapotraspirazione (depurata delle zone a vegetazione rada o assente) media annua è stata determinata la precipitazione efficace, ovvero della lama media di acqua che dà origine al ruscellamento e all'infiltrazione.

$$P_{eff} = P - ETR = I + R$$

dove:

P_{eff} = precipitazione efficace media annua [mm/anno]

P = precipitazione media annua [mm/anno]

ETR = evapotraspirazione media annua [mm/anno]

I = infiltrazione efficace media annua [mm/anno]

R = ruscellamento superficiale medio annuo [mm/anno].

Dalla differenza tra la precipitazione media annua e quella dell'evapotraspirazione (depurata delle zone a vegetazione rada o assente) media annua è stata determinata la precipitazione efficace, ovvero della lama media di acqua che dà origine al ruscellamento e all'infiltrazione).

Nota la precipitazione efficace è stato distinto il valore di infiltrazione I da quello di ruscellamento R mediante l'introduzione dei coefficienti di infiltrazione potenziale (C.I.P.; P. Celico, 1988). Tali coefficienti esprimono la percentuale di acqua di precipitazione efficace Peff (mm/anno) che potenzialmente s'infiltra nel sottosuolo:

$$\text{C.I.P.} = (I_p / P_{\text{eff}}) \cdot 100$$

dove:

$$I_p = \text{infiltrazione efficace presunta [mm/anno]} = 0,01 \cdot (\text{C.I.P.} \cdot P_{\text{eff}}),$$

così denominata poiché è valutata per differenza tra gli apporti idrici dovuti alle precipitazioni e le perdite per evapotraspirazione e per ruscellamento:

$$P_{\text{eff}} = (P - \text{ETR}) = I_p + R$$

LITOLOGIA	CIP [%]	LITOLOGIA	CIP [%]
Calcari	90 ÷ 100	Ardesia	1 ÷ 5
Calcari dolomitici	70 ÷ 90	Gneiss	1 ÷ 5
Dolomie	70 ÷ 70	Marmo	1 ÷ 5
Calcari marnosi	30 ÷ 50	Scisto o Fillade	1 ÷ 5
Alluvioni ghiaioso-sabbiose	80 ÷ 100	Quarzite	1 ÷ 5
Detriti grossolani (Ghiaie)	80 ÷ 90	Gabbro alterato	5 ÷ 15
Sabbie	80 ÷ 90	Basalto	1 ÷ 5
Sabbie argillose	30 ÷ 50	Granito non alterato	1 ÷ 5
Loess	10 ÷ 20	Granito alterato	10 ÷ 15
Torba	50 ÷ 60	Diorite	1 ÷ 5
Limo	15 ÷ 25	Andesite	5 ÷ 15
Argille ed Argilliti	5 ÷ 10	Tufo vulcanico	20 ÷ 35
Arenaria a grana media e/o fine	15 ÷ 25	Pietra pomice (porosa)	35 ÷ 50
Anidrite (r. evaporitica)	10 ÷ 20	Sienite	1 ÷ 5
Rocce sedimentarie		Rocce metamorfiche	
			Rocce ignee

Fasce di variazione indicative del C.I.P. in alcuni complessi idrogeologici.

7. Innalzamento complessivo dell'acquifero sotterraneo

Sommiamo ora all'ampiezza di marea complessiva (m. solare + lunare), l'innalzamento dovuto alle precipitazioni per ottenere l'ampiezza complessiva dell'innalzamento del livello della falda:

$$\Delta H_w = \Delta H'_w + \Delta H''_w + \Delta H'''_w \text{ [m]}$$

8. Calcolo del Franco Idrogeologico di Sicurezza

Il franco idrogeologico di sicurezza è dato dalla differenza tra la quota del piano campagna (Q_{PC}), la quota della falda acquifera (Q_{FA}) e l'ampiezza complessiva del suo innalzamento (ΔH_w):

$$F_i = Q_{PC} - (Q_{FA} + \Delta H_w) \text{ [m]}$$

9. Conclusioni

Il calcolo deve dimostrare che il franco idrogeologico di sicurezza per il sito considerato ha un valore nettamente superiore al franco di sicurezza idrogeologico minimo, normalmente richiesto, di **1,50** metri, garantendo, così, un adeguato margine di sicurezza per la protezione delle acque sotterranee.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Castany (1968): "*Prospection et exploitation des eaux souterraines*", Dunod, Paris;
- [2] L. Turc (1954): "*Le bilan d'eau des sols. Relation entre les precipitations, l'évaporation et l'écoulement*", Ann. Agron. 5, Paris;
- [3] P. Celico (1988): "*Prospezioni idrogeologiche*", Volume Secondo, Liguori Editore, Napoli;
- [4] J. L. Margot (2015): "*A quantitative criterion for defining planets*", University of California, The Astronomic Journal, Vol. 15, N. 6, The American Astronomical Society, Los Angeles.
- [5] M. Civita (2005): "*Idrogeologia applicata e ambientale*", Casa Editrice