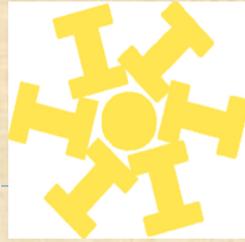




# UNSJ - FACULTAD DE INGENIERIA

## PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL



### **SEMINARIO VIRTUAL:**

“Licuación de Gravas: Implicancias en la Seguridad de Presas de Embalse”

**Disertante: Ing. Eduardo Luis Martín**

*Instituto de Investigaciones Antisísmicas. Facultad de Ingeniería. UNSJ*



Organiza: Instituto de Investigaciones Antisísmicas - IDIA  
Facultad de Ingeniería – UNSJ. Fecha:Viernes 08/05/2020 Hora: 17:00

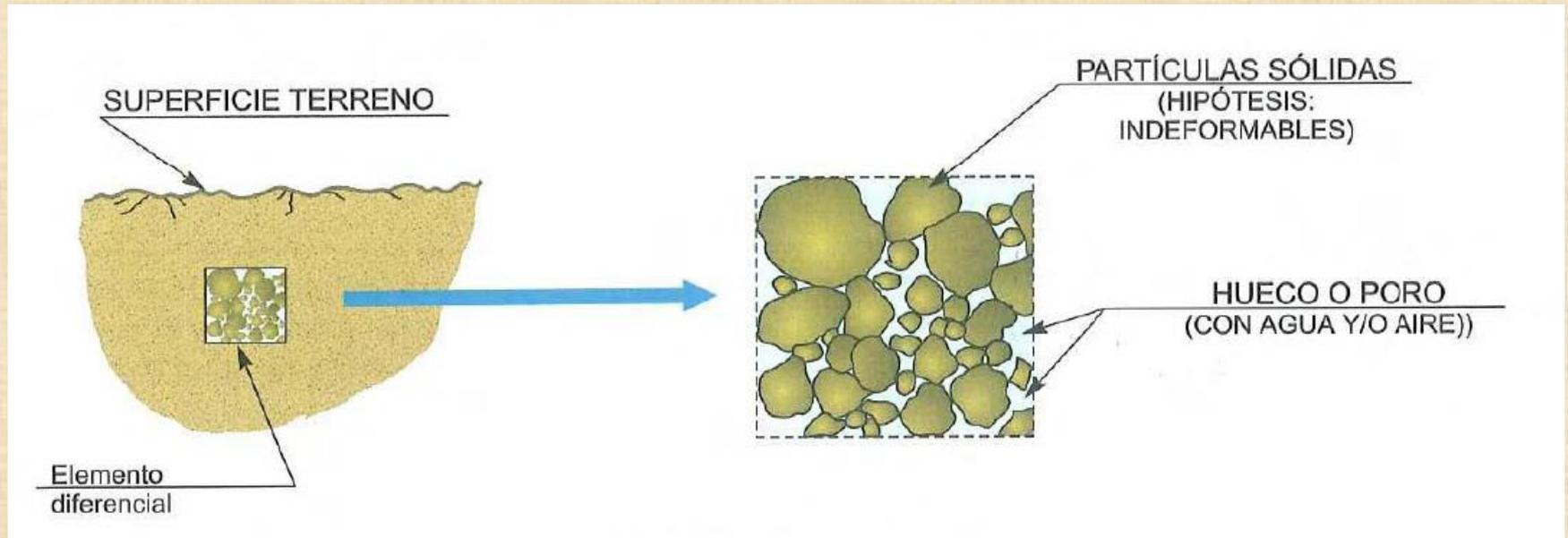
# Organización de la Presentación

---

1. Licuación de suelos – Concepto
2. Licuación de gravas
3. Ensayos para evaluación del potencial de licuación
4. Estudios de potencial de licuación en presas
5. Terremoto de Wenchuan
6. Ensayo DPT
7. Fundación de la presa Punta Negra
8. Conclusiones



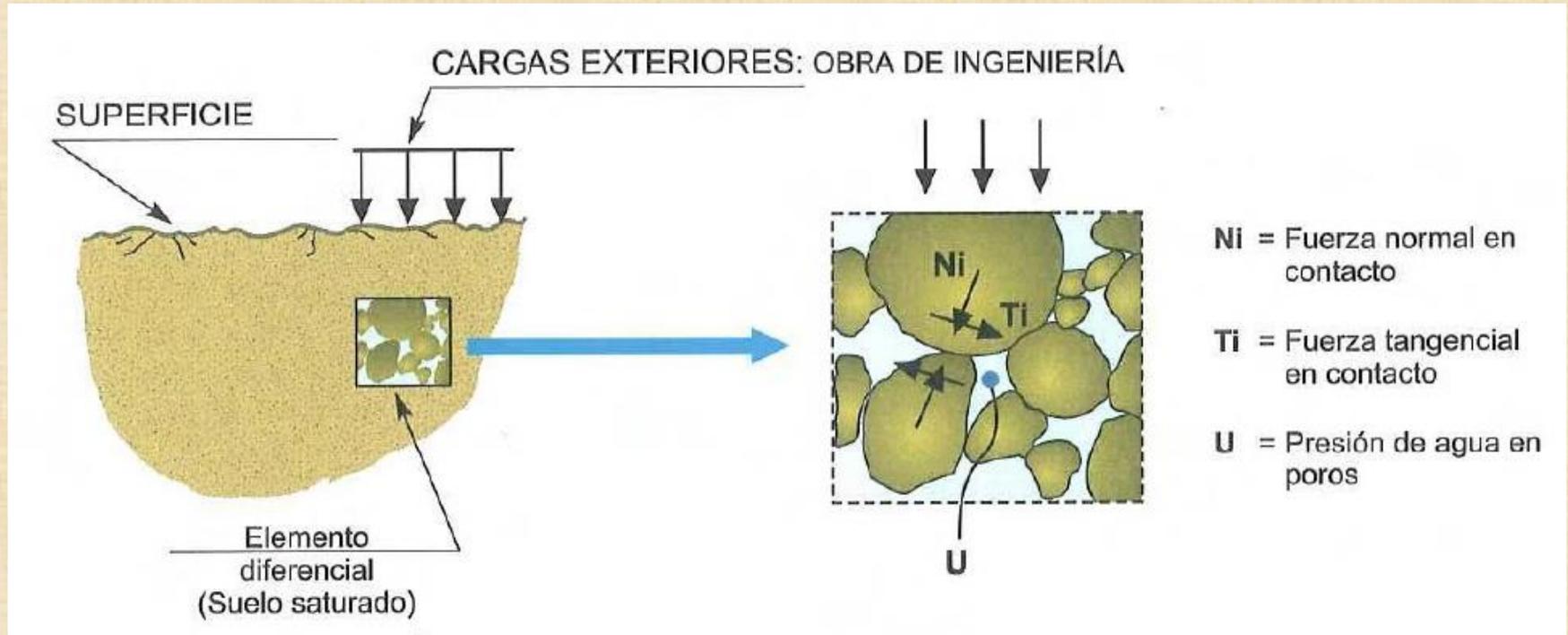
# LICUACIÓN DE SUELOS - CONCEPTO



Constitución de un Suelo. Luis González Vallejos (2002). "Ingeniería Geológica"

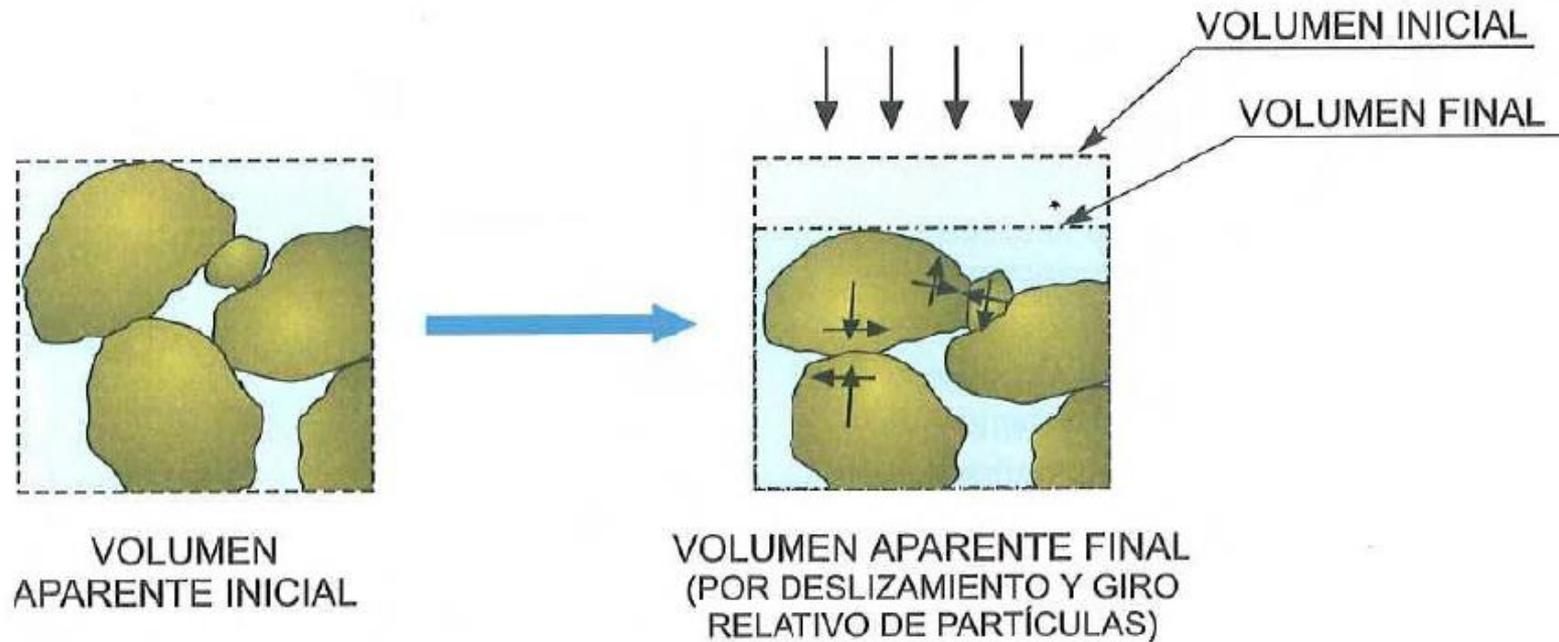


# LICUACIÓN DE SUELOS - CONCEPTO



Acciones sobre un Suelo. Luis González Vallejos (2002). "Ingeniería Geológica"

# LICUACIÓN DE SUELOS - CONCEPTO



Reacomodamiento producido por las acciones externas. Luis González Vallejos (2002). "Ingeniería Geológica"

# LICUACIÓN DE SUELOS - CONCEPTO



Hundimiento de edificios Kawagishi-Cho, producido por licuación de suelos en el terremoto de Niigata (1964)

# ¿Pueden licuar las gravas?

---

- ▶ En 1992, Mark Evans escribía:

“Las gravas y suelos gravosos no son ampliamente aceptados como licuables por la comunidad de ingeniería geotécnica internacional. Ciertamente es verdad que la abundancia de casos históricos involucrando licuación de arenas no existe para las gravas. Sin embargo, existen numerosos casos históricos notables en los que se ha registrado licuación de gravas y de suelos gravosos.



# ¿Pueden licuar las gravas?

---

## ▶ 1992: Evans vs viejo paradigma:

La conductividad hidráulica en las gravas es lo suficientemente elevada como para impedir un comportamiento no drenado de la masa de suelo.

**CUIDADO!!**

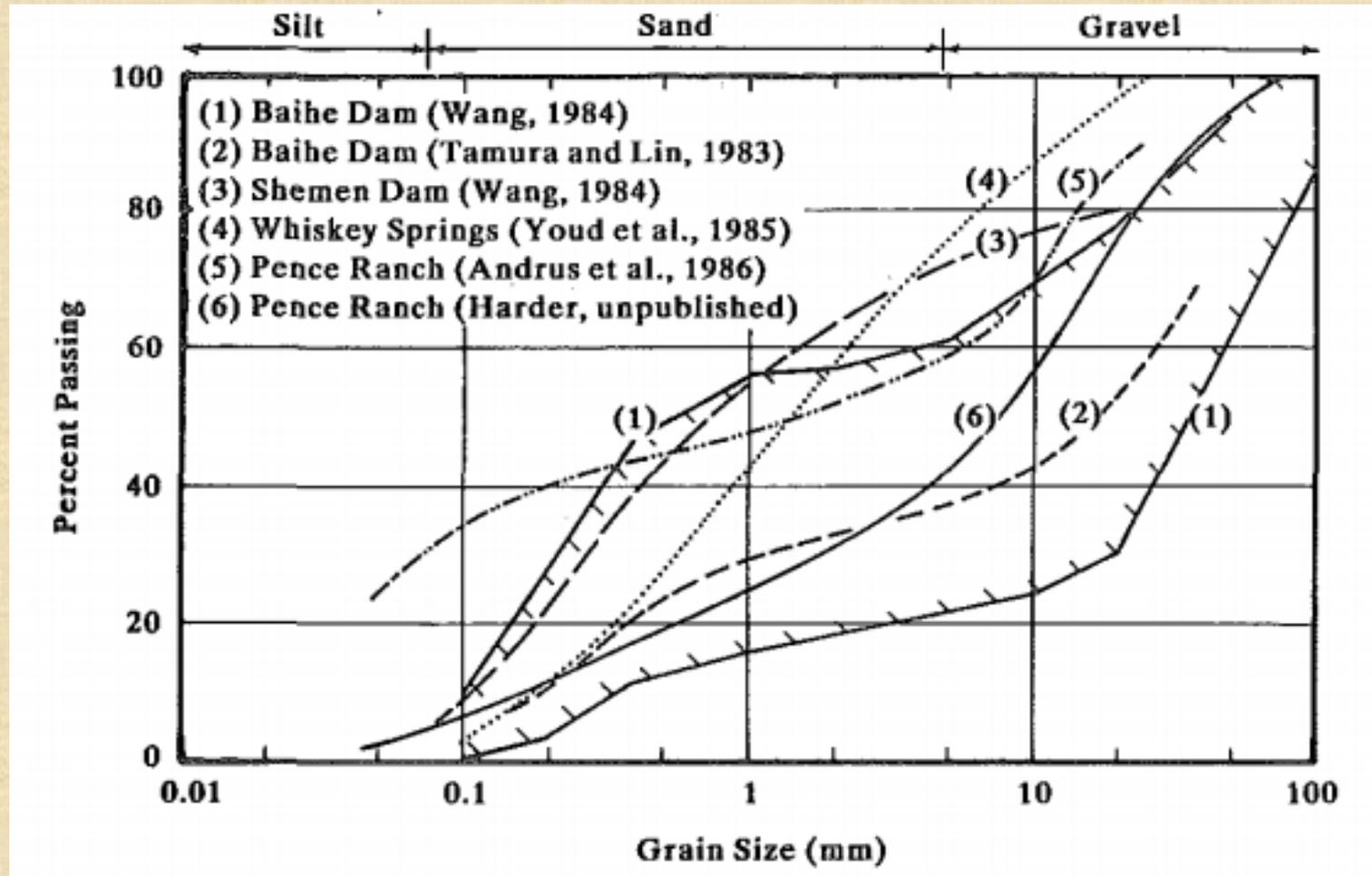
El drenaje puede verse impedido → frontera de material limo arcilloso.

### Ejemplos

- Antiguo cauce fluvial con depósitos de gravas intercalados con finos.
  - Deposición de limos en la cara aguas arriba o al pie de una presa de materiales sueltos.
- 



# Licuación de gravas



Curvas granulométricas de suelos gravosos licuados hasta 1992. Evans et al., 1992

# Licuación de gravas

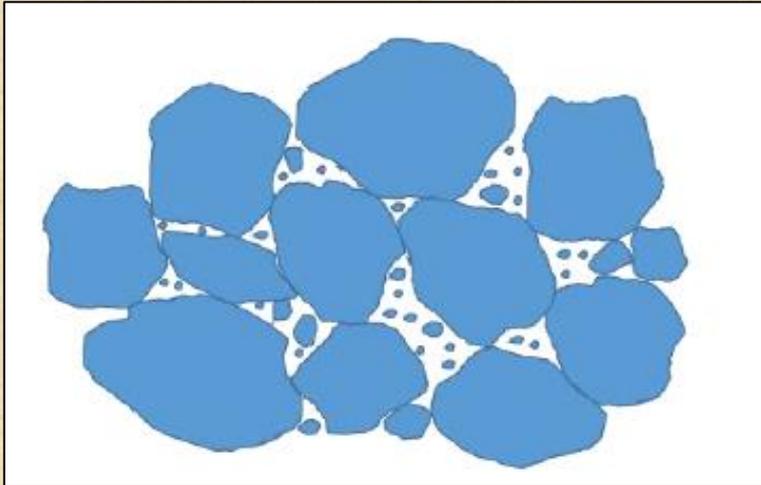
---

TERREMOTO	País	Año	Magnitud (Mw)	Material licuado
Cephalonia Island	Grecia	2014	6.1	Relleno portuario gravoso
Wenchuan	China	2008	7.9	Grava
Hyogoken Nanbu	Japón	1995	7.2	Grava arenosa bien graduada
Hokkaido Nansei-Oki	Japón	1993	7.7	Detritos gruesos con arenas y limos
Borah Peak, Idaho	EE.UU.	1983	7.3	Grava arenosa fluvial
Tangshan	China	1976	7.8	Grava arenosa
Haicheng	China	1975	7.3	Grava arenosa
Alaska	EE.UU.	1964	9.2	Grava
Fukui	Japón	1948	7.3	Grava

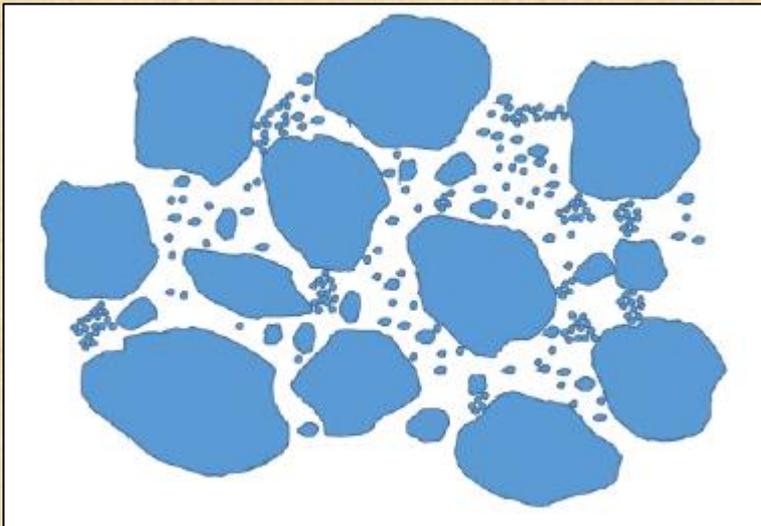


# Estructura del suelo gravoso

---



Suelo 1: Suelo gravoso denso y bien graduado sin contenido significativo de partículas finas. Poco susceptible a licuación.



Suelo 2: Suelo gravoso suelto y mal graduado, con un contenido significativo de partículas finas. Más susceptible a licuación.



# Ensayos para evaluar el potencial de licuación

---

MÉTODO IN SITU	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
Becker Penetration Test (BPT)	Similar al SPT pero de mayor diámetro (6"). De punta abierta o cerrada. Existen correlaciones con golpes SPT.	Harder and Seed (1986)
Instrumented Becker Penetration Test (iBPT)	Mejora del BPT con instrumentación de la punta para medición de energía.	DeJong et al. (2016); Ghafghazi et al. (2016)
Large Penetration Tests (LPTs)	Similar al BPT, pero con un muestreador de mayor diámetro (en gral. 4").	Yoshida et al. (1988); Lin et al. (2004)
Chinese Dynamic Penetration Test (DPT)	Penetrómetro con punta cónica a 60°. A diferencia de otros métodos empíricos, la determinación del potencial de licuación está basada en datos de campo sobre gravas.	Cao et al. (2013)
Shear Wave Velocity (SWV)	Diferentes métodos indirectos aplicables a suelos gravosos (crosshole, downhole, MASW, SASW, etc.).	Stokoe et al., 1988; Gorny and Liljegren, 2006; Lewis et al., 2013)



# Ensayos para evaluar el potencial de licuación

---

MÉTODO DE LABORATORIO	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
Corte simple directo a gran escala	No se dispone mucha información para suelos gravosos. Ver Hubler et al. (2017).	Hubler et al. (2017)
Ensayo triaxial cíclico a gran escala	Dificultad asociada al tamaño de las partículas (tamaño de la cámara, penetración de la membrana, etc.). Requiere equipo de diseño a gran escala, o remover partículas de gran tamaño.	Lin et al., 2004; Kokusho et al., 2004; Kokusho 2007; Hatanaka et al., 1997
Ensayo de cámara a gran escala	Ensayo de penetración en laboratorio, preparados en un contenedor cilíndrico de acero.	Robertson and Campanella, 1983, Baldi et al., 1986; Kokusho 2007



# Ensayos para evaluar el potencial de licuación



Evans, 1993



Martín, 2018



Martín, 2015



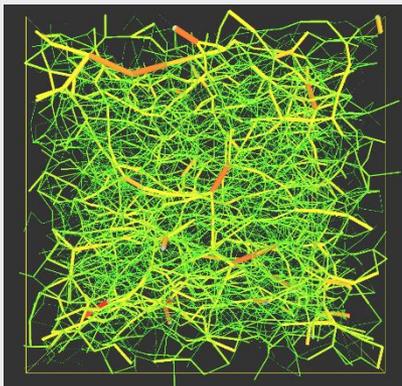
# Métodos numéricos para evaluar el potencial de licuación

## MÉTODOS NUMÉRICOS

## DESCRIPCIÓN

## REFERENCIA

### DEM



Con el método de los elementos discretos se puede reproducir el comportamiento de un suelo granular sometido a cargas cíclicas, por medio de un arreglo numérico de partículas de diferentes formas y tamaños.

Limitaciones asociadas a la actual potencia computacional:

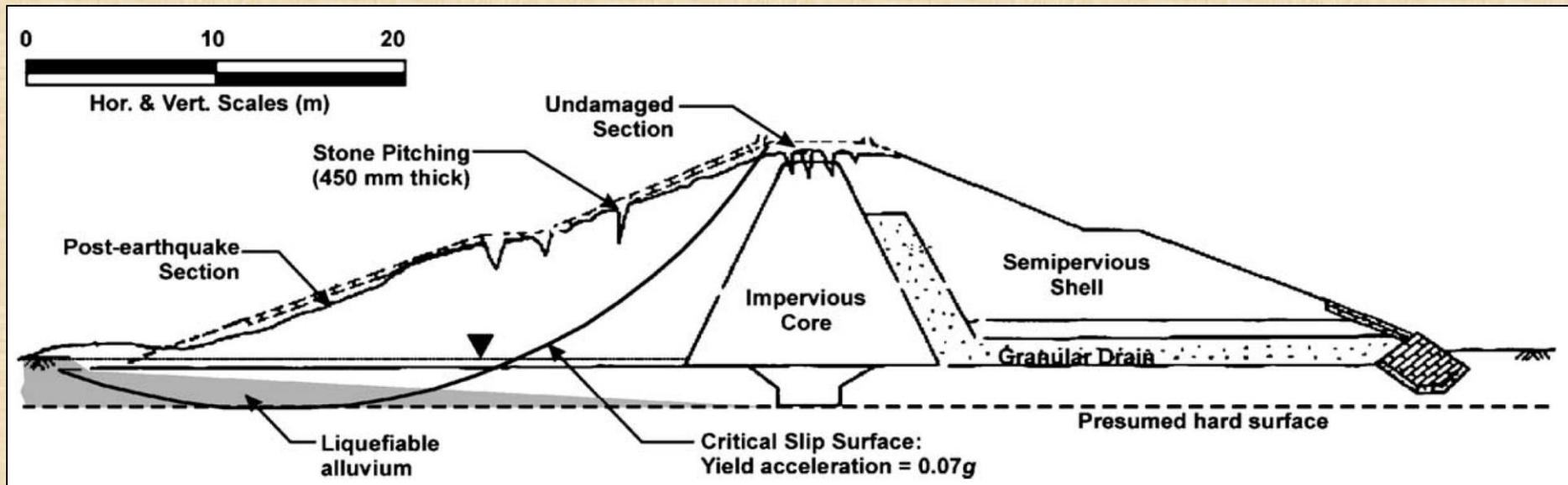
- N° de partículas en un arreglo.
- Relación entre las partículas de mayor y menor tamaño.
- Forma de las partículas.
- Rugosidad de las partículas.
- Propiedades del fluido.
- Rotura superficial y fractura de partículas.
- Necesidad de calibración de parámetros locales con ensayos triaxiales de laboratorio.

Referencias varias:  
Thornton & Barnes (1986); Ng & Dobry (1994); Sitharam et al. (2002); Zhang (2003), Bonilla (2004); Sitharam & Govinda Raju, 2007; Soroush & Ferdowsi, 2011; Gong et al. (2012); Xu et al., 2015; Martín et al. (2019)



# Seguridad de presas ante licuación

- ▶ Terremoto de Buhj, India, año 2001.
- ▶ Daños en numerosas presas de materiales sueltos:
  - ▶ Ej. Presa Fatehgadh: 11 mts de altura. Materiales sueltos con núcleo de arcilla.



Sección transversal de la presa Fatehgadh. Fuente: Singh et. al., 2005.

# Presa Granby, Colorado, EE.UU.

---

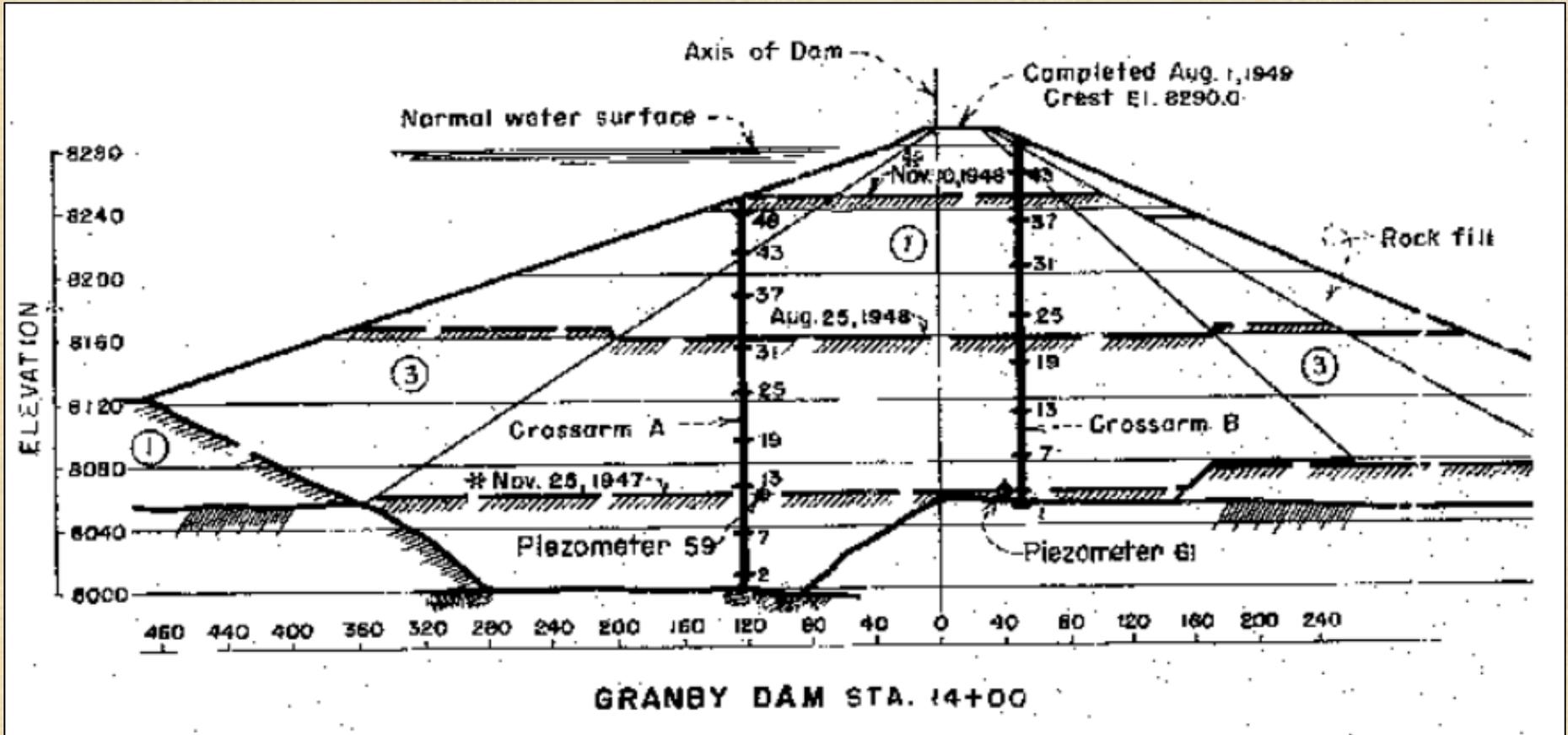


Presas Granby, sobre el Río Colorado, Colorado, EE.UU.

---



# Presa Granby, Colorado, EE.UU.



Presa Granby, sobre el Río Colorado, Colorado, EE.UU.

# Presas Granby – Caso de Estudio

---

- ▶ **Presas de materiales sueltos zonificada.**
    - ▶ Amplio núcleo central de material impermeable.
    - ▶ Trincheras central hasta la roca.
    - ▶ Zona de transición hacia aguas abajo limitada por una capa de enrocado para compresión y protección.
    - ▶ Zona de transición aguas arriba protegida por rip rap.
  
  - ▶ **Fundación:**
    - ▶ Aluvión cuaternario del cauce del río Colorado
    - ▶ Mezcla heterogénea de gravas bien graduadas y mal graduadas, con capas intercaladas de arenas mal graduadas y arenas limosas con presencia de conglomerados y cantos rodados.
    - ▶ Un programa de perforación en 1991 determine una profundidad del aluvión al pie de la presa superior a 33mts.
- 



# Presa Granby – Caso de Estudio

---

- ▶ Campaña de exploración de 1990: descartada.
- ▶ Campaña de exploración 2012 – 2013:
  - ▶ Ensayos de penetración SPT y BPT:
    - ▶ Los resultados del SPT fueron cuestionados debido a la granulometría gruesa del depósito cuaternario.
    - ▶ Entre 1 y 3mts de profundidad: de 20 a 100 golpes BPT
    - ▶ Profundidad mayor a 3mts: entre 100 y 700 golpes BPT
  - ▶ Determinaciones de Vs mediante Cross-Hole:
    - ▶ Entre 1 y 3mts de profundidad: Vs (no corregida por sobrecarga) entre 410 y 470m/seg
    - ▶ Profundidad mayor a 3mts: Vs (no corregida por sobrecarga) entre 490 y 610m/seg.



# Presas Granby – Caso de Estudio

---

El potencial de licuación se determinó con el método simplificado de Seed e Idriss:

- ▶ Según SPT: solo un estrato licuable en la fundación para  $Tr=10000$  años (solo informativo).
- ▶ Según BPT, depende de la conversión a SPT equivalente:
  - ▶ Harder & Seed, 1986 (más conservador): estrato potencialmente licuable en la fundación, sobre 8055 pies, con un período de retorno de 10000 años, considerando 3 sondeos BPT.
  - ▶ Sy & Campanella, 1994:  $Tr=20000$  años para un sondeo BPT y  $Tr=50000$  años para los otros dos.
- ▶ Según  $V_s$ : no existen estratos licuables.



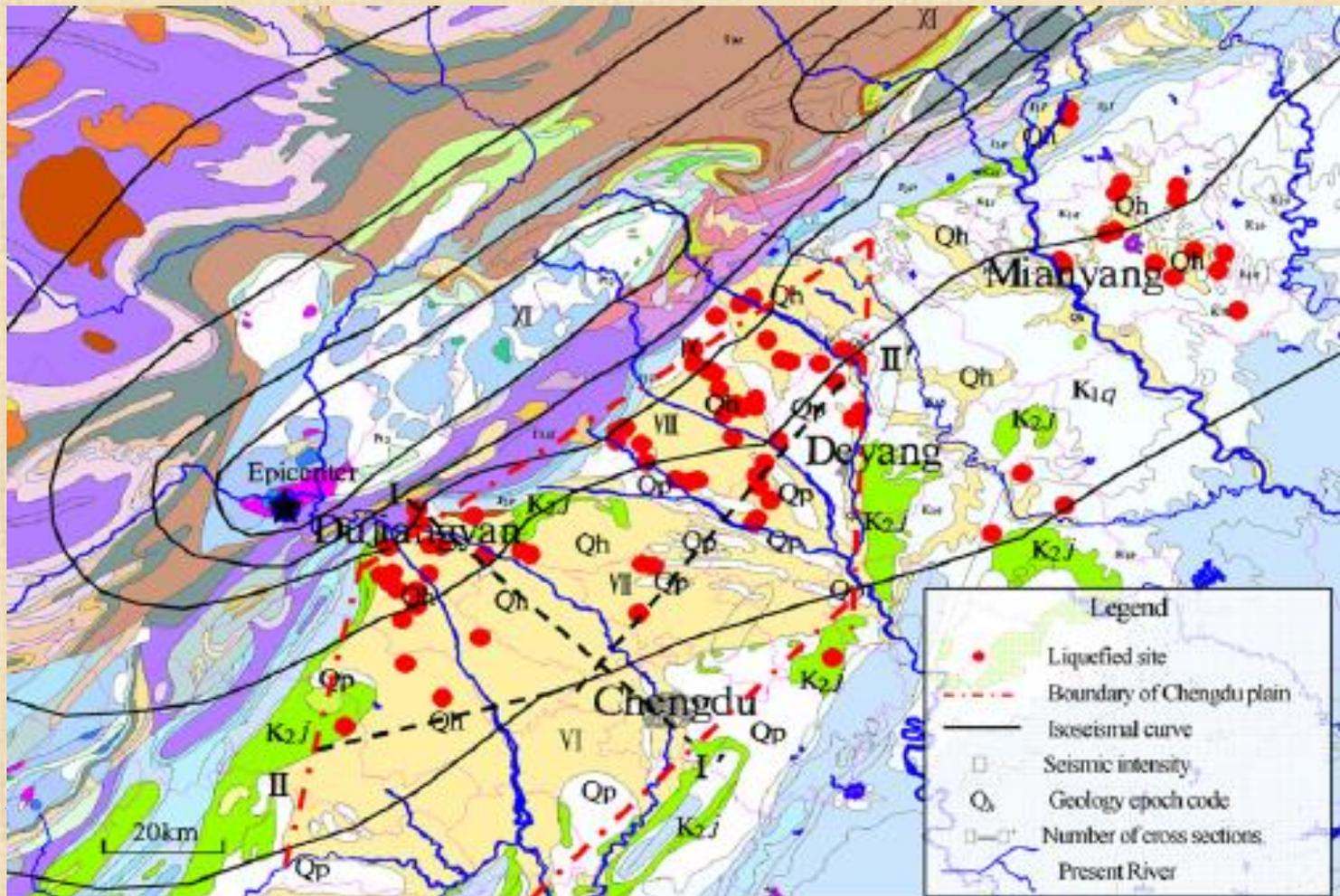
# Otros estudios

---

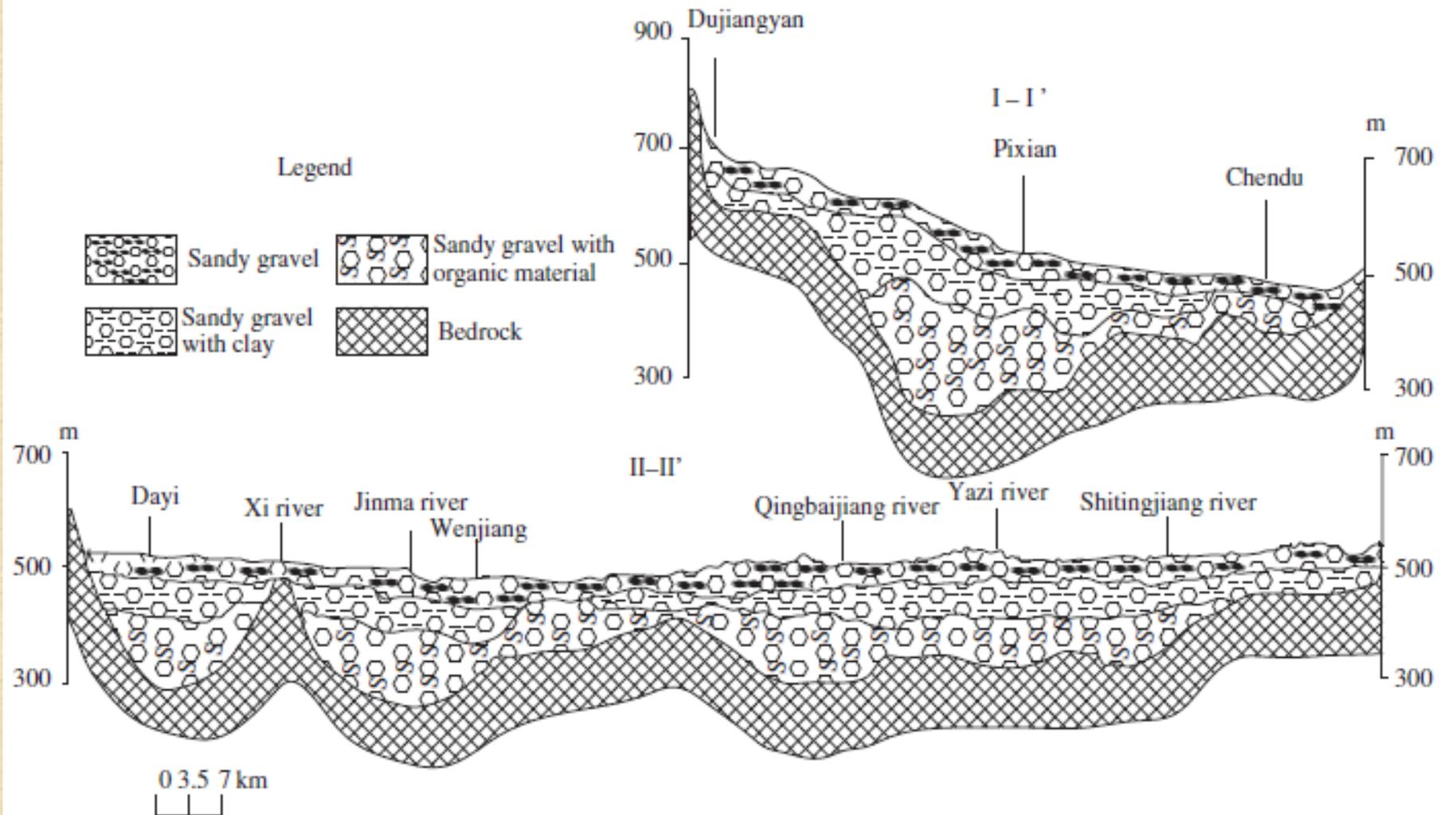
PRESA	UBICACIÓN	METODOLOGÍA	AÑO
Bradbury	California	BPT	1990
Keenleyside	BC – Canadá	SPT y Vs (SASW y MASW)	1994
Skookumchuck	Washington	BPT y Vs (Down-Hole)	2006
Headworks West Reservoir	California	iBPT	2014
North Haiwee	California		
Stone Canyon	California		
Bouquet Canyon	California		
Clark Canyon	Montana	BPT	2014
Tieton	Washington	BPT	2015
<b>Millsite Dam</b>	<b>Utah</b>	<b>DPT y BPT</b>	<b>2015</b>

# TERREMOTO DE WENCHUAN

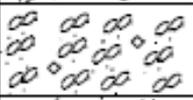
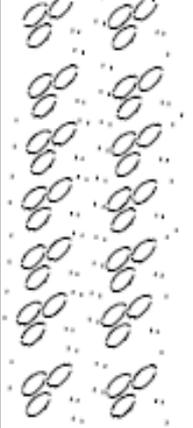
- ▶ Año: 2008,  $M_s = 7.98$ , Epicentro en la Provincia de Sichuan. Profundidad focal: 19Km.

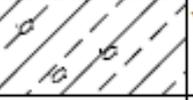
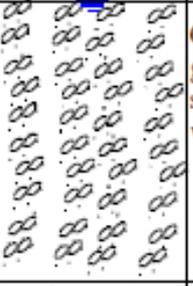
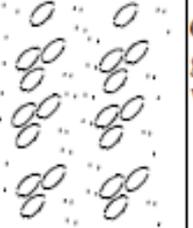


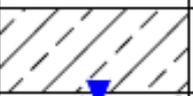
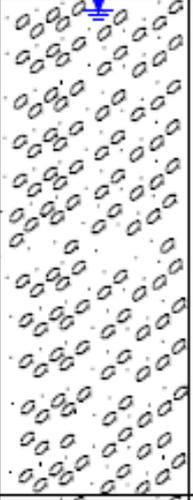
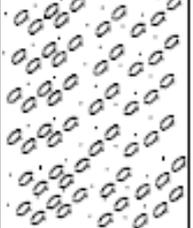
# TERREMOTO DE WENCHUAN



# TERREMOTO DE WENCHUAN

Depth (m)	Log	Description
0.8		Gray clayey fill; contains rare gravel
1.9		Gray to yellow sandy gravel; Max. grain size of 5 cm
2.4		Medium dense sandy gravel
6.7		Dense sandy gravel; Max. grain size of 12cm

Depth (m)	Log	Description
0.5		Clayey fill; contains rhizome
1.0		Yellow silty clay
2.0		Gray loose Sandy gravel
5.3		Gray loose sandy gravel; Max. grain size of 8cm; weathering serious
8.0		Gray dense sandy gravel; medium weathering

Depth (m)	Log	Description
0.7		Yellow silty clay
7.0		Yellow loose sandy gravel; Max. grain size of 15cm
18.4		Yellow medium dense sandy gravel; Max. grain size of 5cm

Fuente: Cao Zhenzhong et al., 2013

# TERREMOTO DE WENCHUAN

## Evidencias de licuación de gravas



Escuela Banquiao, en Mianzhu. Asentamiento dif. > a 20cm. — Fuente: Cao et al., 2013.

# TERREMOTO DE WENCHUAN

## Evidencias de licuación de gravas



Erupción de arena y grava en la villa Songbai, región de Bailong. – *Fuente: Cao et al., 2013.*

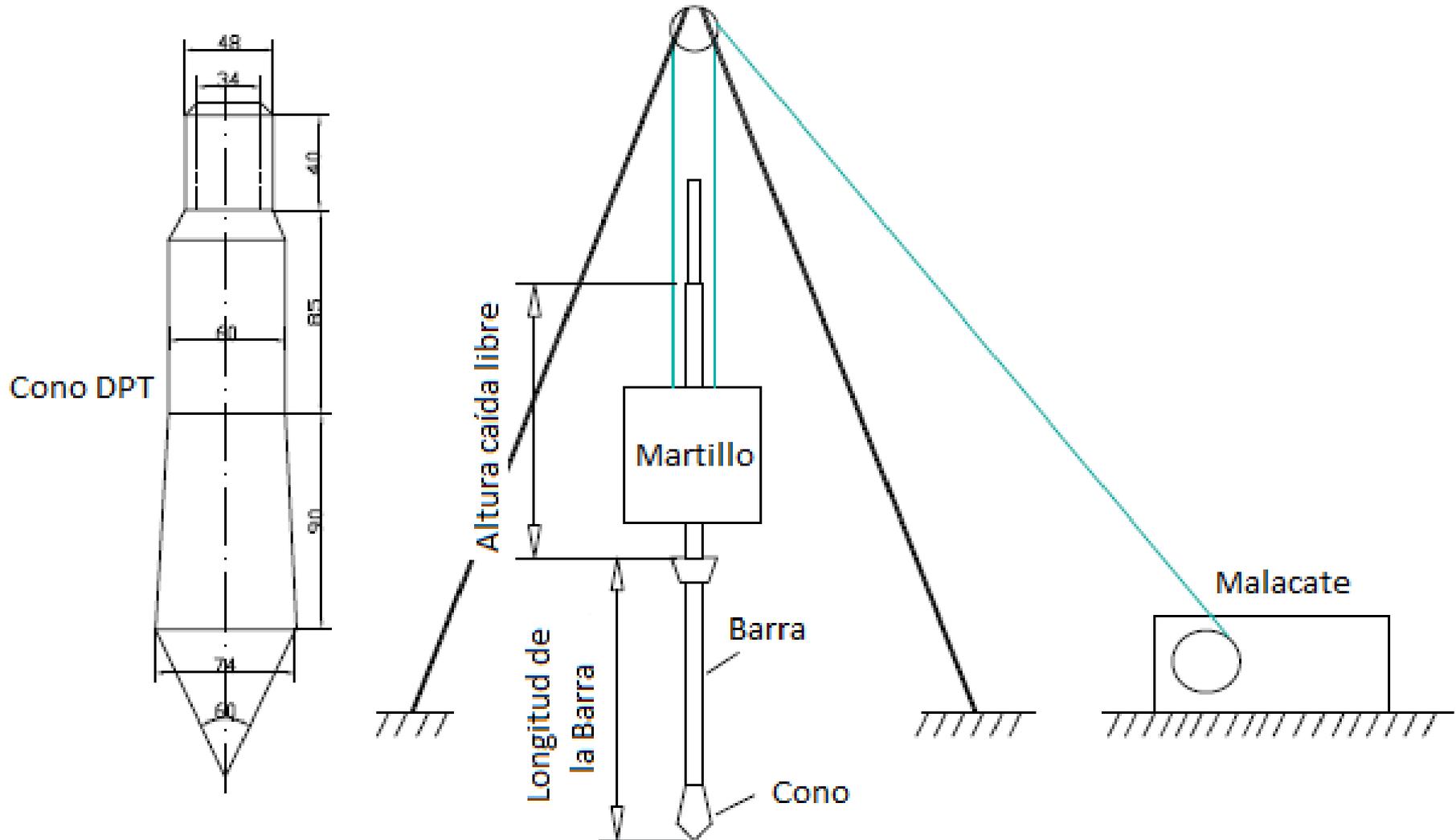
# Wenchuan 2008: 47 sitios evaluados con $V_s$

N°	Ubicación	Intensidad	PGA [%]	CSR	$d_s$ [m]	$d$ [m]	$s'_v$ [KPa]	$V_s$ [m/seg]	$V_{s1}$ [m/seg]	$V_{sCrítico}$ [m/seg]	Predicción	Licuación
1	Yongfen	8	0.34	0.3	6	2.8	82	238	250	193	NO	SI
2	Xinshi	8	0.34	0.33	3	1	37	133	171	143	SI	SI
3	Pilu	7	0.22	0.22	5.2	1.4	61	161	182	135	NO	SI
4	Banqiao	8	0.37	0.29	4.6	3	71	159	173	163	SI	SI
5	Songbai	8	0.24	0.27	4.6	0.8	49	185	221	180	NO	SI
6	Guoyuan	7	0.21	0.15	1.9	1.5	32	165	219	74	NO	SI
7	Jingqiao	7	0.18	0.16	5.1	2.2	68	164	181	129	NO	SI
8	An'ren	9	0.44	0.31	5	4	85	267	278	239	NO	SI
9	Xiangliu	9	0.41	0.31	4.8	3.4	77	233	249	239	SI	SI
10	Xinglong	8	0.42	0.4	6.8	2.4	85	195	203	208	SI	SI
11	Shihu	8	0.33	0.25	4.4	2.9	69	161	177	160	NO	SI
12	Baijiang	7	0.23	0.19	4.1	2.2	59	142	162	115	NO	SI
13	Qifu	8	0.3	0.23	5.3	3.5	83	180	189	174	NO	SI
14	Anping	8	0.2	0.15	2.5	1.8	41	141	177	115	NO	SI
15	Guihua	8	0.39	0.4	2.2	0.6	26	153	215	123	NO	SI
16	Zhenjiang	8	0.29	0.28	2.4	0.9	31	187	251	126	NO	SI
17	Sangyuan	8	0.29	0.21	3.5	2.8	60	199	227	140	NO	SI
18	Wudu	9	0.48	0.49	6.3	1.6	73	150	162	299	SI	SI
19	Shengli	7	0.21	0.18	3.7	1.9	52	187	220	109	NO	SI
20	Changzheng	7	0.2	0.17	2	1	28	160	220	82	NO	SI
21	Baihutou	9	0.46	0.38	2.2	1.2	32	178	237	171	NO	SI
22	Baiyang	8	0.35	0.32	3.8	1.5	49	150	179	158	SI	SI
23	Linyan	8	0.47	0.31	7	6	123	250	237	191	NO	SI

# Wenchuan 2008: 47 sitios evaluados con $V_s$

N°	Ubicación	Intensidad	PGA [%]	CSR	$d_s$ [m]	$d$ [m]	$s'_v$ [KPa]	$V_s$ [m/seg]	$V_{s1}$ [m/seg]	$V_{sCrítico}$ [m/seg]	Predicción	Licuación
24	Qingliang	8	0.24	0.25	4	1	46	203	246	143	NO	SI
25	Siyuan	8	0.41	0.35	3	1.5	42	166	206	139	NO	SI
26	Shuanquan	9	0.49	0.36	3.3	2.5	55	200	233	215	SI	SI
27	Yongquan	7	0.24	0.24	4	1.3	49	152	182	119	NO	SI
28	Xinnian	6	0.13	0.1	2.5	1.8	41	188	236	-	-	SI
29	Wuli	6	0.09	0.1	5	1	55	138	160	-	-	SI
30	Jiangyou	8	0.49	0.41	4.7	2.4	66	215	238	171	NO	SI
31	Wulan	7	0.2	0.16	9	5	131	269	251	164	NO	NO
32	Chuanmu	9	0.41	0.27	9.2	8	163	272	241	310	SI	NO
33	Tonglin	9	0.48	0.5	10.2	2	112	234	228	372	SI	NO
34	Nanguì	8	0.24	0.21	11.9	4.7	154	304	273	264	NO	NO
35	Mianzhu	8	0.37	0.29	5.4	3.4	83	282	296	178	NO	NO
36	Heping	8	0.18	0.16	10.8	3.7	134	305	283	256	NO	NO
37	Quezhu	7	0.26	0.2	10.5	6	155	287	257	175	NO	NO
38	Bayi	8	0.43	0.27	6.7	6.2	122	248	236	184	NO	NO
39	Yongling	8	0.41	0.45	10.2	1.4	106	337	332	260	NO	NO
40	Shenghua	7	0.18	0.16	5	2	65	208	232	130	NO	NO
41	Dacheng	8	0.32	0.24	6.8	4.5	106	257	253	196	NO	NO
42	Min'an	8	0.25	0.21	8.2	3.7	111	259	252	222	NO	NO
43	Changlin	9	0.43	0.3	5	4	85	323	336	239	NO	NO
44	Wufan	8	0.27	0.24	4.6	2	61	187	211	172	NO	NO
45	Yangjia	7	0.2	0.13	7.4	6.1	128	218	205	142	NO	NO
46	Linfa	9	0.47	0.35	6.3	4.3	100	365	365	273	NO	NO
47	Yujiaguan	8	0.49	0.42	6.5	3	89	233	240	201	NO	NO

# Surge el método DPT (o DCPT) (Yuan Xiaoming y Cao Zhenzhong)



# Surge el método DPT (o DCPT) (Yuan Xiaoming y Cao Zhenzhong)

---

- La evaluación del potencial de licuación por el método DPT comprende dos etapas:

- **Predeterminación:** Excluye suelos “imposibles” de licuar.

- **Re-determinación:** Se calcula el potencial de licuación con una fórmula basada en registros del ensayo DPT:

$$N_{cr-120} = N_{0-120} [1 + \alpha_w (d_w - 2) + \alpha_s (d_s - 3)]$$

- El método es simple y fácilmente aplicable a la ingeniería práctica. Pero necesita más desarrollo:

- Validación con mayor número de registros de campo.

- Determinación de la influencia del % de gravas en los registros DPT.

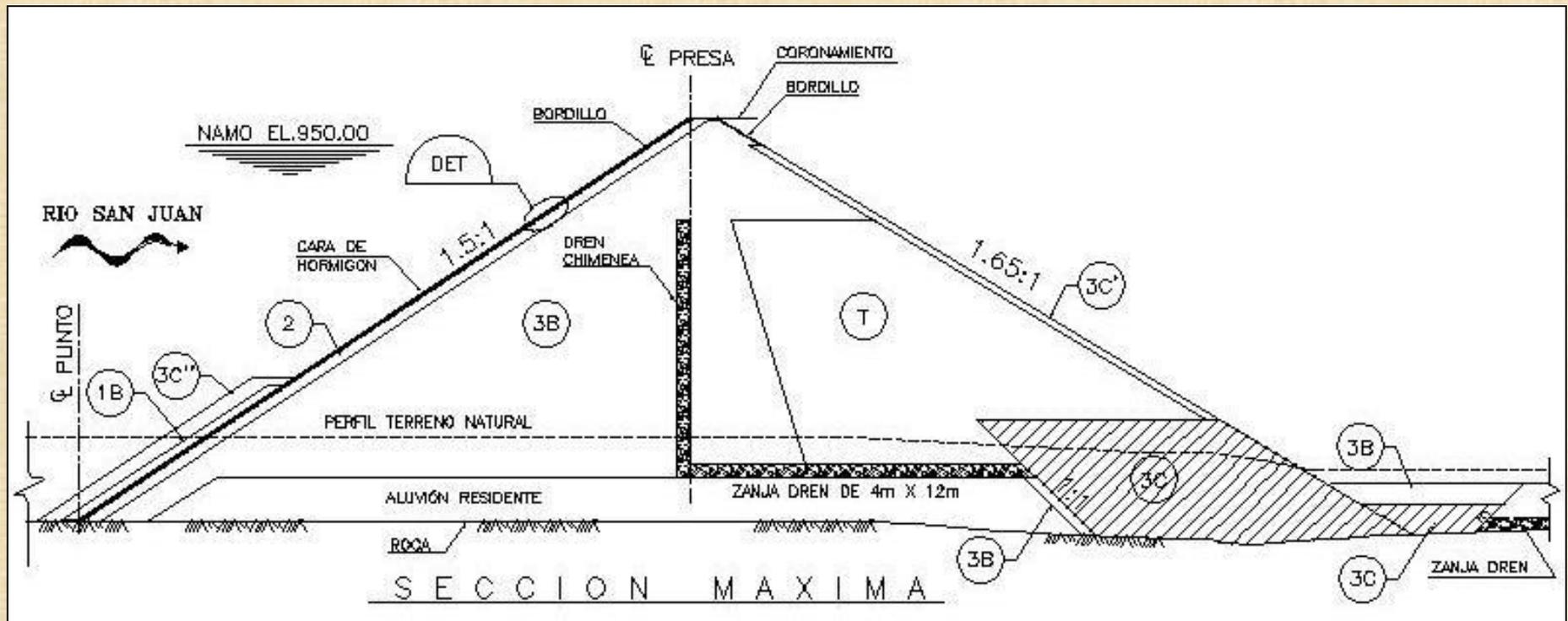
- Influencia de FC% y Cu.

- Reemplazo del parámetro Intensidad por el de PGA%



# Caso de estudio – Provincia de San Juan

## PRESAS CFRD – PUNTA NEGRA



Sección Máxima Proyectada de la Presa Punta Negra

# Presas Punta Negra – Provincia de San Juan

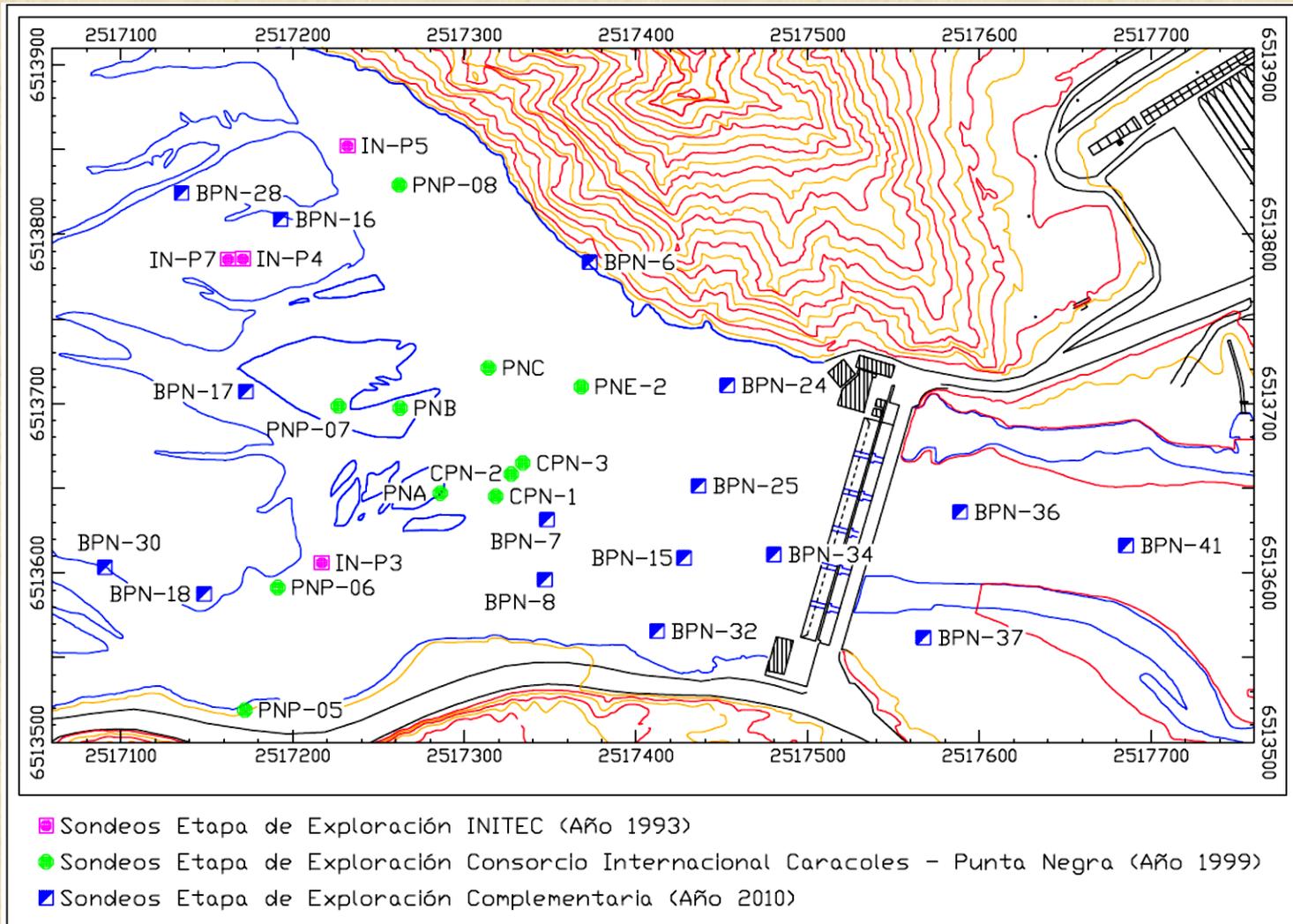
---



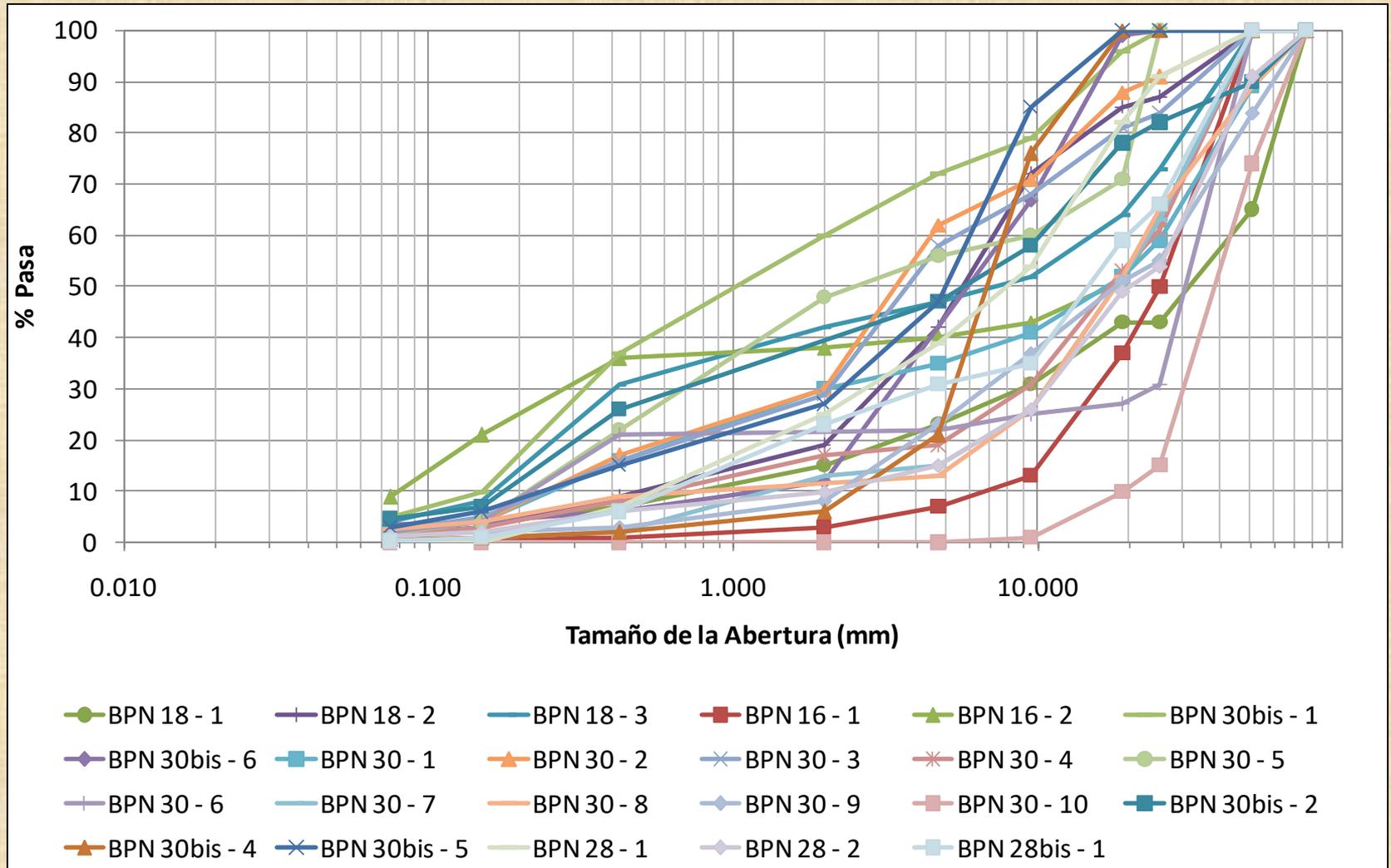
Presas en construcción – Año 2013.



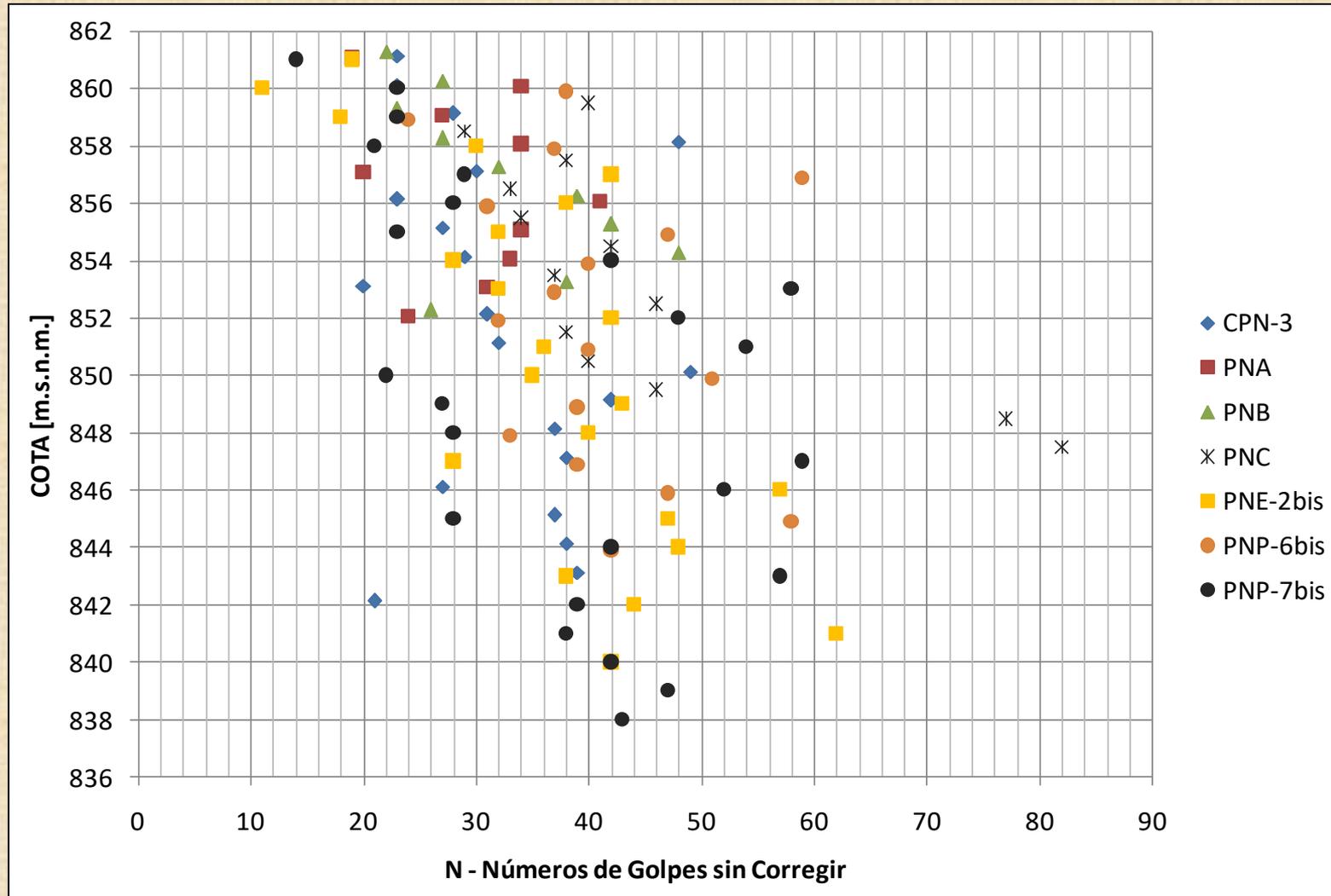
# Presa Punta Negra – Provincia de San Juan



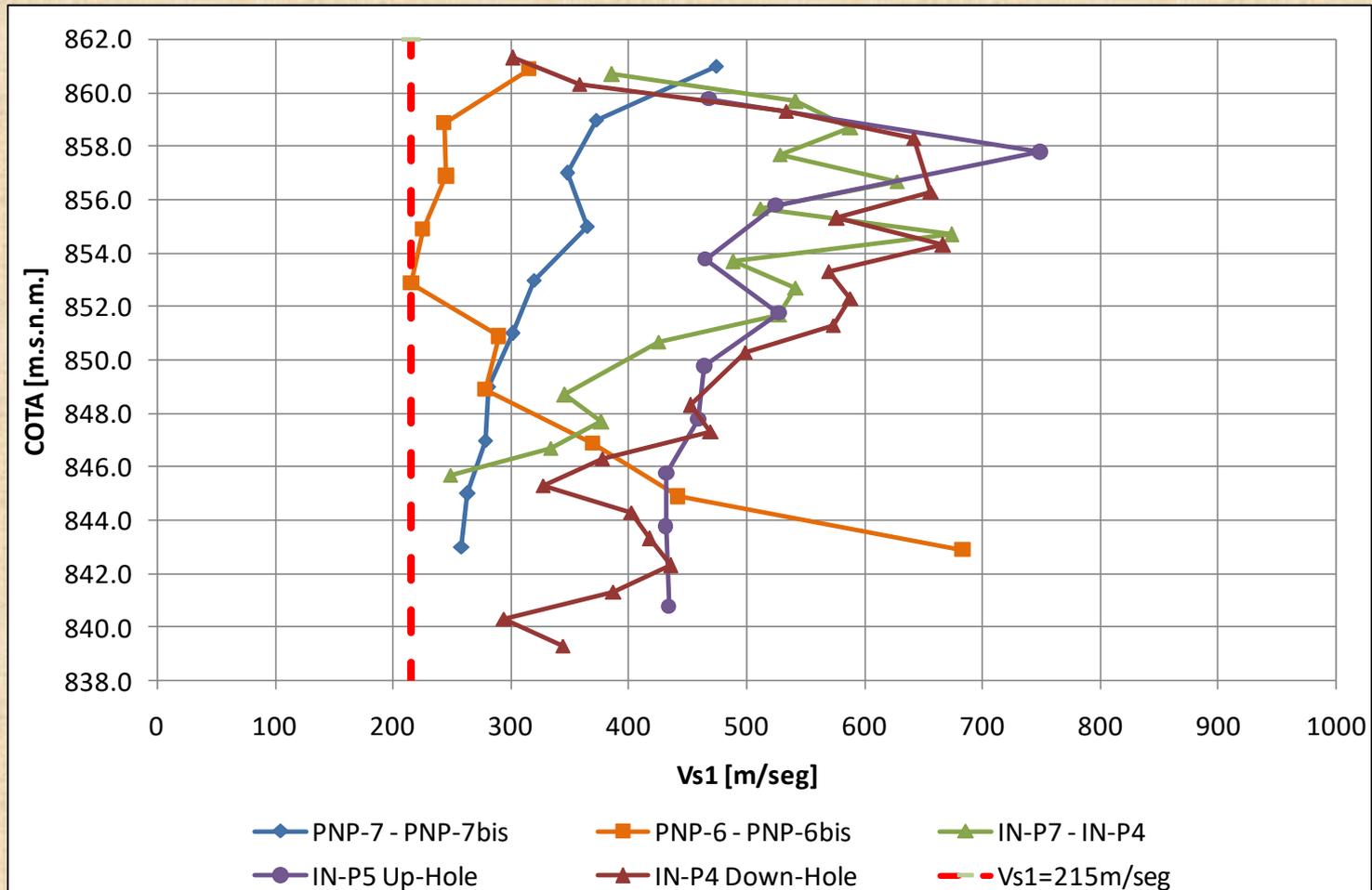
# Presa Punta Negra – Provincia de San Juan



# Presa Punta Negra – Provincia de San Juan



# Presa Punta Negra – Provincia de San Juan



VsI según Andrus y Stokoe (1997) para un terremoto de magnitud 7,5. Criterio adoptado en el Diseño Ejecutivo de Los Caracoles y Punta Negra.

# Solución adoptada en Punta Negra

---

- ▶ Dadas las limitaciones de los métodos empíricos existentes, en el caso de la fundación de Punta Negra se optó por un criterio conservador, consistente en remover paulatinamente el aluvión residente en la fundación, determinando en cada capa la densidad relativa (DR), hasta alcanzar un nivel en el que el suelo tuviera un valor de DR superior al 70%.
- ▶ El IDIA recomendó agregar:
  - ▶  $CU \geq 30$
  - ▶  $D_{50} \geq 10mm$
- ▶ EPSE y UTE Techint – Panedile acordaron 2 criterios adicionales:
  - ▶  $NSPT \geq 30$
  - ▶  $V_s \geq 300 \text{ m/seg}$



# Conclusiones

---

- ▶ En el caso de arenas, el fenómeno de licuación se encuentra bien estudiado, y existen métodos empíricos o semi empíricos, para evaluar el potencial de licuación. Para ello se emplean métodos de evaluación indirecta basados en correlaciones con  $V_s$ , SPT, CPT, etc.
- ▶ No ocurre lo mismo con los suelos gravosos. Los casos históricos de licuación en gravas alrededor del mundo son muy escasos como para permitir elaborar métodos empíricos sólidos y confiables de evaluación del potencial de licuación.
- ▶ El terremoto de Wenchuan alertó a la comunidad geotécnica mundial sobre la ineficacia de los métodos de evaluación de potencial de licuación en arenas para determinar el potencial de licuación en suelos gravosos.



# Conclusiones

---

- ▶ Existen intentos recientes de elaborar métodos empíricos para la determinación del potencial de licuación en gravas, basados en los casos de licuación observados en la provincia de Sichuan (terremoto de Wenchuan), pero están escasamente validados.
- ▶ Respecto de la Presa Punta Negra, en la provincia de San Juan, tanto la envergadura como la proximidad a centros poblados de la obra, obligaron, dada la incertidumbre dejada por los métodos empíricos existentes, a emplear un criterio conservador para definir el nivel final de excavación del aluvión natural.



# Conclusiones

---

- ▶ Existe la necesidad de estudiar el fenómeno a microescala, para investigar en profundidad el proceso de deformación del esqueleto intergranular del suelo saturado al ser sometido a cargas cíclicas, y las consecuentes variaciones en la presión de poros, que pueden llegar en un caso extremo a anular la resistencia al corte del material.





Instituto de Investigaciones  
Antisísmicas  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN

***GRACIAS POR SU ATENCIÓN***

Ing. Eduardo Luis Martín  
e.martin@unsj.edu.ar