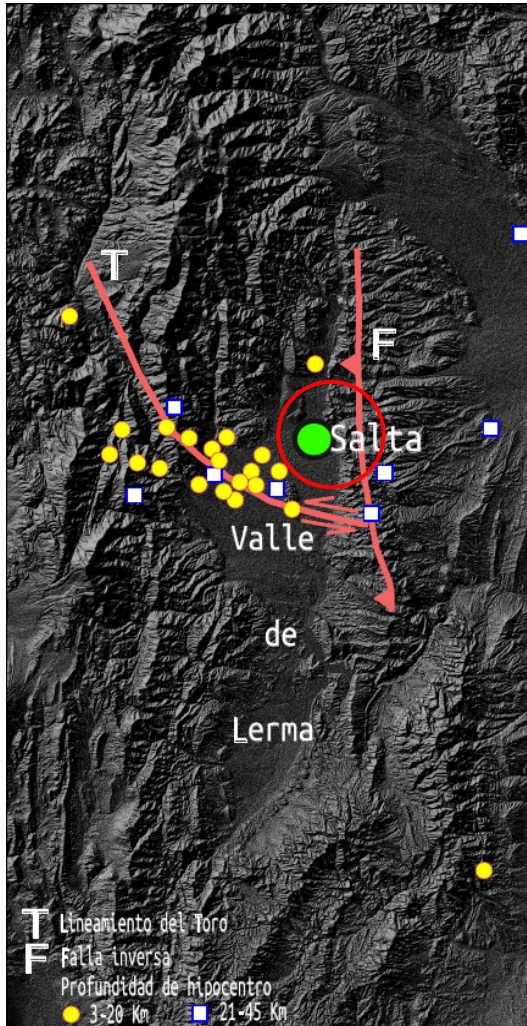


Modelo Unificado para arcillas y arenas (Yu, 2006)

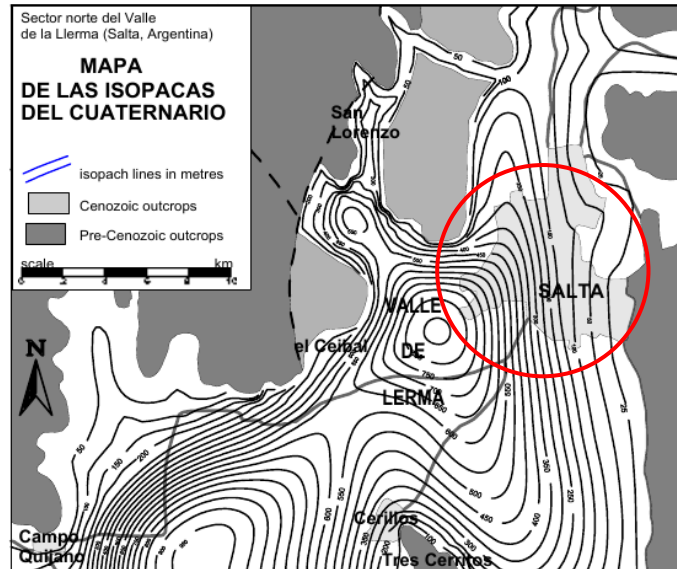
**Objetivo: aplicar a suelos típicos de la
ciudad de Salta**

Fernando Javier Albarracin.
Lía Elizabeth Orosco Segura
Fecultad de Ingeniería. UcaSal. Salta, Argentina.

Preliminares. Ubicación de Salta y sismicidad en el Valle de Lerma



Composición sobre imagen satelital de ASTER GDEM (producto de METI y NASA). Se observa falla inversa (F), lineamiento del Toro (T) y sismos históricos con hipocentros a profundidades corticales someras e intermedias (González Bonorino *et al.* 2012)



Mapa de las Isopacas del Cuaternario del sector Norte del Valle de Lerma (Colombi *et al.*, 1999)

Preliminares. Ubicación de Salta y sismicidad en el Valle de Lerma

valle sedimentario

En el caso de la ciudad de Salta, su historia sísmica nos muestra vestigios del comportamiento de suelos, muy disímiles en pocas cuadras de distancia (una cuadra de esta ciudad posee unos 100 metros en más o en menos).

Esto incluye:

- * Licuefacción de arenas;
- * deslizamientos de laderas (el último importante durante el sismo de febrero de 2010);
- * y otros cambios morfológicos durante eventos sísmicos.

Dan cuenta de la distribución y heterogeneidad de suelos en toda la ciudad de Salta y zonas cercanas (pobladas):

entre otros:

- * Estudios gravimétricos 3D (Colombi *et al.* 2001).
- * Perfiles de suelos obtenidos durante las perforaciones para pozos de agua.
- * Mediciones de la respuesta de suelos mediante el análisis espectral de las señales del ruido ambiental en ciertos sectores de la ciudad (Orosco *et al.* 2004) aplicando el método de Nakamura (Nakamura, 1989).
- * Análisis aplicando métodos de sísmica de refracción (MAN, MASW. 2017-2019).
- * Sondeos a 2m, 4m y 6m para extracción de muestras: ensayos triaxiales y edométricos (en curso)

Modelizado numérico por MEF: Área del Valle donde se asienta la ciudad de Salta

Como parte del estudio de la respuesta sísmica de los suelos, se propone la modelización numérica tridimensional empleando el método de elementos finitos y técnicas de simulación en sistemas de **alto desempeño computacional**.

Permite en este caso:

- * Simulación 3D a gran escala de la acción sísmica estudiando distintas fuentes sísmicas.
- * Predicción de los efectos de sitio teniendo en cuenta la compleja conformación geológica del Valle de Lerma (valle sedimentario).
- * Predicción del comportamiento de suelos empleando **modelos constitutivos**

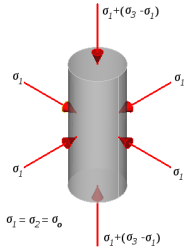
complejos.

Se emplea un modelo de estado crítico (Roscoe *et al.*, 1958), dentro del código por elementos finitos. Aplicación computacional desarrollada en C/C++ (con gcc++, plataformas GNU/Linux)

Modelo unificado para arcillas y arenas (Yu, 2006)

Es un modelo constitutivo que, partiendo y manteniendo la filosofía de los modelos de estado crítico Cam-clay (Roscoe *et al.*, 1968; Cambridge), permite con los parámetros clásicos obtenidos en ensayos de consolidación y ensayos triaxiales, predecir el comportamiento de arcillas y arenas con una única formulación.

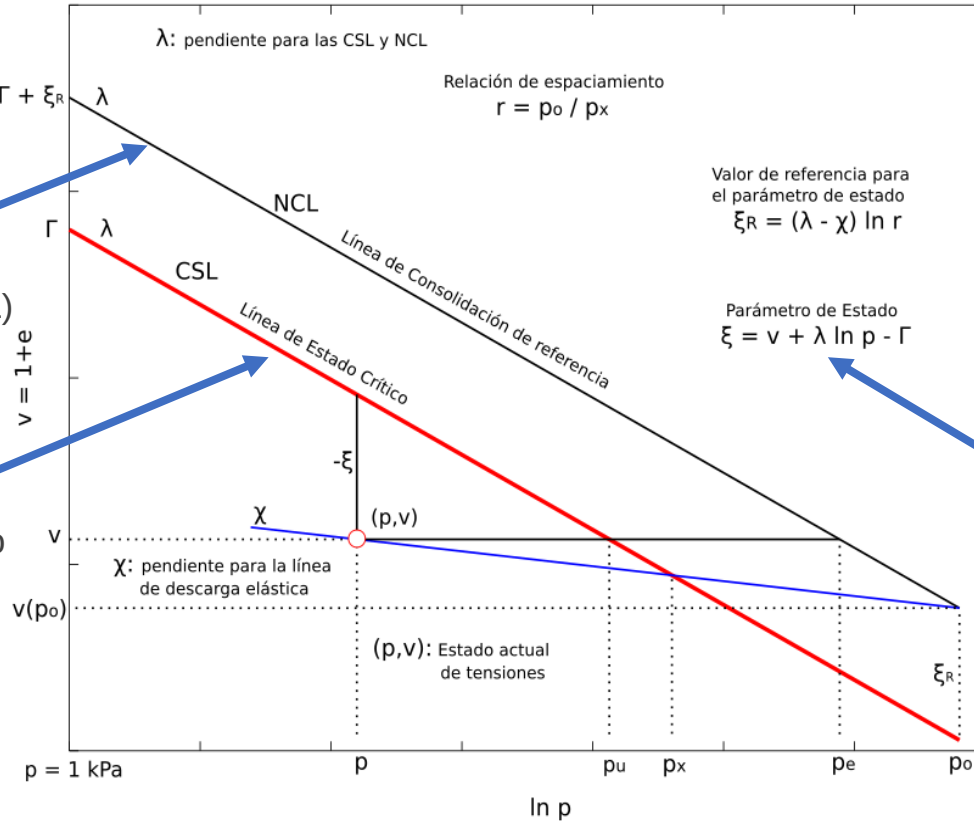
Modelos de Estado Crítico



Se fundamentan en los parámetros obtenidos de ensayos triaxiales, principalmente

Línea de Consolidación Normal o de referencia (NCL)

Línea de estado crítico (CSL)



Concepto de parámetro de estado, luego de los aportes de Yu (1995, 1998).

Con $n = 1$ y $r = 2.7183$:

restituye el criterio del Cam-clay

Con $n = 2$ y $r = 2$:

restituye el criterio del Cam-clay modificado

$$f(p, q, p_o) = \left(\frac{q}{M p} \right)^n + \frac{\ln \frac{p}{p_o}}{\ln r} = 0$$

Modelo unificado para arcillas y arenas (Yu, 1998)

$$\left(\frac{\eta}{M} \right)^n = 1 - \frac{\xi}{\xi_R}$$

$$\frac{q}{p} + \frac{d \varepsilon_p^p}{d \varepsilon_q^p} = M$$

$$\eta = q / p$$

Modelo Unificado para arcilla y arena (Yu, 2006)

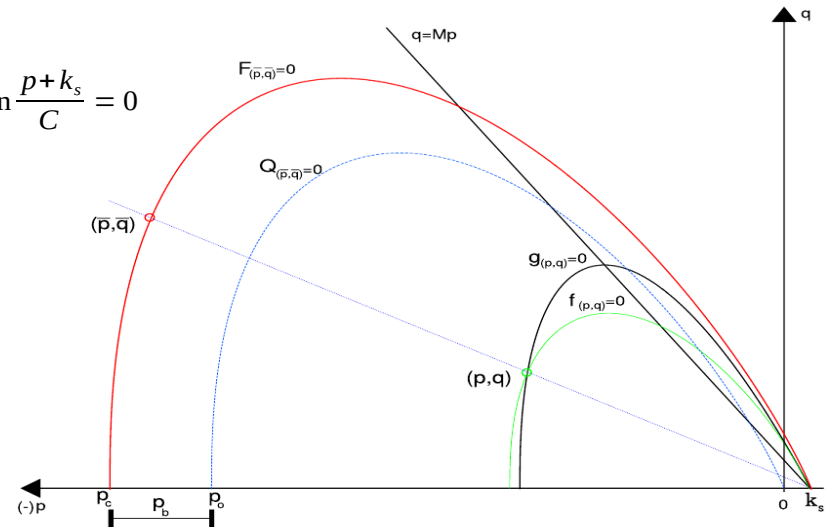
Modelo elastoplástico de estado crítico (Yu, 1998), con múltiples superficies de fluencia (Mroz *et al.* 1978, 1979, 1981), reducida a dos superficies: una límite y otra de carga (Yu, 2006)

Asume para la componente elástica: $K = \frac{\nu p}{\chi}$ Módulo de bulk, variable con la presión de confinamiento efectiva p' y con el volumen específico ν

Función de carga: $f(p, q, M_\theta, \epsilon_p^p) = \left[\frac{q}{(p+k_s)M_\theta} \right]^n + \frac{\ln \left[\frac{p+k_s}{\beta(p_o+k_s)} \right]}{\ln(r)} = 0$ Siendo: $\bar{q} = \frac{q}{\beta}$

Potencial plástico: $g(p, q, M_\theta) = m \ln \left[1 + (m-1) \left[\frac{q}{(p+k_s)M_\theta} \right]^n \right] + n(m-1) \ln \frac{p+k_s}{C} = 0$

Superficie límite: $F(\bar{p}, \bar{q}, M_\theta, \epsilon_p^p) = \left[\frac{\bar{q}}{(\bar{p}+k_s)M_\theta} \right]^n + \frac{\ln \left[\frac{\bar{p}+k_s}{\beta(p_o+k_s)} \right]}{\ln(r)} = 0$



Aplicación del modelo a suelos de la ciudad de Salta: calibración numérica

Muestras ensayadas en condición triaxial, con aplicación de tensión desviadora hasta la falla, previa consolidación de la muestra saturada:

Pozo N°	Prof.	Muestra N°	Descripción	# 200	LL	LP	IP	USCS
Pozo 2	2 mts	Muestra 10	Arcilloso	92 %	45	31	14	ML
Pozo 6	4 mts	Muestra 9	Arena fina, limpia	5 %	--	--	--	SP

Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería de la UBA, Buenos Aires.

Simulación por elementos finitos de un ensayo a compresión no drenado.

$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$ Deformación total como suma de la elástica y de la deformación plástica (elastoplasticidad)

$\varepsilon_p = \varepsilon_p^e + \varepsilon_p^p$ Deformación volumétrica

$\varepsilon_q = \varepsilon_q^e + \varepsilon_q^p$ Deformación de desviación

En condición NO drenada: $\varepsilon_p = 0$ Deformación volumétrica nula

$$\varepsilon_p^e = -\varepsilon_p^p$$

Aplicación del modelo a suelos de la ciudad de Salta: calibración numérica

Método incremental de Newton-Rapson

Ciclo incremental m

$$F^{m+1} = F^m + \delta F$$

Ciclo corrector n

CONTROL de la convergencia

$$\delta P_{n+1}^m = \int_V B^T \delta \sigma_n^m dV$$

$$\delta u_{n+1}^m = (K^o)^{-1} \delta P_{n+1}^m$$

$$\delta \sigma_{n+1}^m = \int_V D_{ep(n)}^m \delta \varepsilon_n^m dV \quad \text{Tensiones actualizadas}$$

fin corrector

$$u^{m+1} = u^m + \delta u^m$$

$$\delta \sigma^{m+1} = \int_V D_{ep}^m \delta \varepsilon^m dV \quad \text{Tensiones incrementales actualizadas}$$

fin incremental

NOTAS (Newton-Rapson):

La expresión explícita:

$$\Psi_{(u)} \equiv K_{(u)} u + f \equiv P_{(u)} + f = 0$$

Series de Taylor (2 términos):

$$\Psi_{(u^{m+1})} \equiv \Psi_{(u^m)} + \left(\frac{d\Psi}{du} \right)^m \Delta u^m = 0$$

$$\frac{d\Psi}{du} = \left(\frac{dP}{du} \right) \equiv K_{T(u)}$$

Tensor elastoplástico tangente

$$D^{ep} = D - \frac{D \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T D}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} + A}$$

Plasticidad clásica

$$D_{L/U}^{ep} = D - \frac{(D:n_{gL/U}) \otimes (n:D)}{n:D:n_{gL/U} + H_{L/U}}$$

Plasticidad generalizada
(Zienkiewicz et al., 1975)

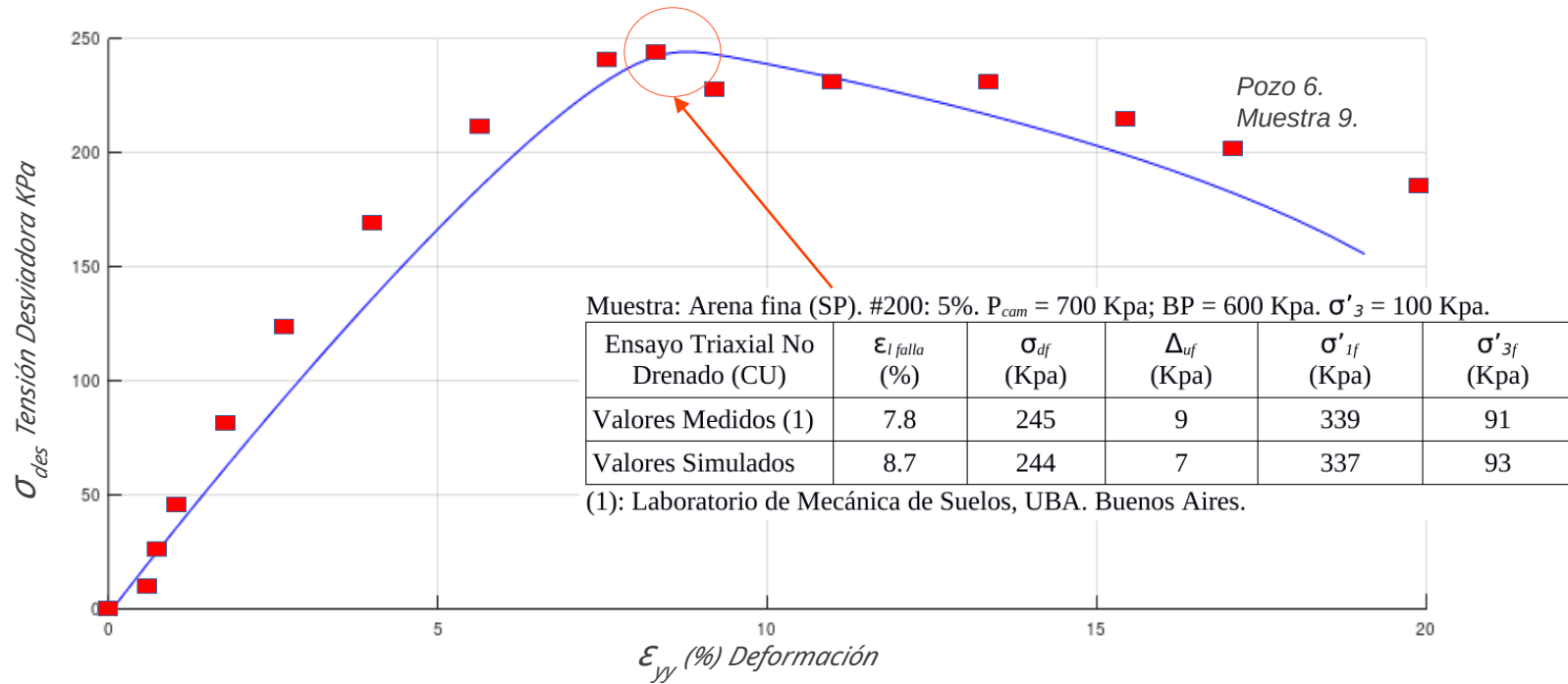
Tensor material acústico

$$Q_{kl}^{ep} = n_i D_{iklj}^{ep} n_j \left[\frac{\det(Q_{ij}^{ep})}{\det(Q_{ij})} \right]_{,\alpha}$$

CONTROL de la “degradación” del tensor elastoplástico.

Modelo Unificado para arcilla y arena (Yu, 2006)

Simulación por elementos finitos a compresión no drenado de una muestra de arena fina.

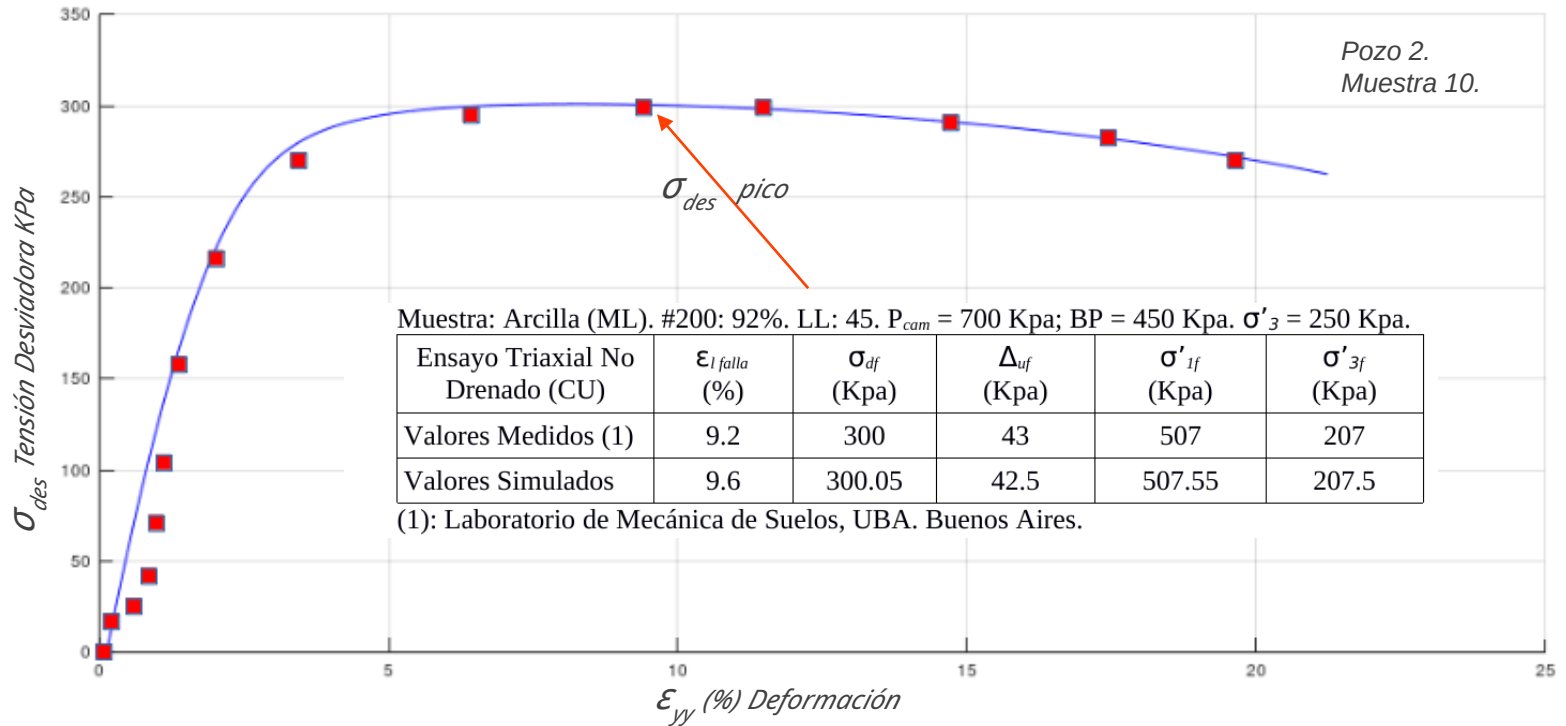


■ Valores medidos: ensayo Triaxial No drenado (Lab. de Mecánica de Suelos. FI UBA, Buenos Aires)

— Predicción del modelo para compresión no drenado ($p_o = 110$ Kpa; $\lambda = 0,05$; $\chi = 0,005$; $r = 1,15$)

Modelo Unificado para arcilla y arena (Yu, 2006)

Simulación por elementos finitos a compresión no drenado de una muestra de arcilla.



■ Valores medidos: ensayo Triaxial No drenado (Lab. de Mecánica de Suelos. FI UBA, Buenos Aires)

— Predicción del modelo para compresión no drenado ($p_o = 250$ Kpa; $v_o = 1,986$; $r = 1,45$)

Conclusiones

- * Sin mayores dificultades, pudo calibrarse el modelo unificado para 2 tipos muy distintos de suelos donde se asienta la ciudad de Salta.
- * Los ensayos de laboratorio están en curso actualmente. No obstante, con la información hoy disponible pudieron aproximarse satisfactoriamente los valores de tensiones desviadoras vs deformación.
- * El calibrado de la muestra de arcilla, resultó más satisfactorio que la de arena fina, pero en ambos casos se obtiene muy buena convergencia a los valores de pico desviador/deformación (falla).
- * Luego de la falla, el modelo unificado continúa mostrando la evolución post-pico; en esta etapa se controla la posible pérdida de estabilidad numérica con la evaluación del tensor material elastoplástico.
- * Se efectuaron simulaciones numéricas para cargas cíclicas con éxito, pero sólo de forma teórica. Es de esperarse la ejecución de ensayos triaxiales cíclicos / dinámicos para la calibración completa.
- * Es de interés futuro analizar la posible correlación con parámetros obtenidos de la sísmica de refracción y los necesarios para el modelo unificado.