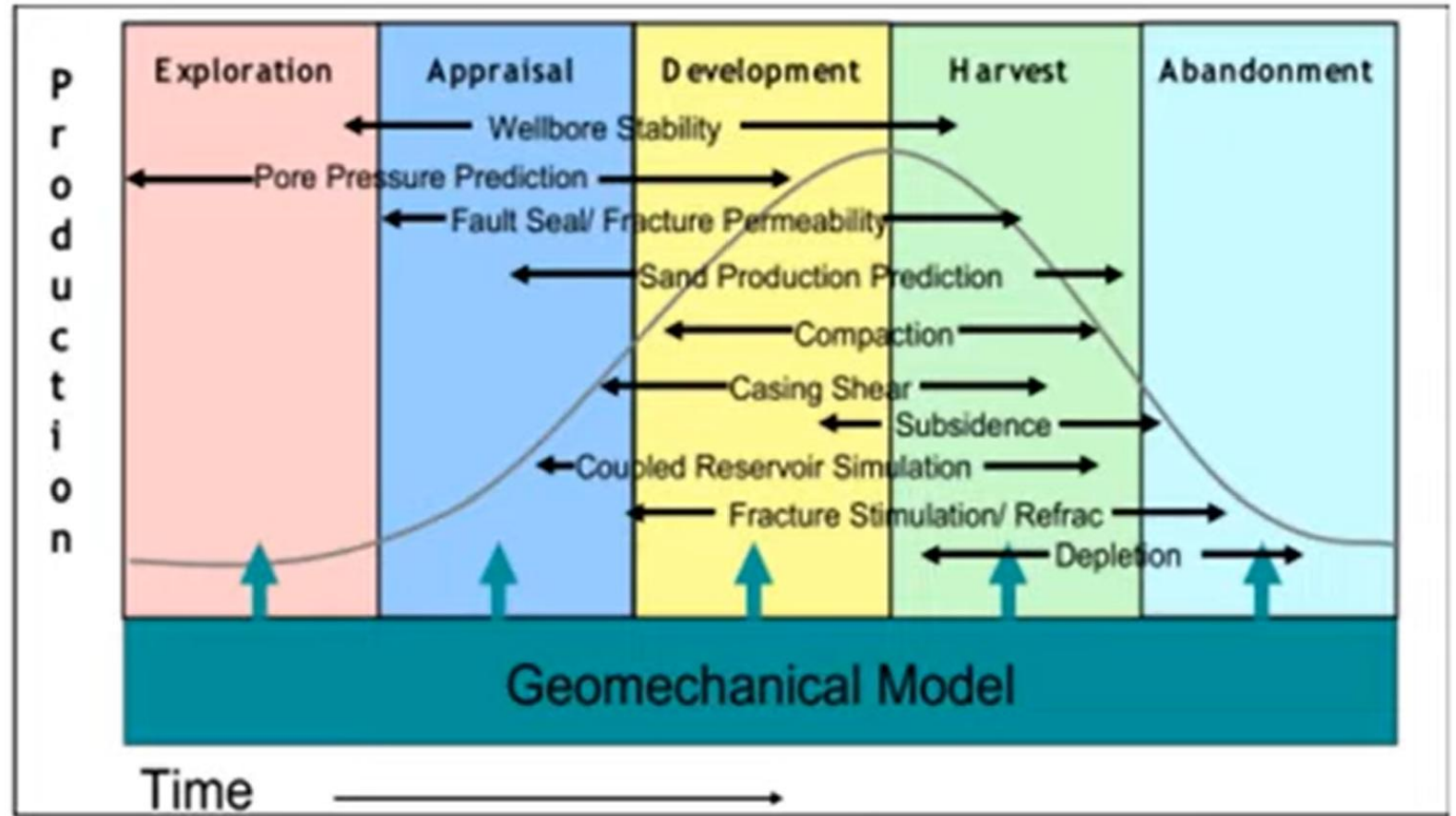
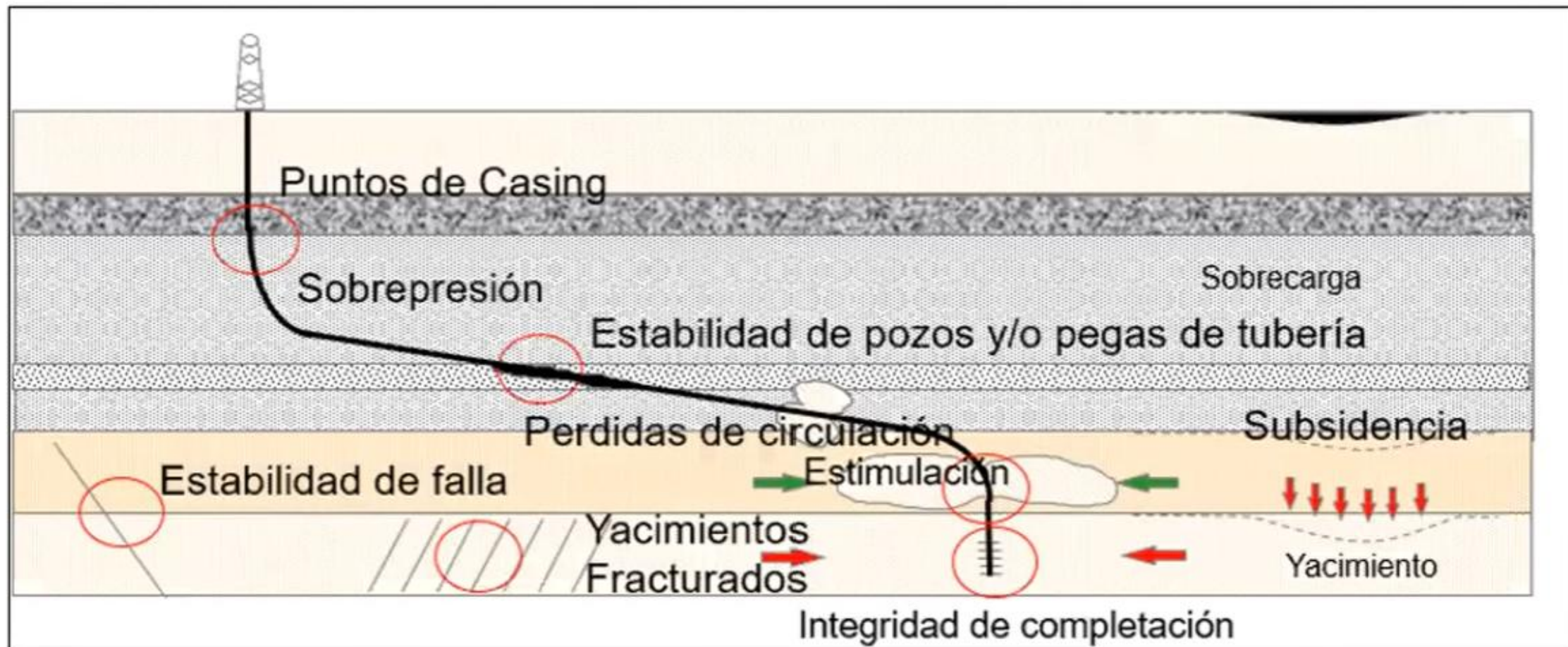


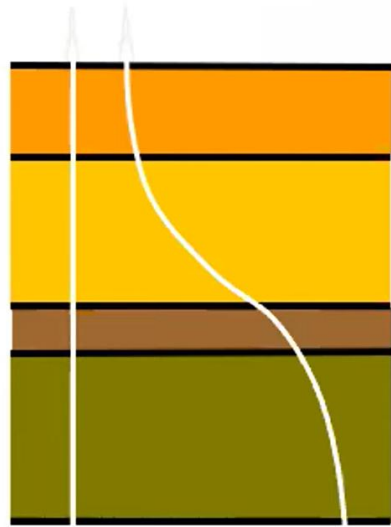
Geomecánica

Geomecánica:
estudia las
características
mecánicas de los
materiales
geológicos, cuantifica
la respuesta a
cambios en los
esfuerzos y presiones

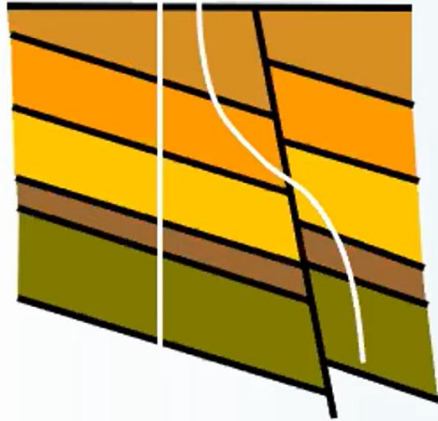


Fuente: ZOBACK, Mark. Determination of the State of Stress With Applications to Wellbore Stability and Fracture Flow in Reservoirs. :California, USA: Stanford University, 2011. p.24.

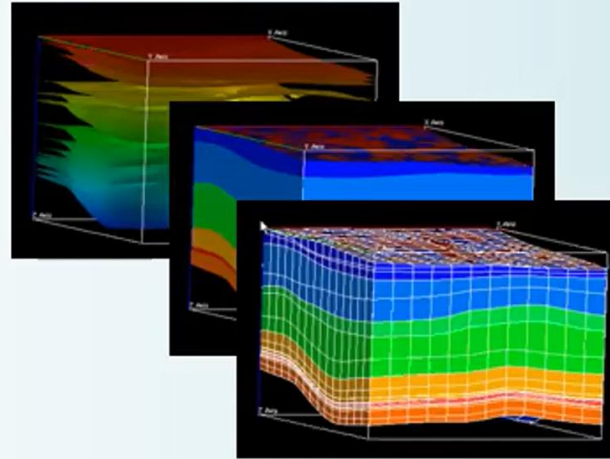




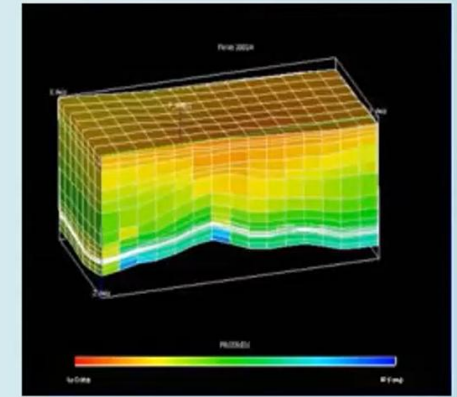
1D



2D



3D



4D

Complejidad
Calibración
Incertidumbre
Tiempo de Respuesta



Modelos geomecánicos 1d, 2d, 3d y 4d

¿Qué
necesitamos
para construir
el modelo
geomecánico
(MEM)?

Esfuerzos: Magnitudes y orientaciones

S_v	Esfuerzo vertical
S_{Hmax}	Esfuerzo horizontal máximo
S_{hmin}	Esfuerzo horizontal mínimo

Presión poral

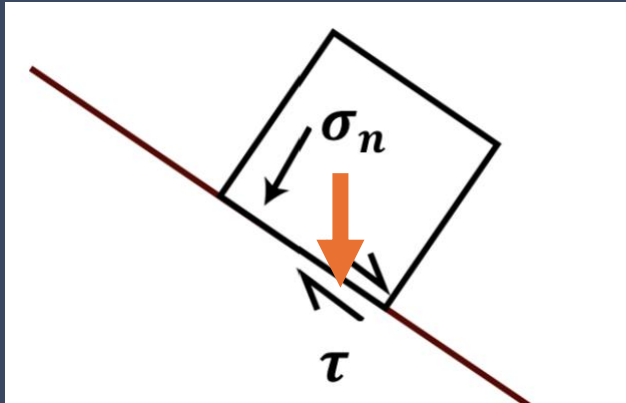
P_p	Presión de poro
-------	-----------------

Propiedades Mecánicas de las rocas

PM	Propiedades Mecánicas: UCS, Cohesión, Fricción, Módulos elásticos
----	--

Esfuerzo (Stress):

- Es una fuerza ejercida sobre un área
- Se mide en unidades de Presión (Mpa)

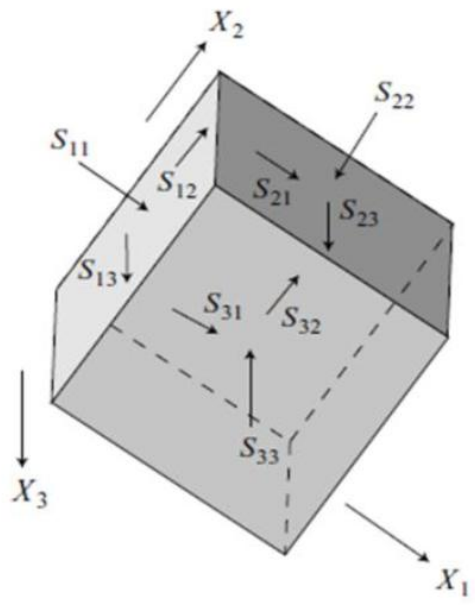


El deslizamiento se presenta cuando:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} \geq \mu$$

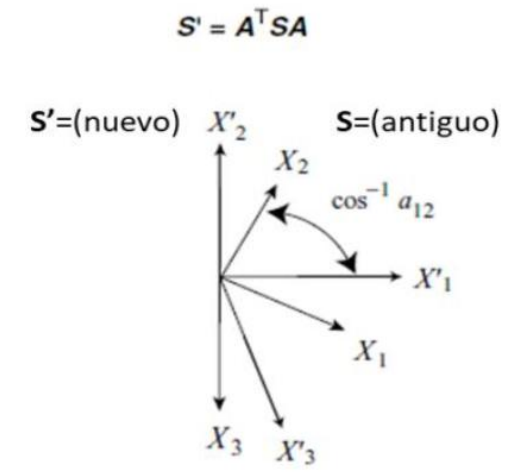
Coeficiente de Fricción
(fricción por deslizamiento)

(a)
Tensor de esfuerzos
(sistema de coordenadas cartesianas arbitrario)



$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

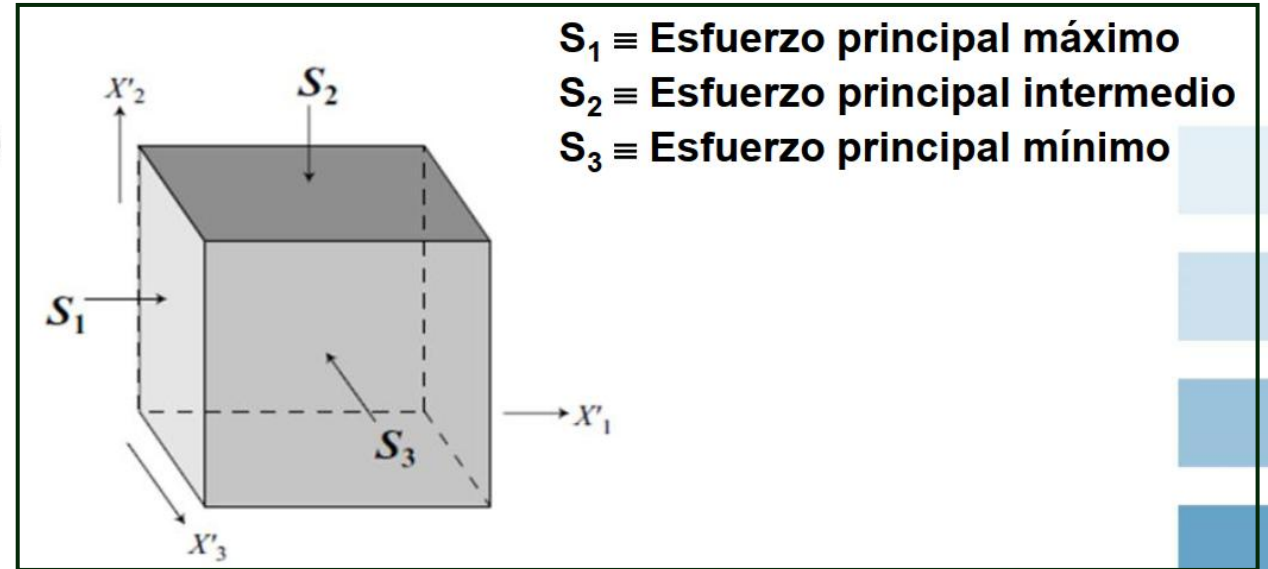
(b)
Tensor de transformación
(rotación de ejes)



$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} S \text{ (antiguo)}$$

Dirección de los cosenos

(c)
Tensor de esfuerzos principales

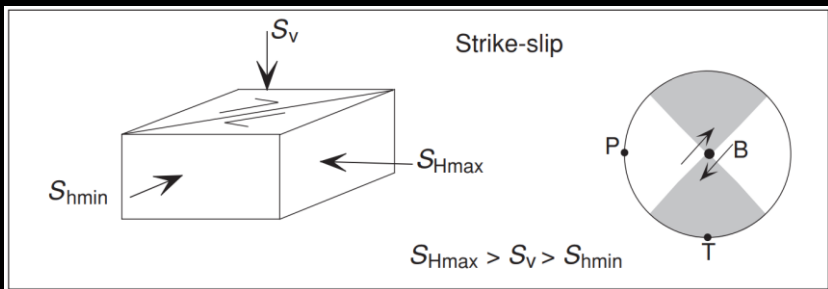


$S_1 \equiv$ Esfuerzo principal máximo
 $S_2 \equiv$ Esfuerzo principal intermedio
 $S_3 \equiv$ Esfuerzo principal mínimo

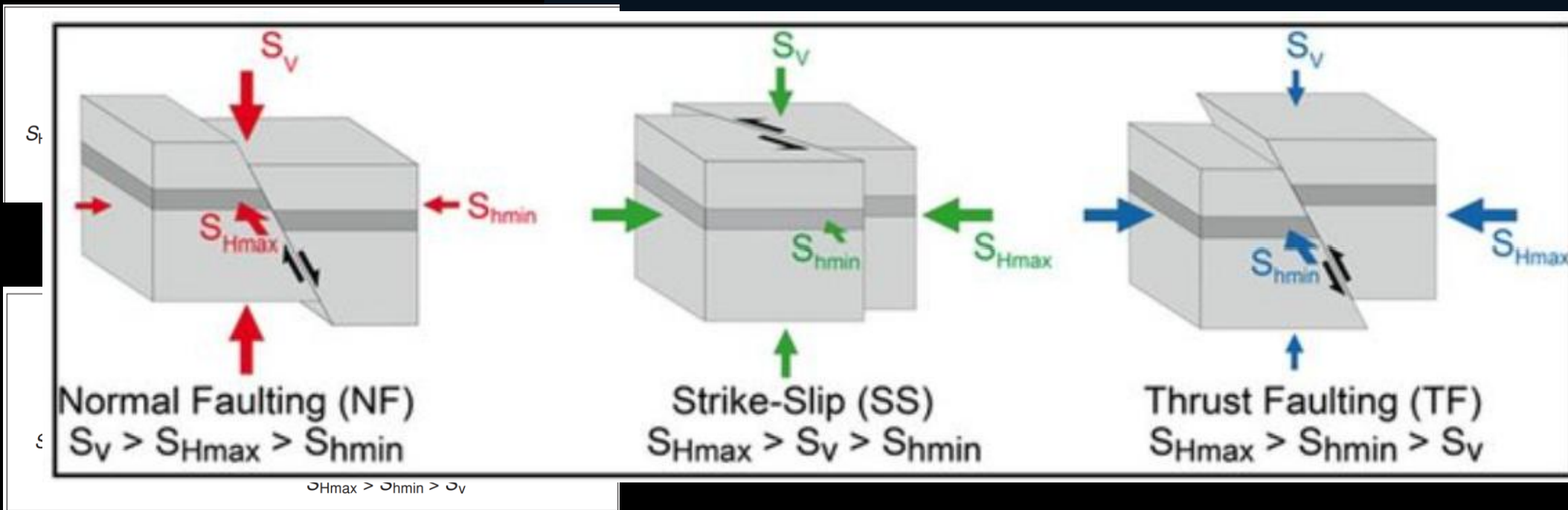
Convención en Geomecánica:

Números (+) indican compresión
 Números (-) indican tensión

(+Los esfuerzos en la corteza son siempre compresivos)









- ¿Cómo es en la corteza terrestre?



En la corteza terrestre

Stress map displays the orientation of maximum horizontal stress S_{Hmax}

Stress Indicator


-  focal mechanism
-  borehole breakout
-  drilling induced fracture
-  hydraulic fracturing
-  geological indicator
-  overcoring


Data Quality

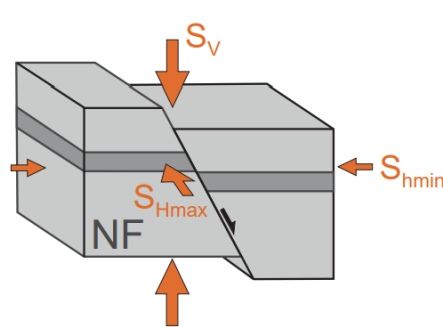
- A ——— S_{Hmax} is within $\pm 15^\circ$
- B ——— S_{Hmax} is within $\pm 20^\circ$
- C ——— S_{Hmax} is within $\pm 25^\circ$

Stress Regime (black denotes unknown)

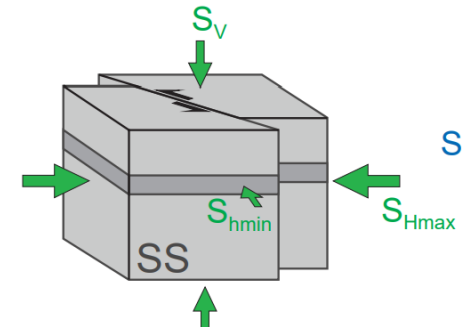
 Normal faulting

 Strike-slip faulting

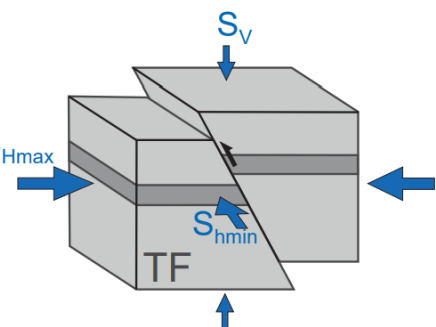
 Thrust faulting



$$S_V > S_{Hmax} > S_{hmin}$$

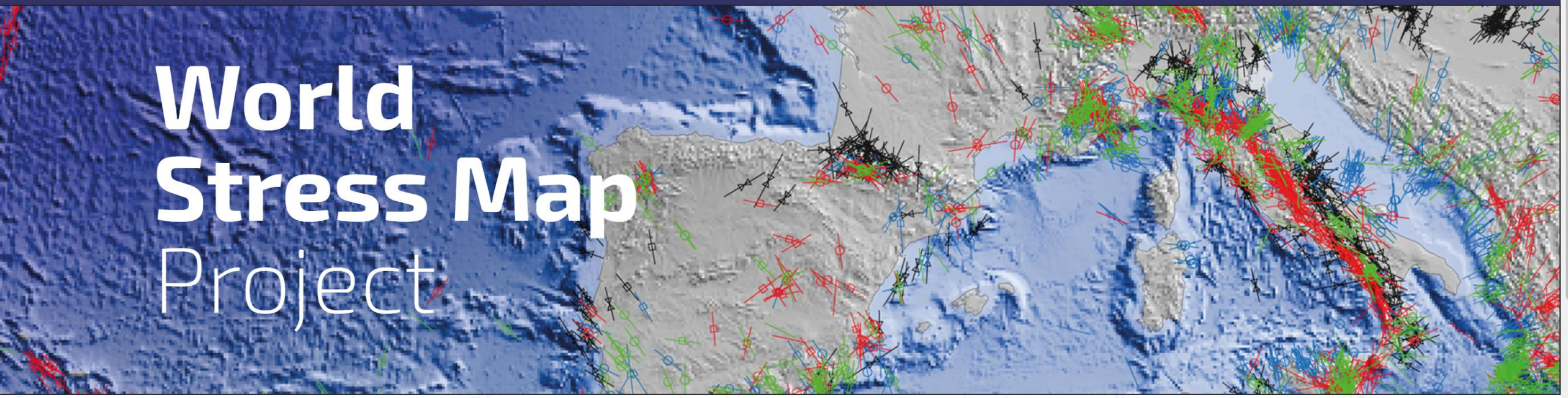


$$S_{Hmax} > S_V > S_{hmin}$$



$$S_{Hmax} > S_{hmin} > S_V$$

Modelo de Anderson

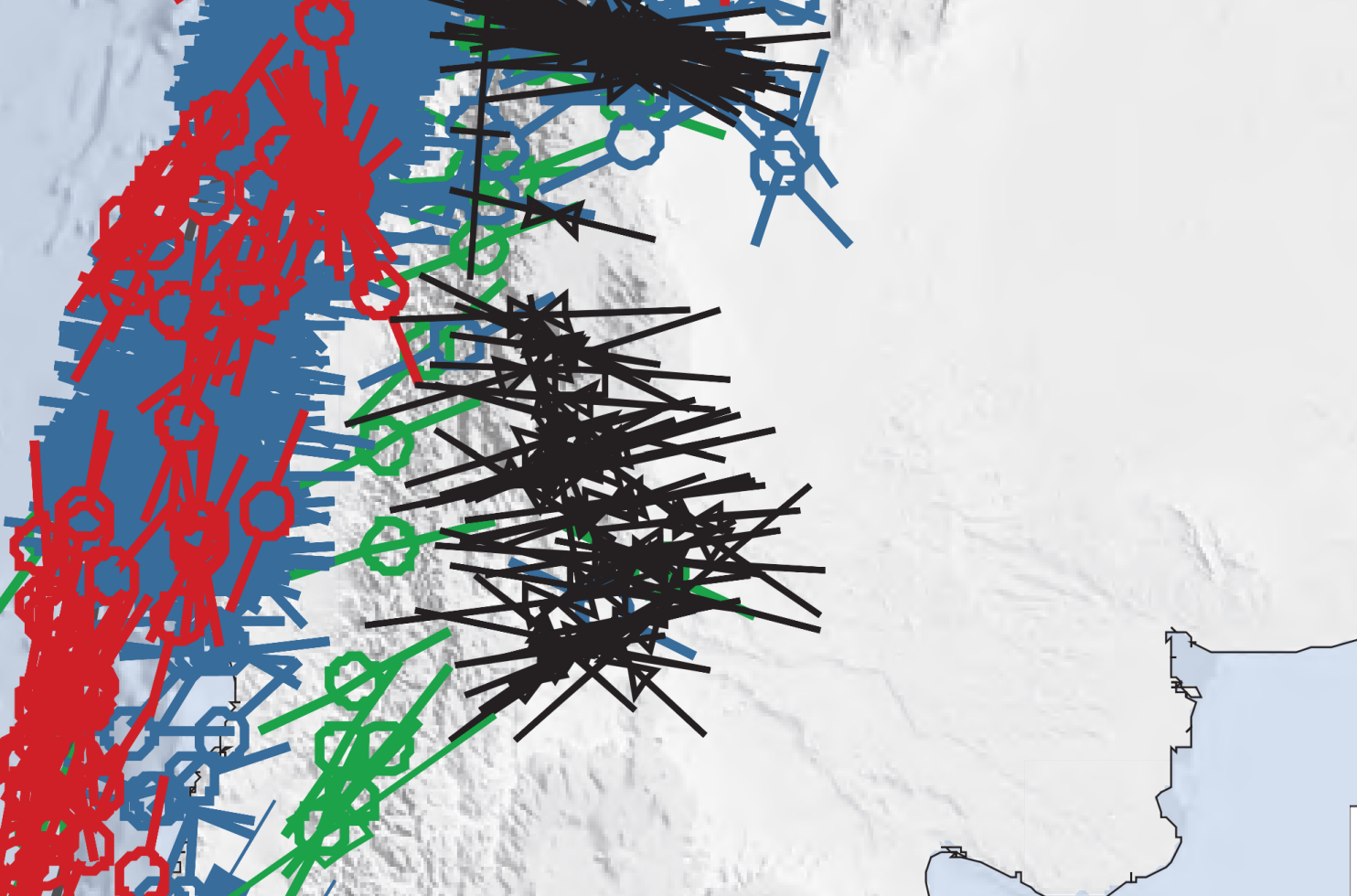


World Stress Map Project







WSM Database Release 2025

The World Stress Map database release 2025 can be [downloaded here](#) as a file with comma separated fields and as an Excel spreadsheet. The database is public and thus the download and usage is free of charge. Details on the database structure and the individual fields are explained in the [WSM Technical Report 25-01](#). When you use the WSM database release 2025 please cite it as:




- Heidbach, O., Rajabi, M., Di Giacomo, D., Harris, J., Lammers, S., Morawietz, S., Pierdominici, S., Reiter, K., von Specht, S., Storchak, D., and Ziegler, M. O. (2025). World Stress Map Database Release 2025, GFZ Data Services, <http://doi.org/10.5880/WSM.2025.001>



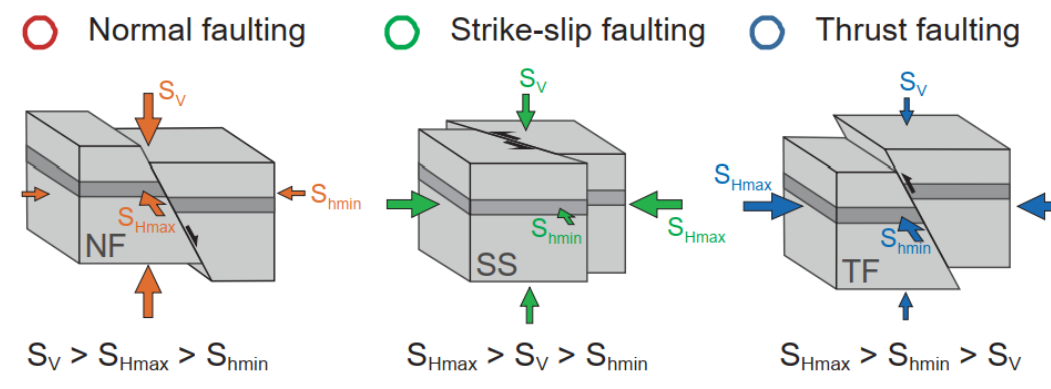
Stress Indicator

-  focal mechanism
-  borehole breakout
-  drilling induced fracture
-  hydraulic fracturing
-  geological indicator
-  overcoring

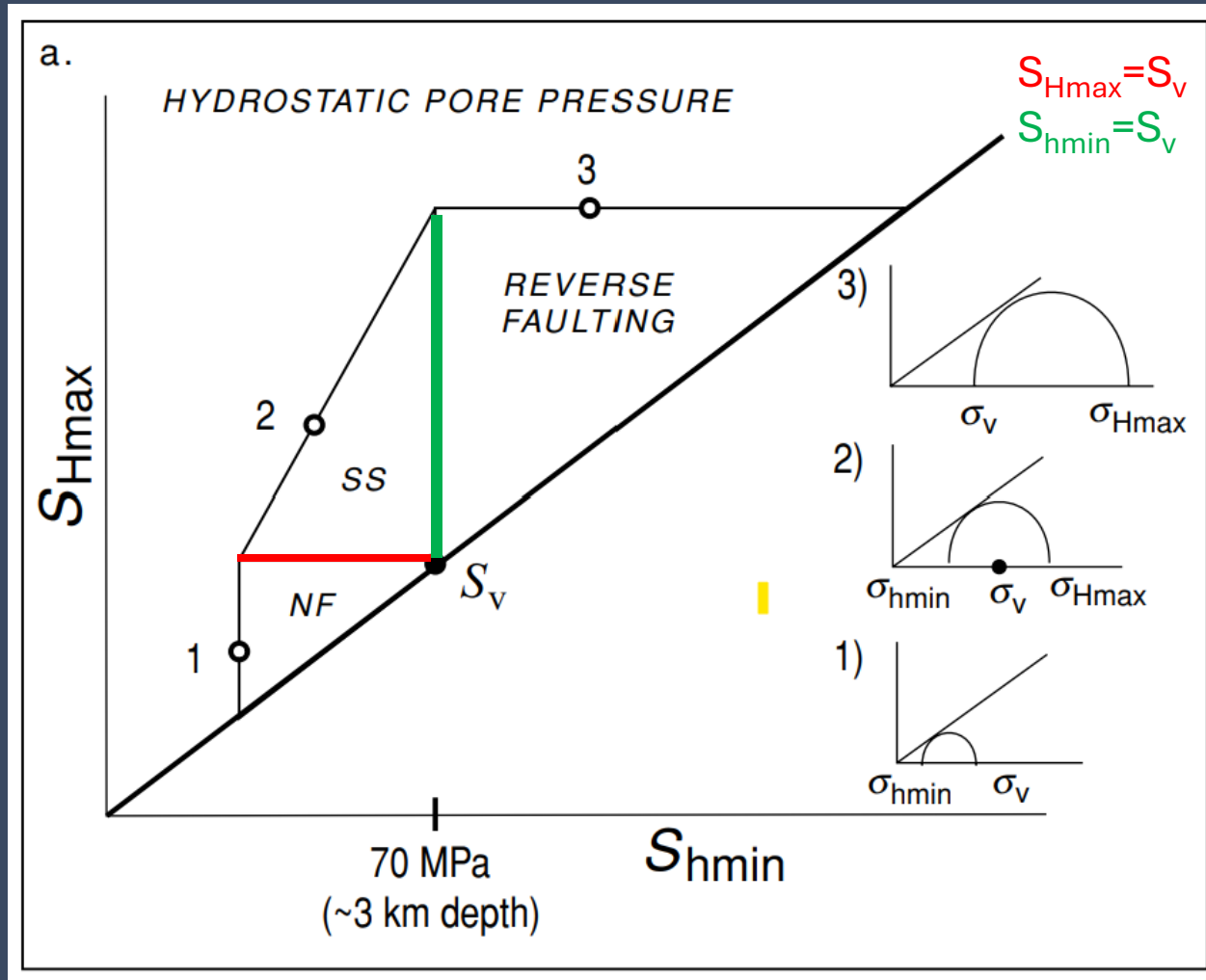
Data Quality

- A  S_{Hmax} is within $\pm 15^\circ$
- B  S_{Hmax} is within $\pm 20^\circ$
- C  S_{Hmax} is within $\pm 25^\circ$

Stress Regime (black denotes unknown)



Polígono de Esfuerzos (Zoback, Reservoir Geomechanics)



Profundidad: 3km
 Densidad sobrecarga: 2.6 g/cm³
 $S_v = 70$ MPa
 Presión poral normal
 $\mu = 0.6$

¿Qué
necesitamos
para construir
el modelo
geomecánico
(MEM)?

Esfuerzos: Magnitudes y orientaciones

S_v	Esfuerzo vertical
S_{Hmax}	Esfuerzo horizontal máximo
S_{hmin}	Esfuerzo horizontal mínimo

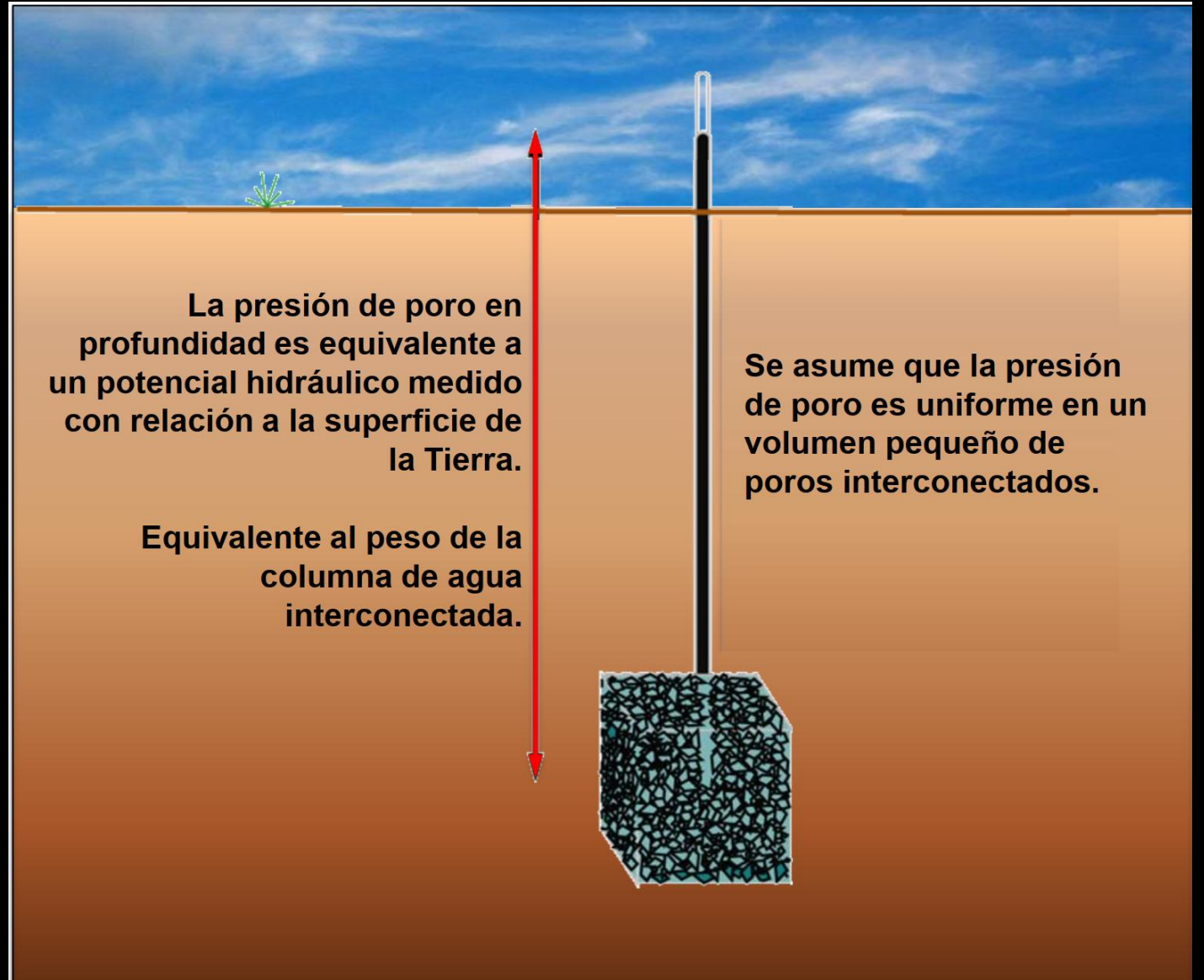
Presión poral

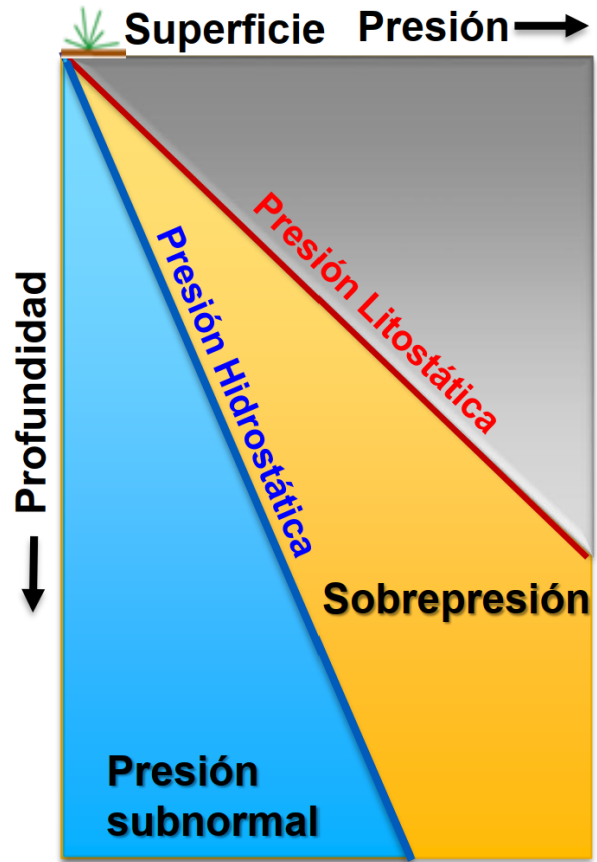
P_p	Presión de poro
-------	-----------------

Propiedades Mecánicas de las rocas

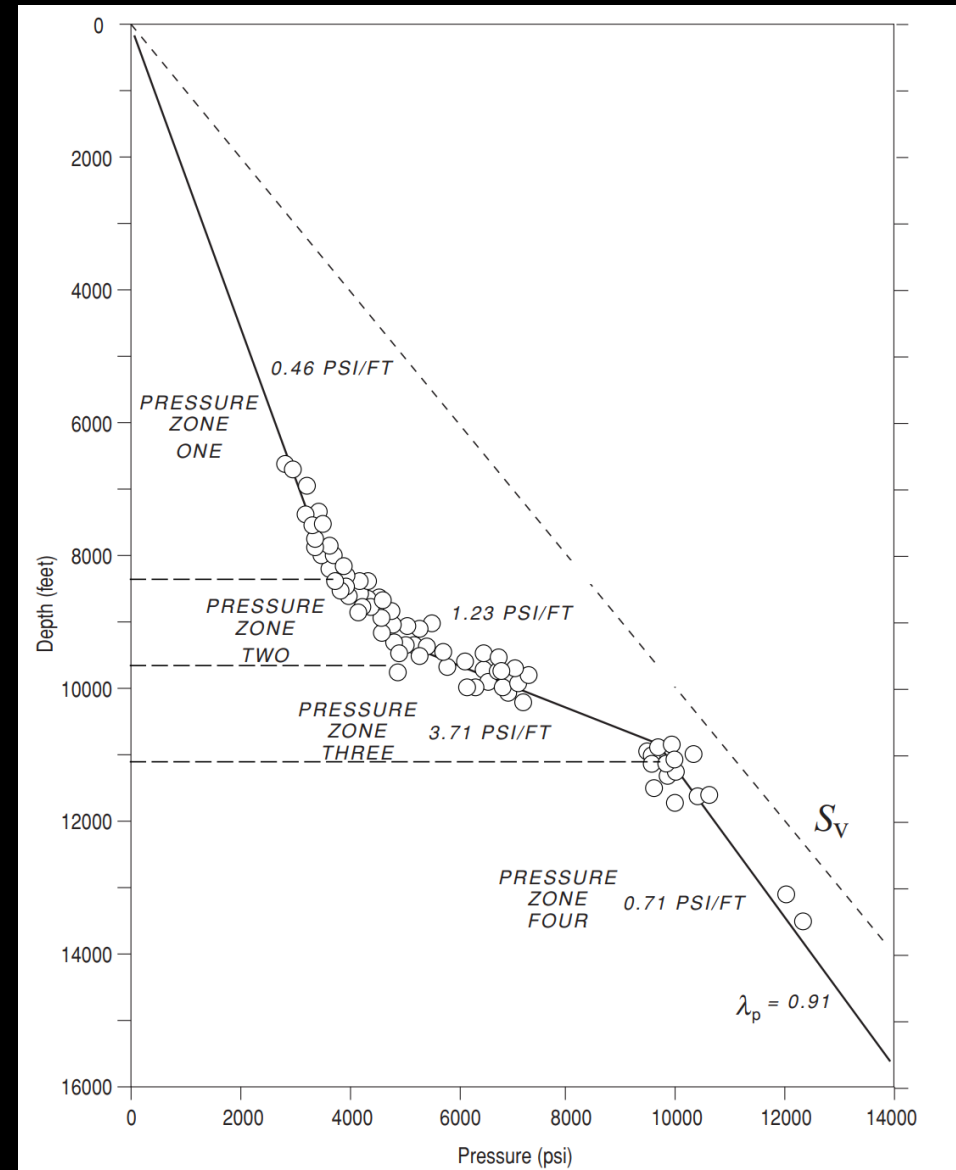
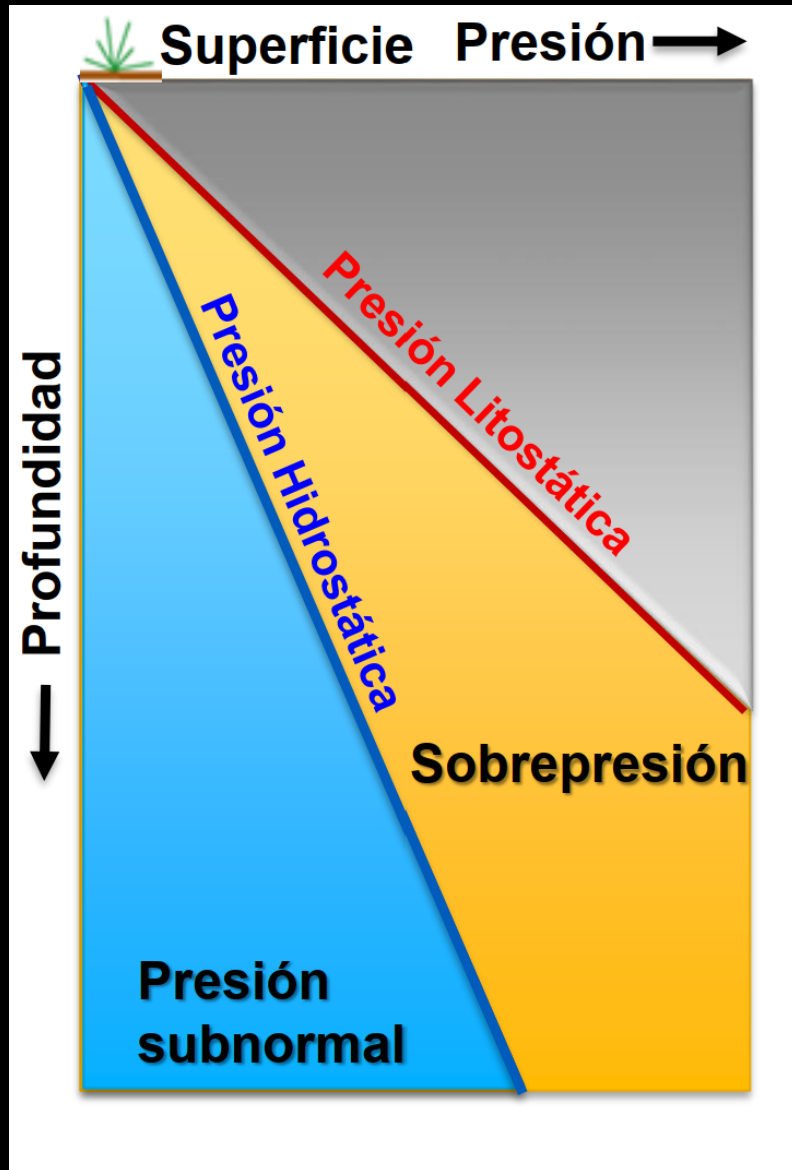
PM	Propiedades Mecánicas: UCS, Cohesión, Fricción, Módulos elásticos
----	--

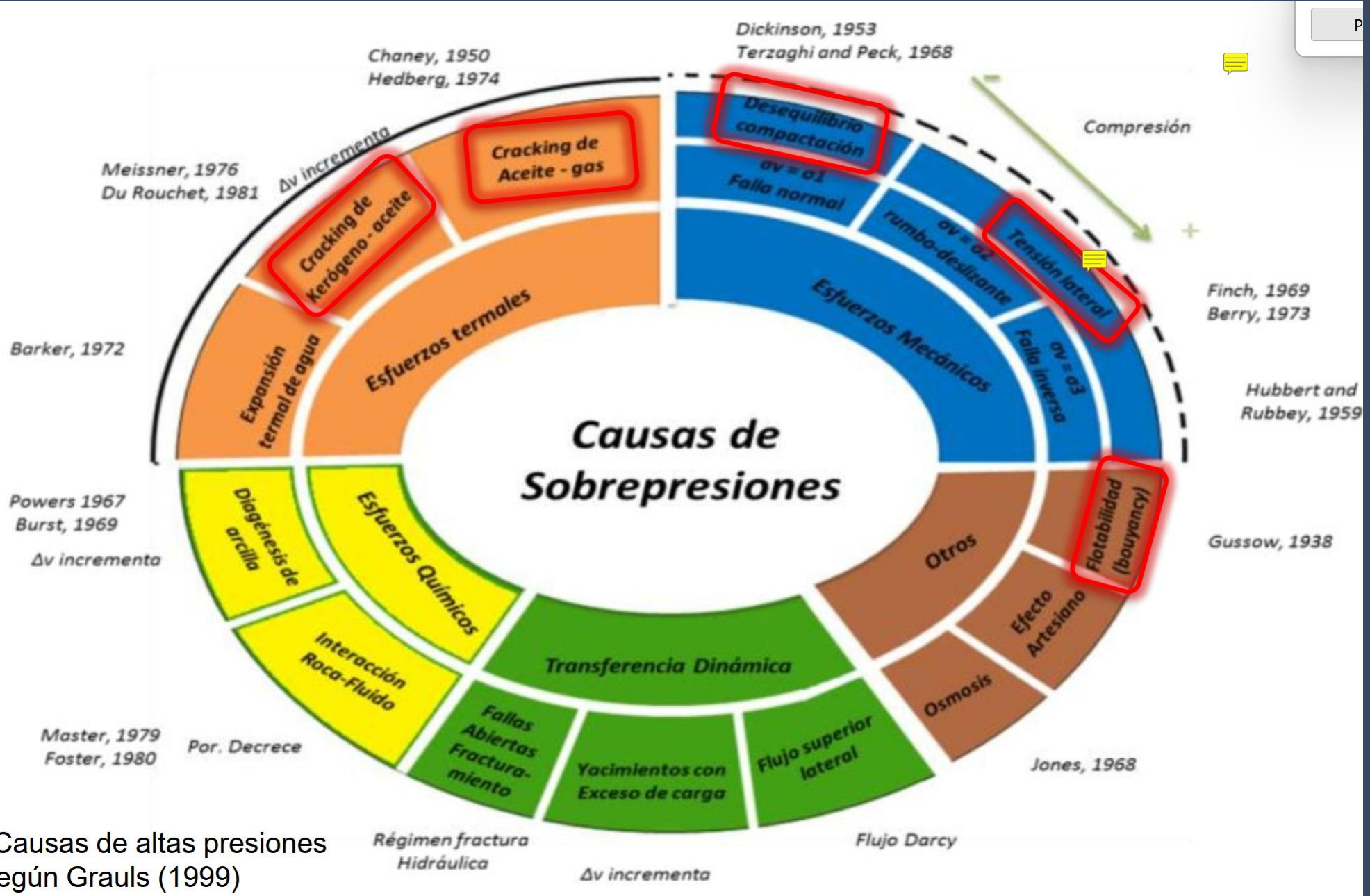
Presión de poro



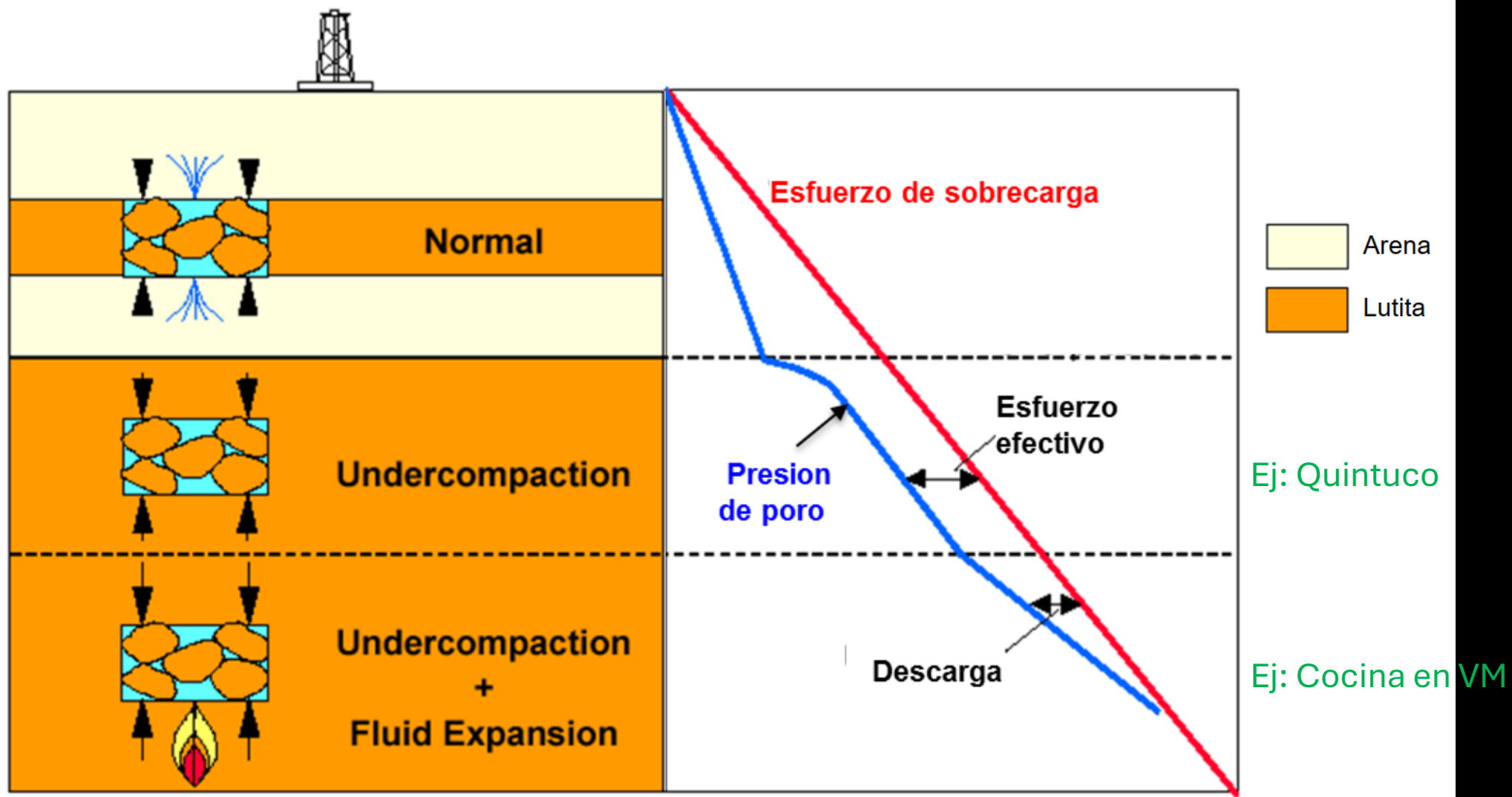


$$P_p^{\text{hydro}} \equiv \int_0^z \rho_w(z) g dz \approx \rho_w g z_w$$

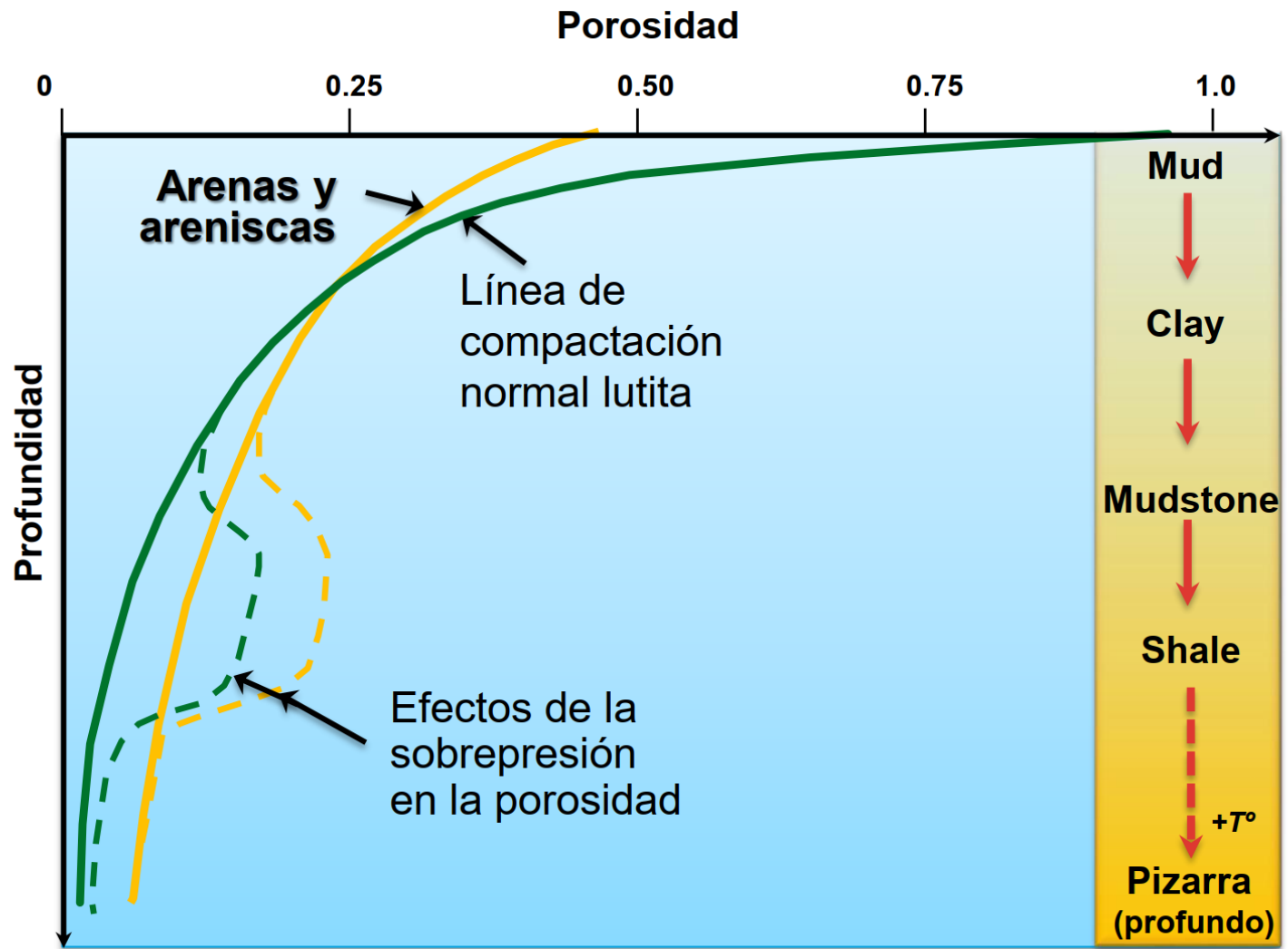




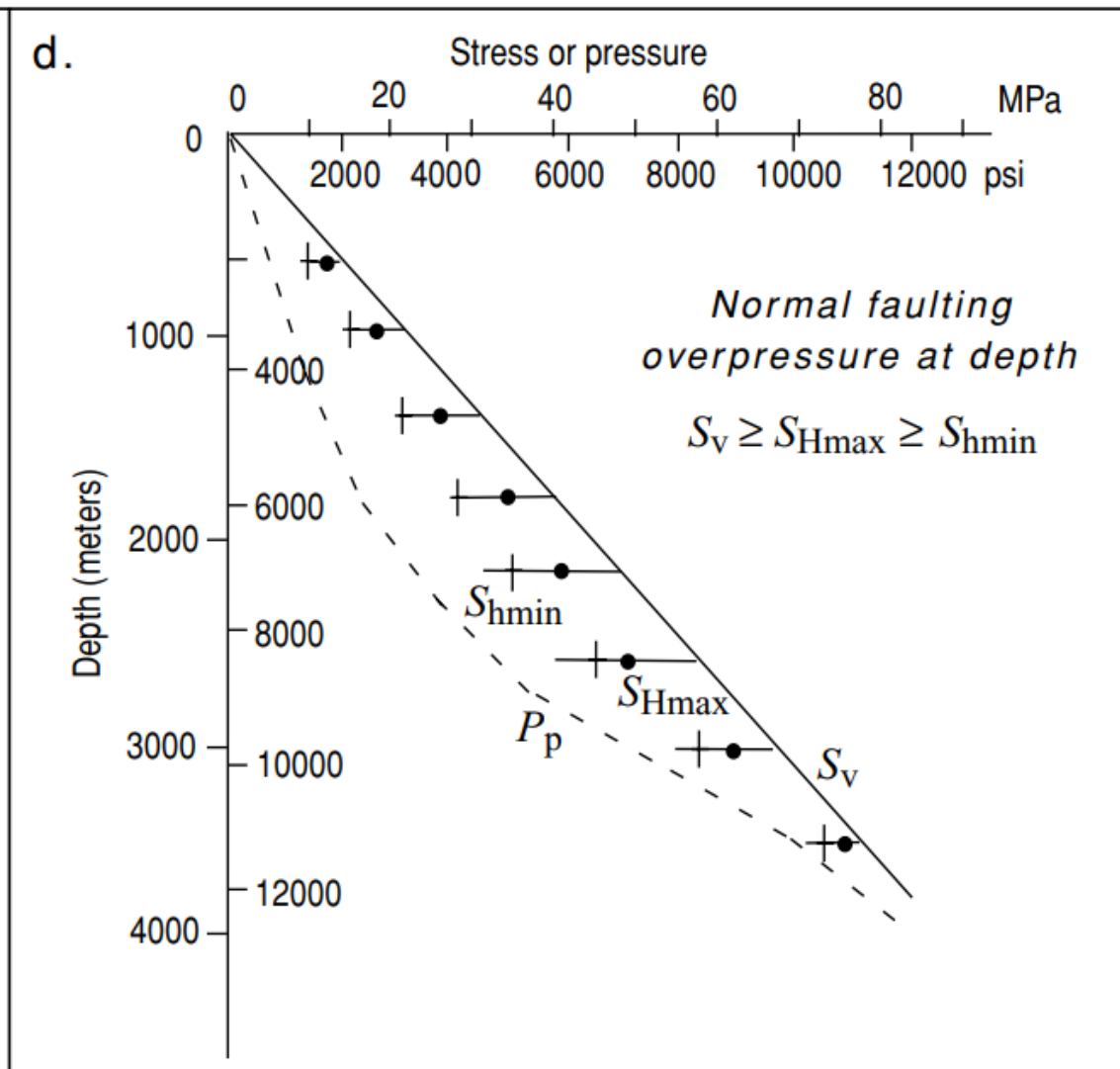
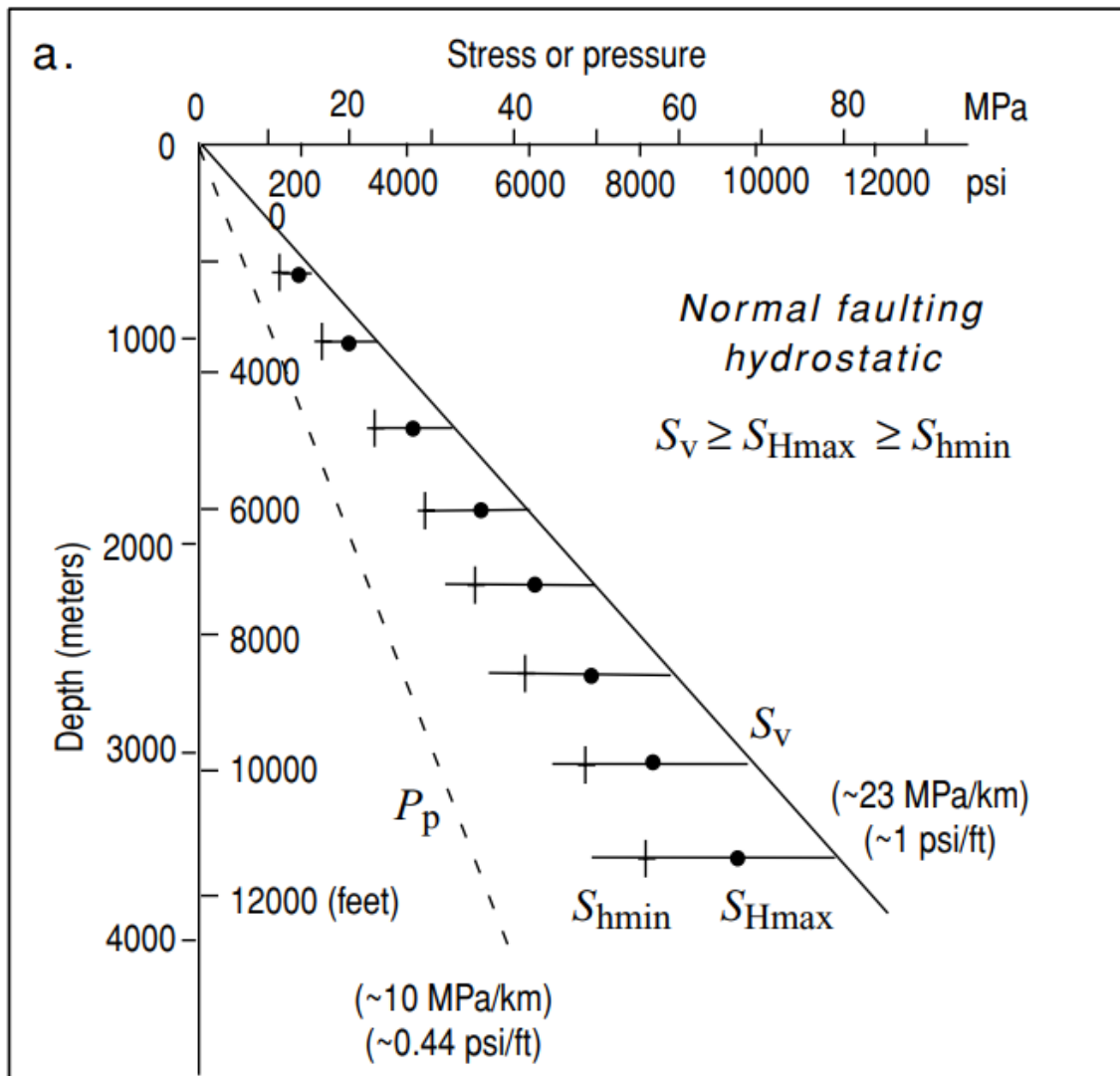
*Causas de altas presiones según Grauls (1999)

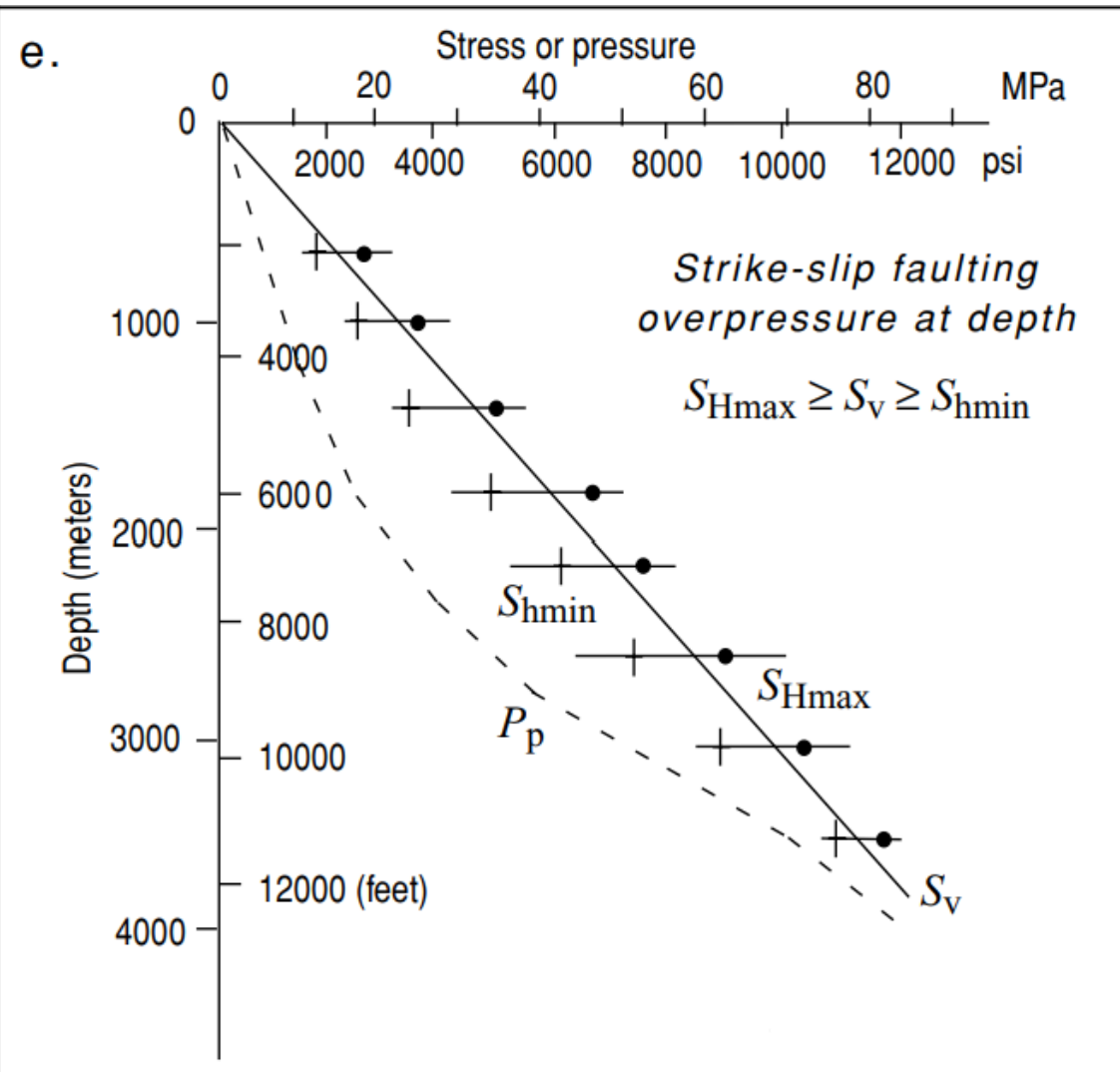
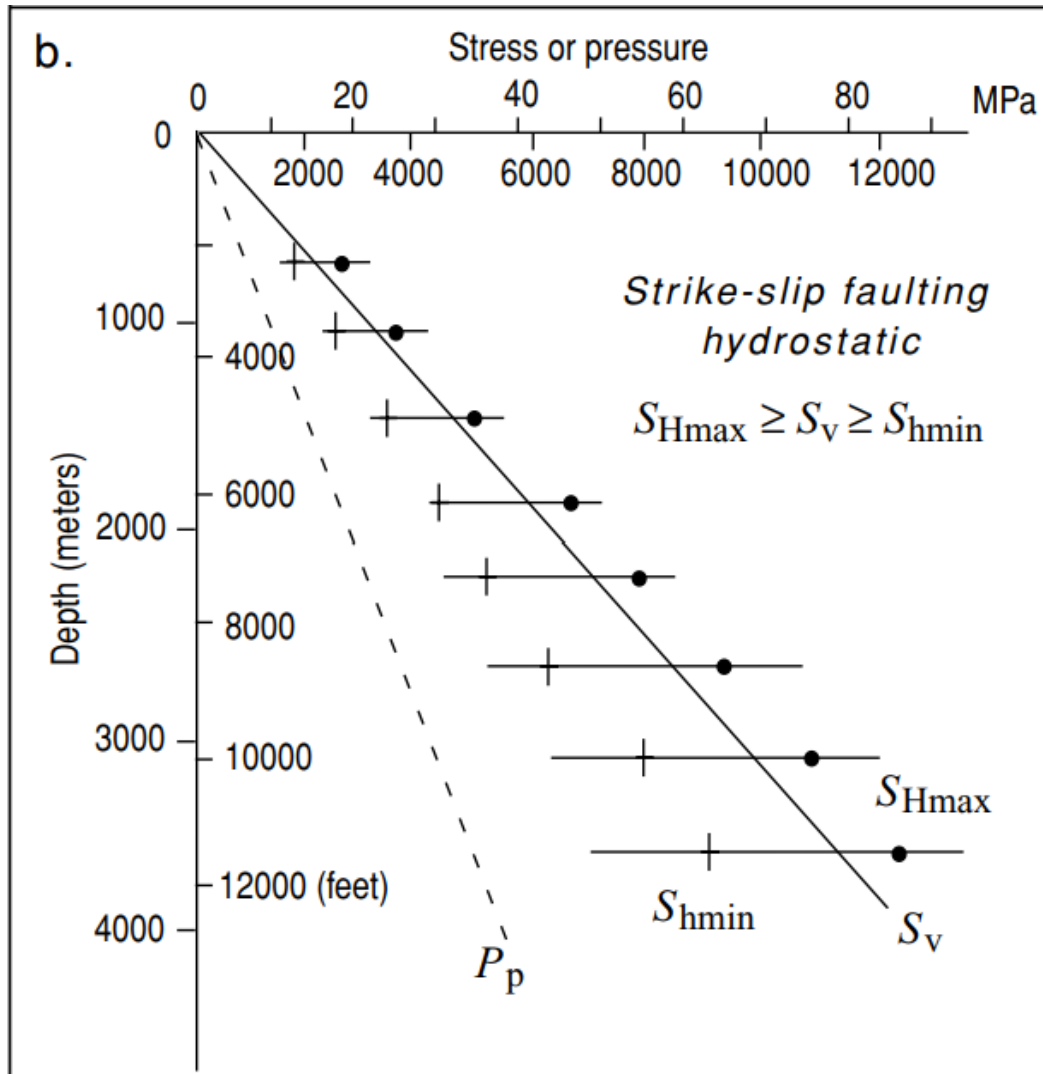


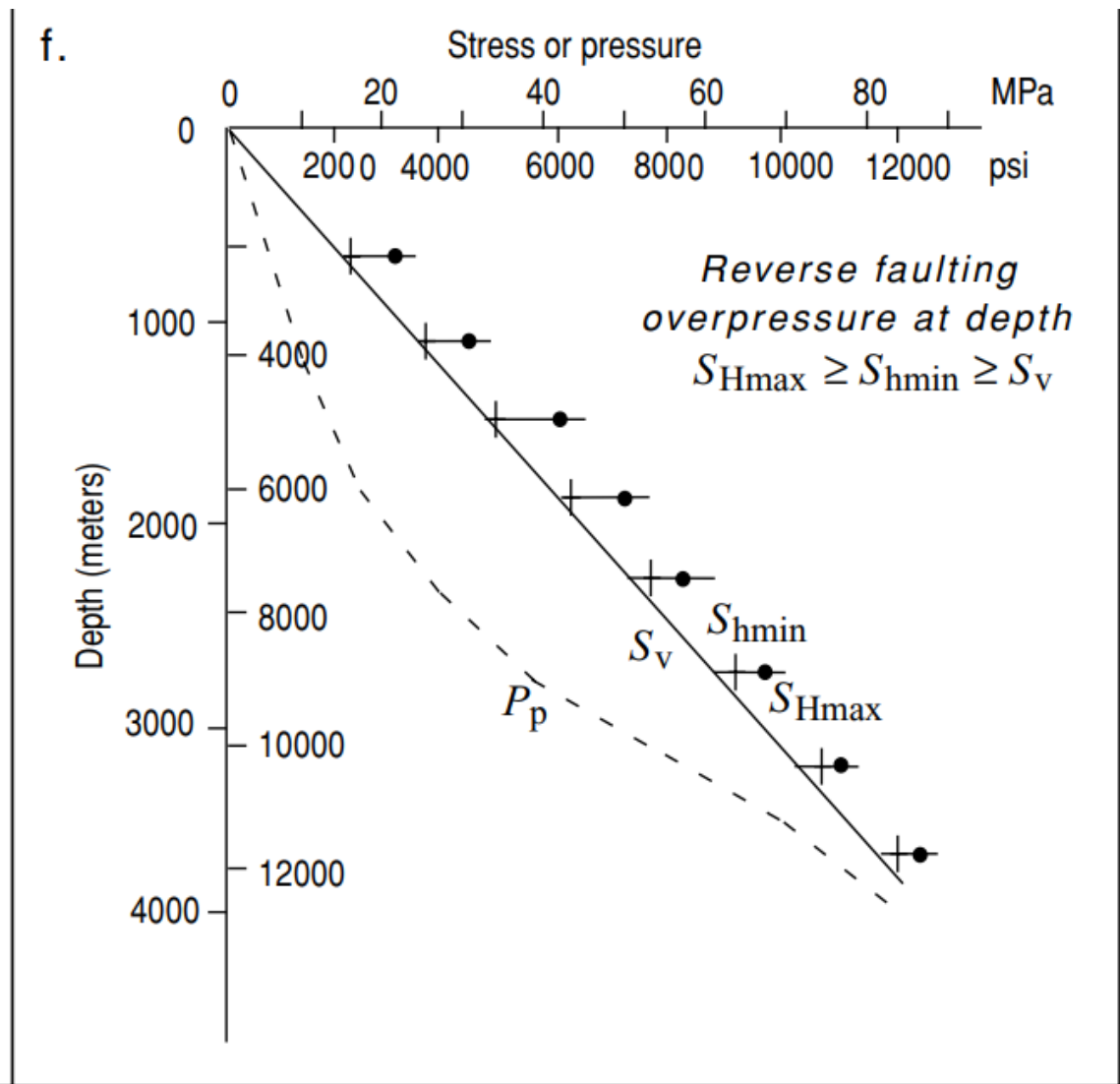
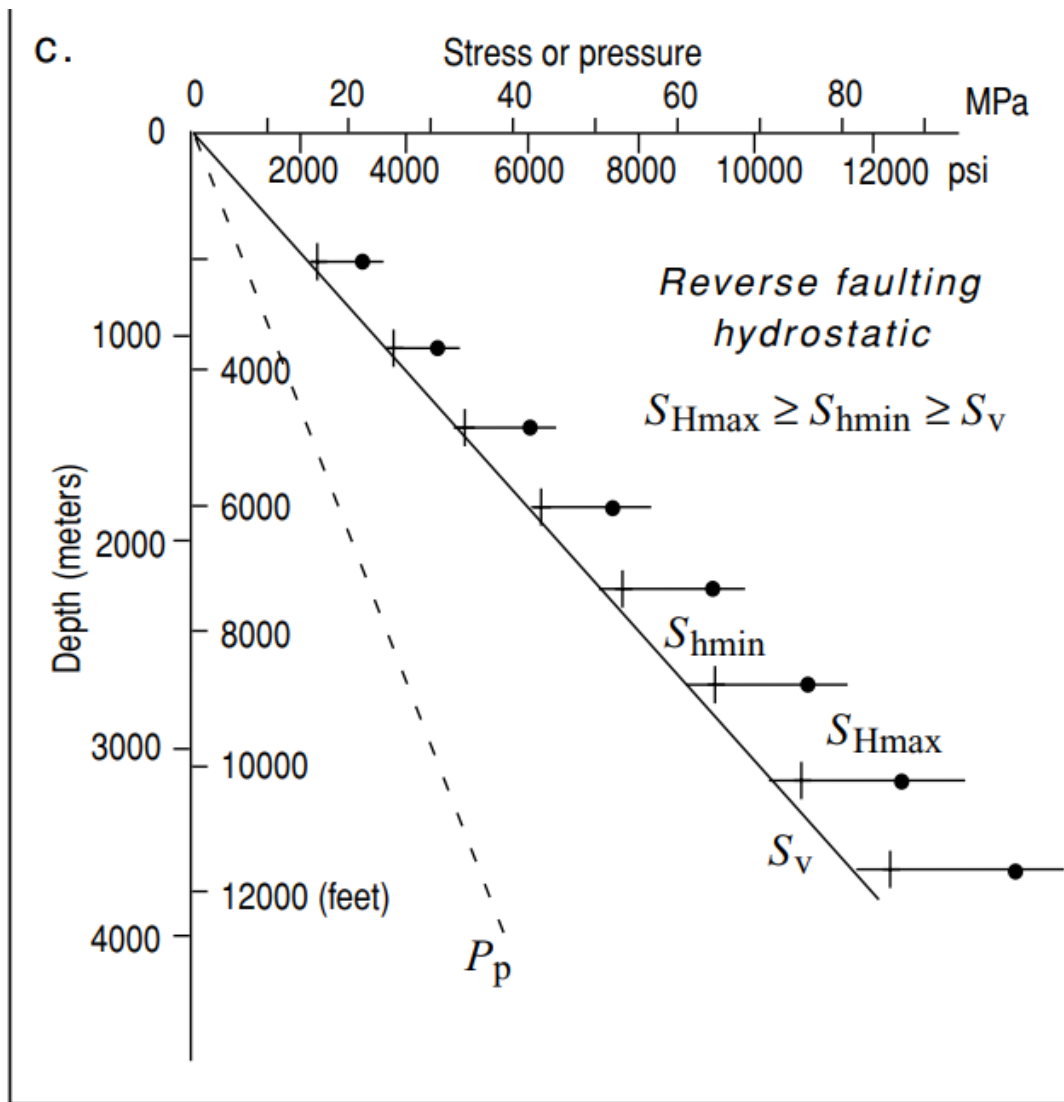
(Bowers G. L., 2001)



(Fuente: M Dusseault)

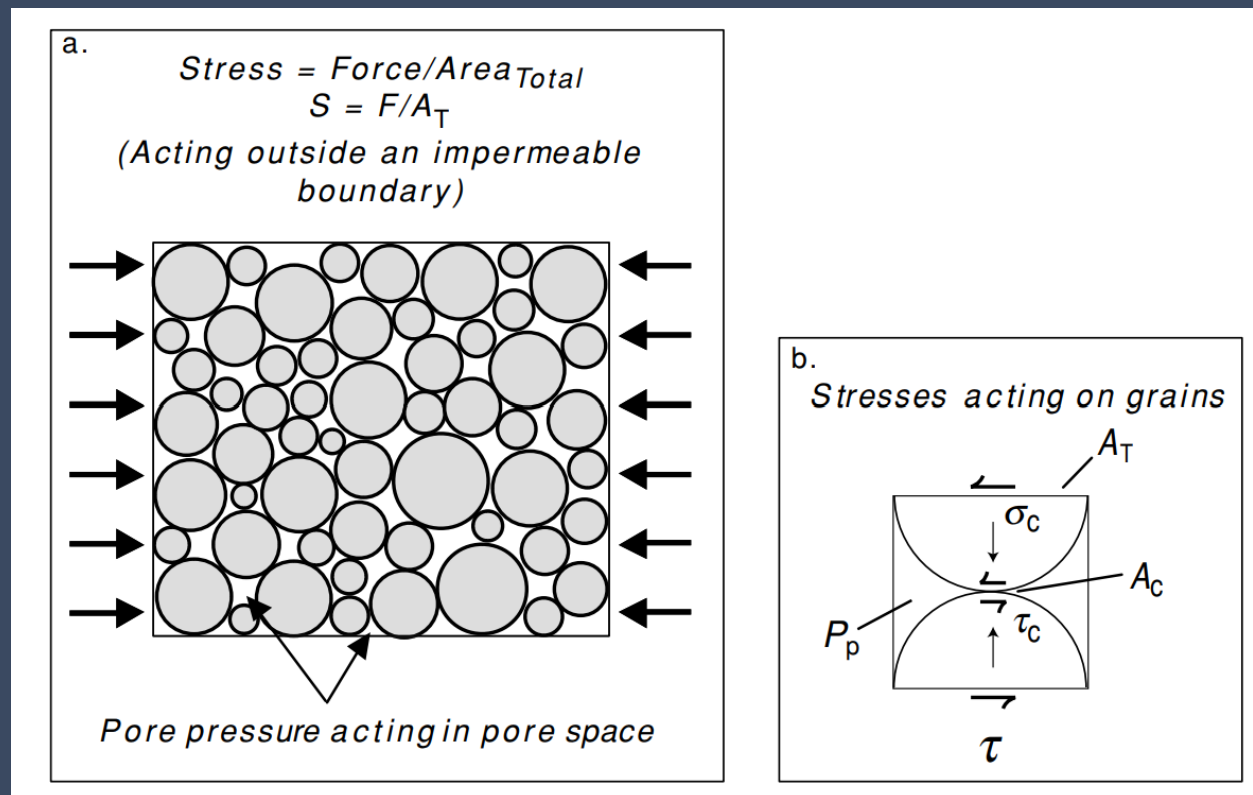






Efecto de la presión poral en el esfuerzo soportado por los granos

$$\sigma_g = S_{ii} - (1 - a)P_p = S_{ii} - P_p$$



¿Qué
necesitamos
para construir
el modelo
geomecánico
(MEM)?

Esfuerzos: Magnitudes y orientaciones

S_v	Esfuerzo vertical
S_{Hmax}	Esfuerzo horizontal máximo
S_{hmin}	Esfuerzo horizontal mínimo

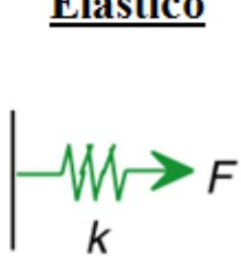
Presión poral

P_p	Presión de poro
-------	-----------------

Propiedades Mecánicas de las rocas

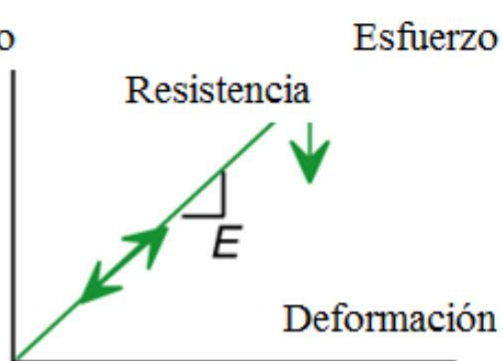
PM	Propiedades Mecánicas: UCS, Cohesión, Fricción, Módulos elásticos
----	--

Elástico



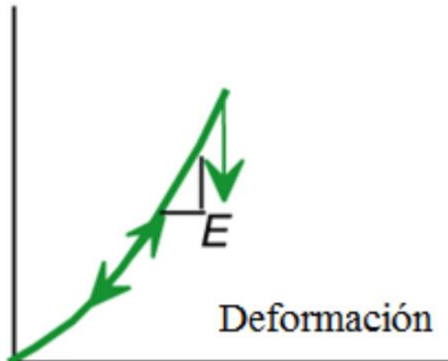
Conceptual

Esfuerzo



Idealizado

Esfuerzo



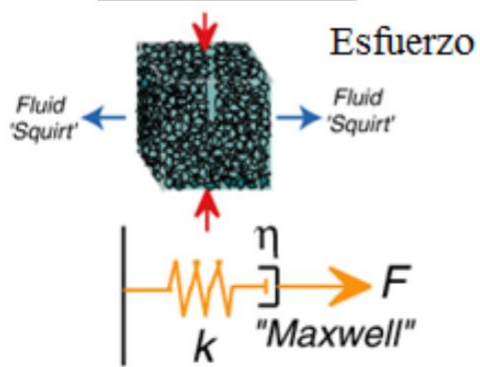
Roca Real

k : constante de resorte

F : Fuerza aplicada

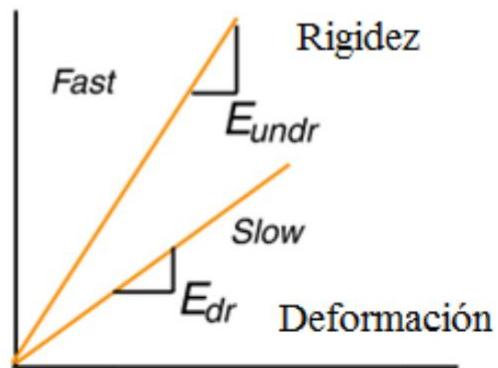
E : Modulo de Young

Por-elástico

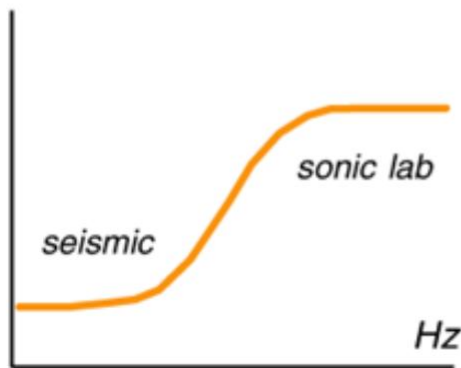


Conceptual

Esfuerzo



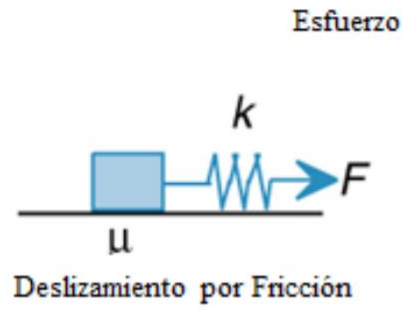
Idealizado



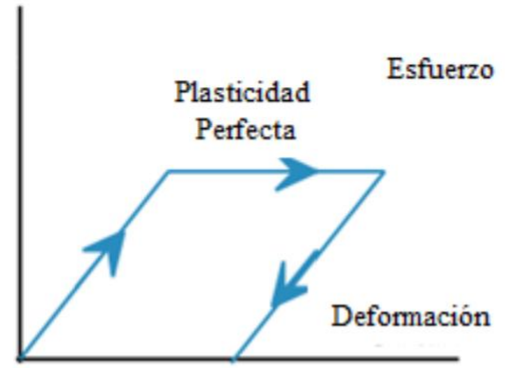
Respuesta de Frecuencia



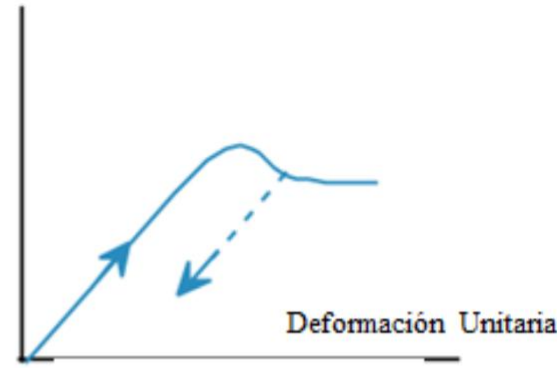
Elasto-Plástico



Conceptual

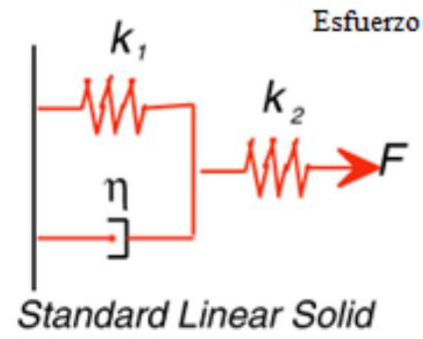


Idealizado

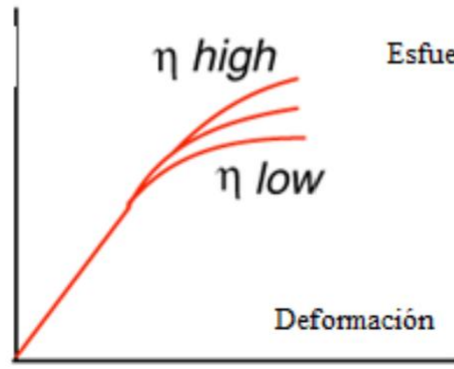


Roca Realista

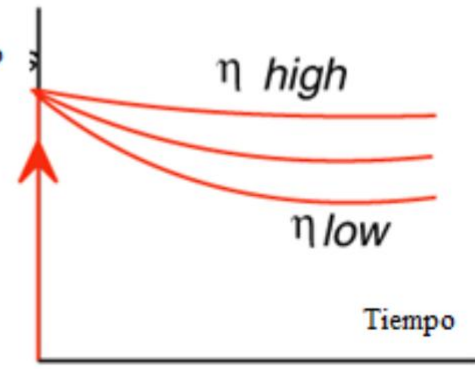
Visco-Elástico



Conceptual



Idealizado



Idealizado

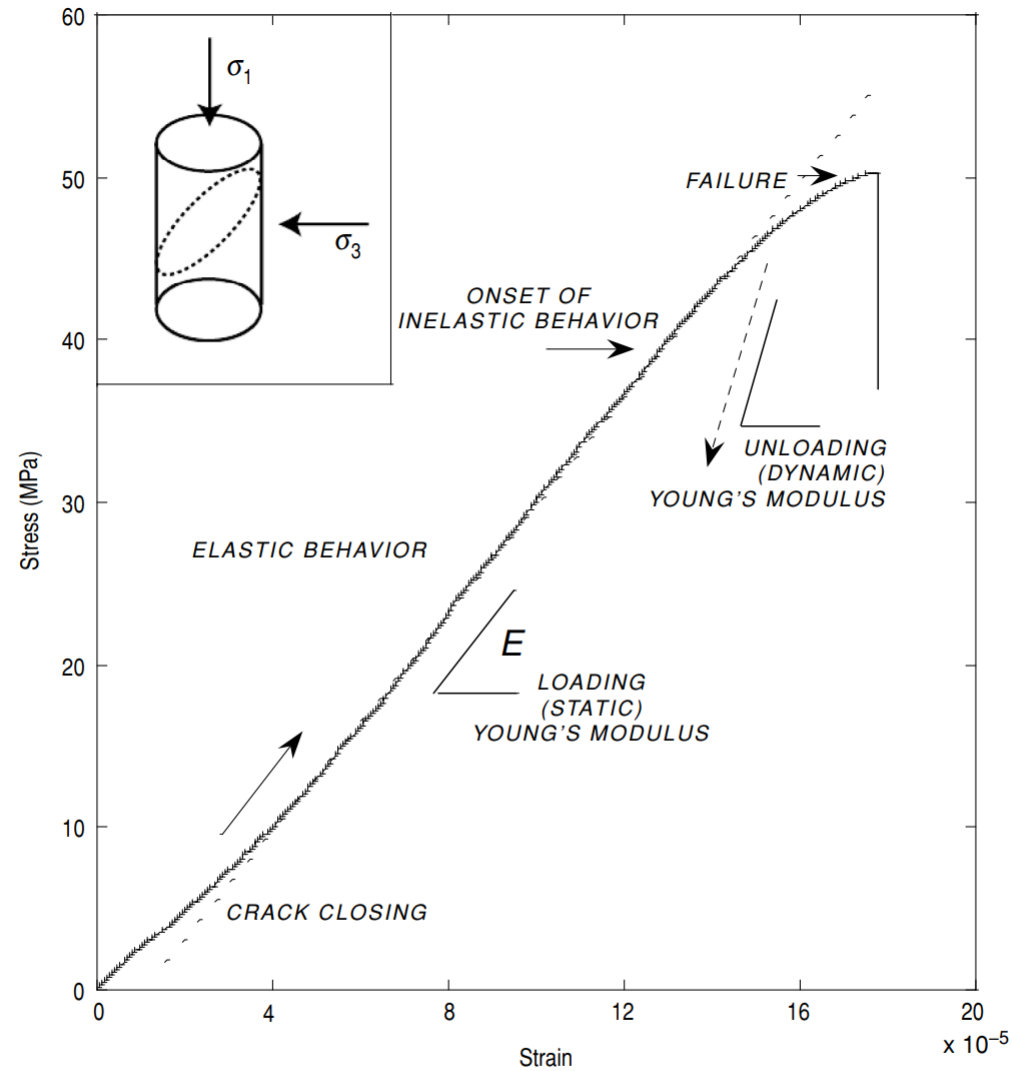


Figure 3.2. Typical laboratory stress–strain data for a well-cemented rock being deformed uniaxially. There is a small degree of crack closure upon initial application of stress followed by linear elastic behavior over a significant range of stresses. Inelastic deformation is seen again just before failure due to damage in the rock.

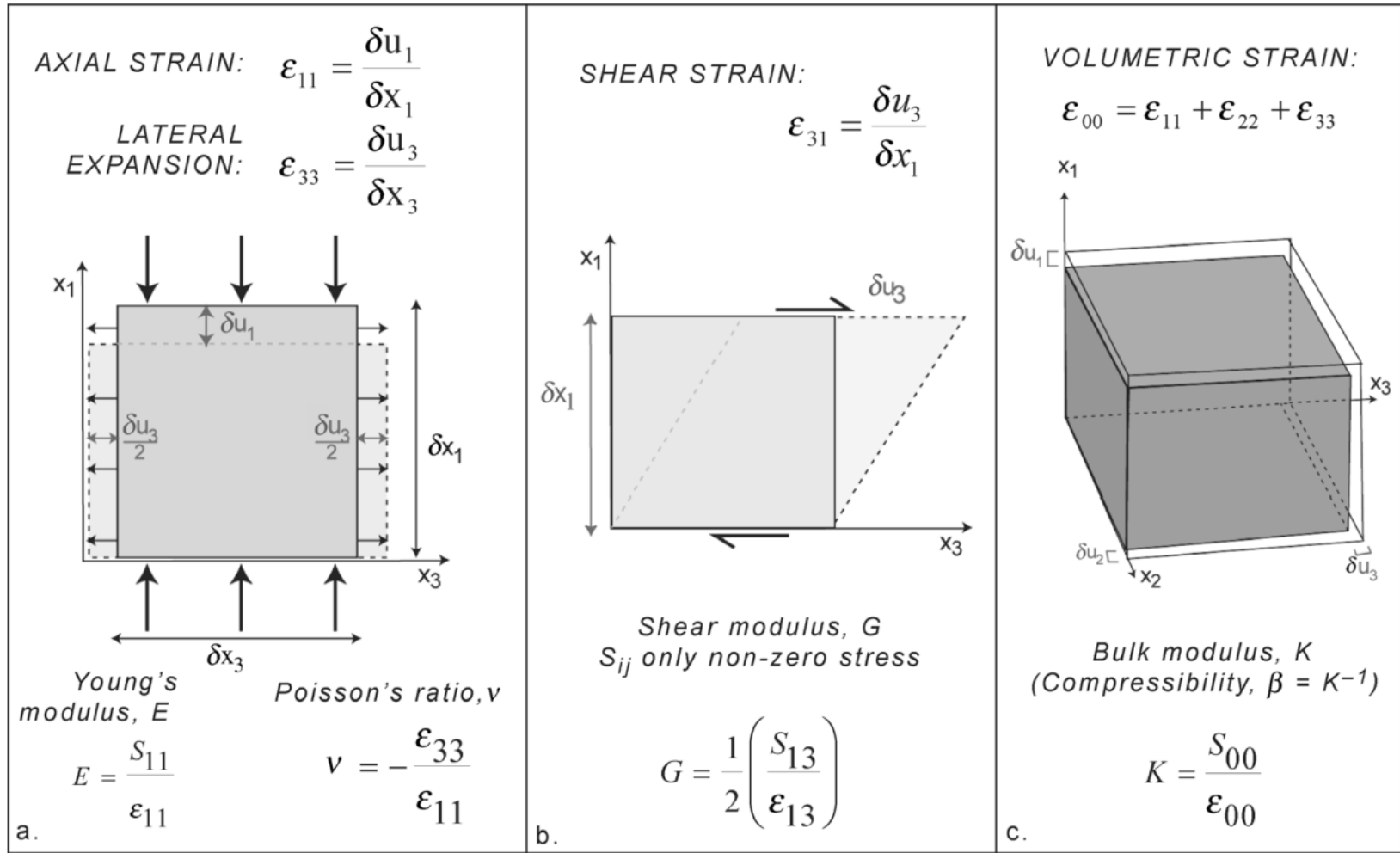
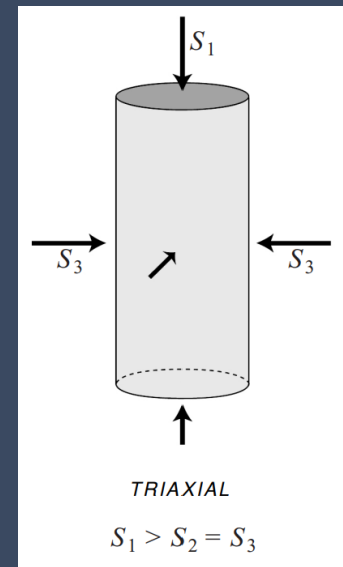
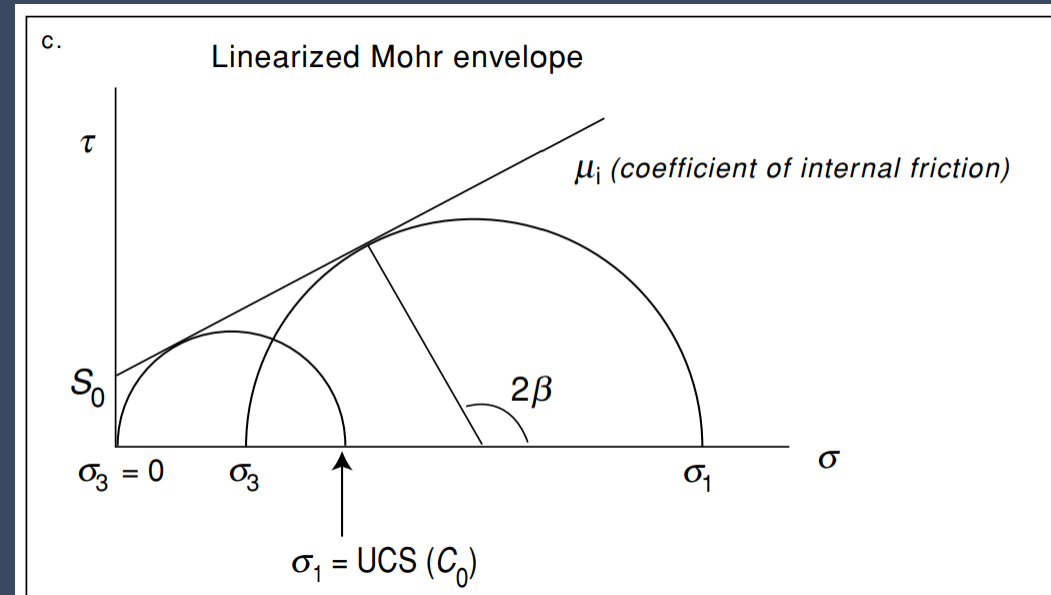
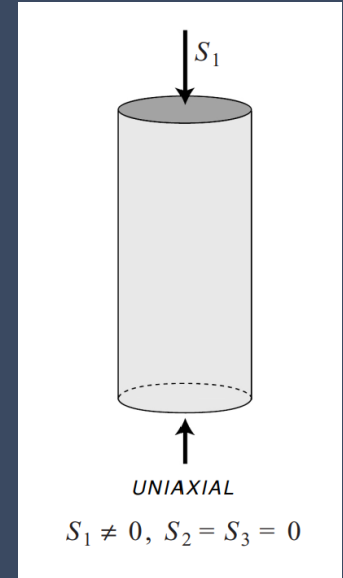
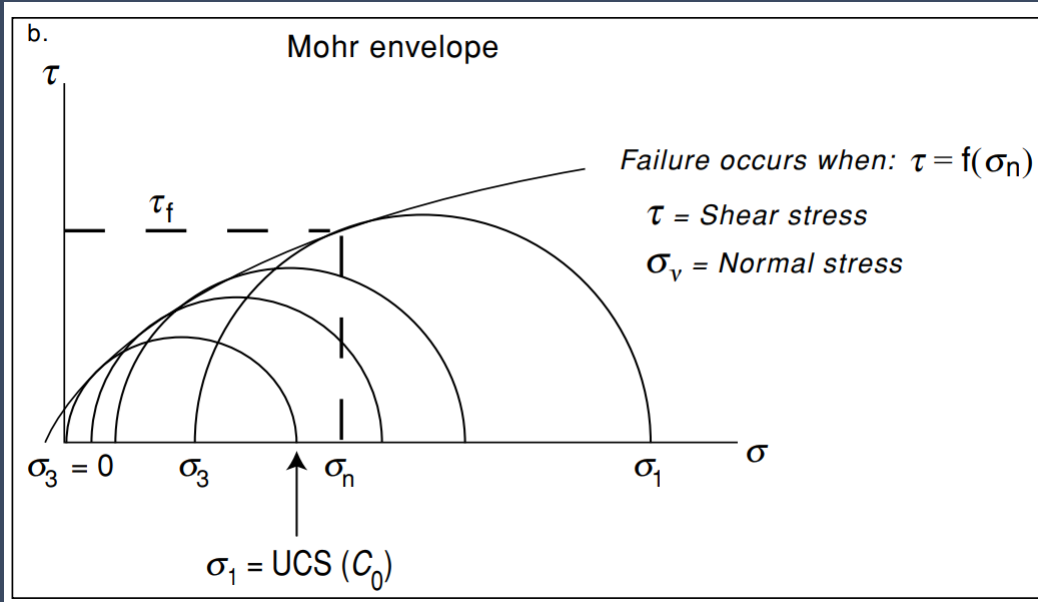
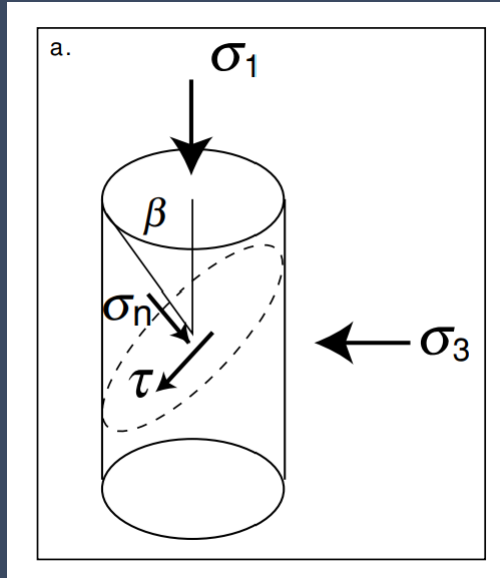
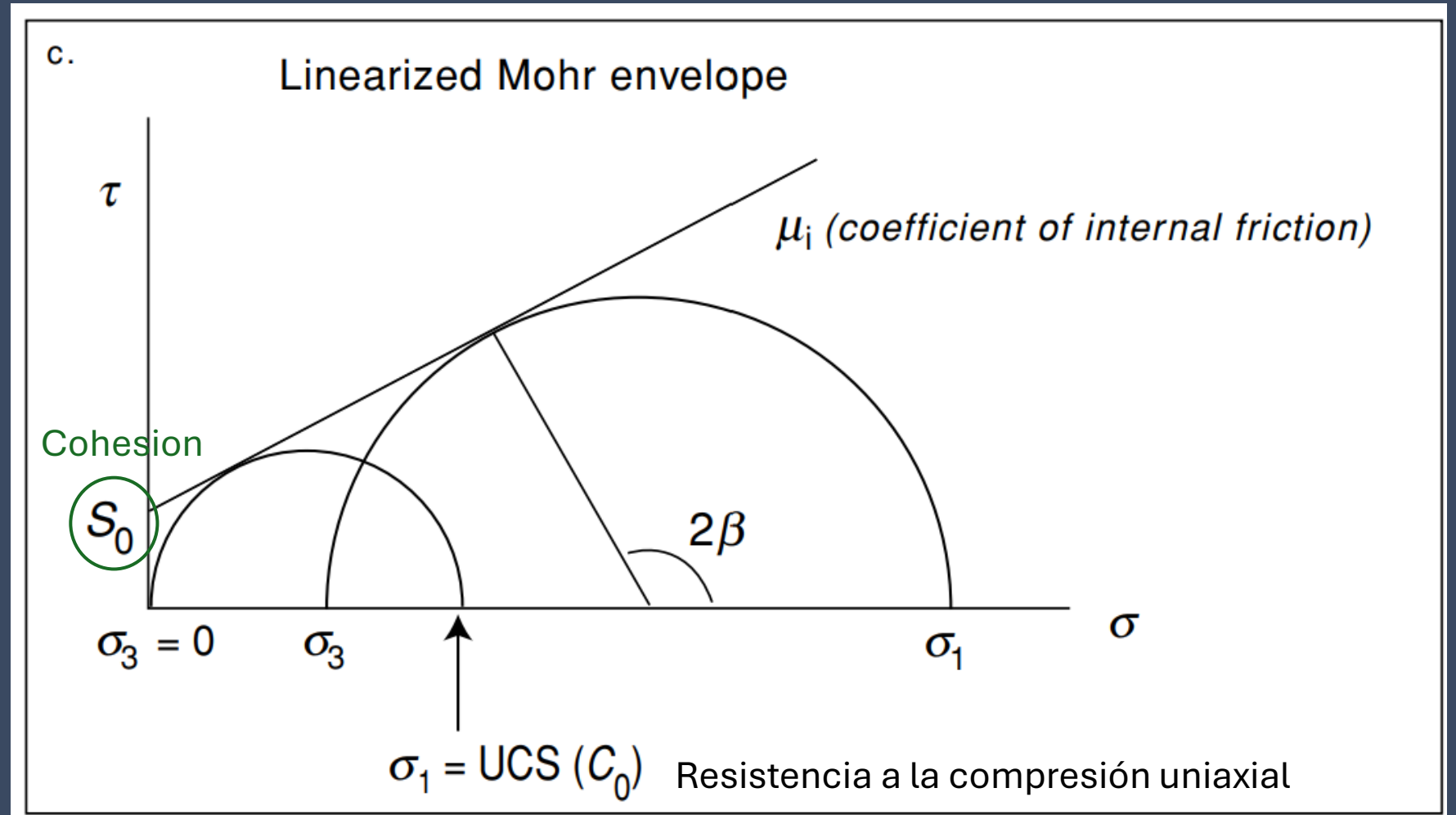
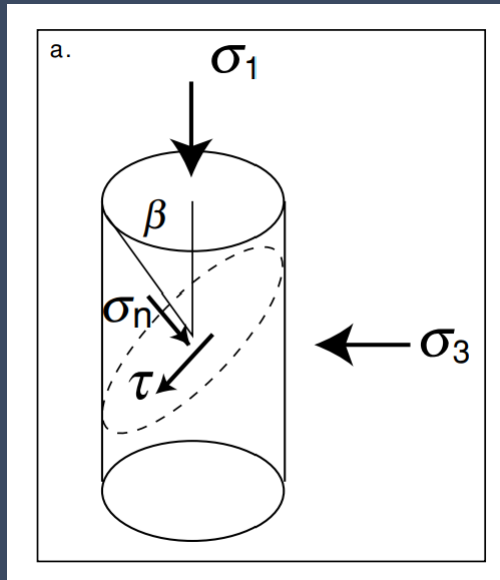
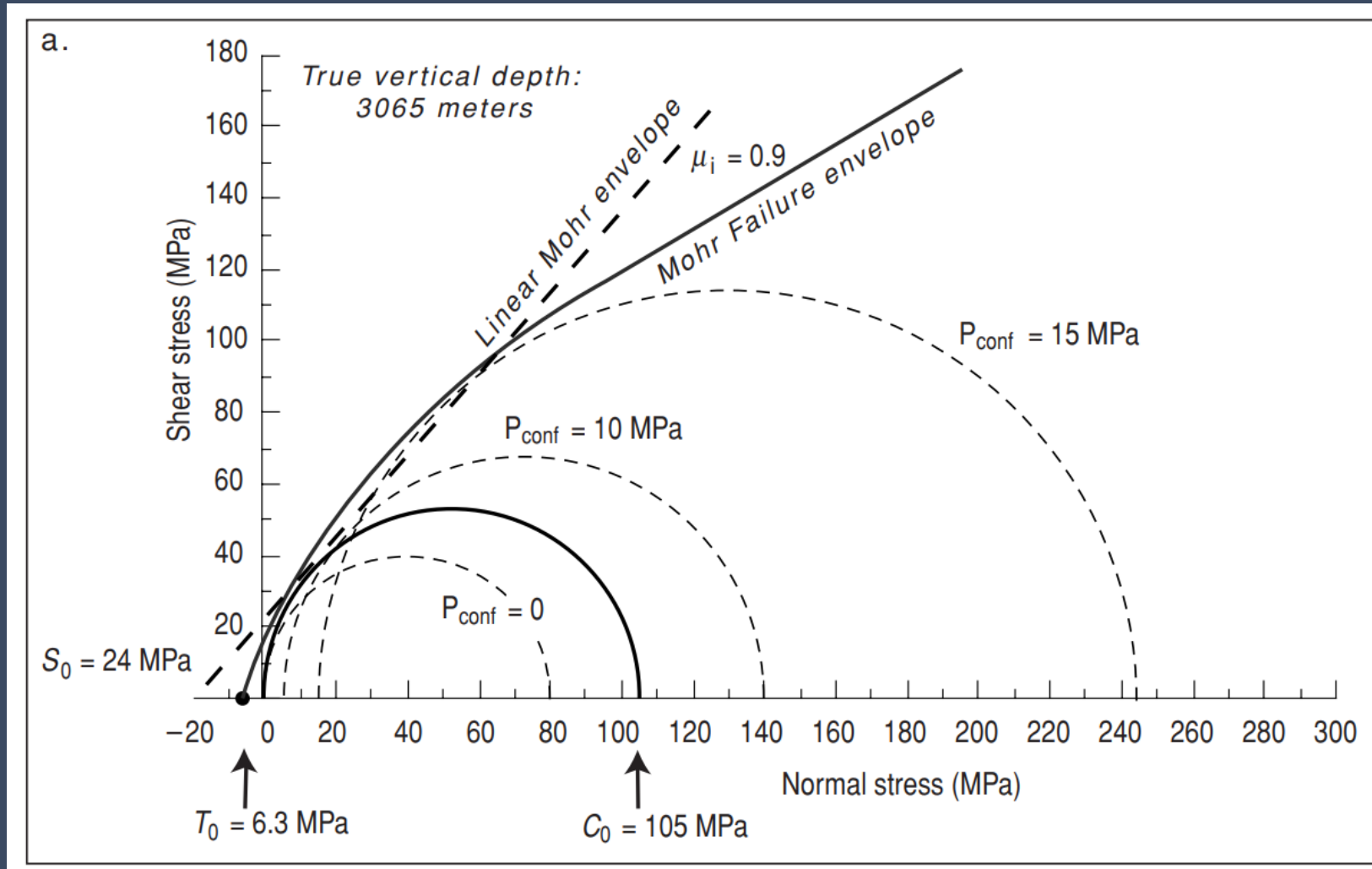


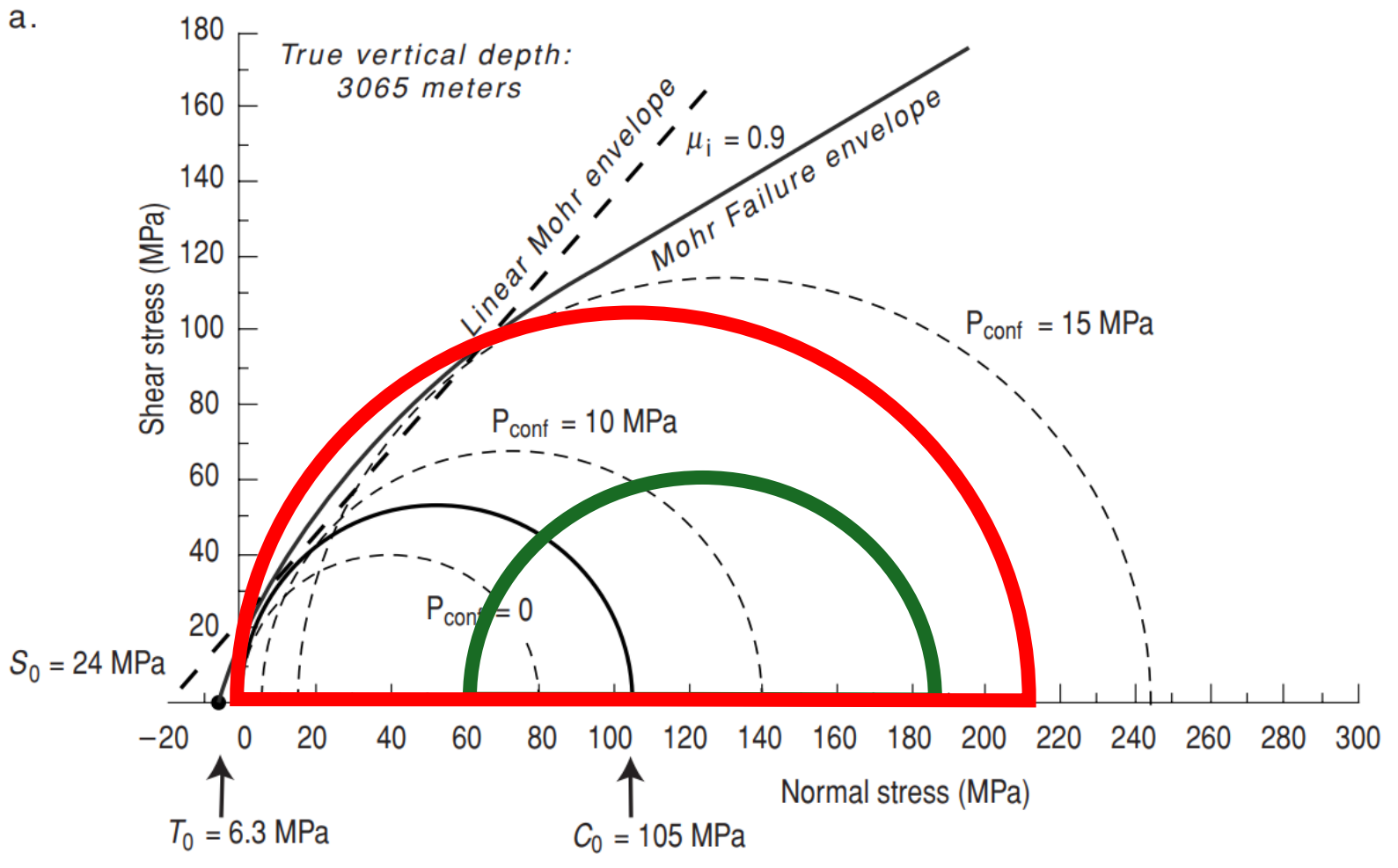
Figure 3.3. Schematic illustration of the relationships between stress, strain and the physical meaning of frequently used elastic moduli in different types of idealized deformation measurements.

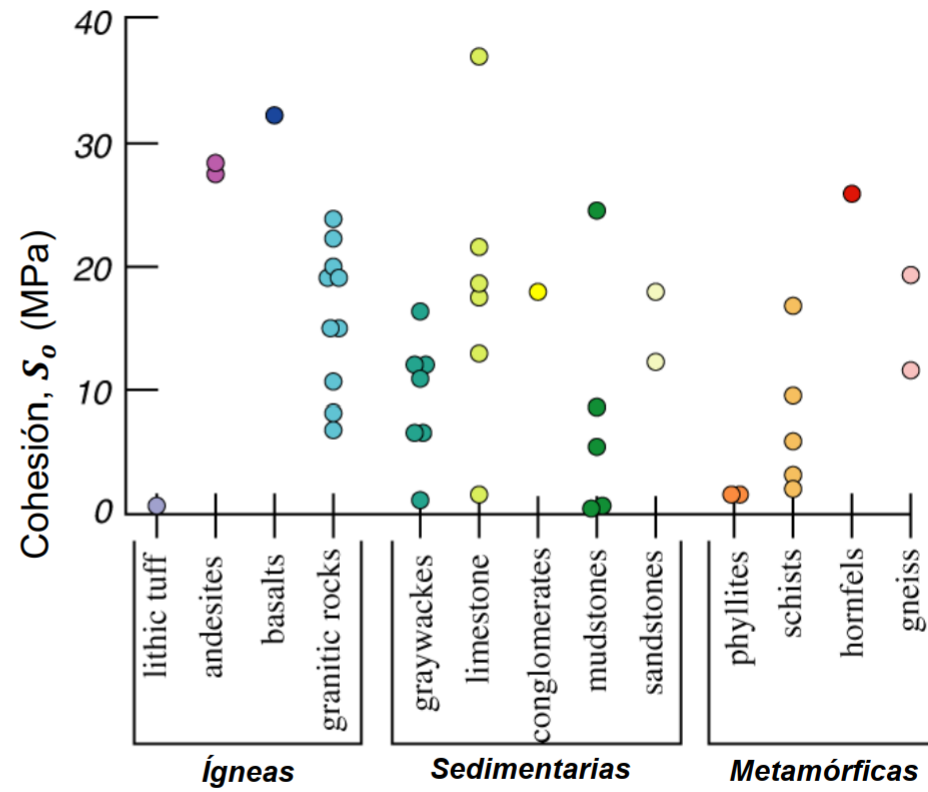
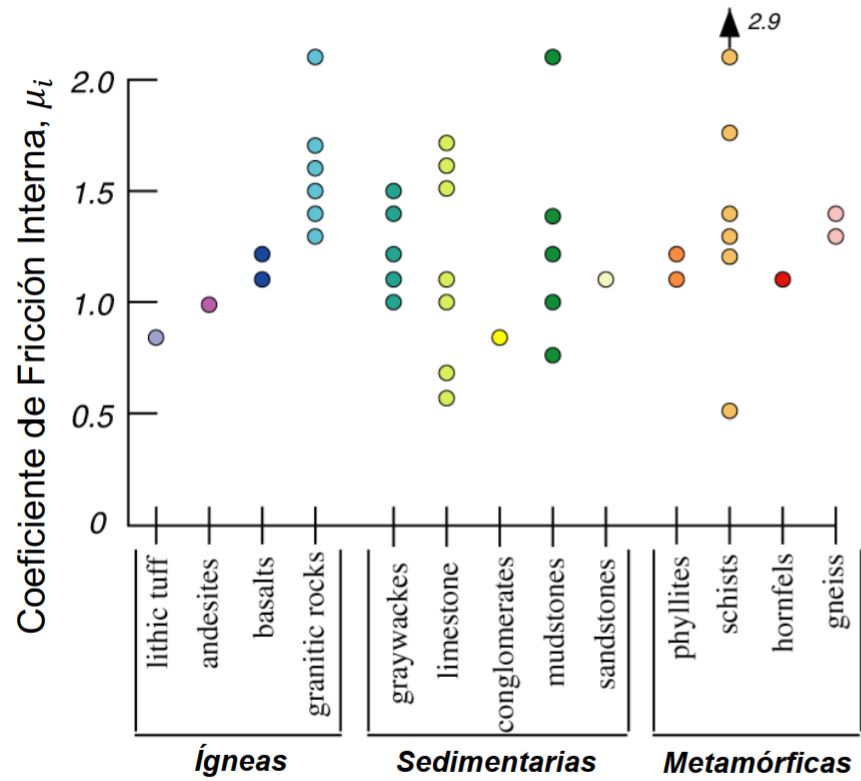






Ejemplo par un caso real de una Arenisca tomada de una muestra a 3000m de profundidad



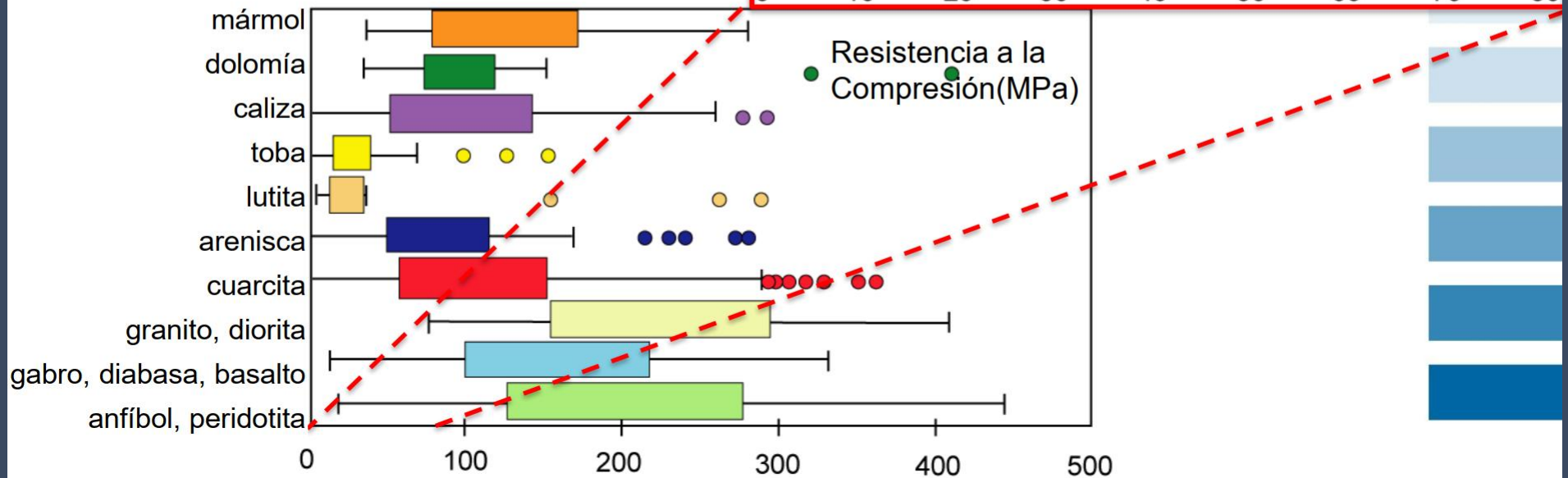
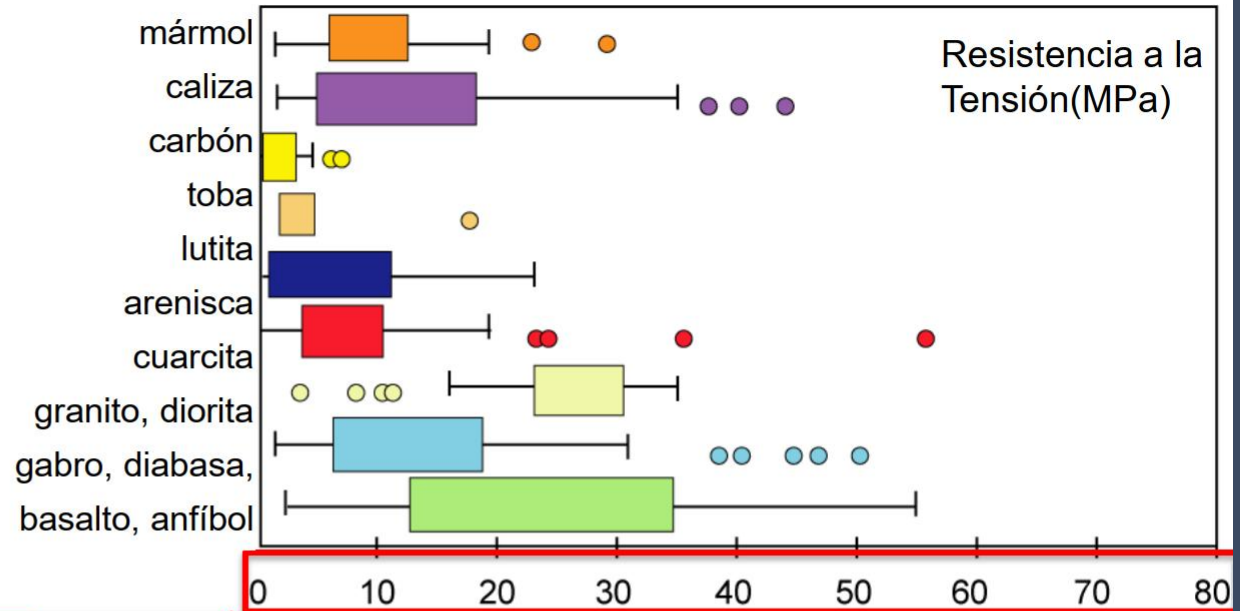


Las rocas débiles tienen baja cohesión

Tomado de Carmichael, 1982

Resistencia a la Compresión vs. Resistencia a la Tensión

La resistencia a la tensión de la roca es mucho menor que a la compresión

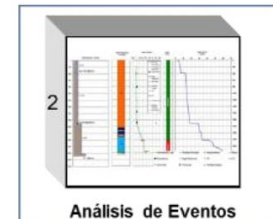


Construcción del Modelo Geomecánico

Flujo de Trabajo

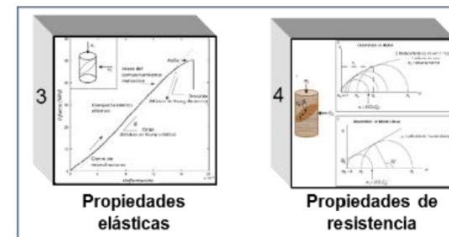


I-AUDITORÍA DE DATOS



II-ANÁLISIS:

- GEOLÓGICO/PETROFÍSICO
- EVENTOS DE POZO
- ESTADO MECÁNICO DE POZO



III-ANÁLISIS DE:

- PROPIEDADES MECÁNICAS



IV-ANÁLISIS DE:

- ESTADO DE ESFUERZOS LOCALES

Auditoría de datos










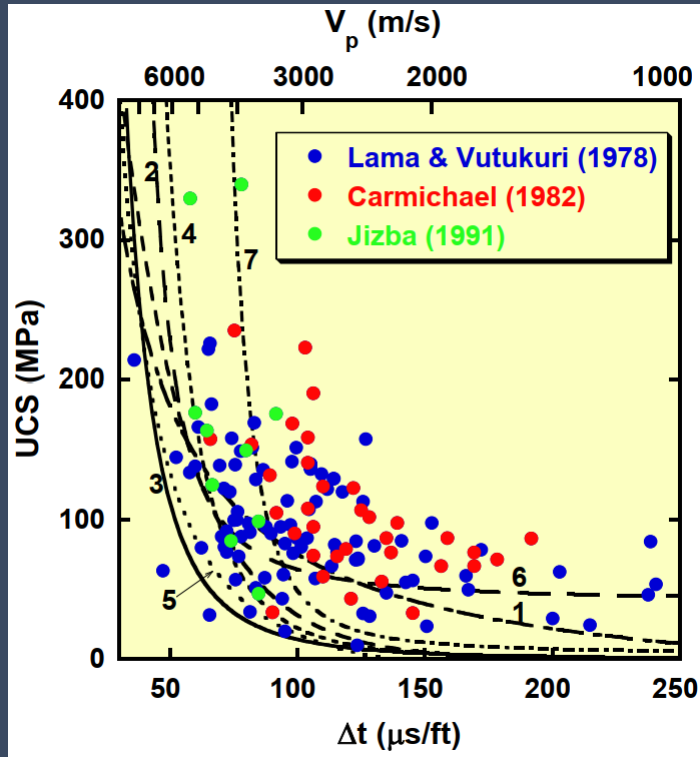
Datos	Pozo-ET*	Pozo-ET@	Pozo-ET+	Pozo-ET#						
Geología										
Control geológico (<i>mudlogging</i>)										
Topes de formación										
Trayectoria del pozo										
Estado mecánico del pozo										
Reportes de perforación (DDR/EOWR)										
DTCO										
DTSM										
RHOB										
Porosidad										
GR+Resistividad										
ECS y/o Lithoscanner	ECS	Litho.	ECS y Litho.	Litho.						
Interpretación mineralógica										
Fotos de coronas										
Perfil Selley	1:40 y 1:200		1:40 y 1:200	1:40 y 1:200						
Calibre orientado/Multibrazo										
Calibre de 1 brazo										
Registros petrofísicos (PHIT-PHIE-VCL)	CO y AP	CO	CS, CO	CO						
Registros de imagen de pozo	FMI-UBI-OBMI	UBI-OBMI	FMI-UBI-OBMI	UBI-OBMI						
Sísmica- <i>Checkshoot</i> -VSP										
Ensayos de presión (RFT-MDT)										
LOT-XLOT-DFIT-HFM-MiniFrac-MFO	LOT-MFO-DFIT	DFIT	DFIT-LOT	DFIT						
Ensayos mecánicos de laboratorio	CS y AP		CS	CS						
Ensayos petrofísicos de laboratorio	CS y AP		CS	CS						
Ensayos mineralógicos de laboratorio	CS y AP		CS	CS						
<table border="1"> <tr><td></td><td>Disponible c/buena calidad</td></tr> <tr><td></td><td>Incompleto y/o calidad intermedia</td></tr> <tr><td></td><td>No disponible y/o mala calidad</td></tr> </table>		Disponible c/buena calidad		Incompleto y/o calidad intermedia		No disponible y/o mala calidad	*CS=Compañía de Servicios, CO=Compañía Operadora, AP=Autoría Propia			
	Disponible c/buena calidad									
	Incompleto y/o calidad intermedia									
	No disponible y/o mala calidad									

Tabla 8.1: Auditoría de datos necesaria para cumplimentar con los 5 niveles analizados para realizar un modelo geomecánico anisotrópico completo, para los 4 pozos analizados.

Resistencia a la compresión uniaxial (UCS): perfil sónico, perfil de densidad)

Para areniscas



Sónico compresional

Eq. No.	UCS, MPa	Region where Developed	General Comments	Reference
1	$0.035 V_p - 31.5$	Thuringia, Germany	-	Freyburg (1972)
2	$1200 \exp(-0.036\Delta t)$	Bowen Basin, Australia	Fine grained, both consolidated and unconsolidated sandstones with all porosity range	McNally (1987)
3	$1.4138 \times 10^7 \Delta t^{-3}$	Gulf Coast	Weak and unconsolidated sandstones	Unpublished
4	$3.3 \times 10^{-20} \rho^2 V_p^4 \left[\frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \right]^2 (1-2\nu) [1 + 0.78 V_{clay}]$	Gulf Coast	Applicable to sandstones with UCS >30 MPa	Fjaer et al. (1992)
5	$1.745 \times 10^{-9} \rho V_p^2 - 21$	Cook Inlet, Alaska	Low strength sandstones	Moos et al. (1999)
6	$42.1 \exp(1.9 \times 10^{-11} \rho V_p^2)$	Australia	Consolidated sandstones with $0.05 < \phi < 0.12$ and UCS > 80MPa	Unpublished
7	$3.87 \exp(1.14 \times 10^{-10} \rho V_p^2)$	Gulf of Mexico	-	Unpublished
8	$46.2 \exp(0.000027E)$	-	-	Unpublished
9	$A (1-B\phi)^2$	Sedimentary basins worldwide	Reasonable for clean consolidated sandstones with $\phi < 0.30$	Vernik et al. (1993)
10	$277 \exp(-10\phi)$	-	Sandstones with $2 < UCS < 360$ MPa and $0.002 < \phi < 0.33$	Unpublished

Coeficiente de fricción interna

Unidades: V_p (m/s), GR (API)

$$\mu_i = \tan^{-1} \phi$$

ϕ : ángulo de fricción (grados)

Relaciones Empíricas para obtener Angulo de Fricción ϕ			
	ϕ , grados	Comentarios	Referencia
27	$\sin^{-1} \left(\frac{(V_p - 1000)}{(V_p + 1000)} \right)$	Aplicable a lutitas	(Lal 1999)
28	$70 - 0.417GR$	Aplicable a rocas sedimentarias arcillosas con $60 < GR < 120$	No publicado
29	$26,5 - 37,4 \cdot (1 - \phi - V_{cl}) + 62,1 \cdot (1 - \phi - V_{cl})^2$	Aplicable a lutitas	Plumb (1994)

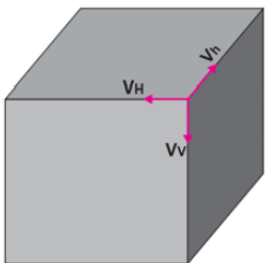
Módulos Elásticos

TENGO ENSAYOS DE LABORATORIO? → NO → UTILIZO CORRELACIONES TEÓRICAS

REFERENCE	EQUATION (Mpsi)	APPLICATION	COMMENTS
Morales and Marcinew (1993)	$\log Est = A_0 + A_1 \log Ed_y$	$\Phi: 10-15\%$	$A_0 = -2.37$ $A_1 = -0.6612$, Error-16%
		$\Phi: 15 - 25\%$	$A_0 = -1.829$ $A_1 = -0.6920$, Error-8%
		$\Phi: >25\%$	$A_0 = -0.4575$ $A_1 = -0.9402$, Error-15%

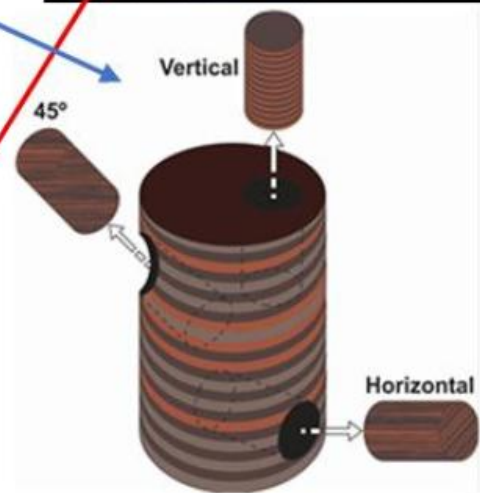
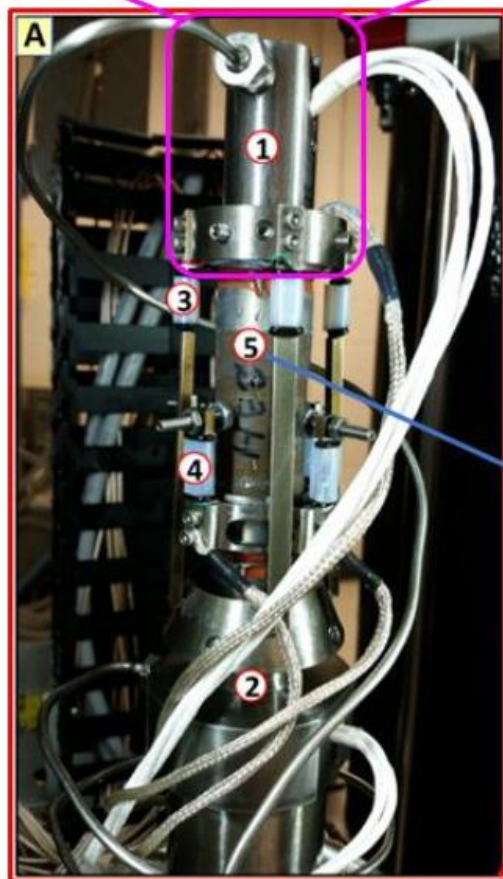
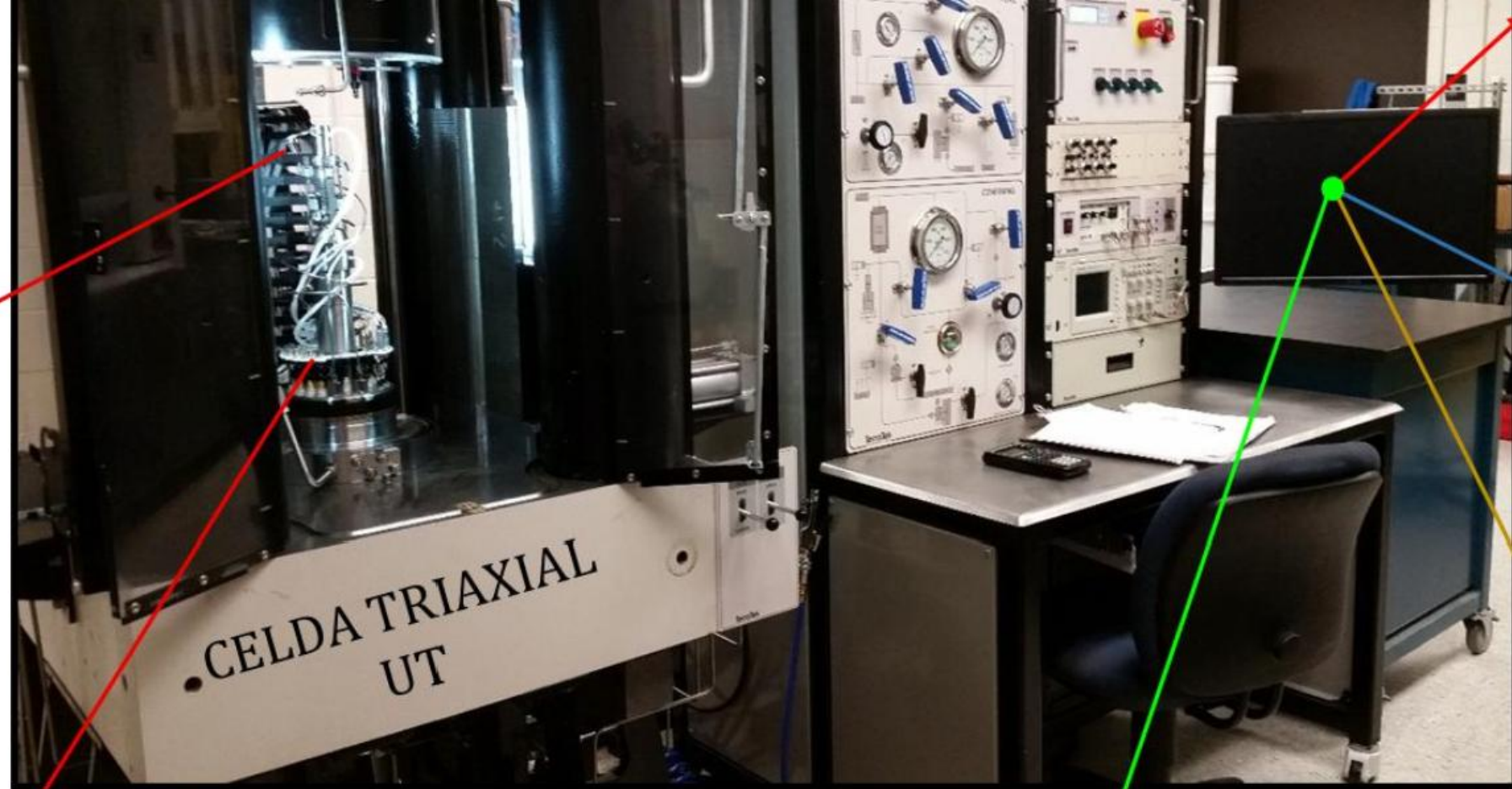
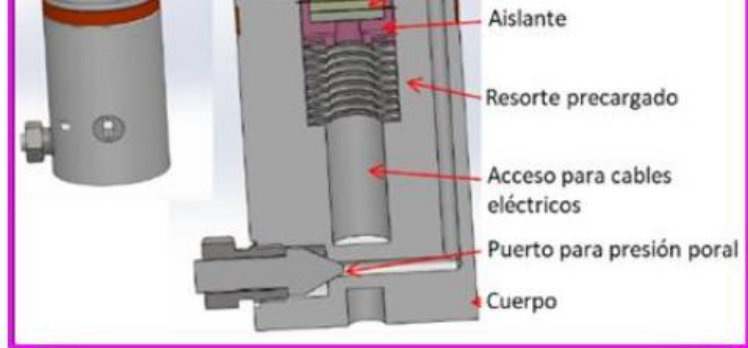
Modelo Isotrópico

$$V_H = V_h = V_v$$

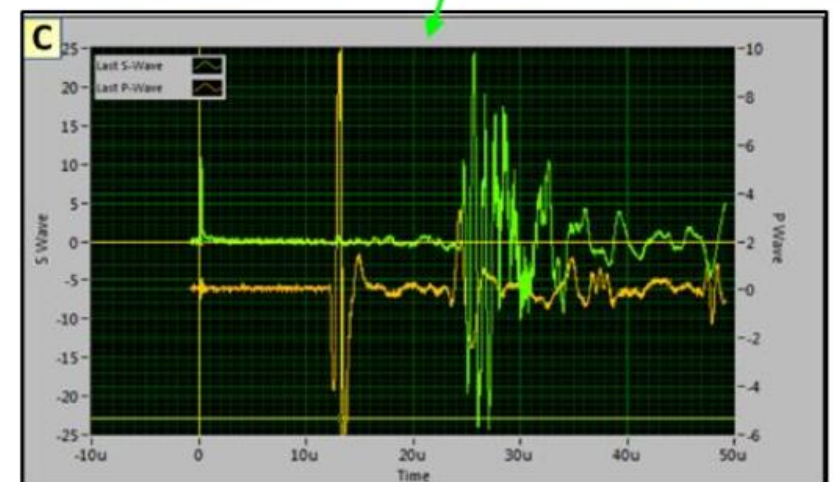


TENGO ENSAYOS DE LABORATORIO? → NO → UTILIZO CORRELACIONES TEÓRICAS

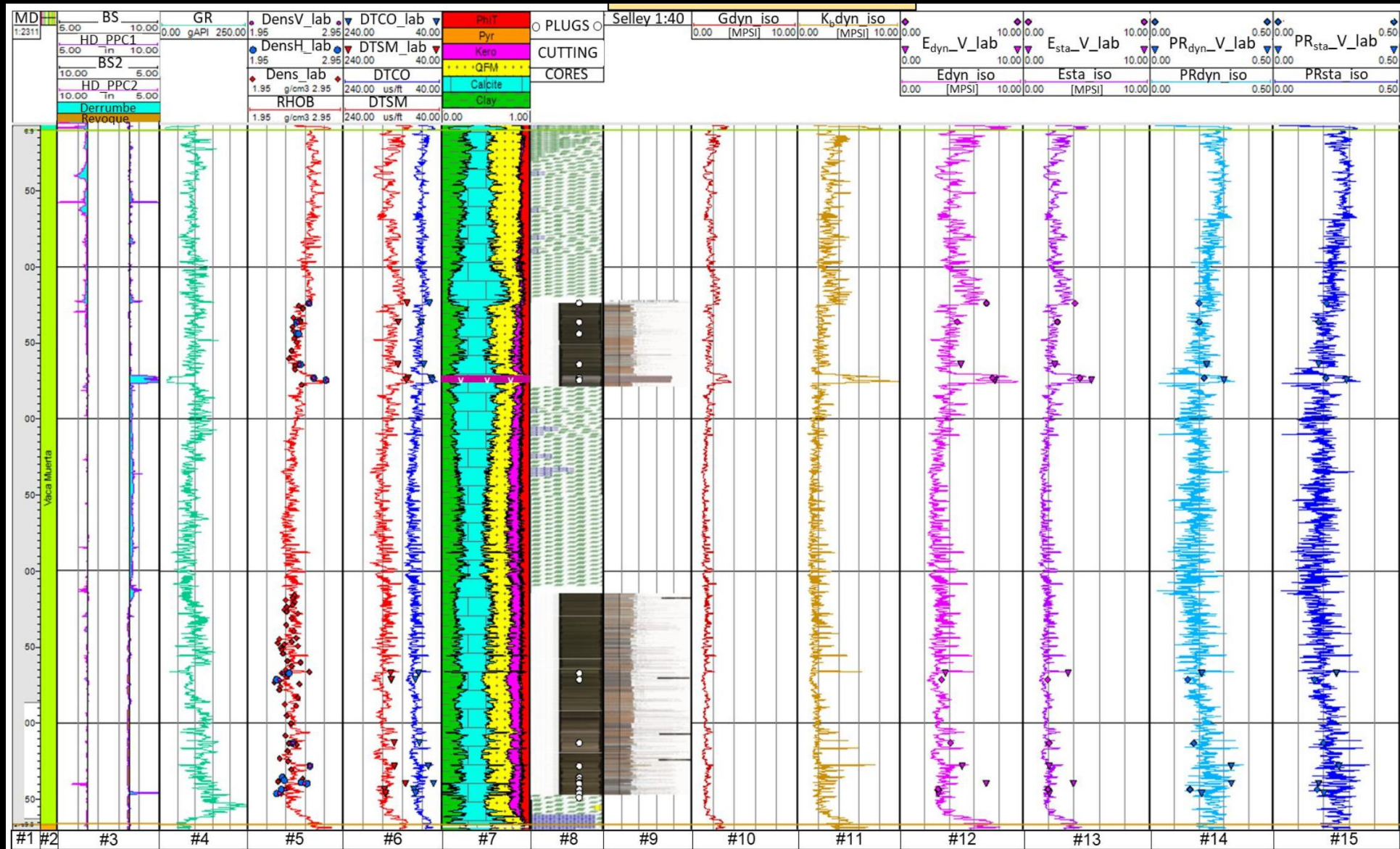
SI → GENERO CORRELACIONES Dyn to Sta PROPIAS



PROPIEDADES DINÁMICAS

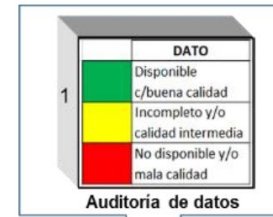


Módulo de corte Módulo de Young Relación de Poisson

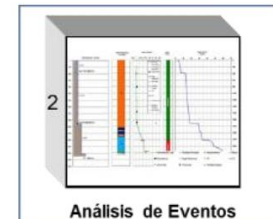


Construcción del Modelo Geomecánico

Flujo de Trabajo

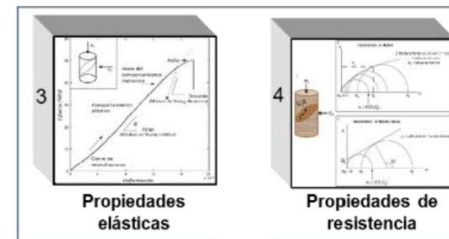


I-AUDITORÍA DE DATOS



II-ANÁLISIS:

- GEOLÓGICO/PETROFÍSICO
- EVENTOS DE POZO
- ESTADO MECÁNICO DE POZO



III-ANÁLISIS DE:
-PROPIEDADES MECÁNICAS



IV-ANÁLISIS DE:
-ESTADO DE ESFUERZOS LOCALES

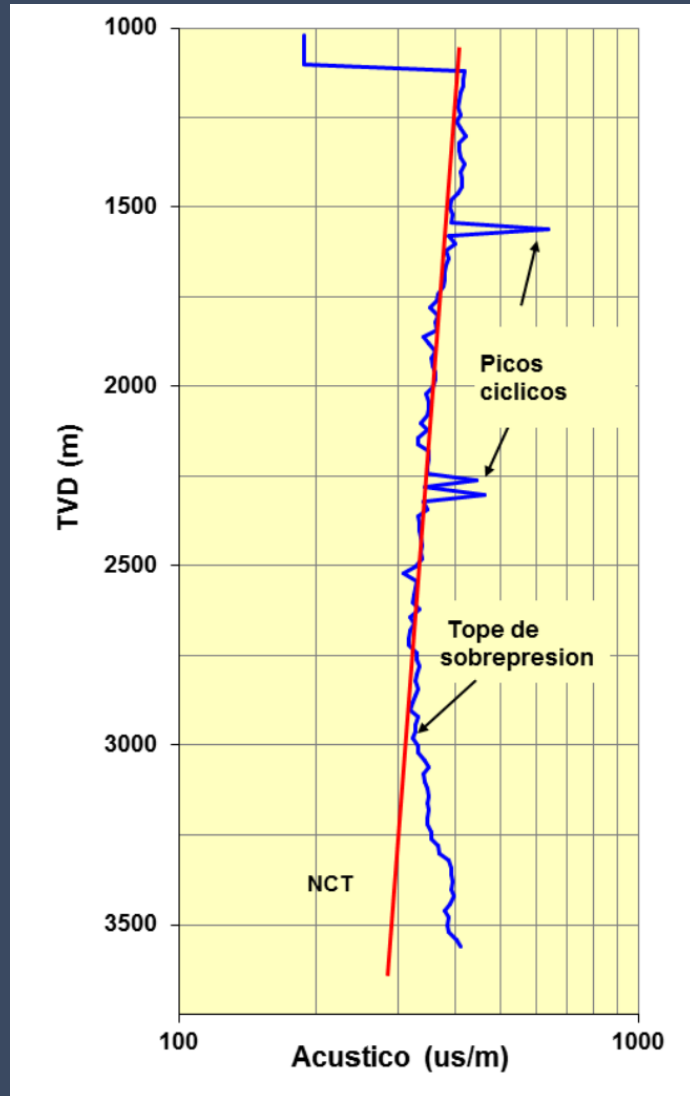
Presión de poro – Método de Eaton

Calcula la presión de poro a partir de una relación entre el parámetro medido por el perfilaje, el valor en la línea de compactación normal y el gradiente de sobrecarga:

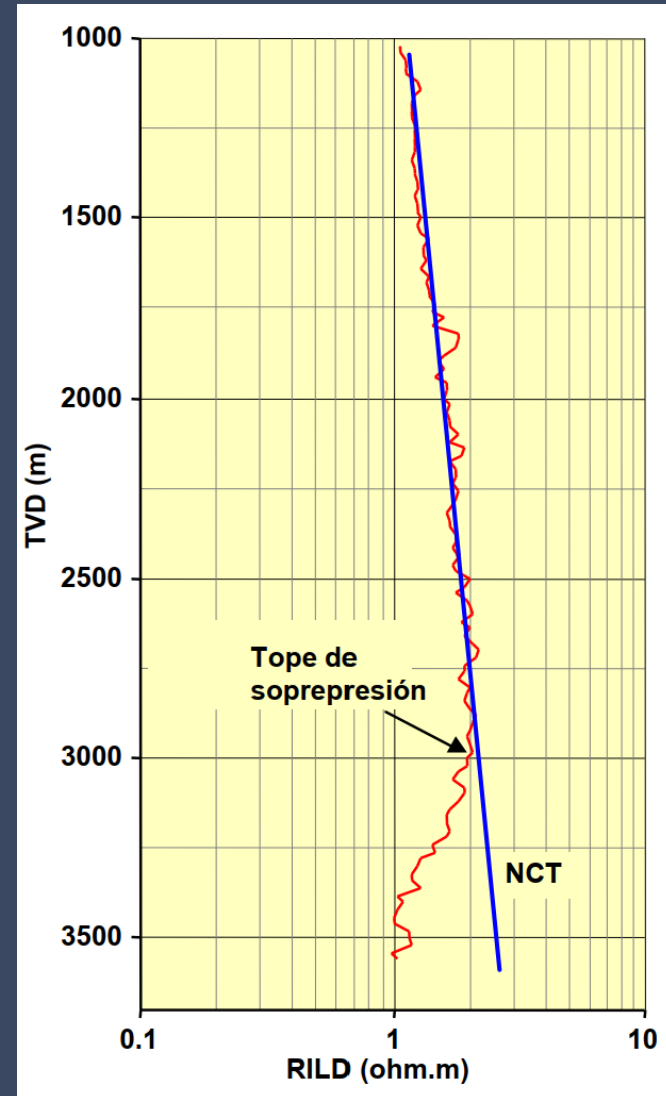
- Para resistividad: $P_p = S - (S - P_{hyd}) \left(\frac{Rsh_{log}}{Rsh_n} \right)^{1.2}$
 - Para acústico: $P_p = S - (S - P_{hyd}) \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{log}} \right)^{3.0}$
- Exponente de Eaton**
-

P	presión de formación (psi/ft or ppg, kPa/m or g/cc)
S	sobrecarga (psi/ft or ppg, kPa/m or g/cc)
Rsh_{log}	resistividad de la lutita (ohms/m)
ΔT	tiempo de tránsito acústico (us/ft)
log	valor observado del log a una profundidad dada (ohms/m or us/ft)
n	valor normal a la profundidad dada (ohms/m or us/ft)
hyd	presión normal o hidrostática (psi/ft or ppg, kPa/m or g/cc)

Acústico



Resistividad



Ejemplo de aplicación

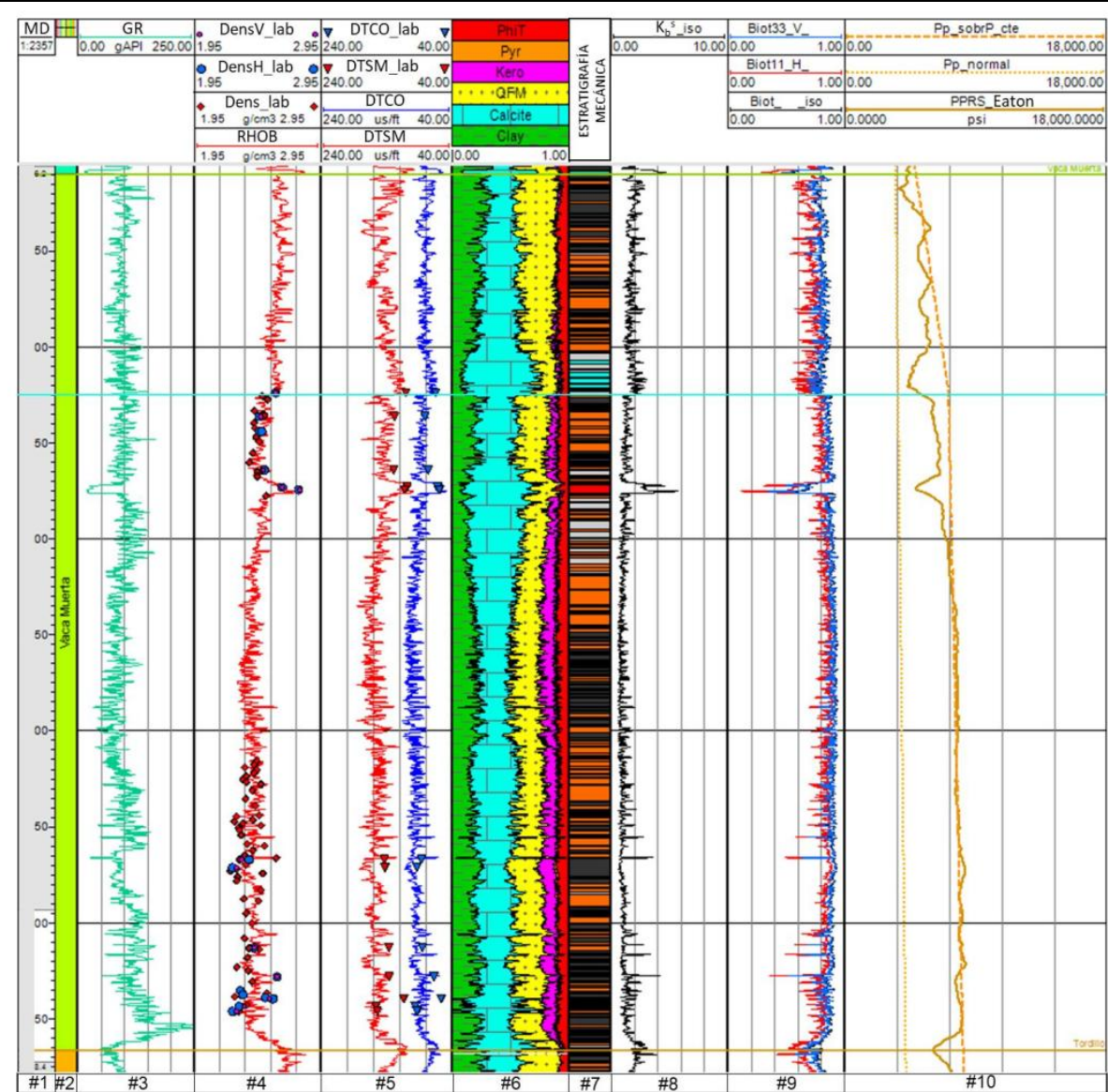
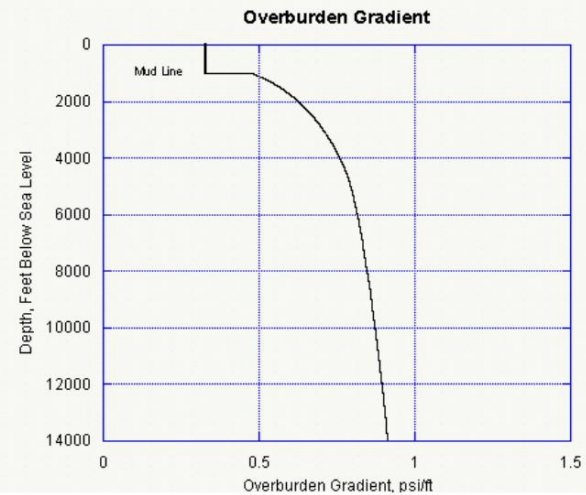
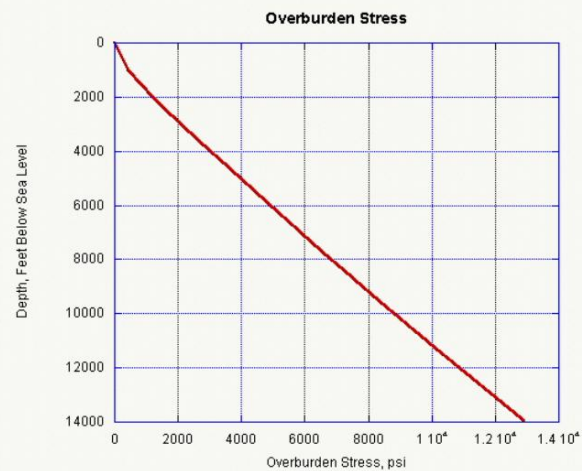
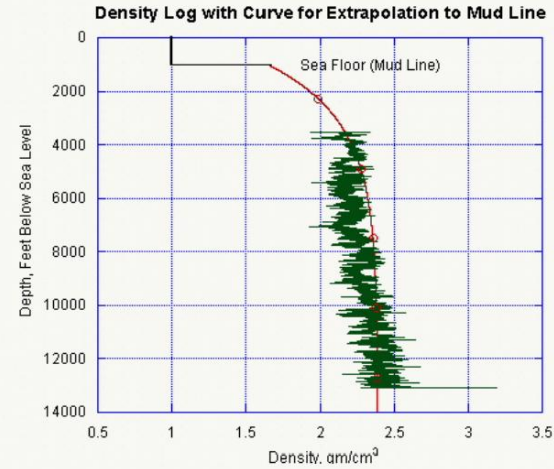
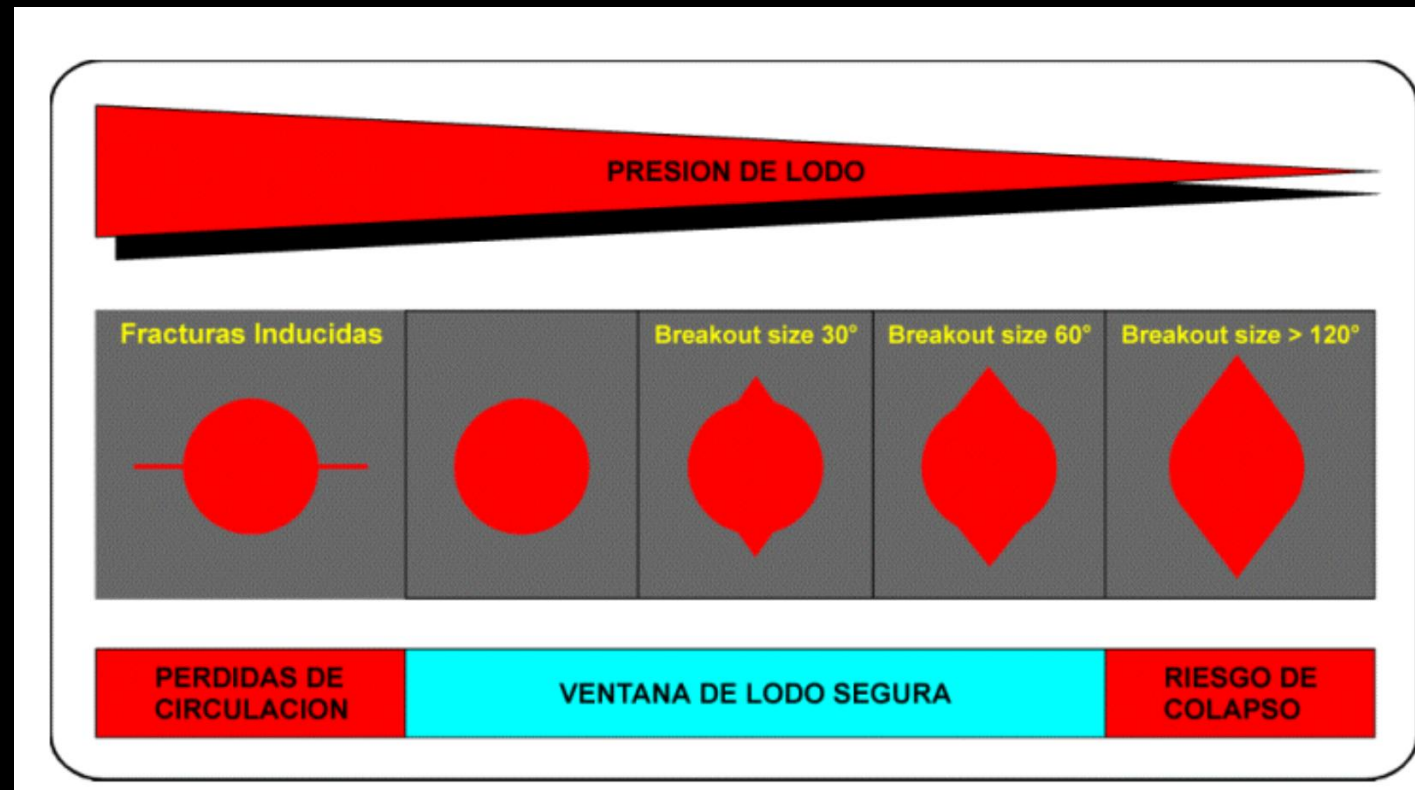
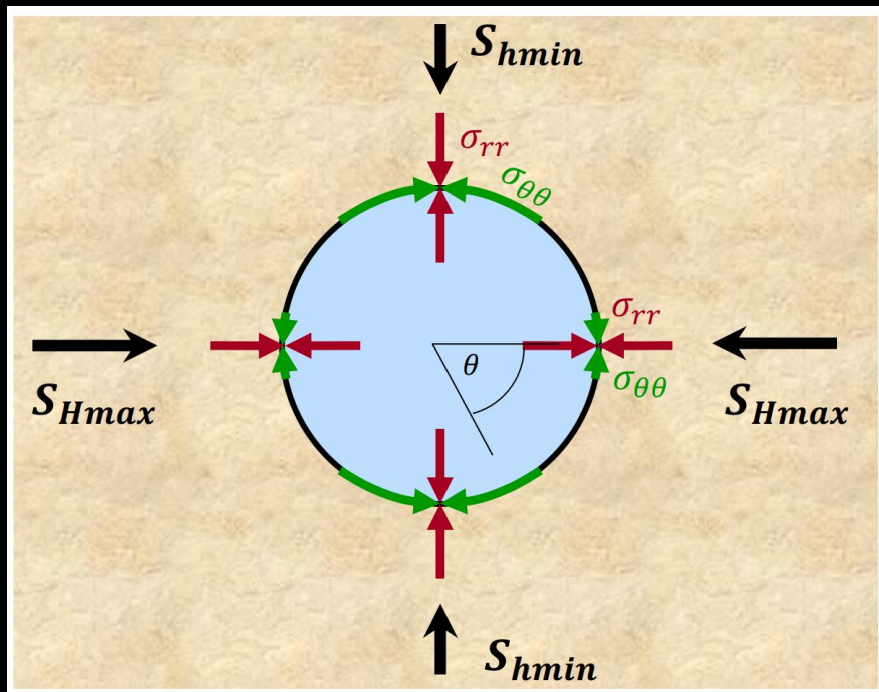


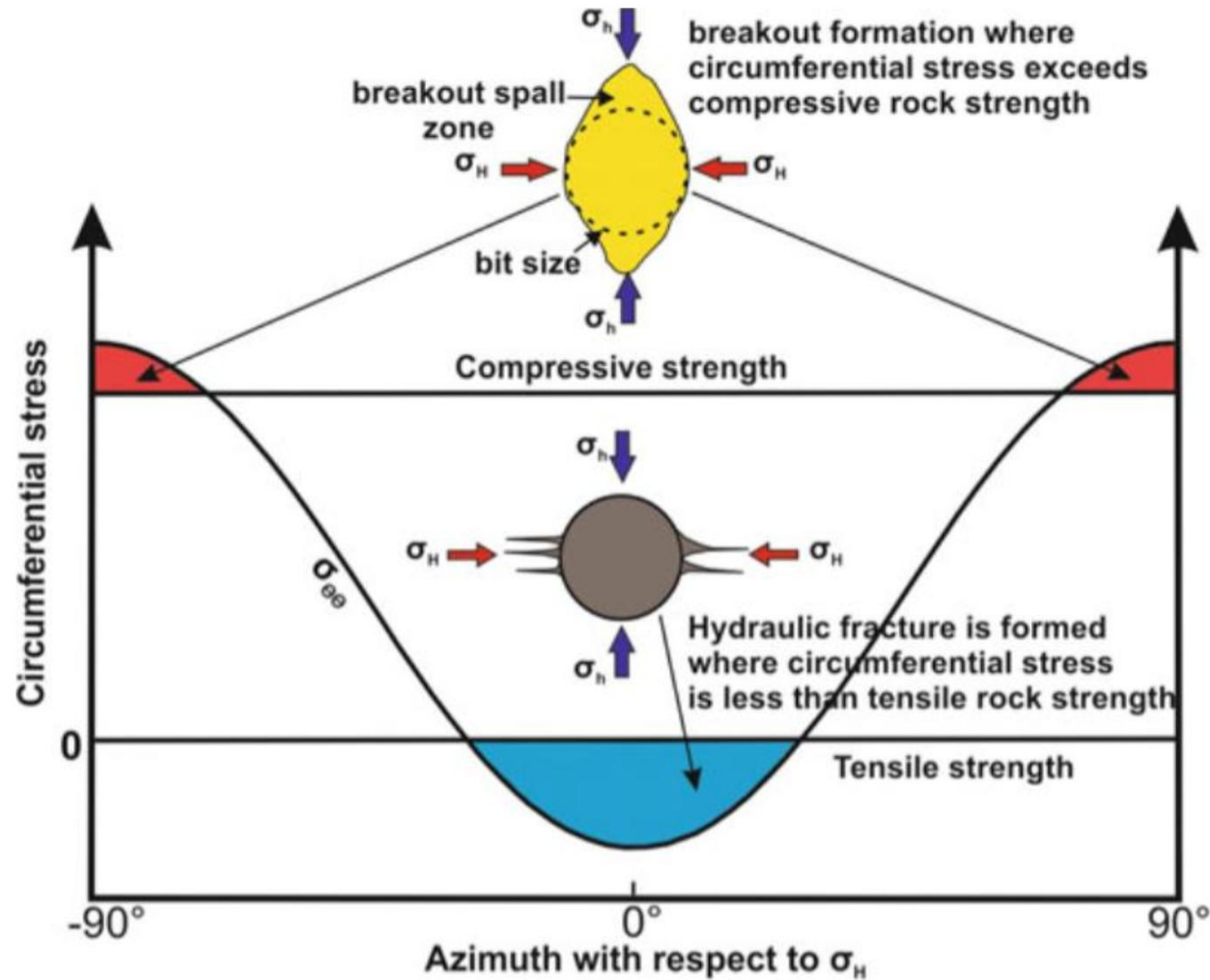
Figura 8.25: Modelado de la presión poral junto con los coeficientes de Biot isotrópicos y anisotrópicos para el pozo-ET*. Nótese el notable cambio de pendiente en la curva de presión poral luego de la recta celeste, la cual es coincidente con la base de un espeso banco carbonático. La curva de Biot isotrópico, es coincidente con la curva de coeficiente de Biot vertical, ya que los parámetros isotrópicos representan los verticales. Por otra parte, es interesante notar la variación entre el gradiente de presión poral normal y la curva de sobrepresión, que se encuentran dentro del rango de la curva calculada con el método de Eaton (1975).

Estimar S_V a Partir de Datos de Densidad





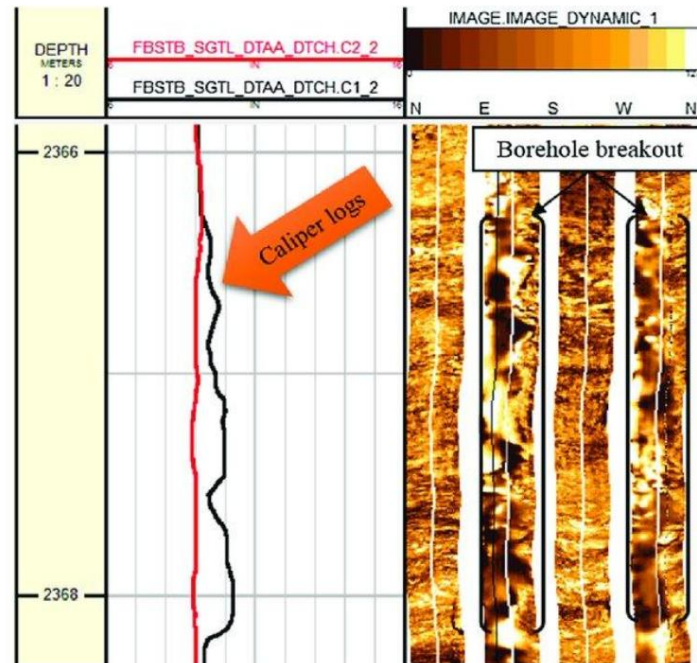
Magnitud de S_{Hmax} a Partir de Breakouts y UCS



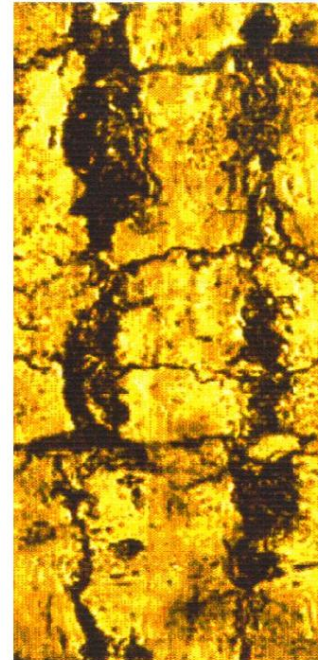
Breakouts: Ejemplos de Campo

Registro Eléctrico

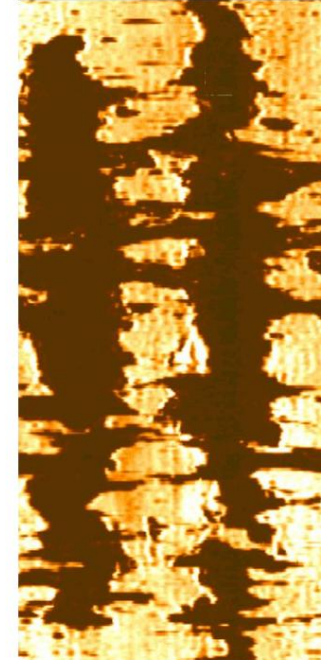
Registro Acústico



CBIL Amplitude

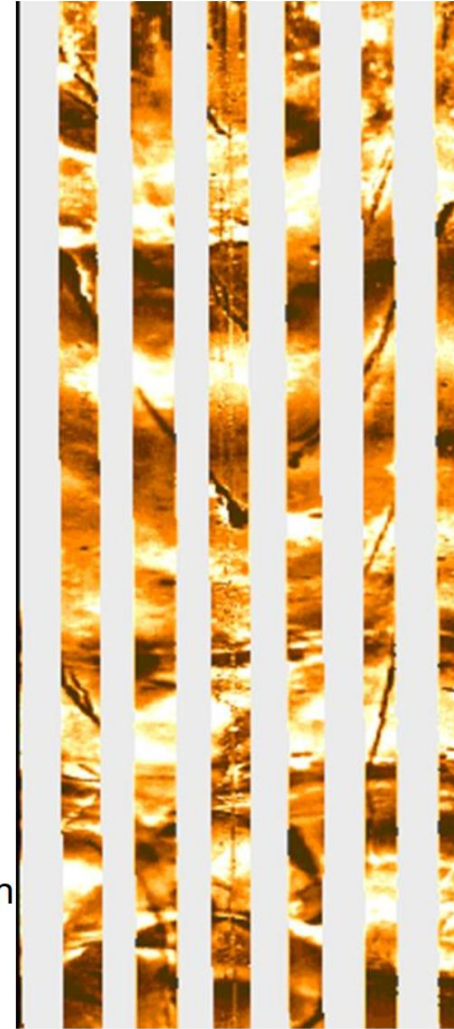
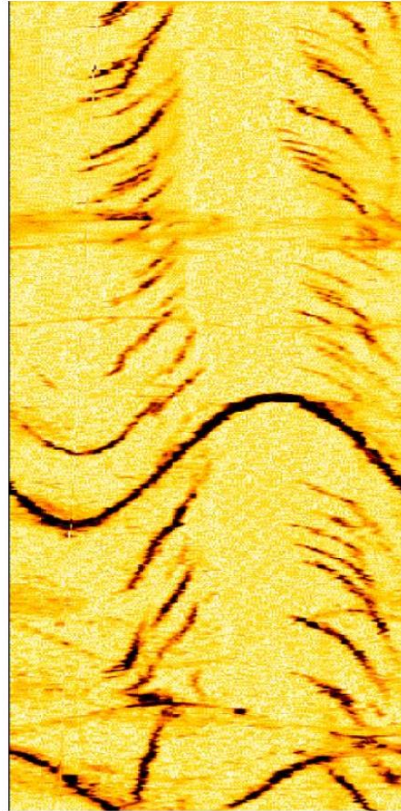


CBIL Amplitude



- Los Breakouts (falla a compresión) se forman porque $\sigma_{\theta\theta} \gg \sigma_{rr}$
- En pozos verticales, los Breakouts ocurren en la dirección de S_{hmin}

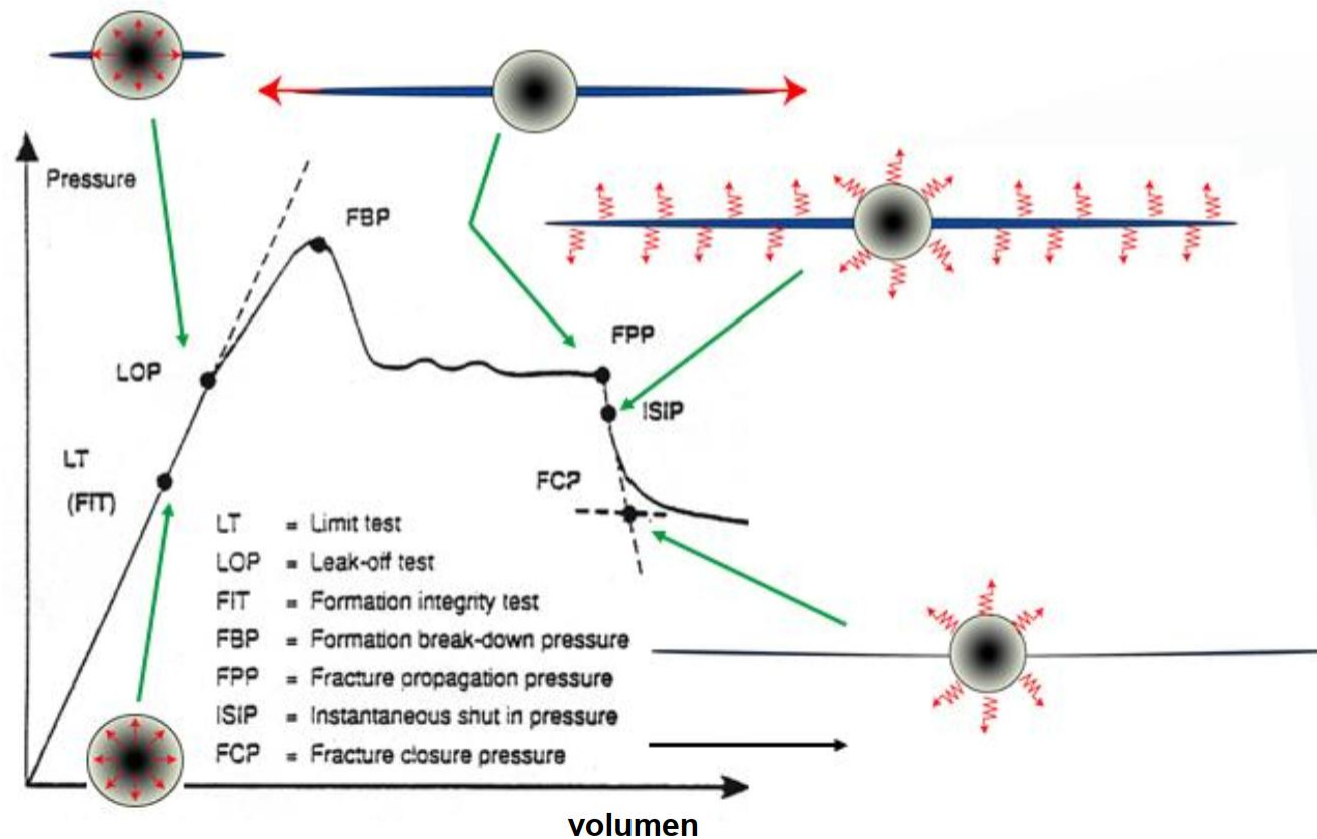
DIF (Drilling-induced tensile fractures)



Estas fracturas por tensión inducidas se producen porque el esfuerzo tangencial ($\sigma_{\theta\theta}$) es menor que la resistencia a la tensión de la formación.

En pozos verticales las fracturas por tensión inducidas durante la perforación se producen en dirección del esfuerzo horizontal máximo (S_{Hmax}).

Esfuerzo Principal Menor (S_{hmin}) a Partir de XLOT



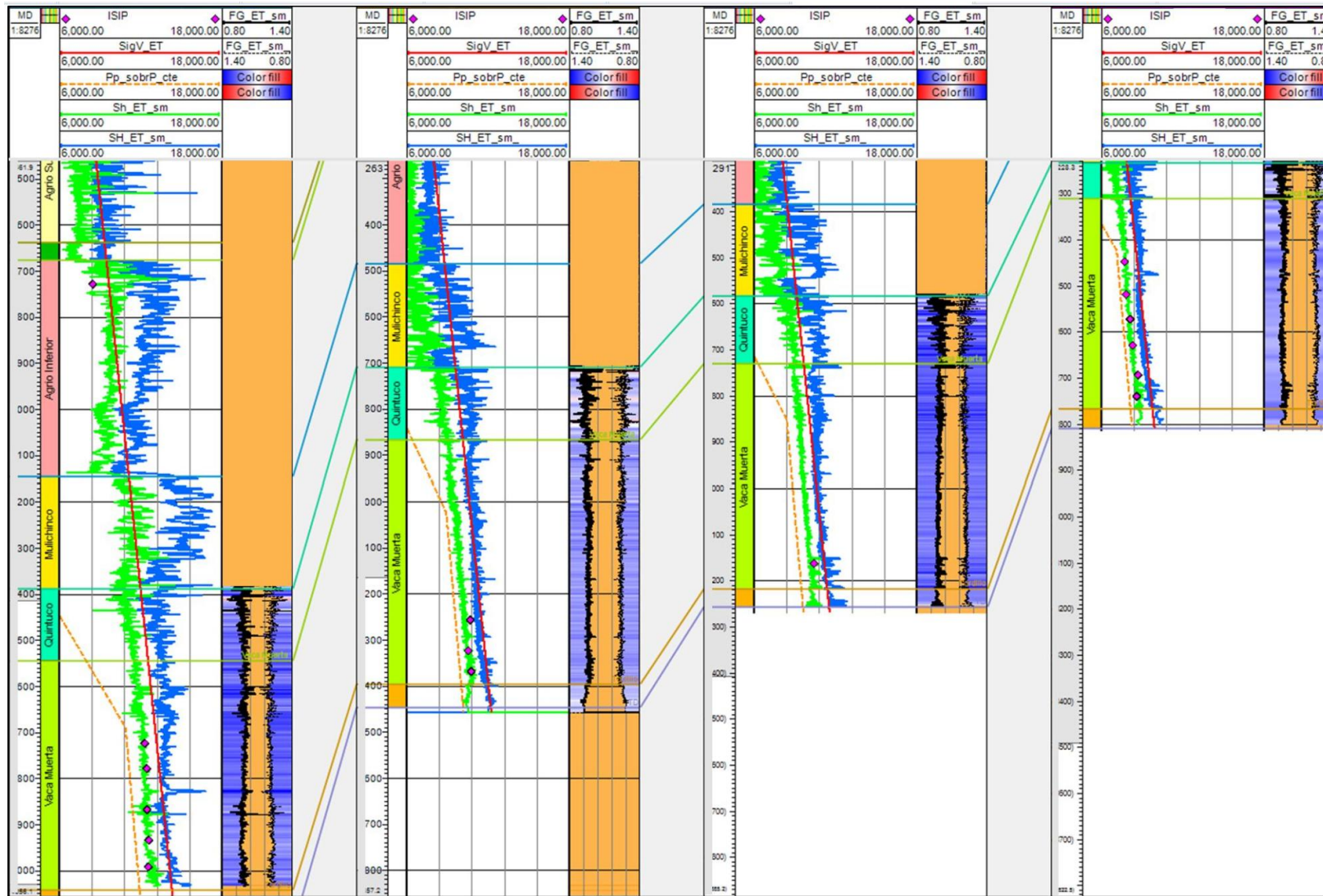


Figura 8.32: Correlación este-oeste entre los cuatro pozos analizados, mostrando la variación en magnitud de esfuerzos con la profundidad y el rumbo. **Pista #1: MD** (*Measure Depth*): profundidad medida en metros; **#2:** Columna estratigráfica; **#3: SigV_ET**: Esfuerzo vertical, **Pp_SobrP_cte**: Presión poral constante, **Sh_ET_sm**: Esfuerzo horizontal mínimo anisotrópico calibrados con ISIP (puntos rosas) (MEAD-2), **SH_ET_sm**: Esfuerzo horizontal máximo anisotrópico (MEAD-2); **#4: FG_ET_sm**: Gradiente de fractura anisotrópico (con discriminación litológica-MEAD-2).

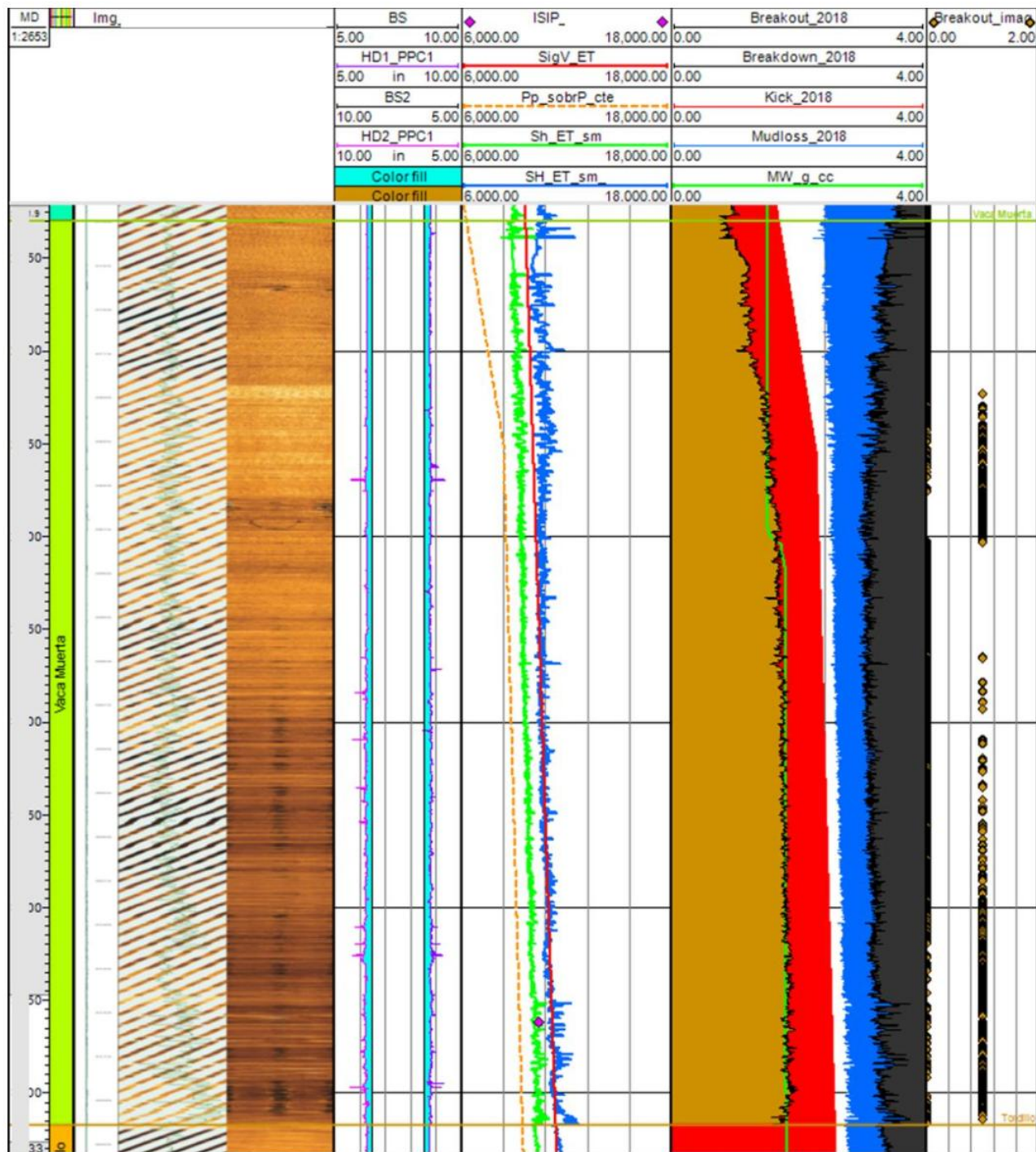


Figura 8.38: Modelo de estabilidad para el pozo ubicado al centro-este. **Pista #1: MD** (*Measure Depth*): profundidad medida en metros; **#2:** Formación Vaca Muerta; **#3: Imágenes de pozo:** de izquierda a derecha, OBMI, UBI y FMI; **#4: HD_PPC** y **BS:** Calibre de 4 brazos orientado y *Bit Size* (diámetro de trepano), en pulgadas; **#5: SigV_ET:** Esfuerzo vertical, **Pp_SobrP_cte:** Presión poral constante, **Sh_ET_sm:** Esfuerzo horizontal mínimo anisotrópico calibrados con ISIP (puntos rosas) (MEAD-2), **SH_ET_sm:** Esfuerzo horizontal máximo anisotrópico (MEAD-2), en PSI; **#6: Breakout, Breakdown, Kick, Mudloss, MW y ECD:** Presión de colapso (en marrón), Presión de fractura (en negro), Presión de Influjos (en rojo), Presión de pérdidas (en azul), densidad de lodo (en verde claro) y densidad equivalente de circulación (en verde oscuro), en g/c^3 ; y **#7: Breakout_imag:** Representación estimada de las zonas de *breakout*, a partir de la relación entre la densidad del lodo (MW) y la curva de colapso.