

DAÑO DE FORMACIÓN: DAÑO GEOMECÁNICO

Presentado por:

Ximena A. Rodríguez Flórez

Ingeniera Geóloga

Estudiante maestría IP

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN

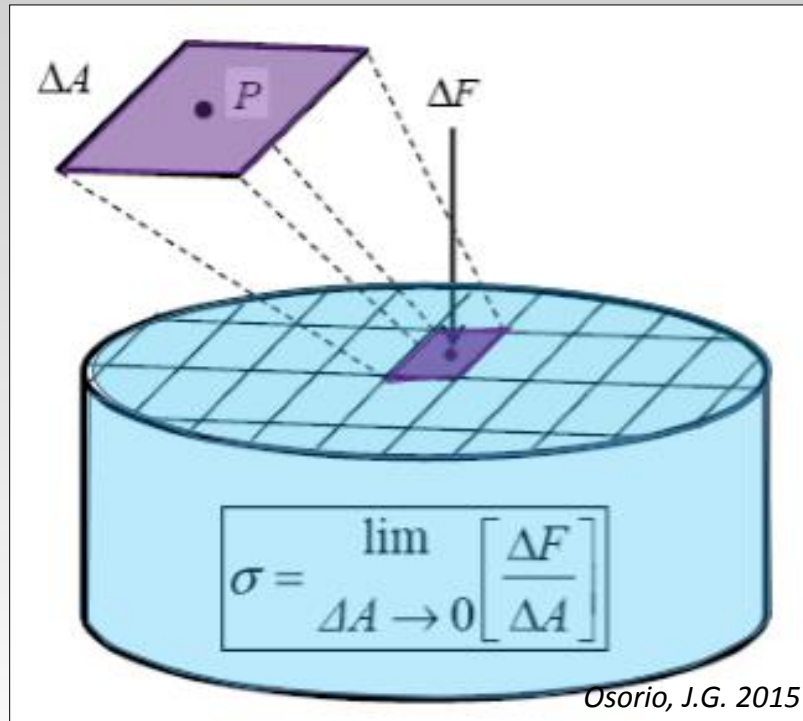
Diciembre/ 2016

Agenda

- Concepto de esfuerzo.
- Esfuerzos principales y presión de poro.
- Daño de formación geomecánico.
- Fenomenología del daño geomecánico.
- Reservorios sensitivos a esfuerzos.
- Tipos de daño geomecánico.
- Evaluación del daño geomecánico.
- Retos del daño geomecánico.
- Por qué estudiar el daño geomecánico.
- Ejemplo modelo diagnóstico.



Qué es esfuerzo? (1/1)

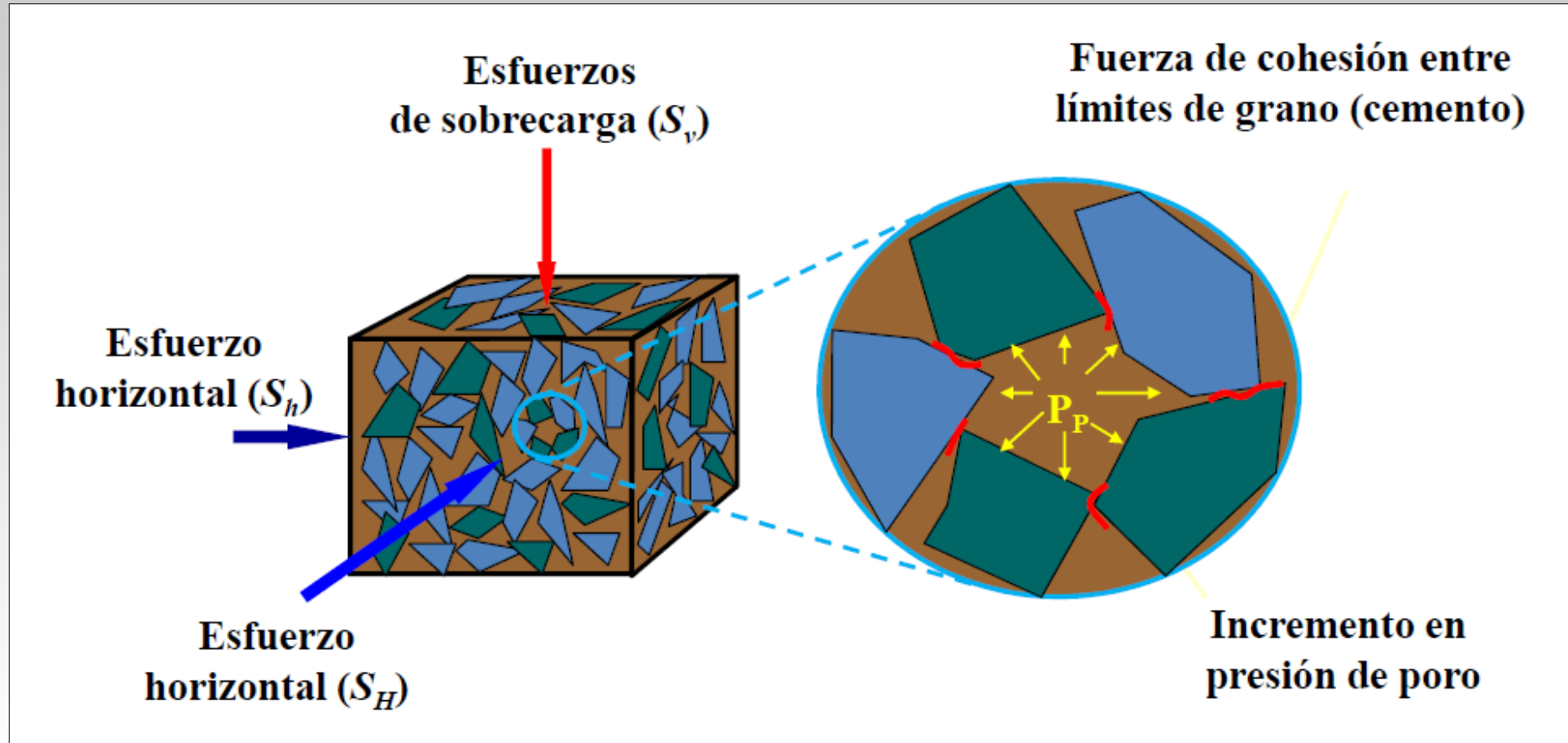


“Fuerza por unidad de área que actúa sobre un punto”

Unidades sistema internacional → Pascales [N/m²]

Unidades de la industria → [PSI/ft]

Esfuerzos principales y presión de poros (1/1)



Qué es daño de formación geomecánico? (1/1)

Disminución de la permeabilidad por cambios en ΔP_p y $\Delta \sigma$. $\sigma_{total} = \sigma' + \alpha P_p$

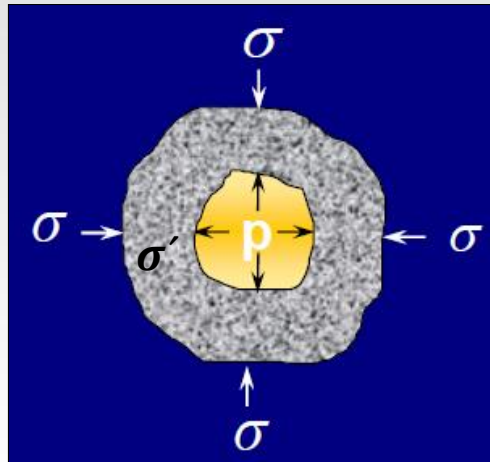
$$\sigma' = \sigma_{total} - \alpha P_p$$

σ' : esfuerzo efectivo

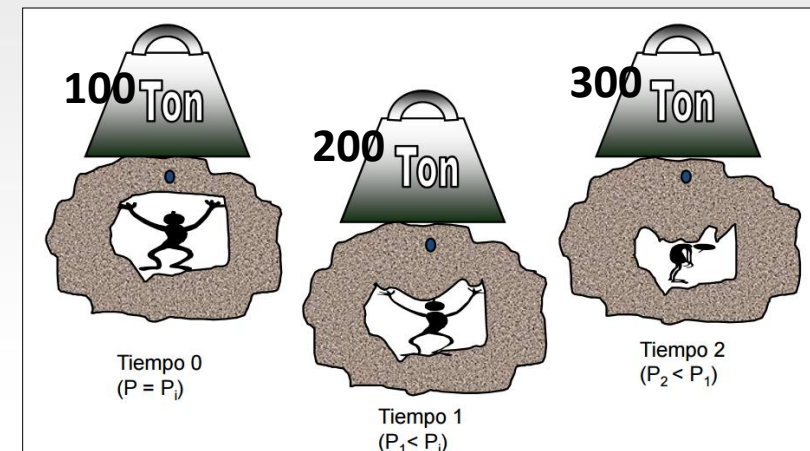
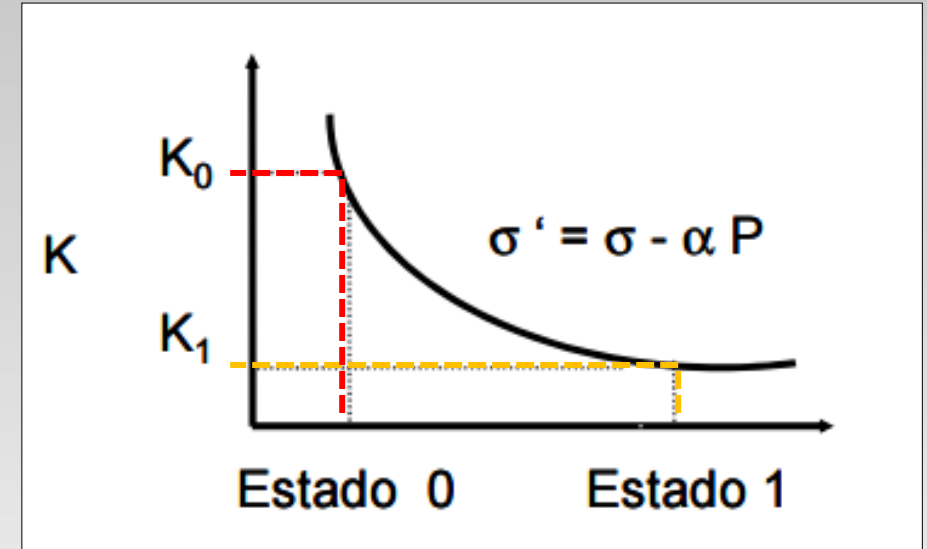
σ_{total} : esfuerzo total

α : coeficiente de Biot

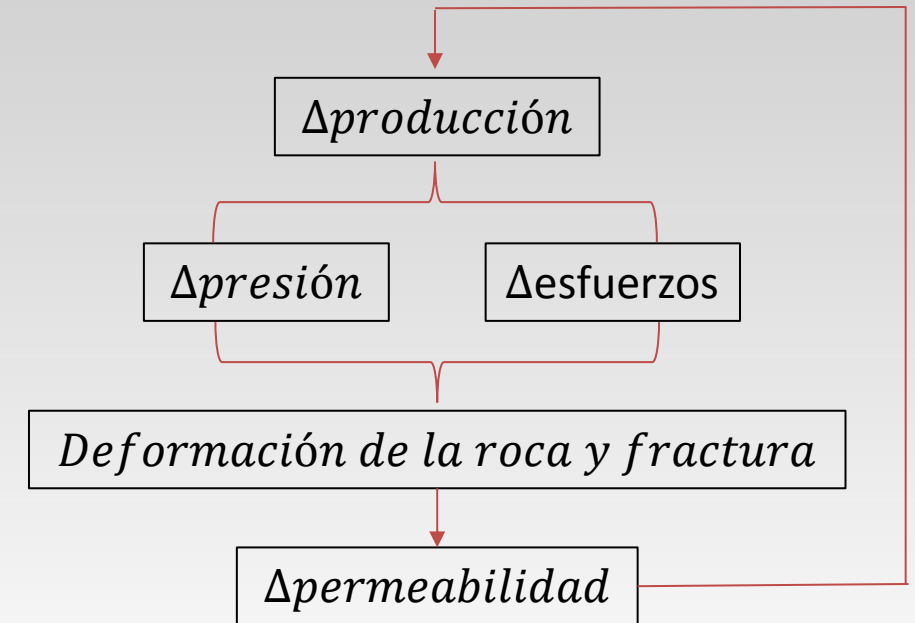
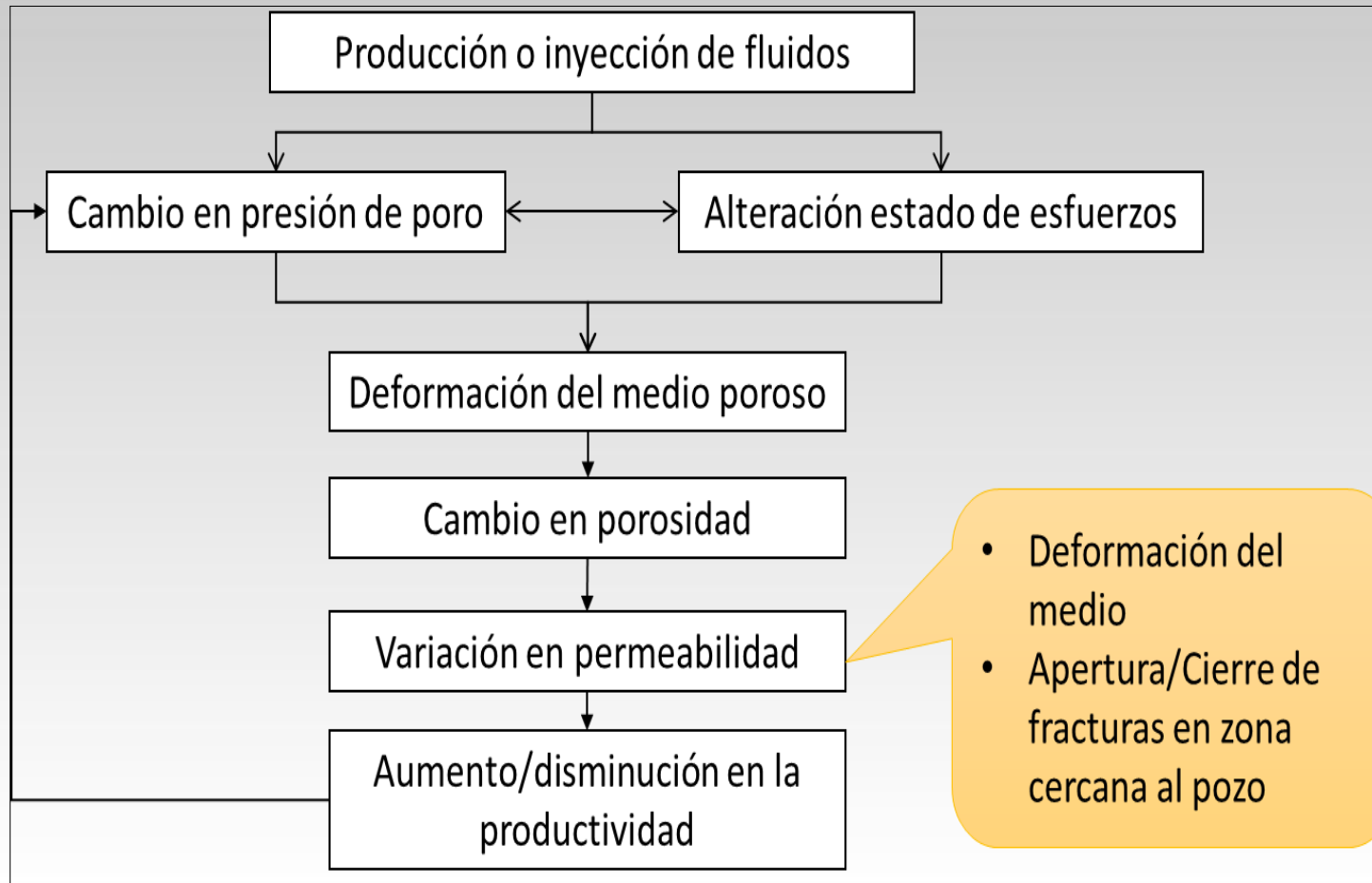
P_p : presión de poros



“Reservorios sensitivos a esfuerzos”



Fenomenología del daño geomecánico (1/2)



Osorio, J.G. 2015

Fenomenología del daño geomecánico (2/2)

Variación de la permeabilidad por cambios en ΔP_p y $\Delta \sigma$.

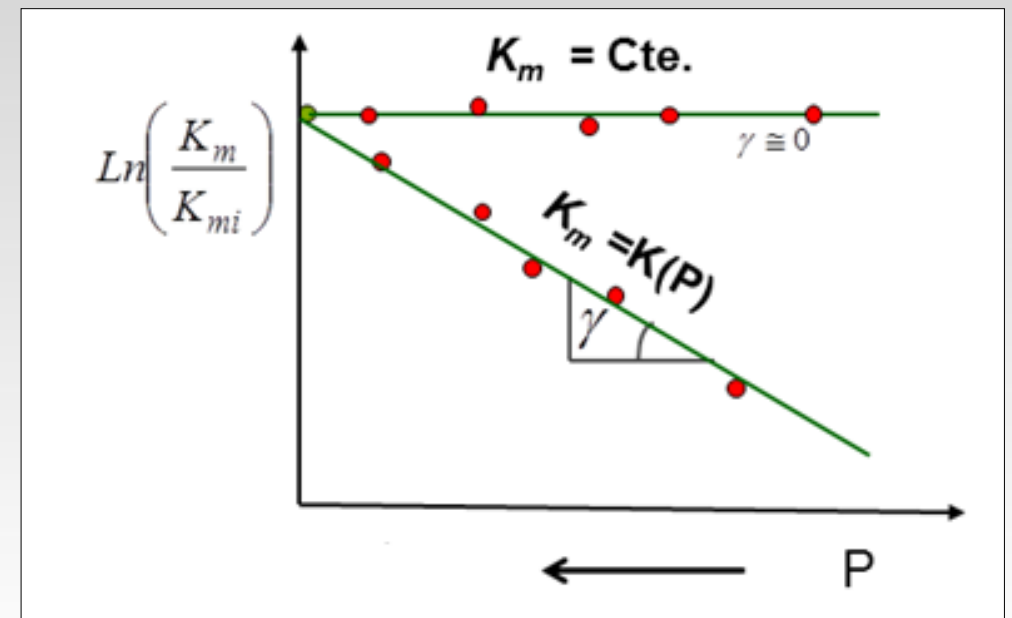
Yacimientos Sensitivos a cambios en Presión.

- Si $\gamma = 0 \Rightarrow K = \text{cte}$: No impacta negativamente la productividad.
- Si $\gamma \neq 0 \Rightarrow K = K(P)$: La productividad disminuye. Si la relación es < 0 .

$$\sigma_T(P) = \sigma_g(P) + \sigma \text{ (Factores no dependientes de } P\text{)}$$

- Diferenciar el % real $\sigma_T(P)$ del % $\sigma_g(P)$.
- Ejemplo: Estimulación química ineficaz si $\sigma(P)$ es alto

$\gamma \rightarrow$ Relaciona K de la zona dañada con K inicial.



Osorio, J.G. 2015

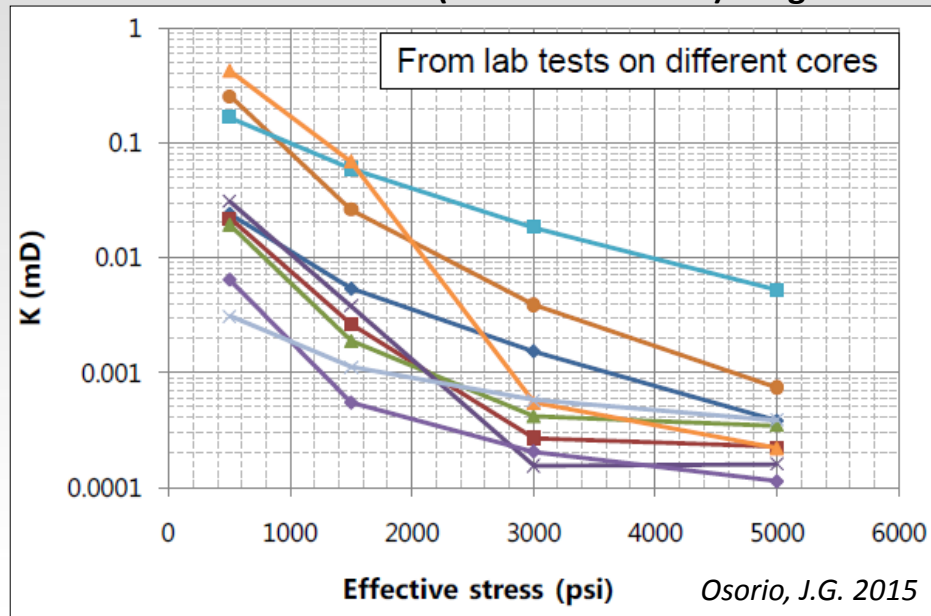
“Reservorios sensitivos a esfuerzos” (1/1)

$$\sigma' = \sigma_{total} - \alpha P_p$$

Reservorios no convencionales

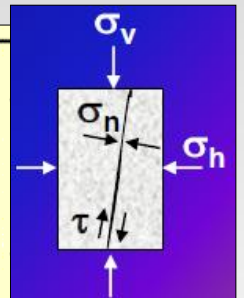
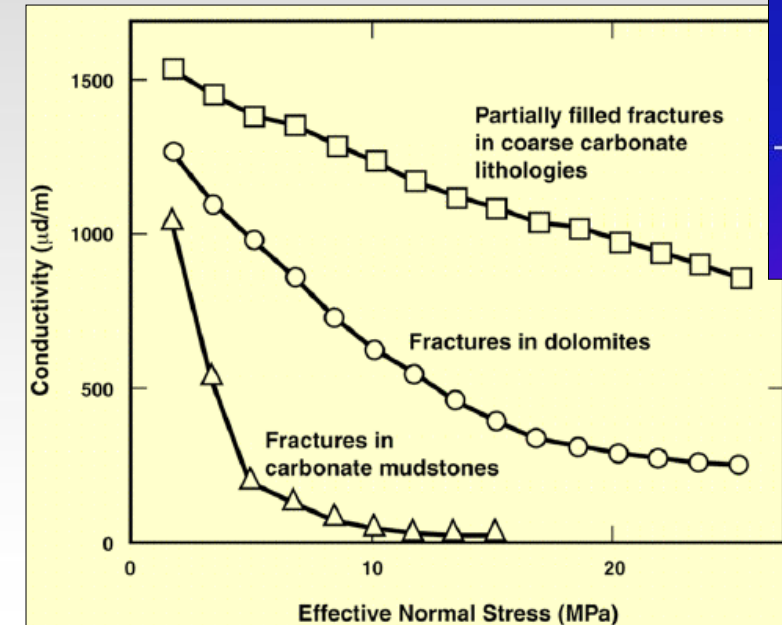
- Zonas sobrepresionadas (varía ΔP_p).
- Fracturamiento hidráulico (varía $\Delta \sigma$).

Formación Vaca Muerta (miembro inferior) - Argentina



Reservorios naturalmente fracturados

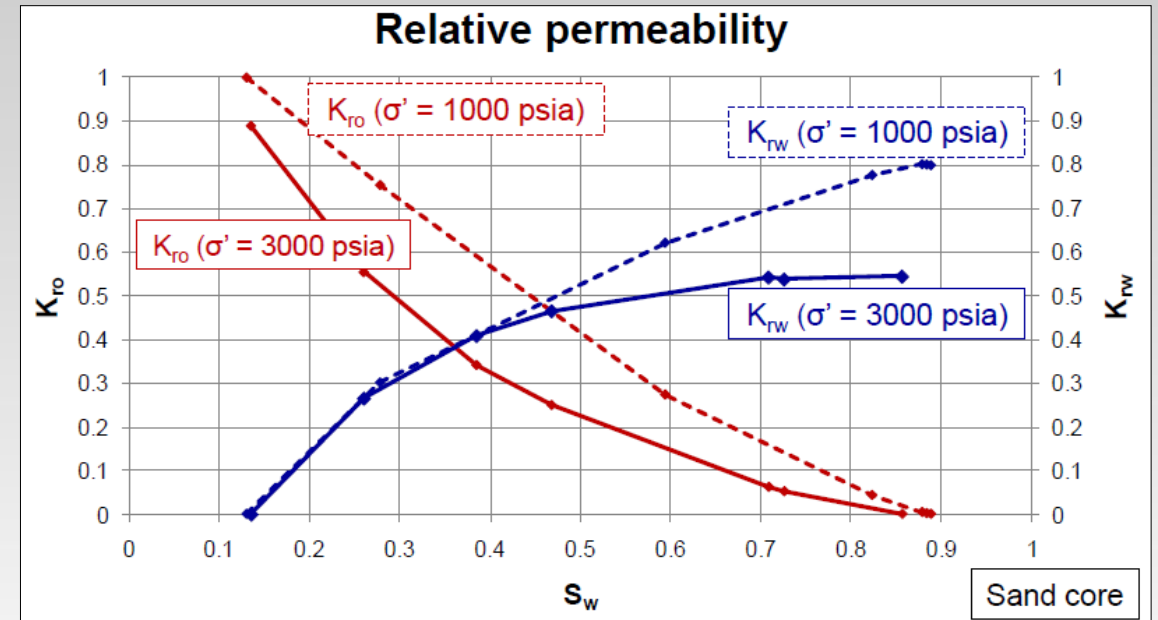
- Apertura de la fractura disminuye por aumento en esfuerzos normales efectivos (baja la productividad).



(Lorentz, JPT, Jan 1999)

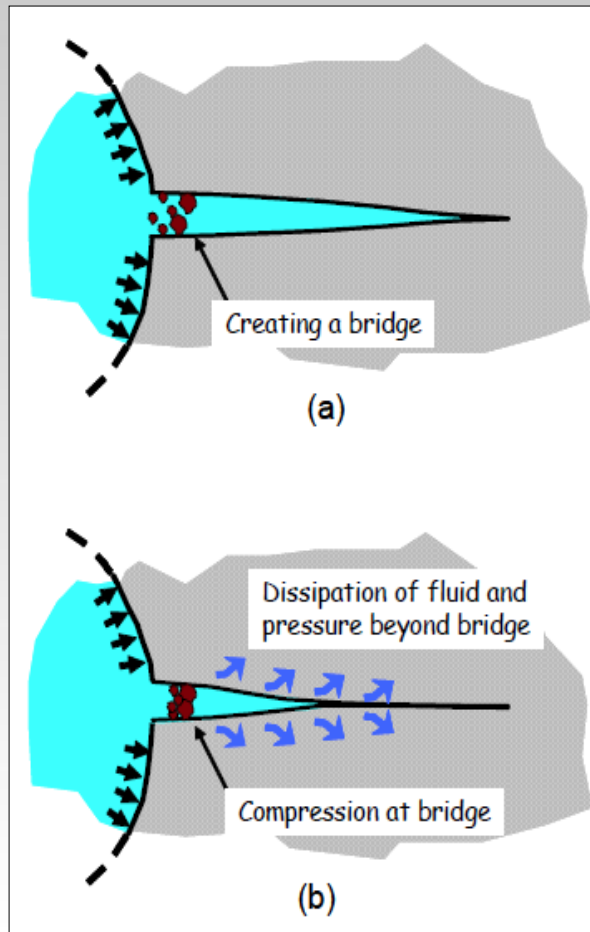
Tipos de daño geomecánico

- ❖ “Stress-Cage”
- ❖ Por cierre de fracturas.
- ❖ Efecto de la temperatura.
- ❖ Debido a la Concentración de esfuerzos.
- ❖ Producción de arena.



Santamaria and Lopera, 2014

Tipos de daño geomecánico: “stress-cage” (1/2)

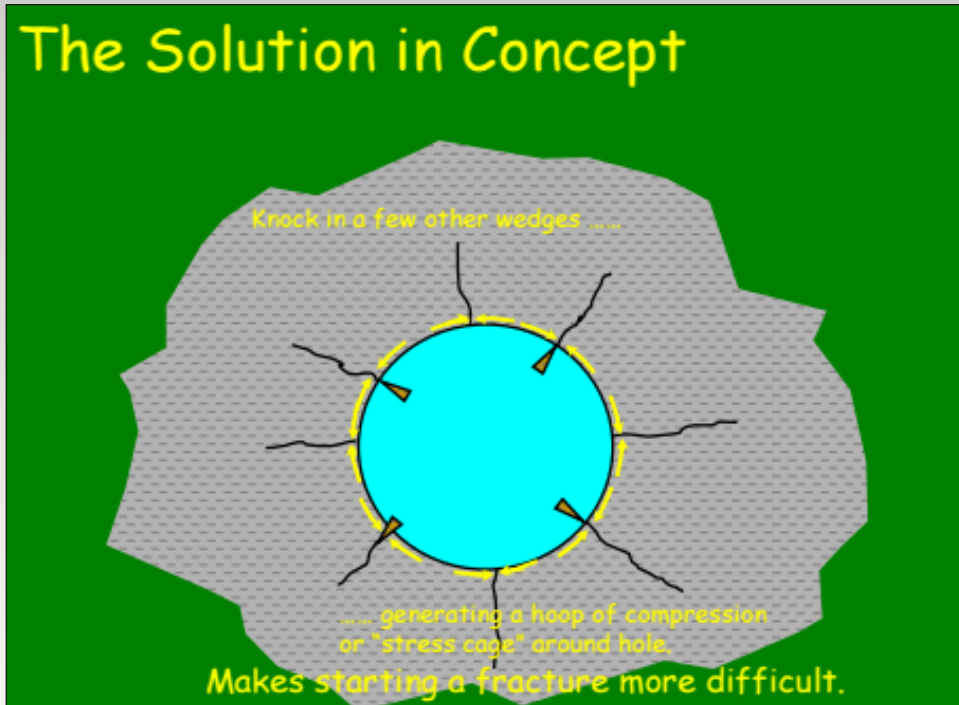


Mark et al, 2004.

- Operaciones de completamiento (Fracturamiento hidráulico), se hace necesaria la implementación de aditivos en los preflujos para alcanzar la apertura de fractura, dicho aditivos dan lugar a la acumulación de partículas atrapándose dentro del canal e flujo y generando el daño.
- Las fracturas naturales se taponan con los residuos de la “pega” de los aditivos → **“Stress Cage”**.
 - Pérdida de productividad de al menos el 50%.
 - Necesidad de estimulación química para reducción del daño.

En este caso la permeabilidad no disminuye por variaciones de ΔP_p y $\Delta \sigma$, sino por taponamiento de los poros.

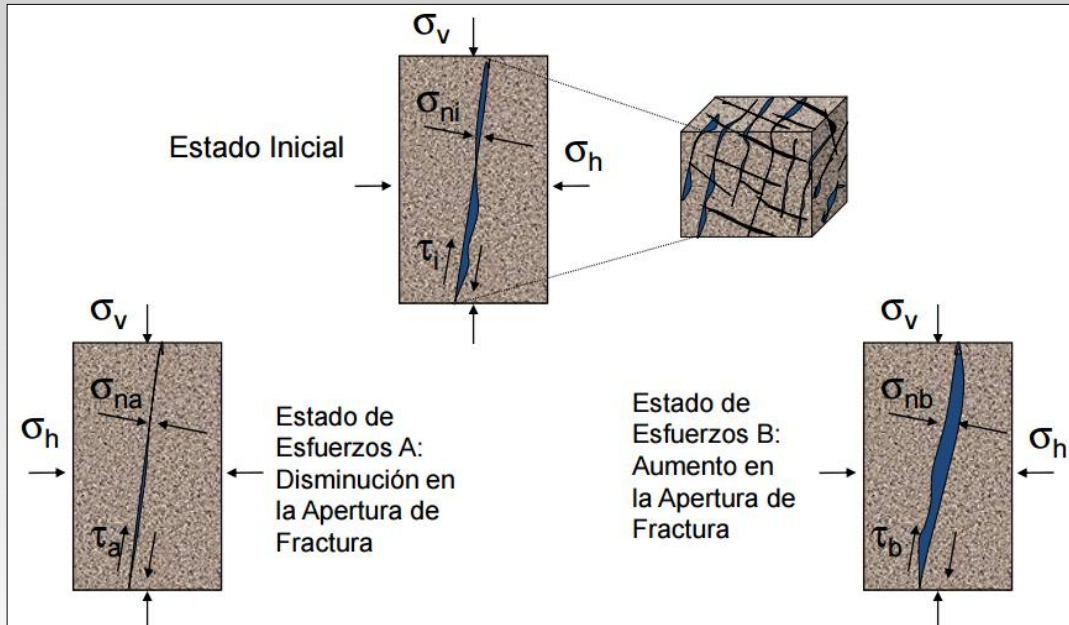
Tipos de daño geomecánico: “stress-cage” (2/2)



- Método de “fortalecimiento” o sellamiento de una roca.
- Previene el flujo de fluidos dentro o fuera de la formación con “stress-cage”.
- Se usan: agentes de puenteo (LCM), Agentes de cementación, fluidos de perforación de bajo contenido de sólidos.

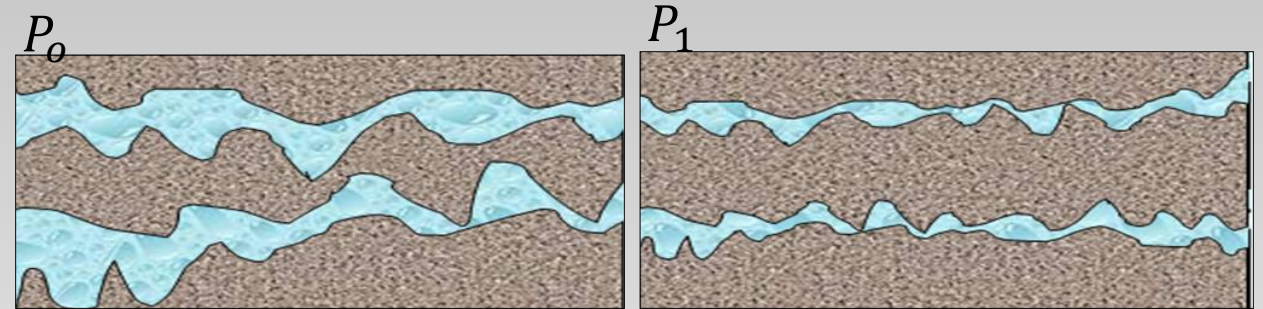
Wang, 2007

Tipos de daño geomecánico: cierre de fracturas (1/2)



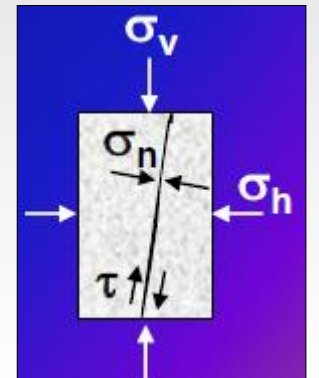
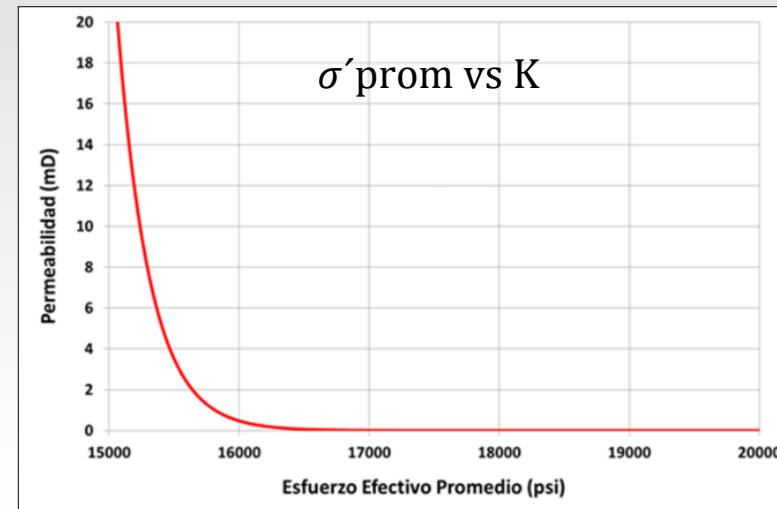
Osorio, J.G. 2014

“La apertura de Fractura varía en función del estado de esfuerzos”



Si $P_1 < P_o \rightarrow \sigma'$ aumenta

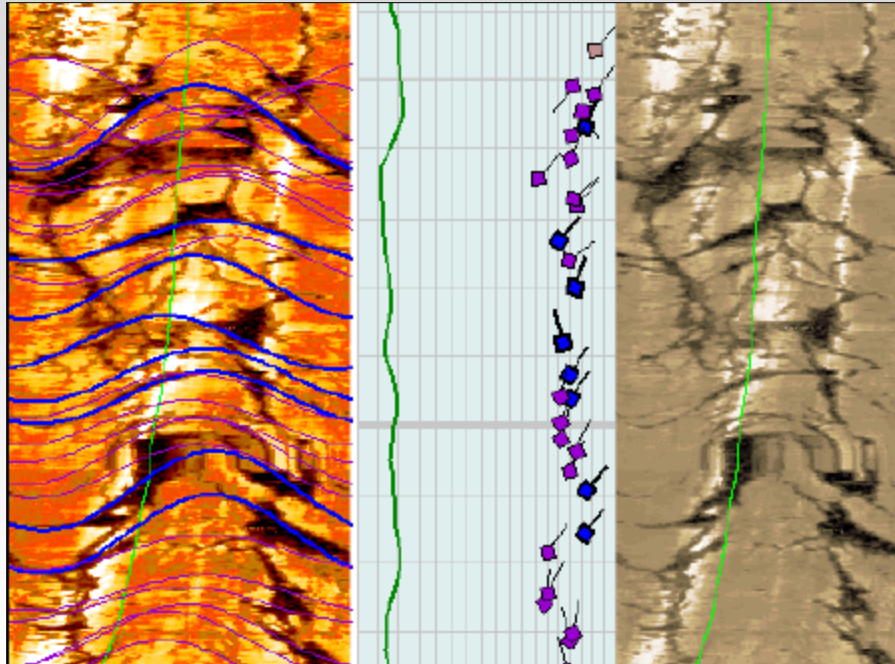
$$\sigma' = \sigma_{total} - \alpha P_p$$



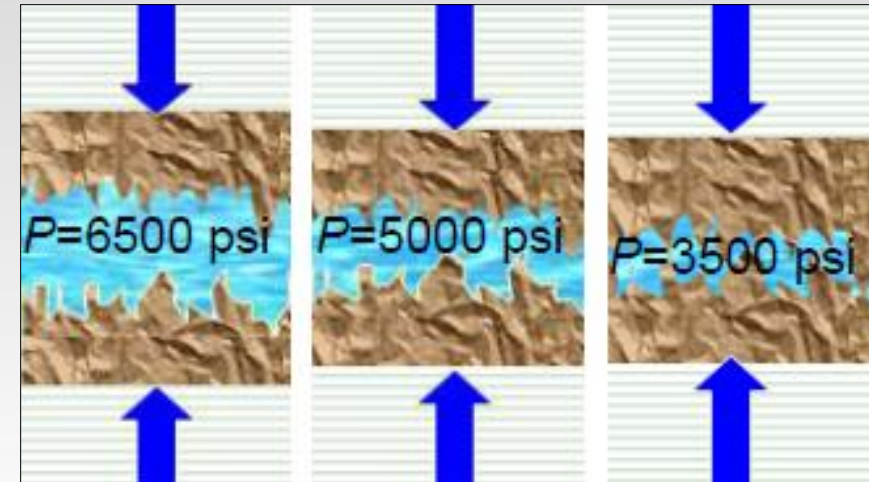
Tipos de daño geomecánico: cierre de fracturas (2/2)

Condiciones para que un sistema naturalmente fracturado (sensible a esfuerzos) ocurra daño geomecánico:

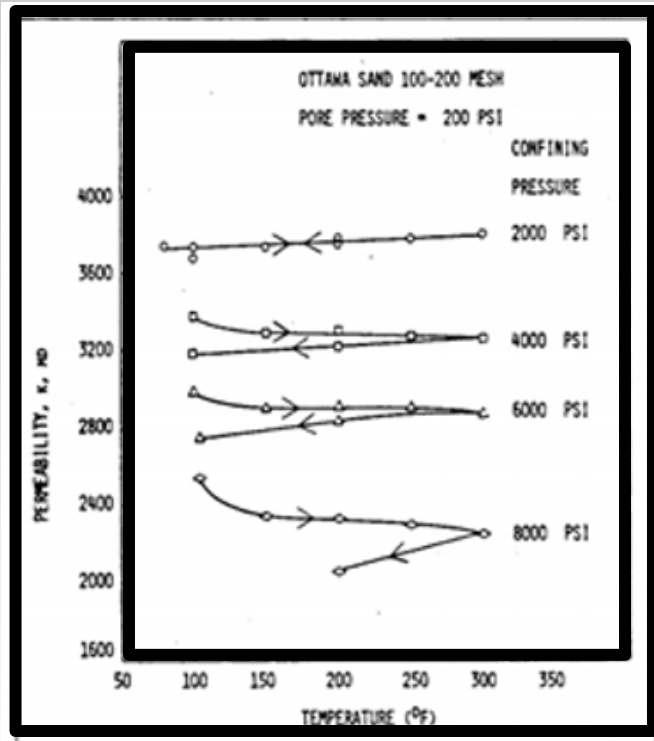
**Existencia de fracturas
(abiertas o cerradas)**



**Variaciones en presión de poros
(por esfuerzos efectivos)**



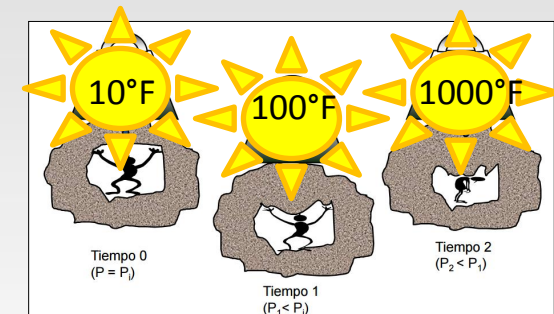
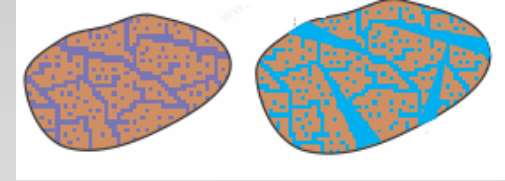
Tipos de daño geomecánico: por efectos térmicos (1/1)



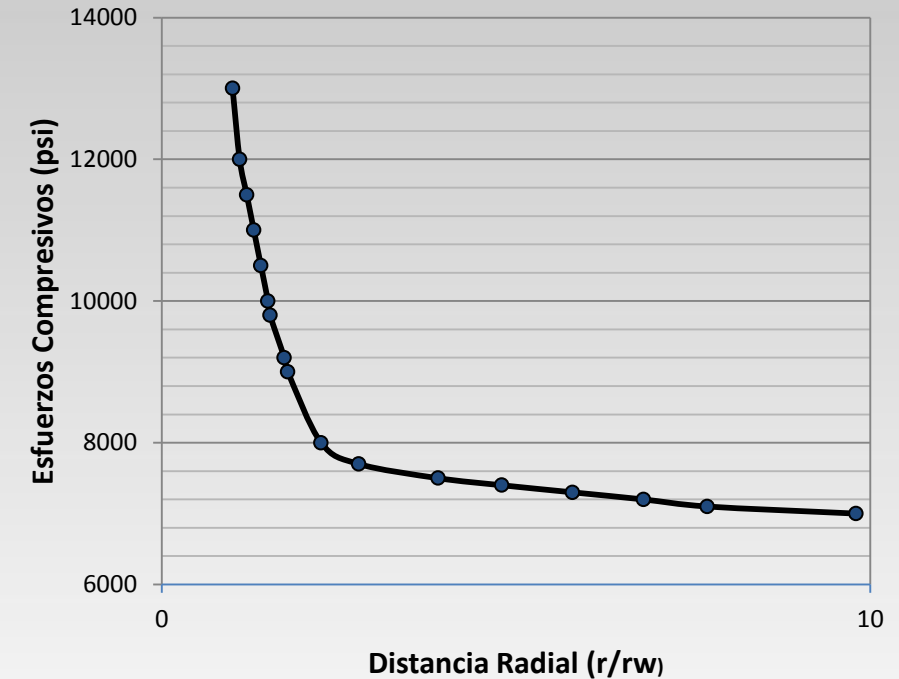
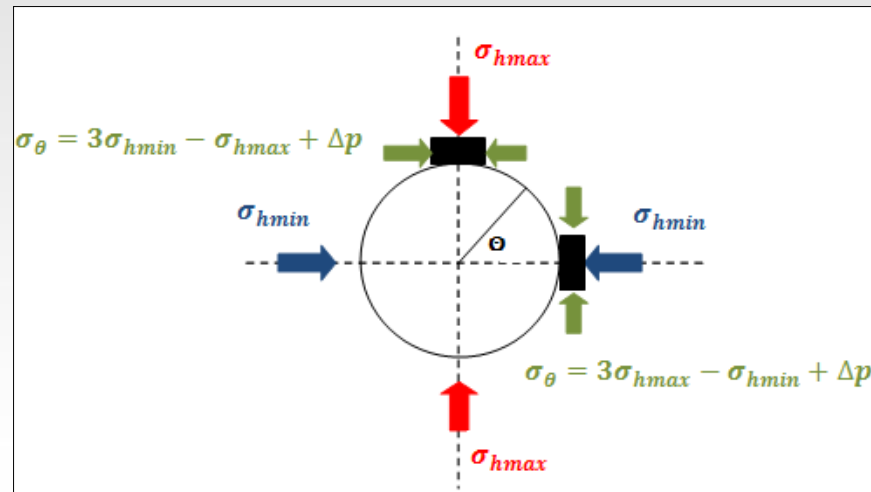
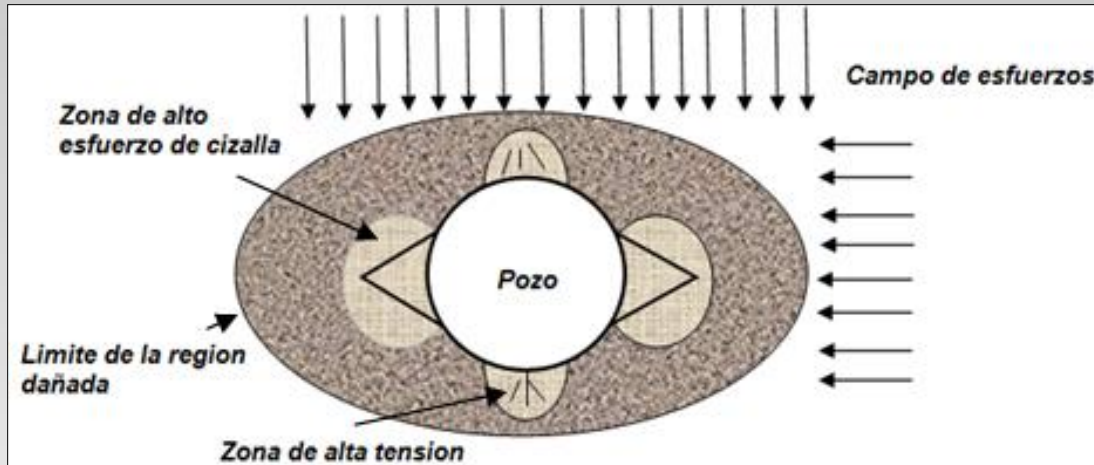
Permeabilidad vs. Temperatura,

Gobran, 1987

- La temperatura causa variaciones mineralógicas que produce expansiones térmicas en la estructura interna de los minerales pueden causar deformaciones permanentes en la roca.
- El aumento de la temperatura, aumenta la compresibilidad del volumen poroso.
- Se han observado aumentos aproximados del 20% al pasar de 75°F a 400°F. (Mayor reducción del volumen poroso en pozos de altas temperaturas).
- Efecto de histéresis – lo que refleja el daño creado
- Alaska: disminución anisotropía de esfuerzos → dilatación del poro → aumento K.



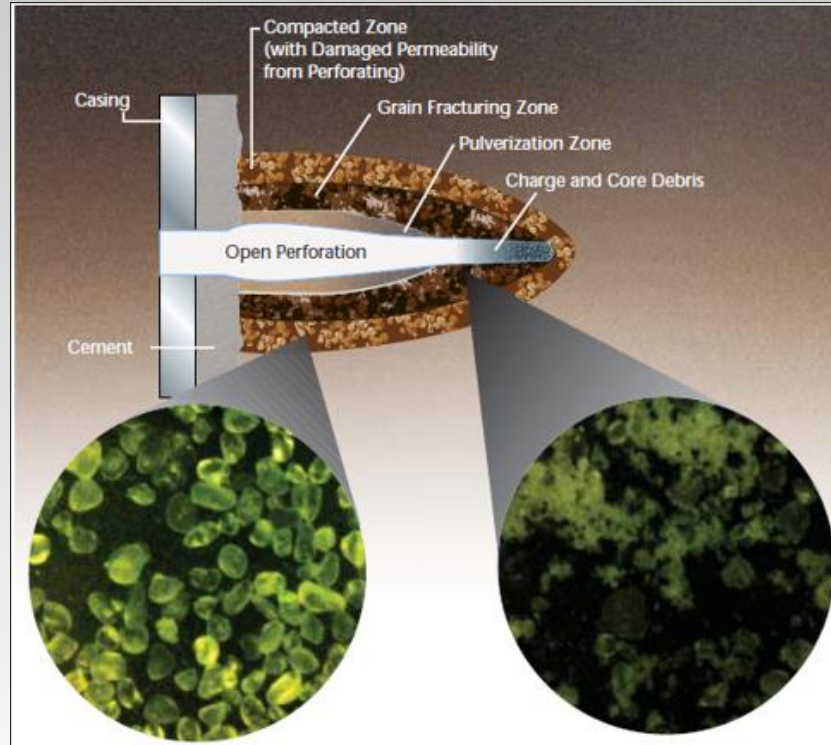
Tipos de daño geomecánico: concentración de esfuerzos (1/2)



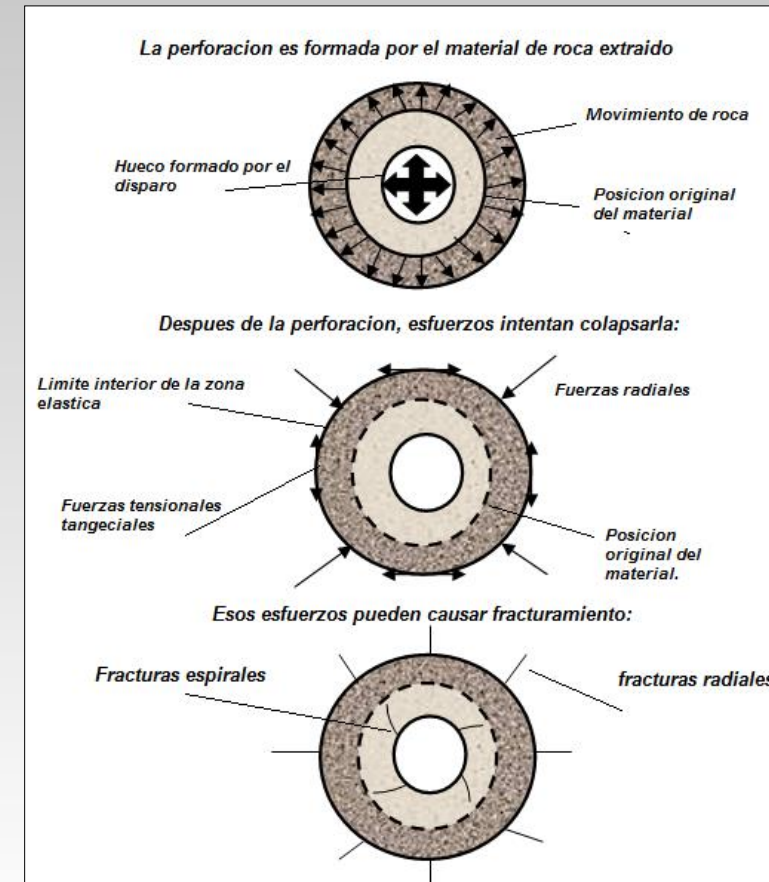
Cercanía a la cara del pozo → más esfuerzos compresivos.

Osorio, J.G. 2015

Tipos de daño geomecánico: concentración de esfuerzos (2/2)



Daño mecánico y geomecánico alrededor del túnel perforado
StimGun Technology "Propellant Technology Development Group" (2010)

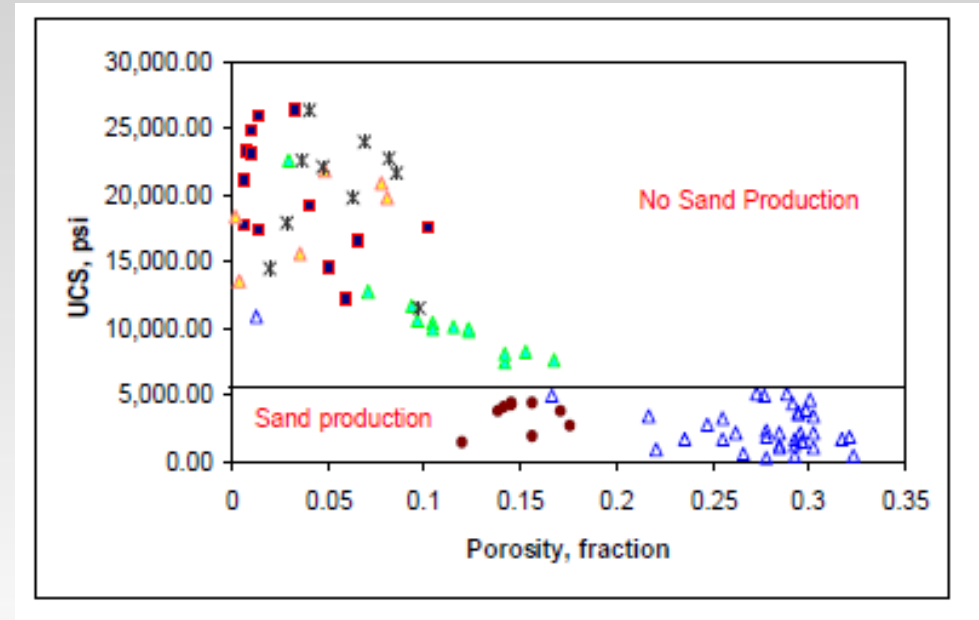


Mecanismos de daño creados por los perforados.
Pucknell et al. (1991)

Tipos de daño geomecánico: producción de arenas (1/1)

Propiedades que afectan la producción de arena:

- UCS
- Resistencia a la cohesión
- Resistencia a la tensión
- Angulo de fricción interna
- Permeabilidad y porosidad
- Mineralogía
- Distribución de arcillas



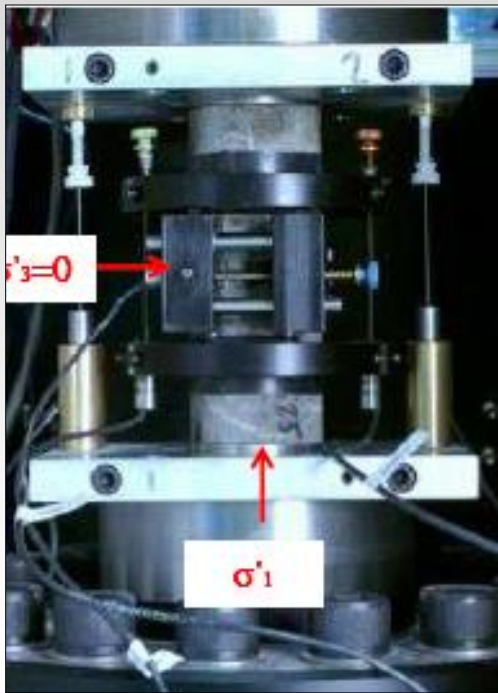
Correlación tendencias de arenamiento

Abbas et. al(2003)

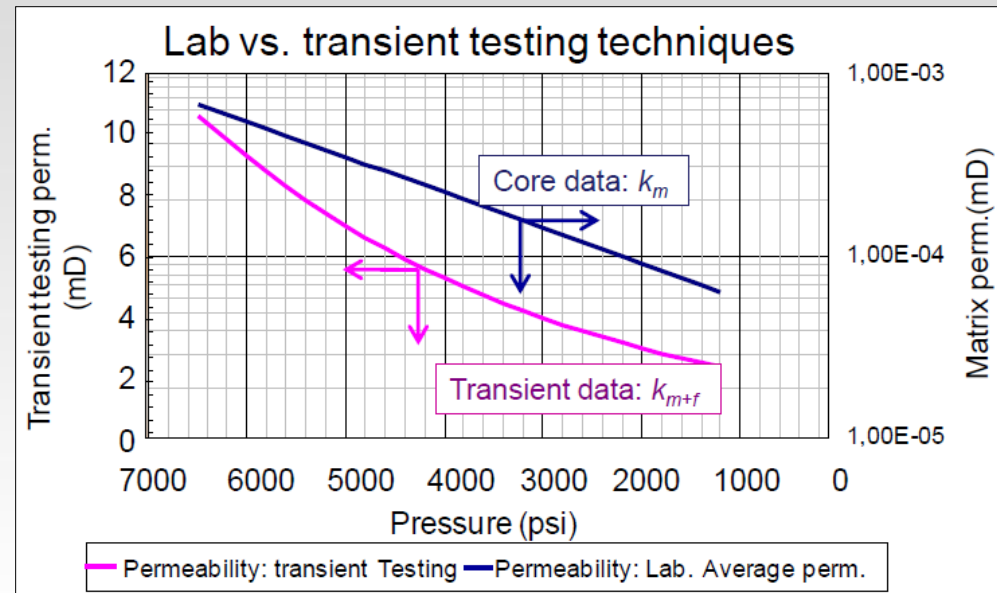
Evaluación del daño geomecánico (1/1)

Algunos métodos son:

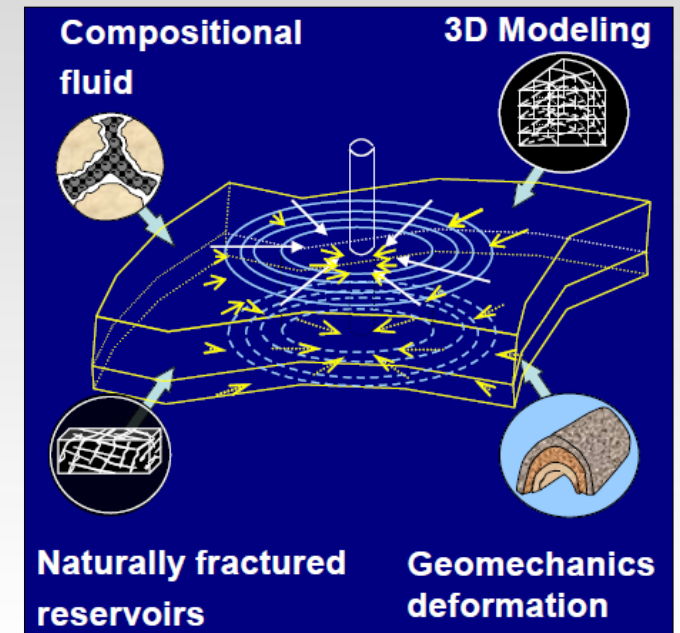
Pruebas de laboratorio



Pruebas de presión



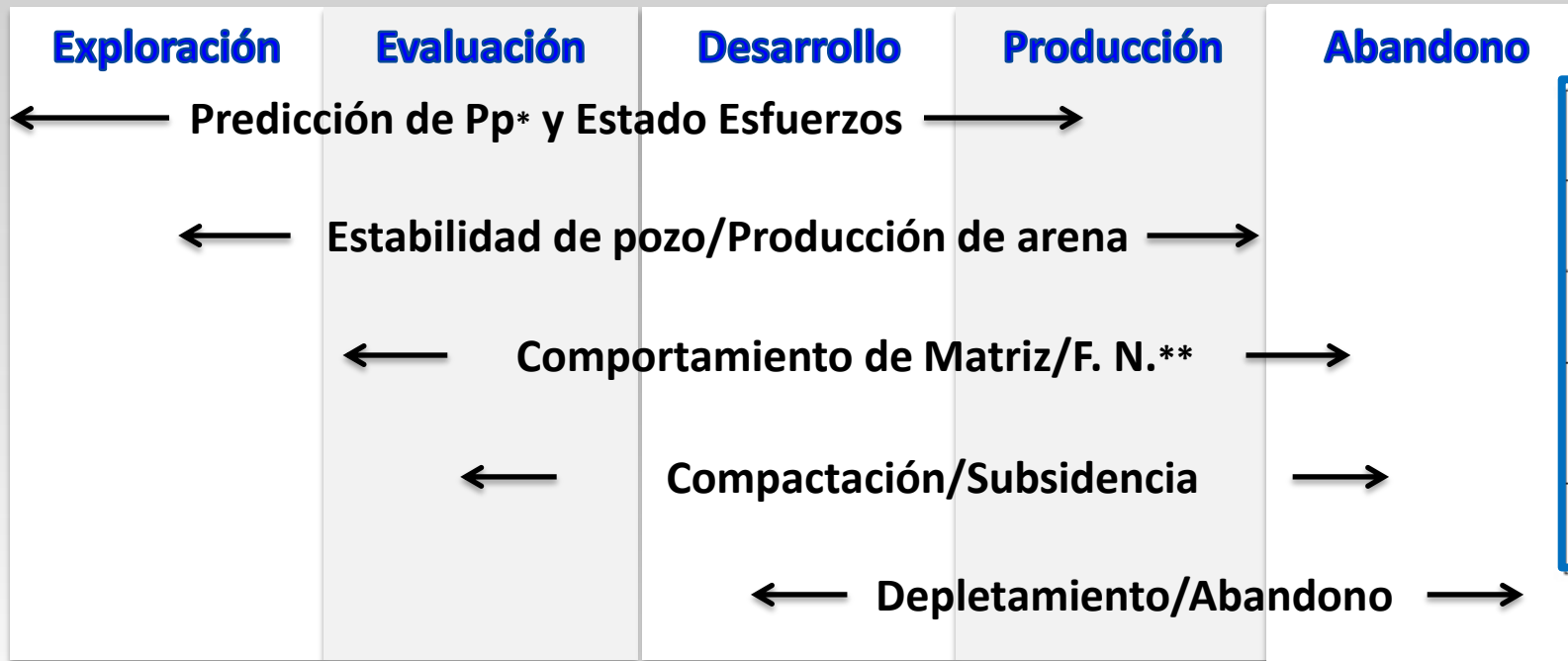
Simulación acoplada



Retos sobre el análisis del daño geomecánico (1/1)

- Metodología de desagregación del daño $\rightarrow \sigma_T(P) = \sigma_g(P) + \sigma$ (**Factores no dependientes de P**).
- Determinación del radio de investigación.
- Modelamiento de la apertura y cierre de fractura (lo más cercanos a la realidad).
- Pruebas de laboratorio con el estado de esfuerzos actual.
- Análisis más completo integrando: datos de producción, PLT, registros de imagen, microsismicidad, petrofísica, etc.
- Simulación acoplada integrando: modelamiento 3D, composición del fluido, deformación geomecánica, propiedades de la roca y de fracturas, etc.

Por qué estudiar el daño geomecánico? (1/1)



PERFORACION	Estabilidad de hoyos (Pega de tuberías, derumbes), Toma de núcleos, Pérdida de lodo, Interacción roca-mecha.
PRODUCCION	Producción de arena, Cañoneo, Fracturamiento Hidráulico, Forzamiento de grava (squeeze).
SUPERFICIAL	Levantamientos superficiales, subsidencia, sísmica, manejo de desechos
YACIMIENTOS	Esfuerzos, Compresibilidad y Permeabilidad vs. agotamiento, inyección de agua, indentificación de fracturas, fuerzas capilares.
EXPLORACION	Migración de hidrocarburos, Fracturas, Eficiencia de sellado de fallas, Modelaje de cuencas

Aspectos de la industria relacionados a la geomecánica ☺

Zoback, 2007

Juan Pablo Avalos Suárez

- *Resultados esperados:*

Modelo para Yacimientos Naturalmente Fracturados.

Productividad del pozo

$$IPR = IPR(\sigma, \Delta k_{m,f}, \Delta \phi_{m,f})$$

Daño geomecánico debido al cierre de fracturas naturales

Ximena Rodríguez Flórez

Resultados esperados:

- Variables que generan mayor impacto en el DG (orientación, apertura, otros.)
- Cálculo de la extensión del radio de afectación el DG en el pozo.
- Intensidad del grado de afectación del DG.

Análisis del DG de fracturas naturales debido a los esfuerzos inducidos por producción de fluidos.

Gran impacto en la productividad del pozo!

DIAGNÓSTICO DE DAÑO GEOMECÁNICO

Jorge Segura Medina

- *Resultados esperados:*

protocolo de completamiento de pozos:

Mitigación del daño Geomecánico

Mitigación del daño geomecánico a partir del protocolo de completamiento del pozo

Efecto de la temperatura en el daño geomecánico

Jhon Alexander Uribe Patiño

Resultados esperados:

- Un método analítico para calcular el impacto de los cambios de temperatura en la productividad de pozos.
- Cálculo del radio de afectación y la propagación del efecto térmico en el yacimiento.

Reducir el impacto de DG presente y optimizar la productividad de los pozos.

Pueden las operaciones térmicas causar daño de formación ?

DAÑO GEOMECÁNICO DE SISTEMAS NATURALMENTE FRACTURADOS DEBIDO A ESFUERZOS INDUCIDOS POR PRODUCCIÓN DE FLUIDOS

Método Diagnóstico

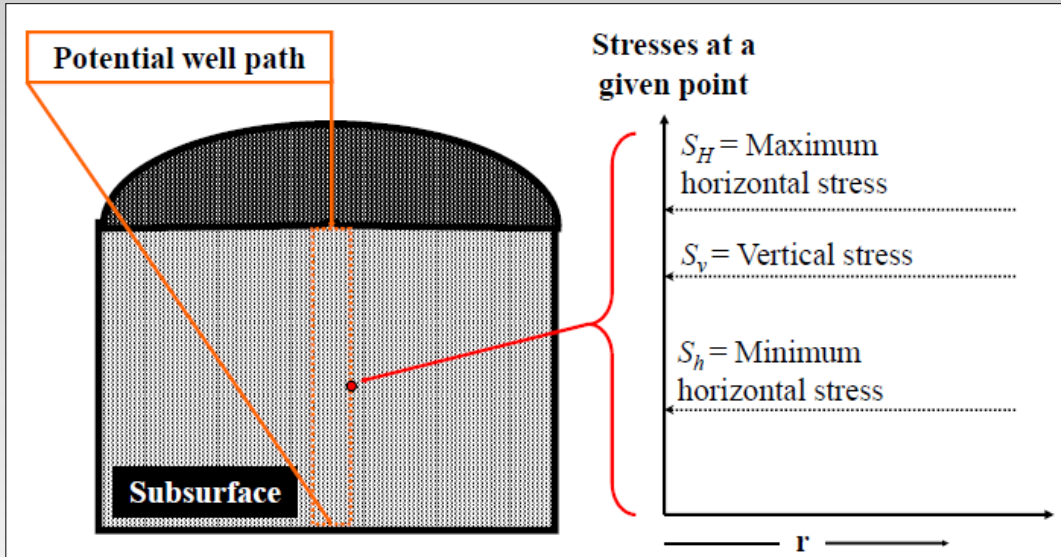
Estudiante: Ximena A. Rodríguez Flórez

xarodriguezf@unal.edu.co

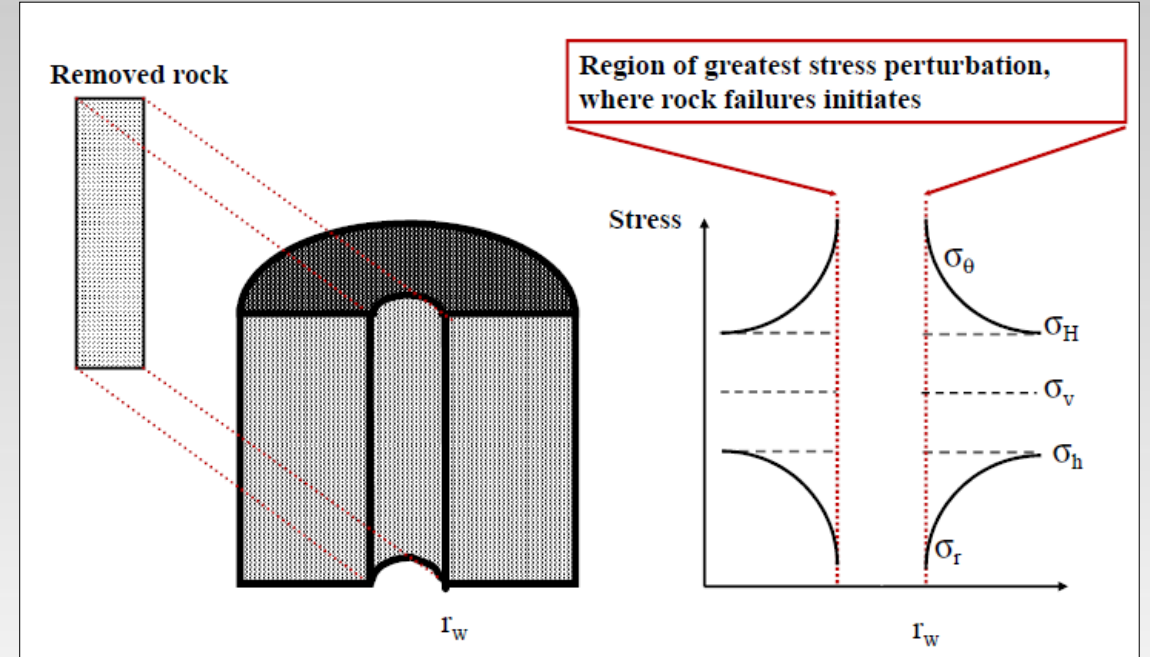
Director tesis: José Gildardo Osorio Gallego

gosorio@unal.edu.co

Planteamiento del problema



ANTES

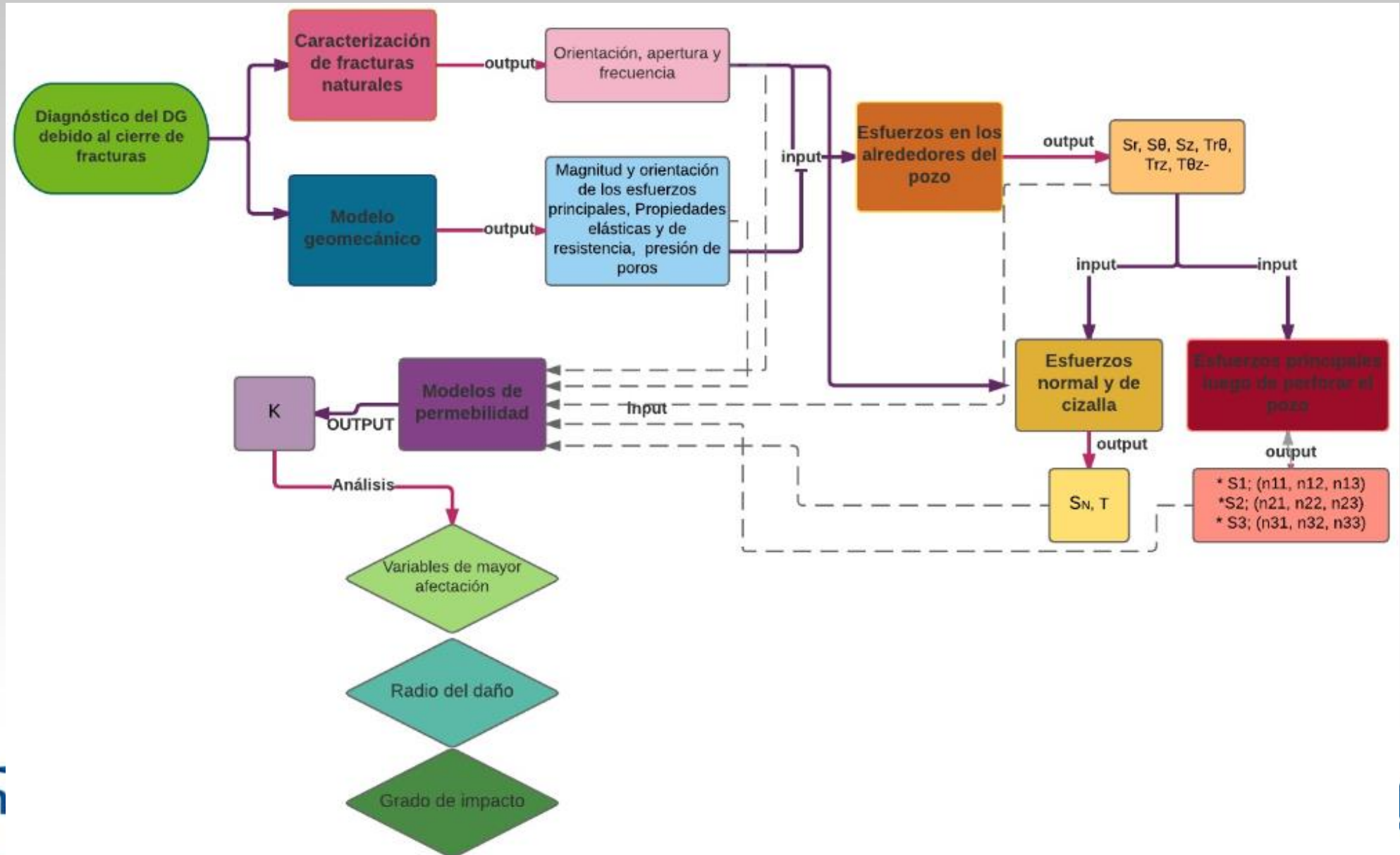


DESPUÉS

Esquema general de A- pozo sin perforar (Tomado de Osorio, J.G., 2015); B- pozo perforado (Tomado de Osorio, J.G., 2015).

Se genera anisotropía de esfuerzos → Disminución de permeabilidad.

Modelo conceptual

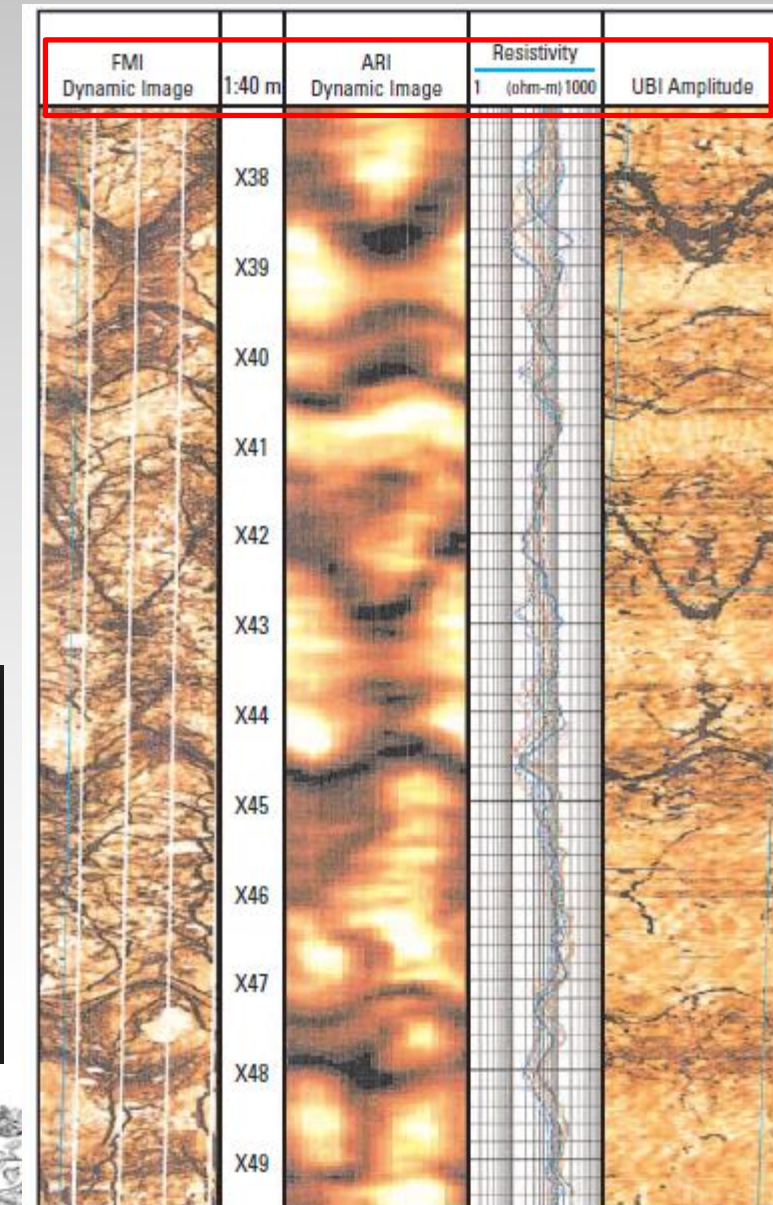
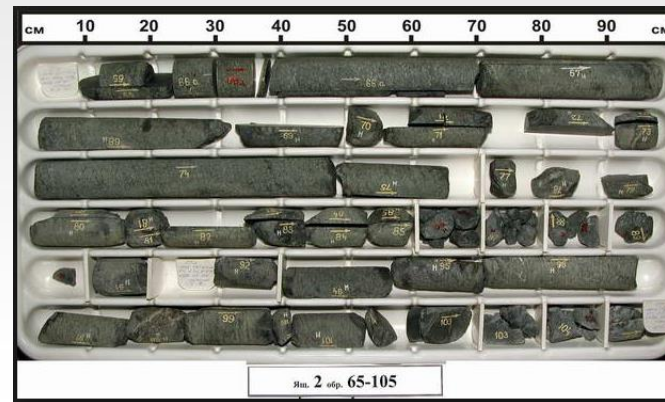


1- Fuentes de información:

A- Levantamiento sistemático de macizos rocosos en afloramientos en los alrededores del pozo.

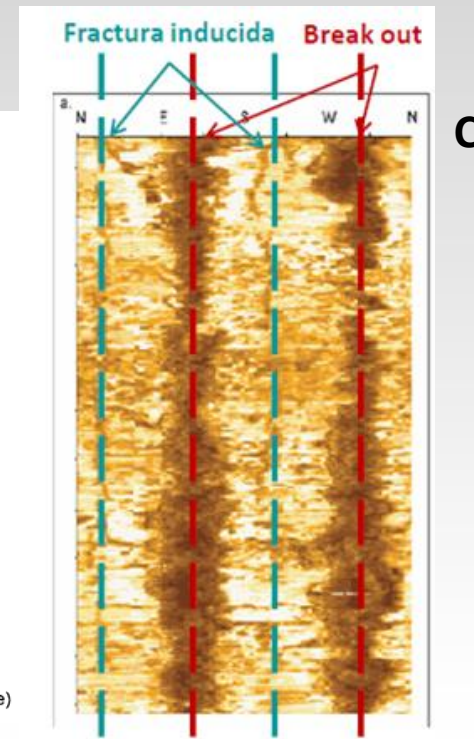
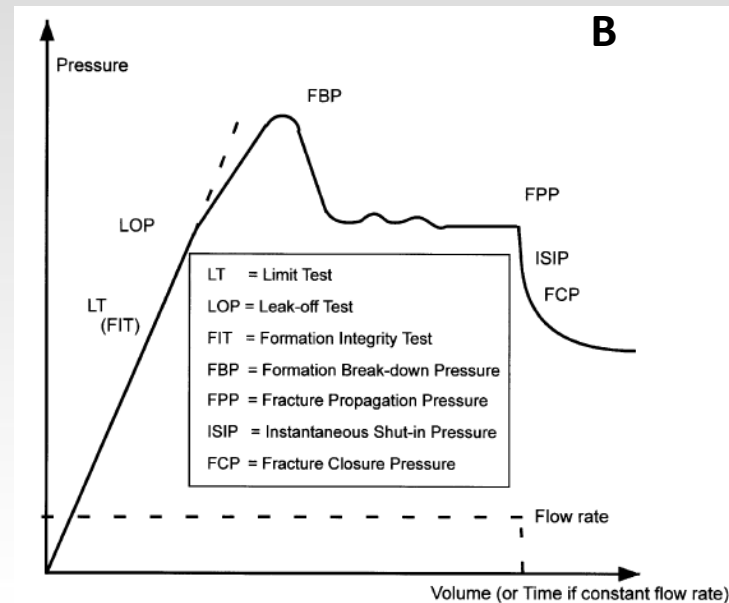
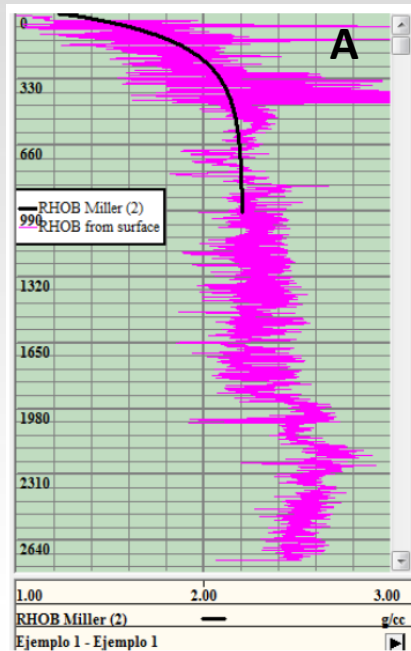
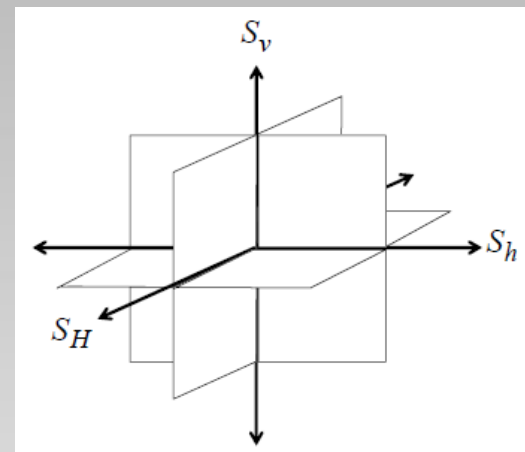
B- Registros geofísicos y de imágenes: FMI (Formation microscanner image), UBI (Ultrasonic borehole image), ARI (Azimuthal Resistivity Imager), etc.

C- Registros de núcleos.



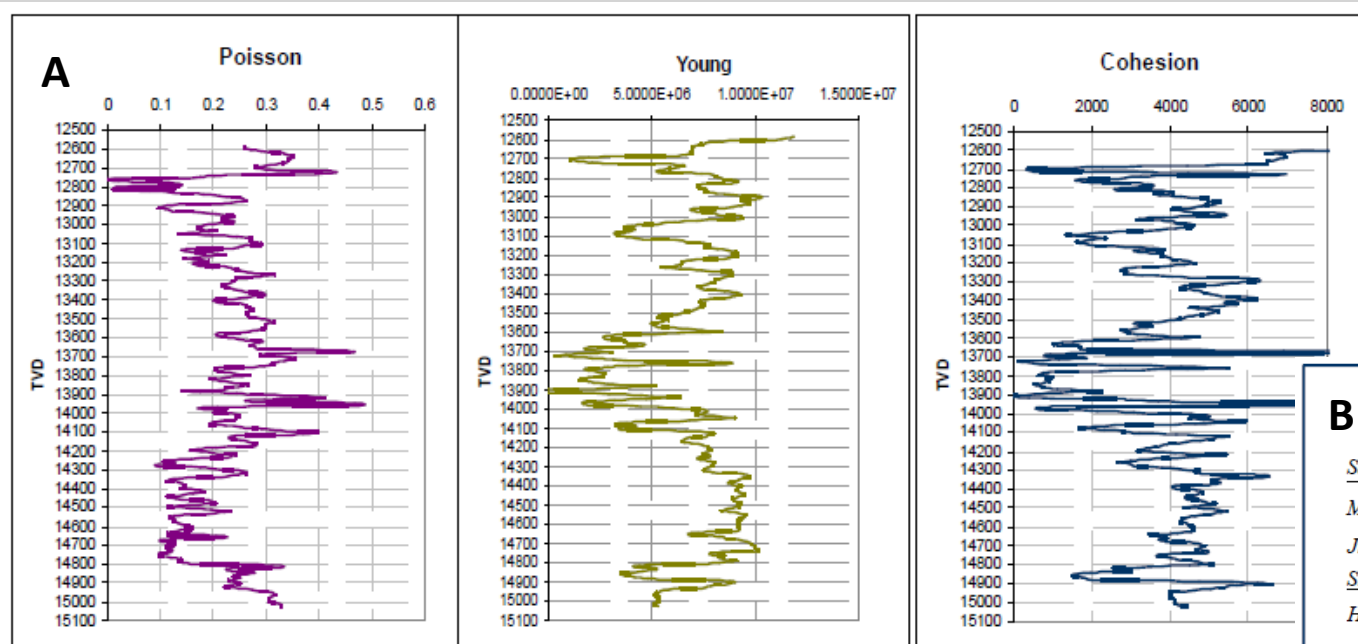
2- Modelo geomecánico

A- Magnitud y orientación de los esfuerzos principales: S_v , S_h , S_H .



cálculo de esfuerzos principales: A- registro de densidad (S_v); B- pruebas LOT (S_h); C- registro de breakouts (S_H).
(Tomado de Osorio, J..G., 2015)

B- Propiedades geomecánicas (elásticas y de resistencia): Módulo de Young, relación de Poisson, cohesión, ángulo de fricción interna, UCS, etc., y presión de poros.



B Correlaciones para UCS

Sandstone, Siltstone

McNally : $UCS = 185165e^{-0.037DT_p}$

Jizba : $UCS = 3668e^{4.14 \cdot 10^{-7} E}$

Shale

Horsrud : $UCS = 2.12 \cdot 10^9 DT_p^{-2.93}$

Golfo de México : $UCS = 2.05 \cdot 10^9 DT_p^{-3}$

Limestone & Dolomite

Militzer : $UCS = \left(\frac{7682}{DT_p}\right)^{1.82}$

Goluveb : $UCS = 10^{\frac{2.44 + \frac{109.14}{DT_p}}{1}}$

General

Lacy : $UCS = 248.7E^2 + 2458E$

Correlaciones para ángulo de fricción interna

Lal : $\phi(rad) = \sin^{-1}\left(\frac{v_p - 1}{v_p + 1}\right)$

Chang & Zoback : $\phi(^{\circ}) = 18.532v_p^{0.5148}$

Cohesión

$$\tau_0 = \frac{UCS}{2 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)}$$

3- Cálculo analítico de la distribución de esfuerzos en los alrededores del pozo

$$\sigma_r = \sigma_h + (\sigma_h - p_w) \frac{R_w^2}{R_o^2 - R_w^2} \left[1 - \left(\frac{R_o}{r} \right)^2 \right] - (p_{fo} - p_w) \eta \left\{ \frac{R_w^2}{R_o^2 - R_w^2} \left[1 - \left(\frac{R_o}{r} \right)^2 \right] + \frac{\ln \left(\frac{R_o}{r} \right)}{\ln \left(\frac{R_o}{R_w} \right)} \right\}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_h + (\sigma_h - p_w) \frac{R_w^2}{R_o^2 - R_w^2} \left[1 + \left(\frac{R_o}{r} \right)^2 \right] - (p_{fo} - p_w) \eta \left\{ \frac{R_w^2}{R_o^2 - R_w^2} \left[1 + \left(\frac{R_o}{r} \right)^2 \right] + \frac{\ln \left(\frac{R_o}{r} \right) - 1}{\ln \left(\frac{R_o}{R_w} \right)} \right\}$$

$$\sigma_z = \sigma_v + 2V_{fr} (\sigma_h - p_w) \frac{R_w^2}{R_o^2 - R_w^2} - (p_{fo} - p_w) \eta \left\{ \frac{2V_{fr} R_w^2}{R_o^2 - R_w^2} + \frac{2 \ln \left(\frac{R_o}{r} \right) - V_{fr}}{\ln \left(\frac{R_o}{R_w} \right)} \right\}$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \sigma_{\theta\theta} & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Donde,

P_f : presión del fluido del reservorio en la pared del pozo

P_w : presión interna

R_w : radio del pozo

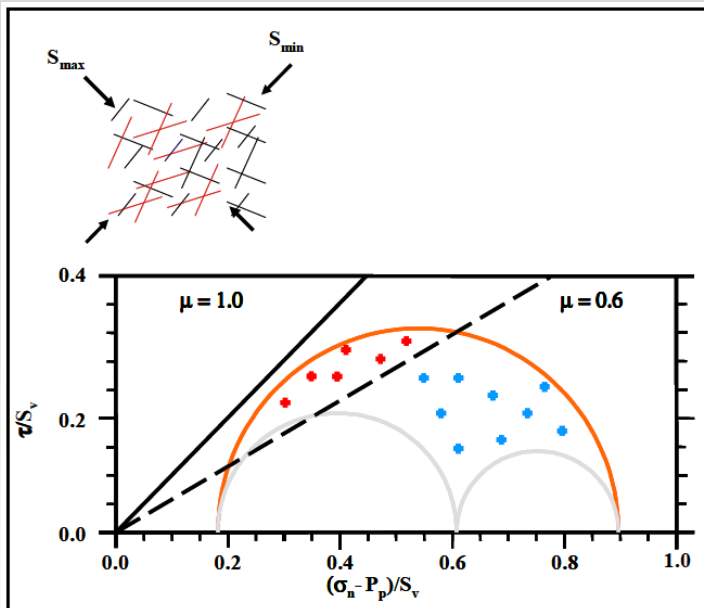
R_o : radio de la pared de investigación del pozo

V_{fr} : relación de Poisson

η : coeficiente del esfuerzo poroelástico

4- Modelamiento de la pérdida de permeabilidad por cierre de fracturas

Teoría friccional del círculo de Mohr:



Donde,

T : esfuerzo tangencial; σ_n : esfuerzo normal; μ : ángulo de fricción interna; P_p : presión de poros; S_v : esfuerzo vertical; S_{max} : esfuerzo máximo principal; S_{min} : esfuerzo mínimo principal

Ki-Bok, M., et al, 2004:

$$k_x = \frac{fx}{12} [br + bmax \exp\{-(\alpha x \sigma_x + \alpha y \sigma_y)\}]^3 + \frac{f dx}{12} [dmax [1 - \exp\{-\gamma x (k - kc)\}]]^3$$

$$k_y = \frac{fy}{12} [br + bmax \exp\{-(\beta x \sigma_x + \beta y \sigma_y)\}]^3 + \frac{f dy}{12} [dmax [1 - \exp\{-\gamma y (k - kc)\}]]^3$$

Donde,

K_x : permeabilidad en la dirección x ; K_y : permeabilidad en la dirección y ; $bmax$: apertura máxima de la fractura; br : apertura hidráulica residual; α : parámetro de curvatura; σ : esfuerzo normal a través de la fractura

Jin, M., 2000:

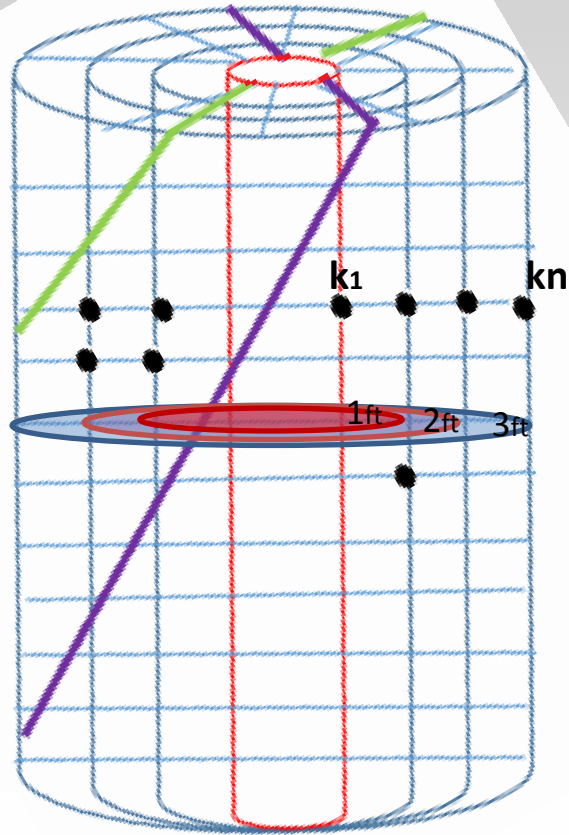
$$k = k_o [\alpha \phi_o + (1 - \alpha \phi_o) e^{(\sigma - \sigma_o) 2 C_p \phi_o^2}]$$

$$\Delta k = \frac{(e + w \Delta \epsilon)^3}{12w}$$

Donde,

α : coeficiente de permeabilidad inicial; ϕ_o : porosidad; $\Delta \epsilon$: deformación elástica; w : espaciamento de la fractura.

Resultados esperados



$r =$ extensión del radio de afectación por DG.

Parámetros de mayor impacto en el DG.

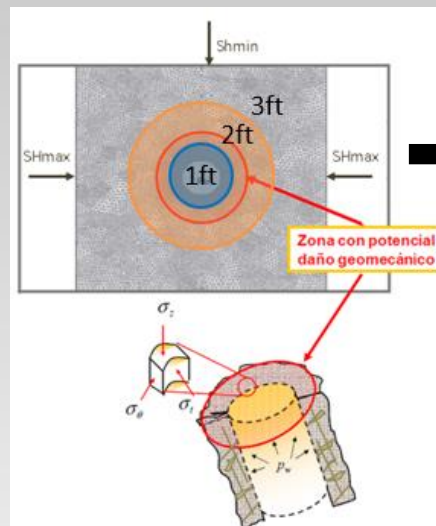
- Atributos de las fracturas naturales (orientación, apertura, etc.).
- Inclínación del pozo.
- Esfuerzos en los alrededores del pozo.
- Anisotropía de esfuerzos.



Impacto del DG.

Impacto en productividad

LOS SISTEMAS
NATURALMENTE
FRACTURADOS SON
SENSIBLES A
ESFUERZOS



PÉRDIDAS EN
PRODUCTIVIDAD DE
HASTA **80%.**

UN POZO que
produzca
1,000 bls/día
puede caer a
200 bls/día.

PÉRDIDAS EN SOLO UN AÑO DE
(200bls*365días) = **292,000 bls**
15 MILLONES DE DÓLARES.



GANANCIA
5 a 8 MILLONES DE DÓLARES X 1 AÑO
50 a 80 MILLONES DE DÓLARES X 10 AÑOS

CONOCIENDO:

* Parámetros de mayor impacto en el daño geomecánico:

1. Anisotropía de esfuerzos.
2. Propiedades geomecánicas.
3. Orientación, apertura, frecuencia.. de fracturas naturales.
4. Inclinação del pozo.
5. Esfuerzos en los alrededores del pozo.

* Extensión del radio de afectación del Daño Geomecánico.

Entre 1-3ft

* Impacto del daño geomecánico en el pozo.
Bajo-Medio-Alto-Severo.

META: MEJORAR
LA PRODUCTIVIDAD
ENTRE **30-50%.**

