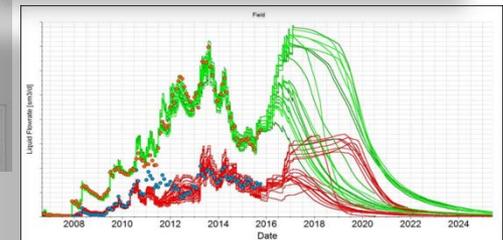
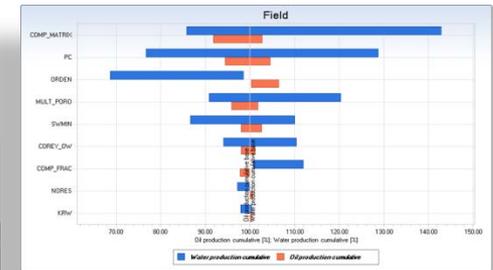
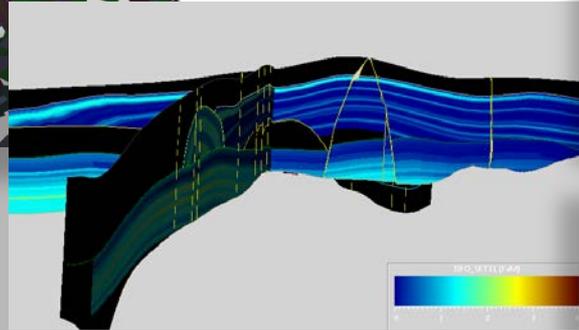
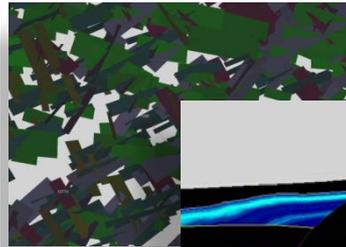




## MODELADO ESTÁTICO Y DINÁMICO DE UN RESERVORIO DE ROCAS VOLCÁNICAS. CASO DE ESTUDIO: GRUPO CHOIYOI, CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA



**Nieto Virginia**, Pampa Energía S.A, virginia.nieto@pampaenergia.com

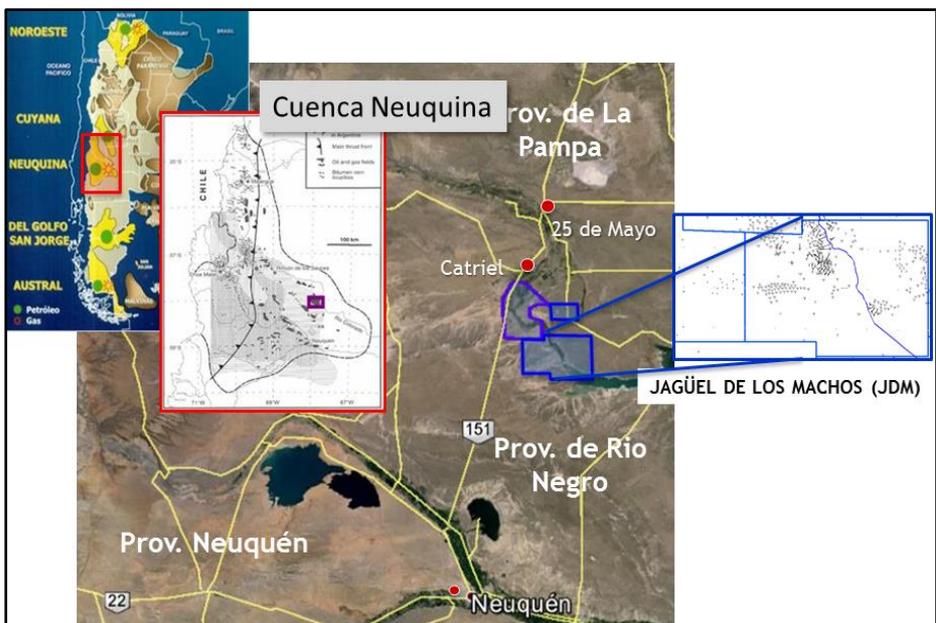
**Monsalvo Guillermo**; Pampa Energía S.A, guillermo.fernandez@pampaenergia.com

**Becerra Gustavo**, Pampa Energía S.A , gustavo.becerra@pampaenergia.com

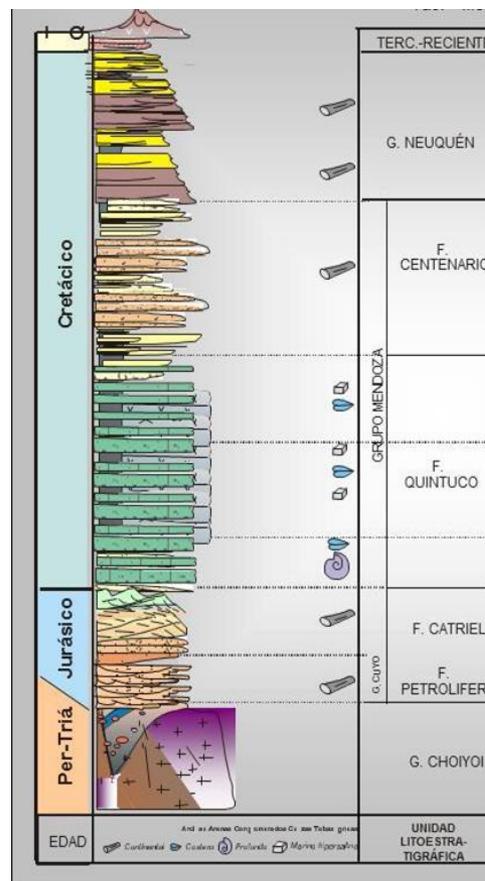


# INTRODUCCIÓN

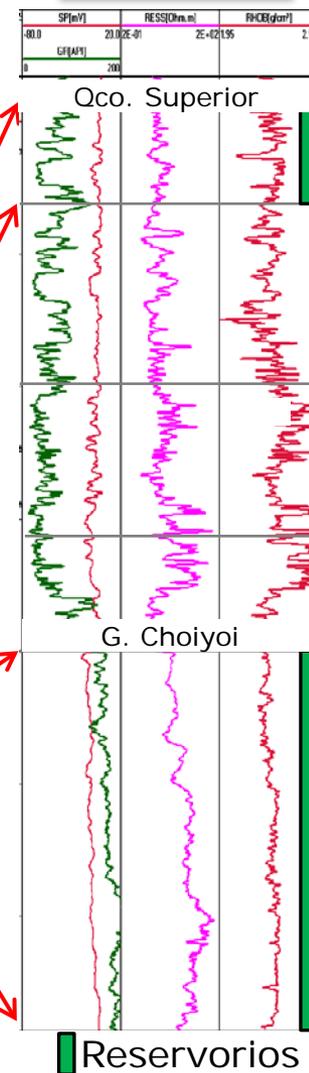
## Ubicación



## Columna Estratigráfica

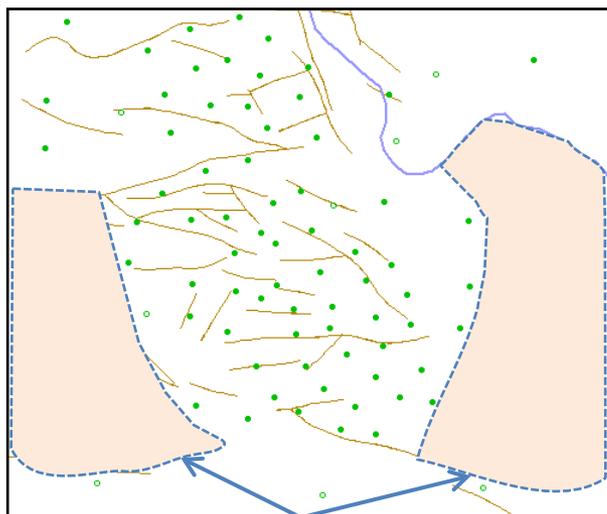
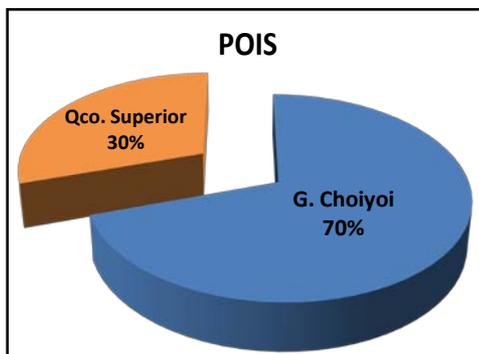


## Perfil tipo

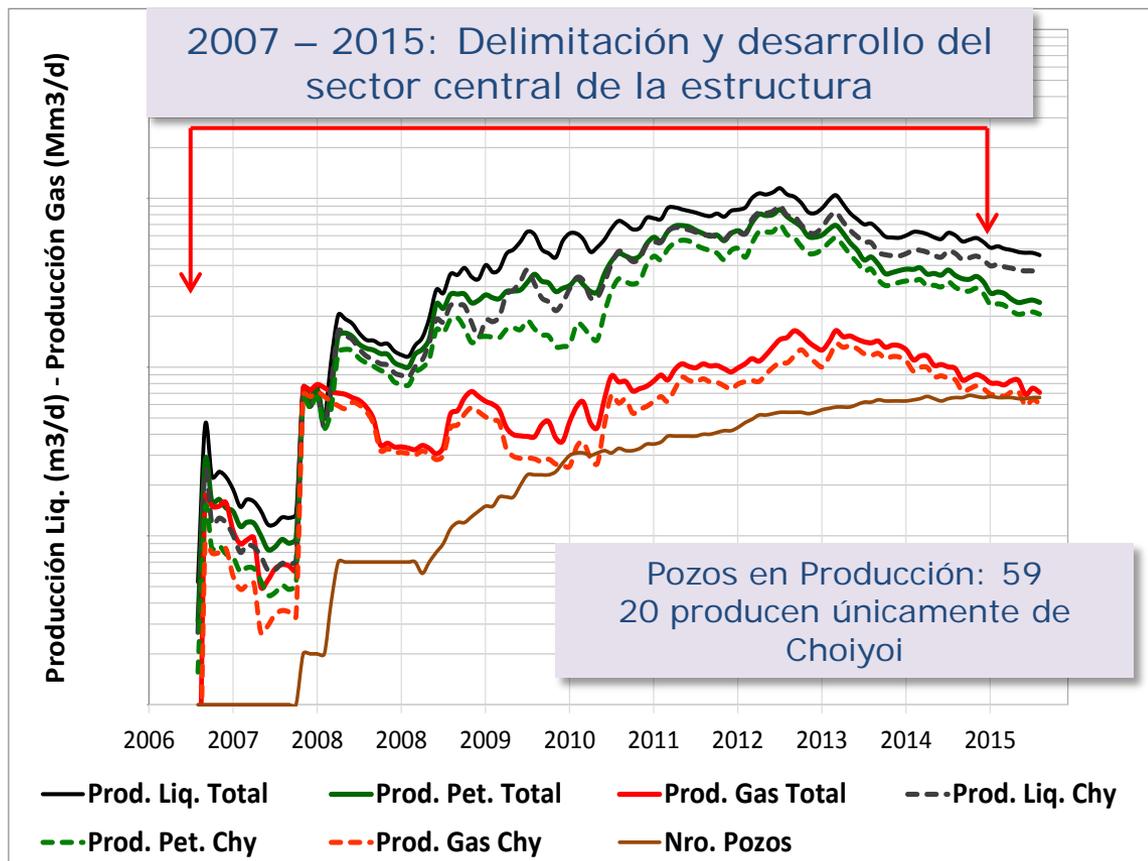




# INTRODUCCIÓN



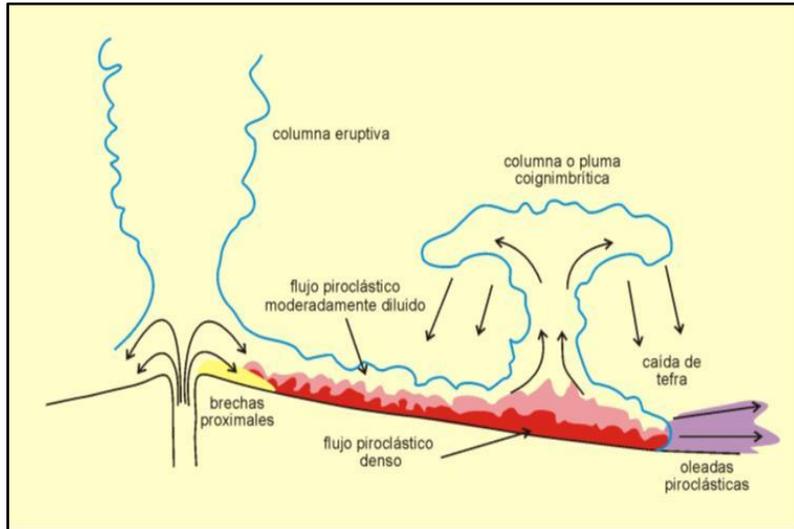
Nuevas Zonas de Desarrollo





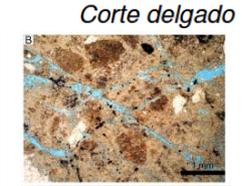
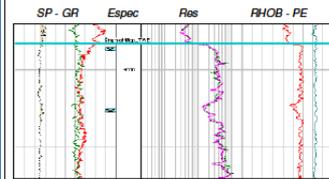
# PROBLEMÁTICA

## Modelo de Depositación

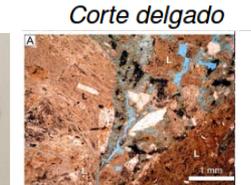
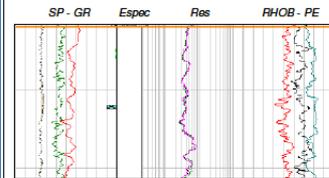


## Rocas volcánicas

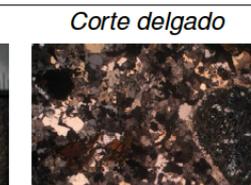
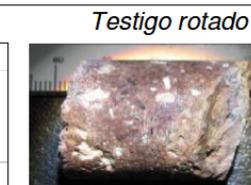
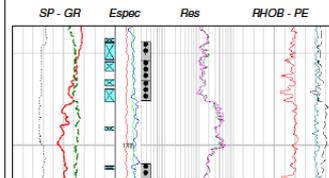
TA-1096 **Ignimbrita-soldada**



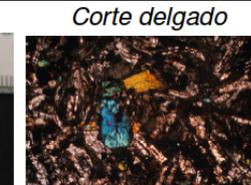
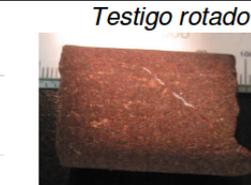
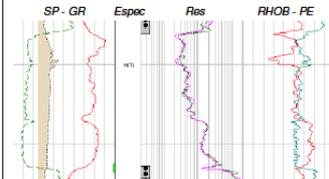
TA-1097 **Ign-no sol**



TA-1080 **Subvolcanico**



JDM-1010 **Basalto**



**Ignimbritas**

**Alto grado de soldamiento**  
 Baja porosidad.  
 Productividad asociada al *flujo en las fracturas*.

**Soldamiento moderado**  
 Mejores propiedades.  
**Aporte de la matriz**



# PROBLEMÁTICA

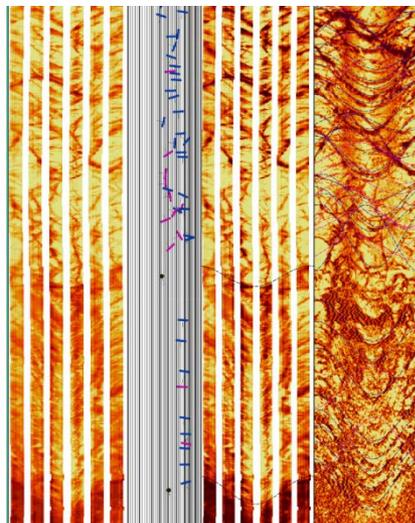
## Corona



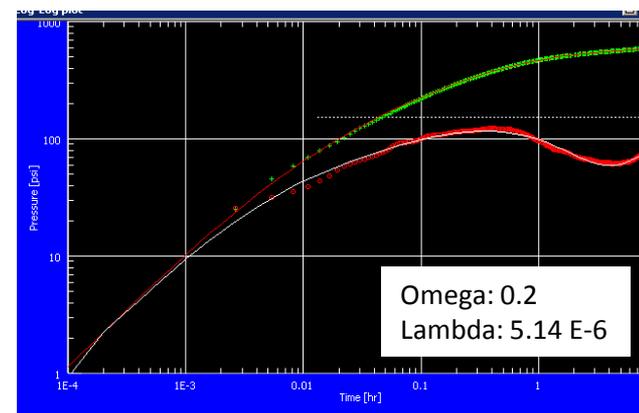
## Petrofísica

	Profundidad Perforación (mbbp)	Porosidad (%)	Permeabilidad al Gas (mD)
1-5-1	1264.30	2.8	0.0025
1-4-2	1265.42	0.7	0.0012
1-3-3	1265.70	3.5	0.0019
1-3-4			
1-3-5			
1-2-6			
<b>1-1-MOJ</b>			
1-2-7			
1-1-8			
2-3-1			
2-3-2	1266.07	1.430	0.00000
2-3-3	1269.15	2.310	0.02189
2-2-4	1270.02		
2-1-5	1270.66	4.207	0.06216
2-1-6	1271.44	13.109	1.69342
3-2-1	1272.05	5.1	0.000755
3-1-2	1272.55	6.0	0.00239

## Perfil de Imagen



## Ensayo de Presión



- ❑ Dificultades para predecir el comportamiento productivo:
  - ❖ Heterogeneidad de facies
  - ❖ Grado de fracturamiento
- ❑ Respuesta de perfiles y sísmica diferente a las rocas convencionales
- ❑ Escasa experiencia en la industria en la caracterización de reservorios volcánicos

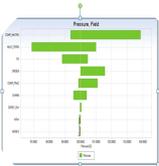


# OBJETIVO

Se realiza un modelado estático y dinámico con el objetivo de:

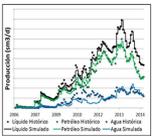


Generar un **flujo de trabajo integrado** entre el modelado estático y dinámico para representar la complejidad del reservorio en estudio

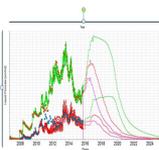


Realizar un **análisis de Sensibilidad e Incertidumbre** asociado a:

- Modelo Estático: Modelado de facies o eventos volcánicos, parámetros del Modelado DFN: densidad de fracturas, apertura, largo y ancho
- Modelo Dinámico: Propiedades petrofísicas de la matriz y las fracturas



Realizar un ajuste histórico global que permita comprender los **principales procesos físicos que impactan en la productividad** de los pozos



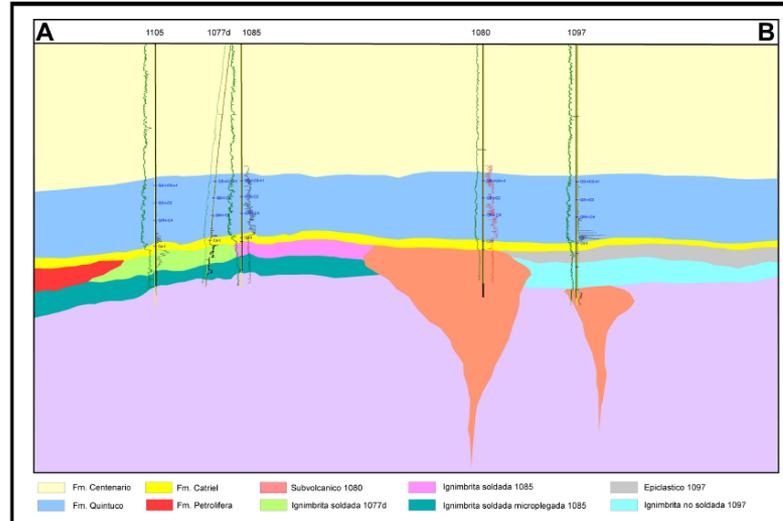
Generar un escenario de desarrollo con un **Enfoque Probabilístico**



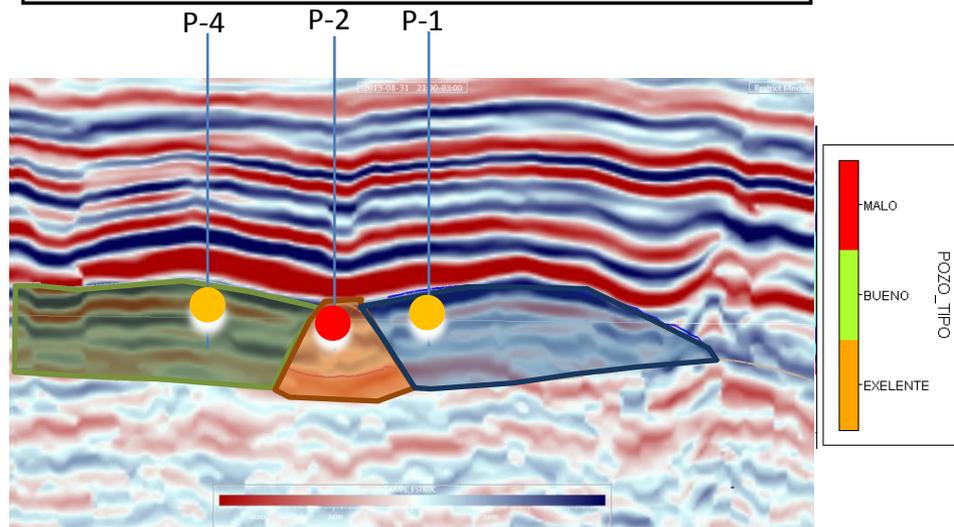
# Modelo Estático

Modelado de facies = Eventos volcánicos

Modelo Conceptual



Modelo 3D





# Modelo Estático

24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina

## Caracterización Petrofísica = Tipos de Roca

PHI Matriz  
>0.6

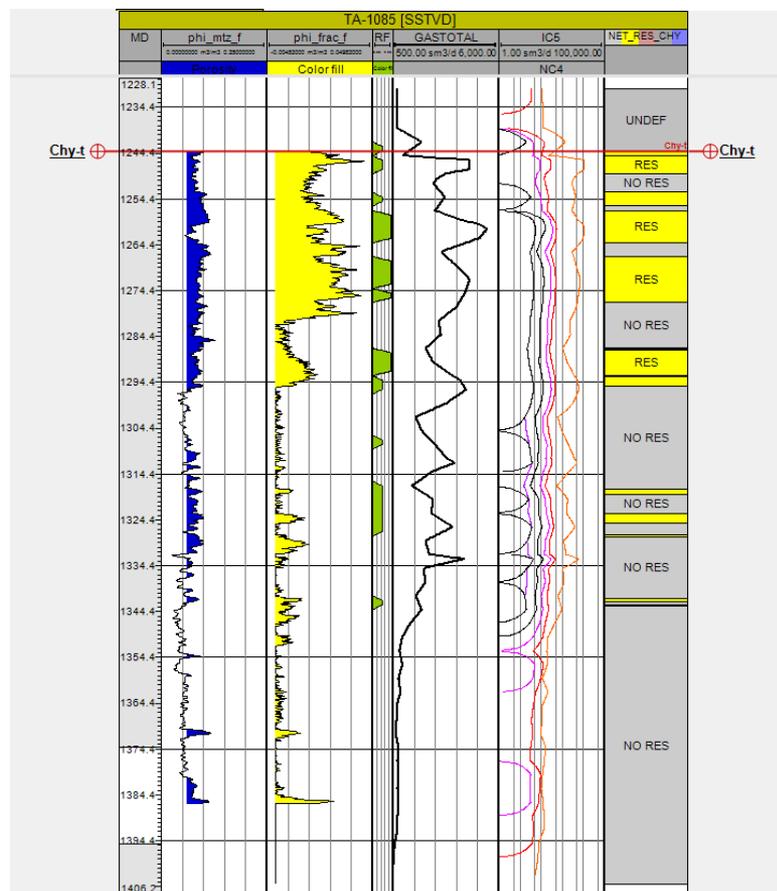
PHI Fractura  
>0

Rastros  
Frescos  
Positivo

Gas Total  
Cambio  
Notorio

Cromatografía  
Completa  
Completa

Tipo de Roca  
Reservorio

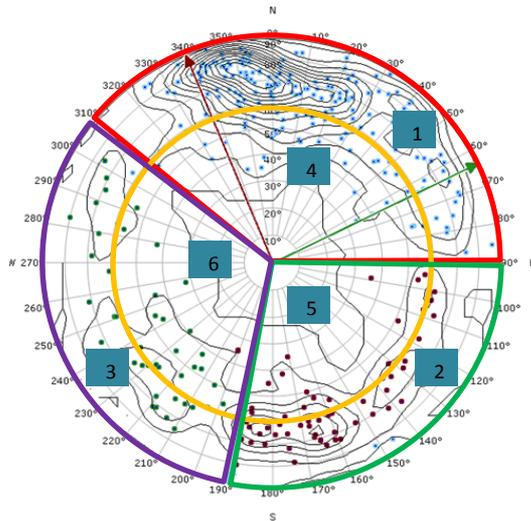
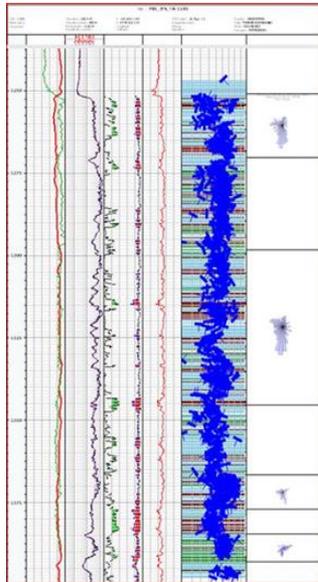




# Modelo Estático

## Modelado de los Set de fracturas (DFNs)

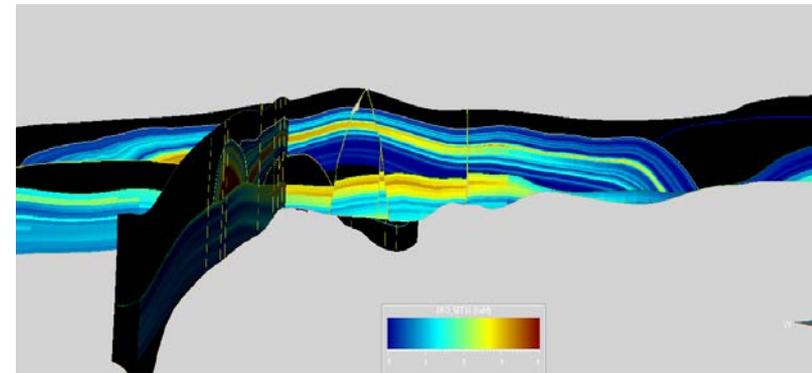
Se identificaron **6 sets de fracturas**



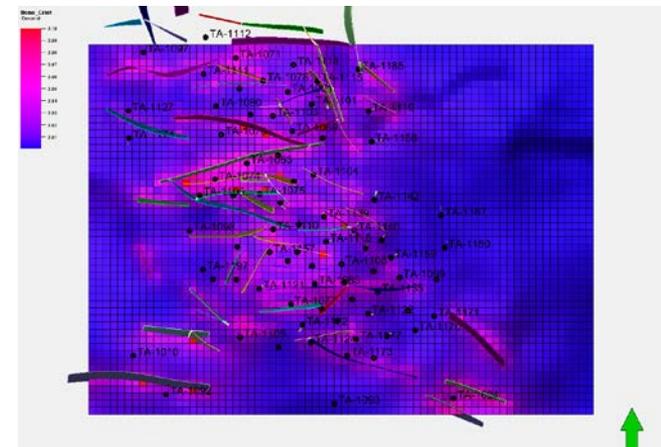
SET	DipDir	DipDir Perc25%	DipDir Perc75%	Dip
1	156	152	159	70
2	300	296	304	69
3	66	62	70	70
4	194	189	199	40
5	315	309	320	37
6	56	51	61	40

Distribución de densidades de fractura:

A) Guiadas por atributos sísmicos como **curvatura** y **coherencia**



B) Guiadas por **Rechazo** de las fallas y **distancia** a estas, aplicando metodología de Cristallini para calcular la densidad de fracturas.

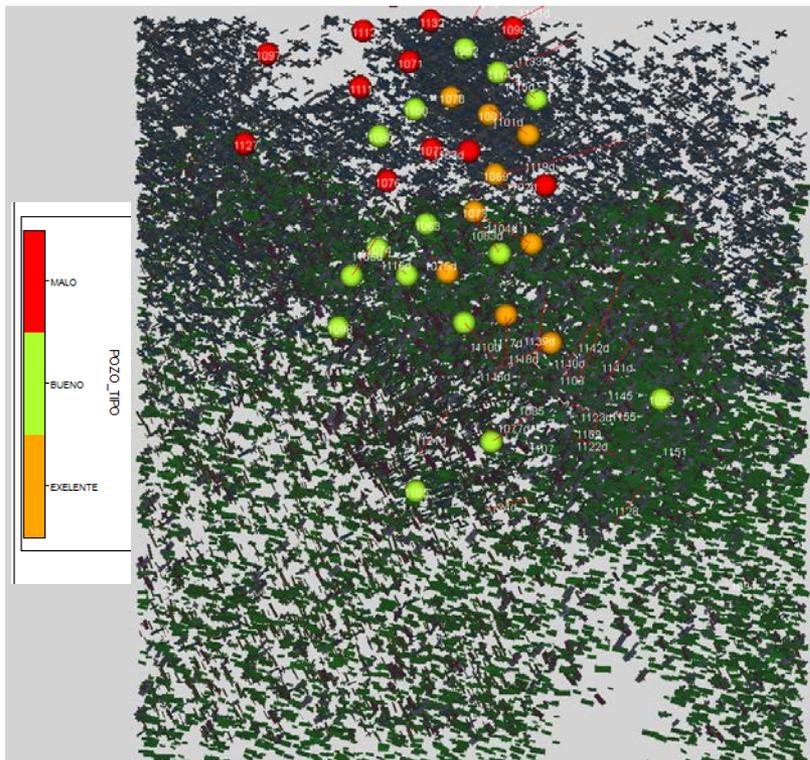




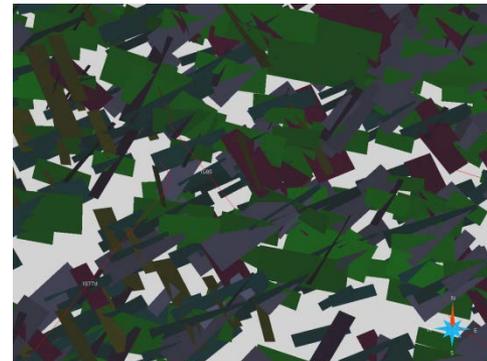
# Modelo Estático

La **densidad de fractura, azimuth e inclinación**, junto a la consideración de variables geométricas como **alto, largo o apertura de las fracturas** se utilizan para generar modelos de fracturamiento (**Discrete Fracture Network**)

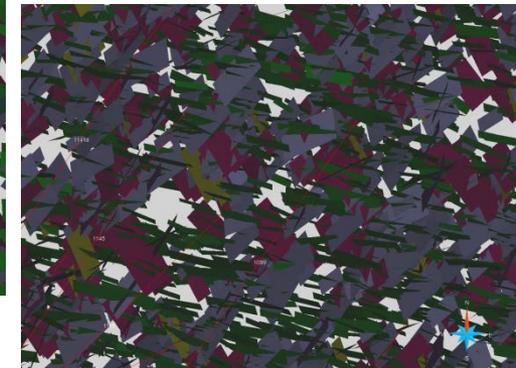
3d en planta



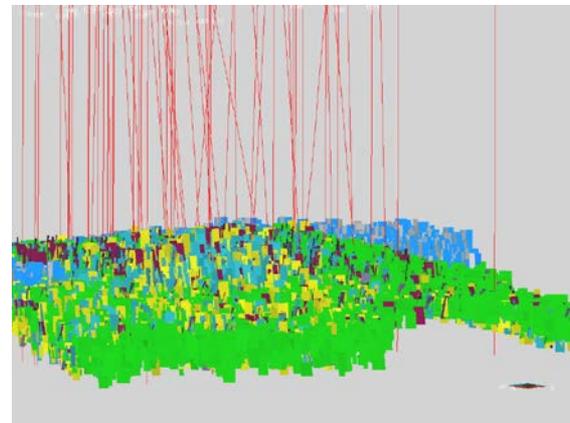
3d zoom 1



3d zoom 2



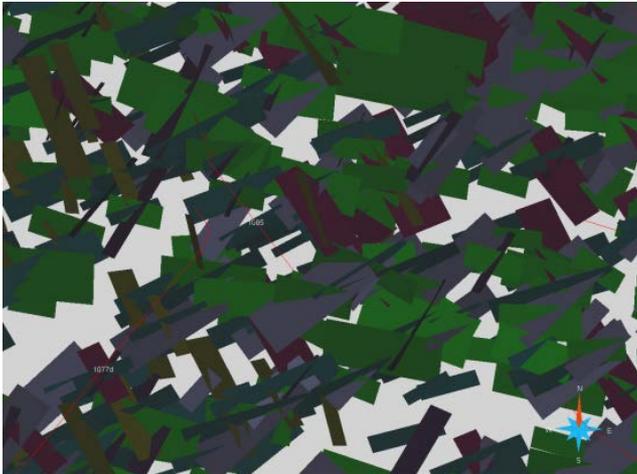
3d vista del S





# Modelo Estático

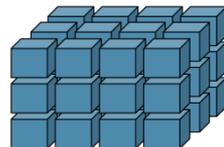
DFN → SIMULADOR NUMÉRICO



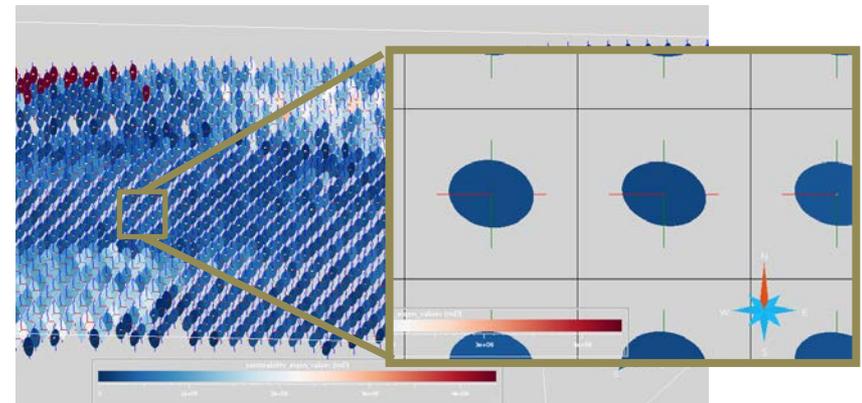
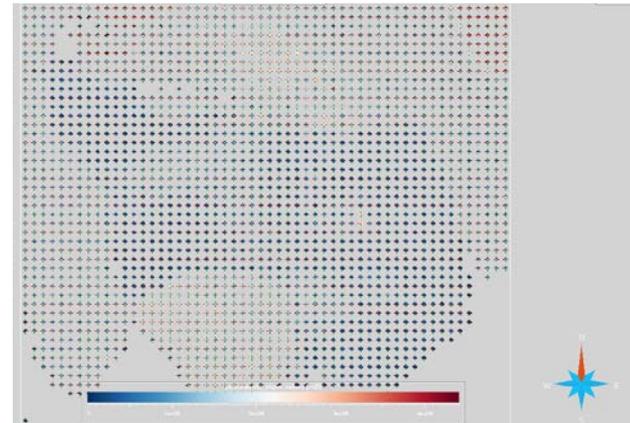
Para cada celda de la grilla se calcula:

- ✓ Permeabilidad de fracturas en I, J, K
- ✓ Distancia entre fracturas en dirección I, J, K
- ✓ Porosidad de fractura
- ✓ Factor Geométrico Sigma

$$\sigma = 4 \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right)$$



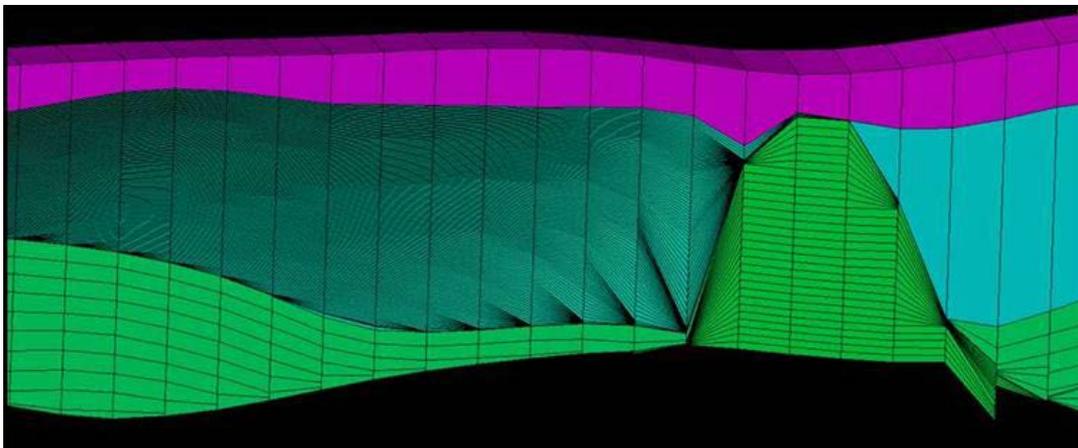
Visualización vectorial de propiedades





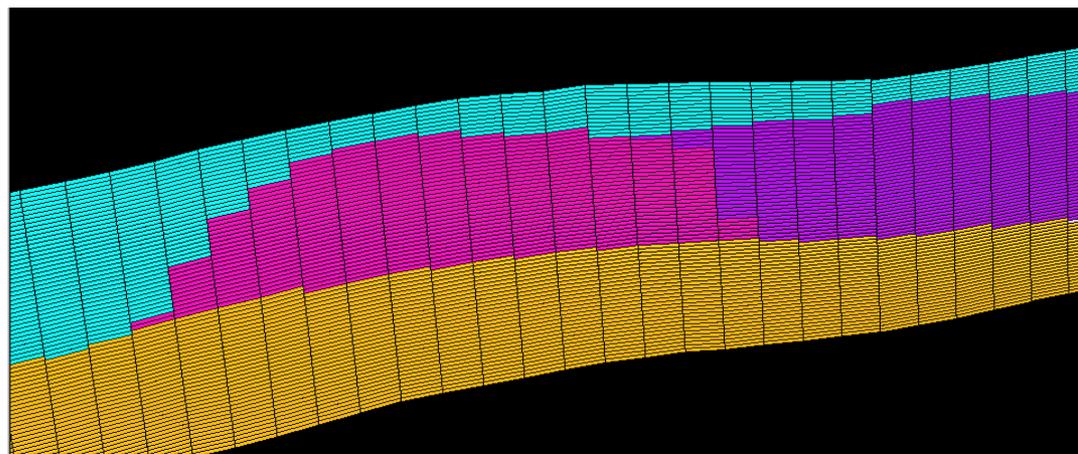
# Modelo Estático

## Grilla para simulación numérica



### **Grilla Inicial:**

*El layering que mantiene el estilo de la superficie que limita cada evento volcánico. Alta complejidad demandante de tiempos computacionales excesivos*



### **Grilla Optimizando tiempos computacionales:**

*Layers proporcionales reflejando los cambios en las **propiedades de cada uno de eventos volcánicos***

- ❖ **Grilla: 54 x 51 x 75 celdas**
- ❖ **Celdas de 100 x 100 x 2 mts.**

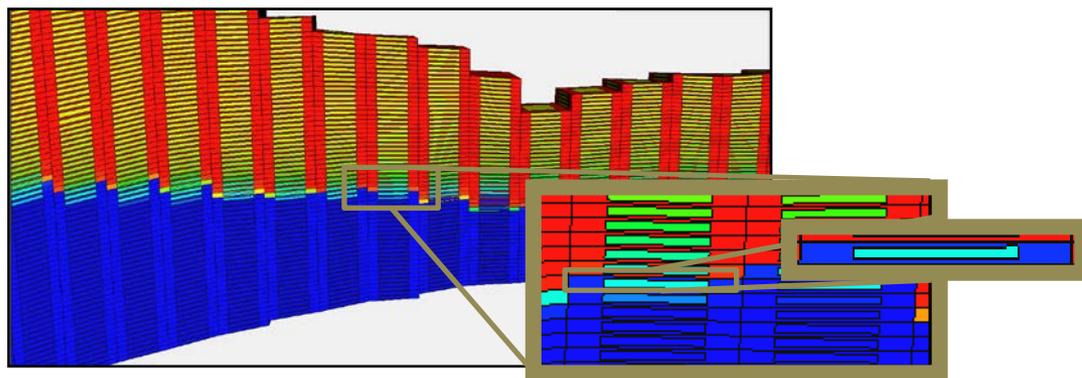


# Modelo Dinámico

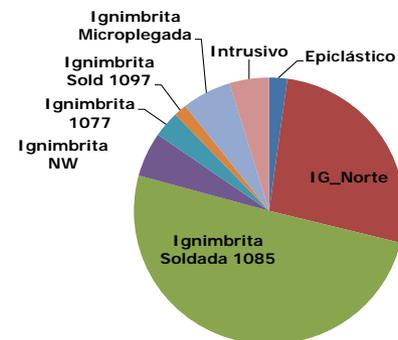
24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina

## Inicialización del Modelo en Condiciones de Equilibrio

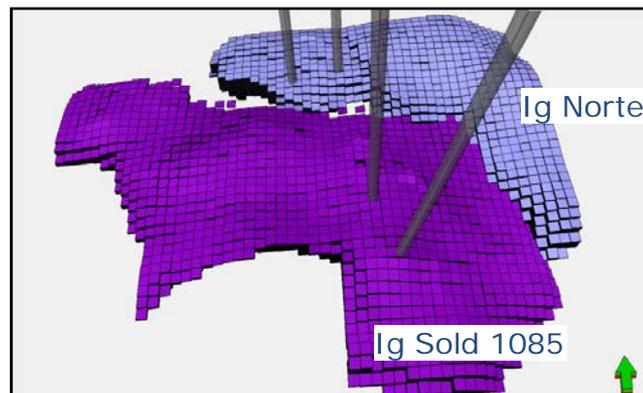
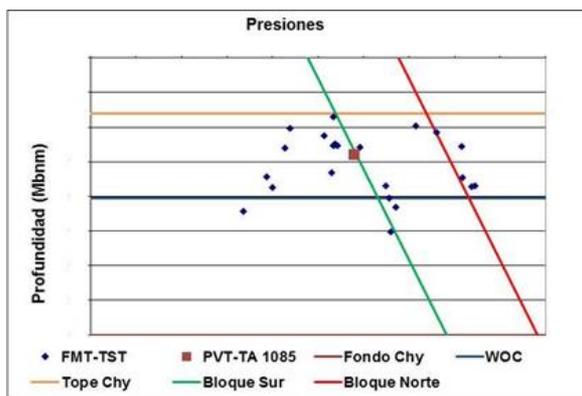
- Saturaciones iniciales : en función de la curva de presión capilar y C A-O.



Distribución del POIS por Eventos



- Presiones : obtenidas a partir del gradiente inicial medido en los pozos



# Modelo Dinámico

24-27 Octubre 2016  
 Llao Llao Hotel&Resort  
 Bariloche, Argentina

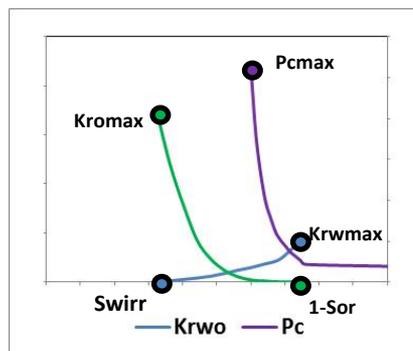
## Interacción roca fluido

### Propiedades de la matriz

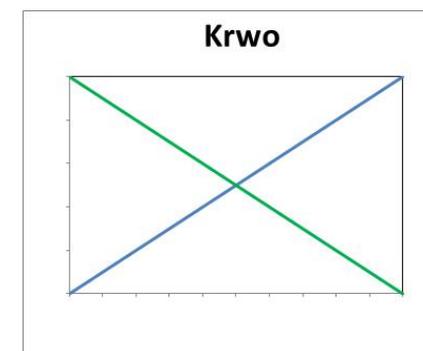
$$K_{ro} = K_{romax} \left( \frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{wirr} - S_{or}} \right)^{No}$$

$$K_{rw} = K_{rwmax} \left( \frac{S_w - S_{wirr}}{1 - S_{wirr} - S_{or}} \right)^{Nw}$$

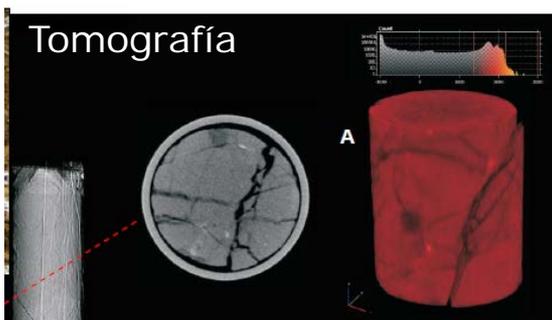
$$P_c = P_{ct} \left( \frac{P_{CW}}{P_{cmax}} \right)$$



### Propiedades de las fracturas



## Compresibilidad de matriz y fracturas



El grado de fracturamiento dificultó la toma de un plug sin fisuras afectando los valores de la compresibilidad de la matriz medida en laboratorio debido a la influencia propia de las fisuras



# Modelo Dinámico

24 · 27 Octubre 2016

Llao Llao Hotel&Resort

Bariloche, Argentina

## Evaluación del comportamiento dinámico del reservorio

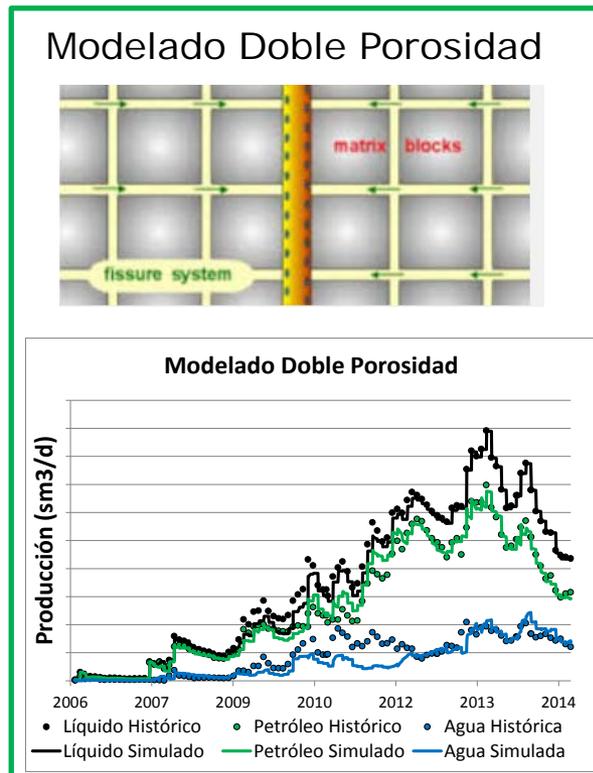
Roca volcánica  
fisurada



Propiedades de la matriz, las  
fracturas y su interacción



Modelos de doble porosidad o  
doble permeabilidad



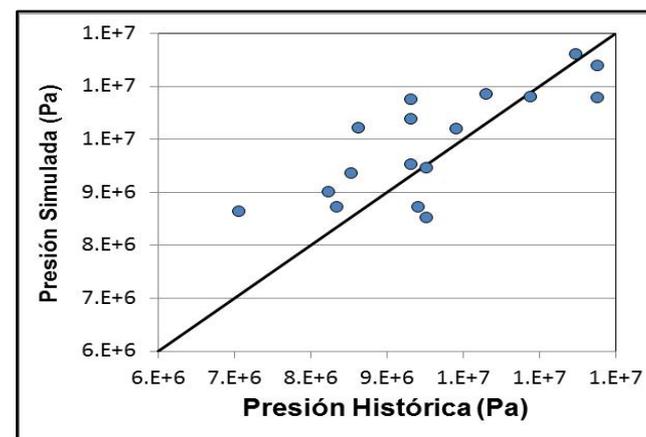
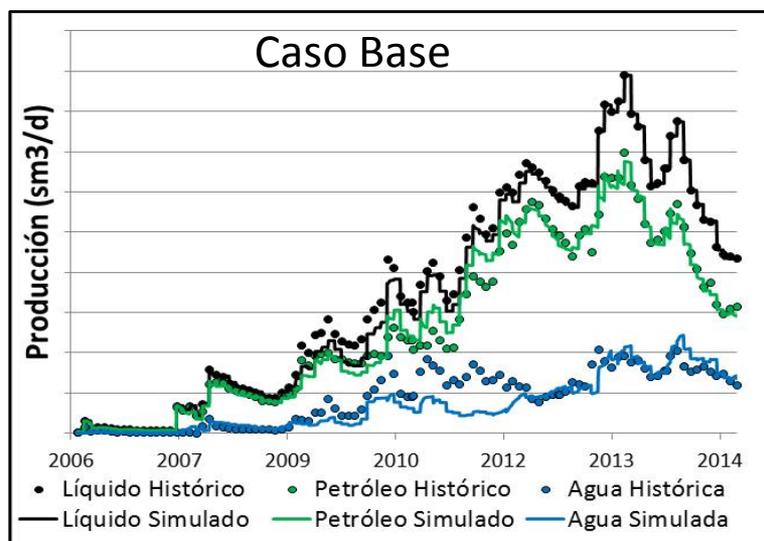


# Ajuste Histórico

24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina

## Primera etapa:

Se realiza un primer ajuste histórico determinístico



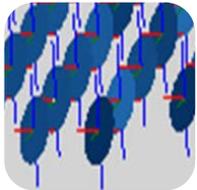
Se obtiene una primera realización llamada "Caso Base" que tiene un buen ajuste a nivel global



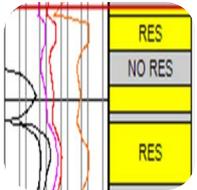
# Ajuste Histórico

24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina

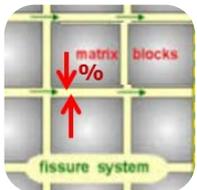
**Primera etapa:** el ajuste histórico determinístico permitió la **identificación de parámetros** que tienen alto impacto en el proceso:



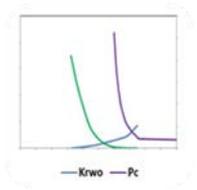
**Poblado de DFNs**



**Porcentaje de roca reservorio y no reservorio** poblado en el modelo.



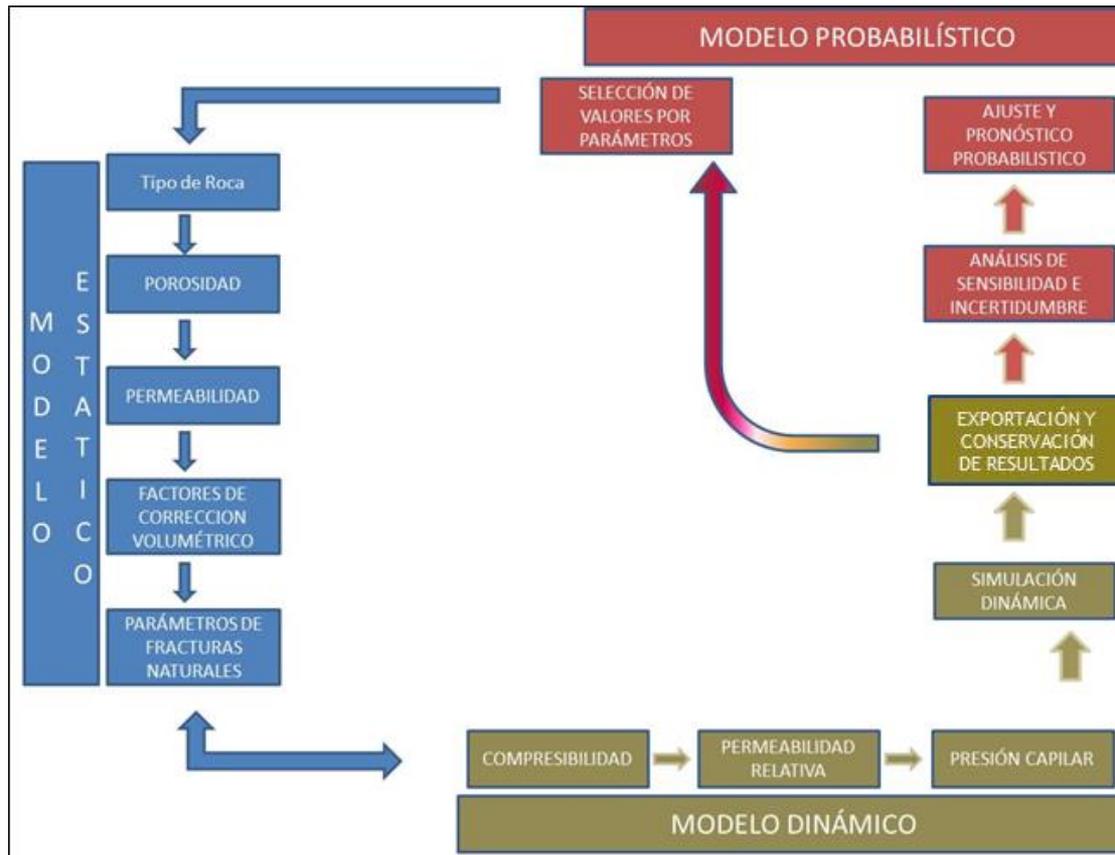
Ajuste del porcentaje del **volumen poral del tipo de roca No Reservorio** con un multiplicador de la porosidad. Afecta al volumen efectivo que mediante el sistema de fracturas se conecta con las rocas de mejor calidad (**pulmón**)



**Caracterización petrofísica especial de la matriz y fracturas.**

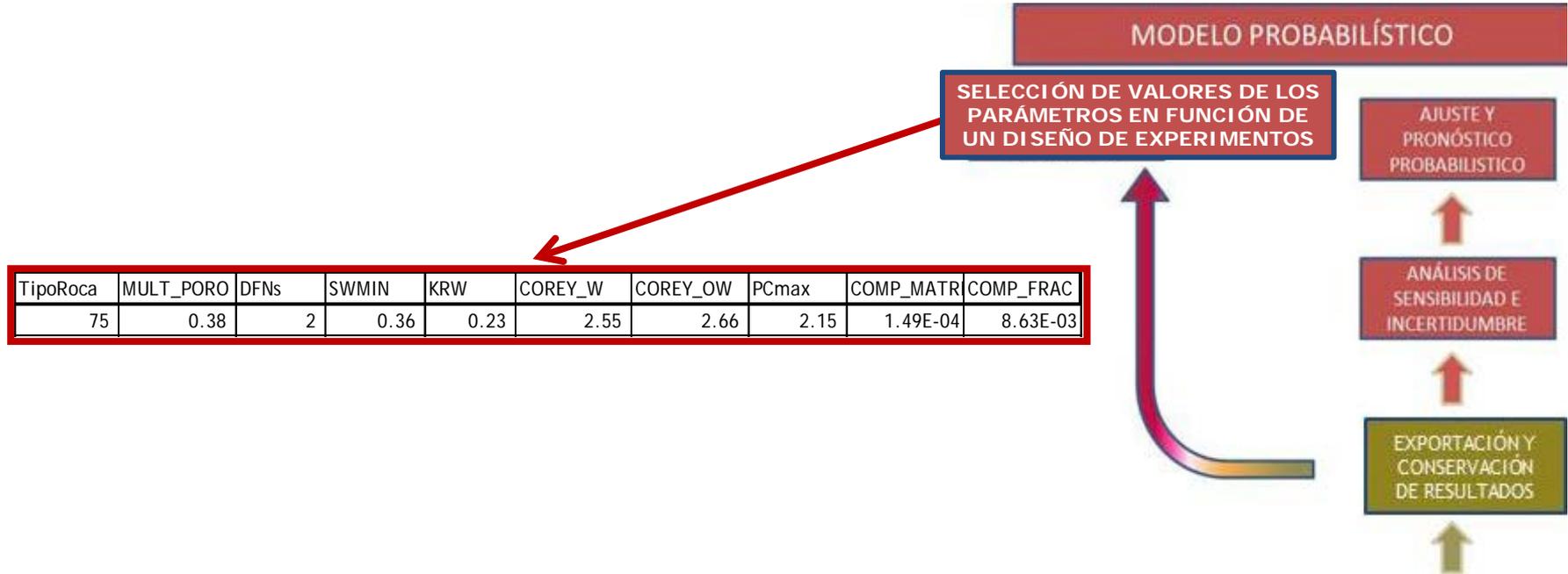


# Flujo de Trabajo





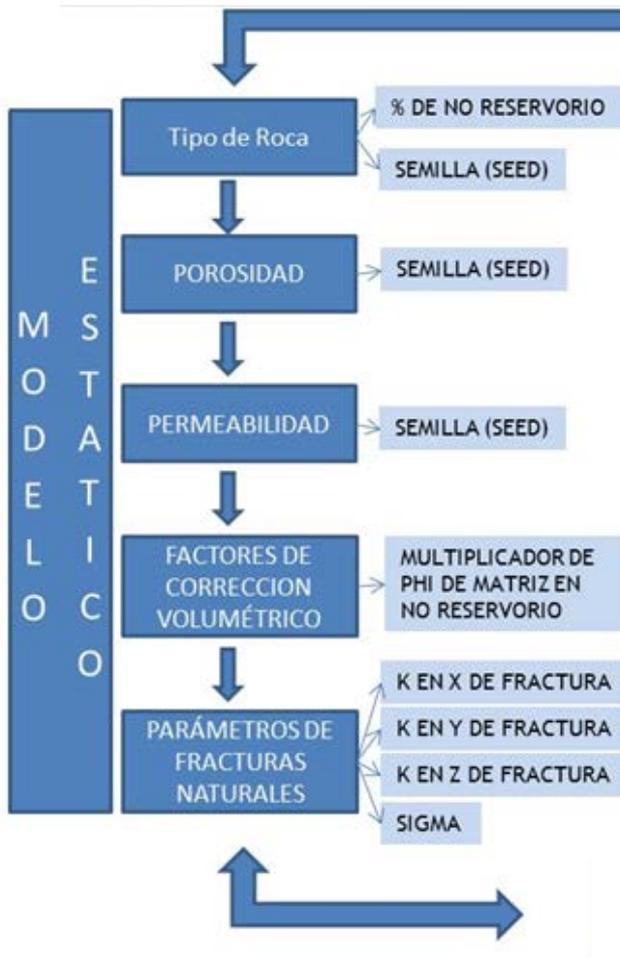
# Flujo de Trabajo



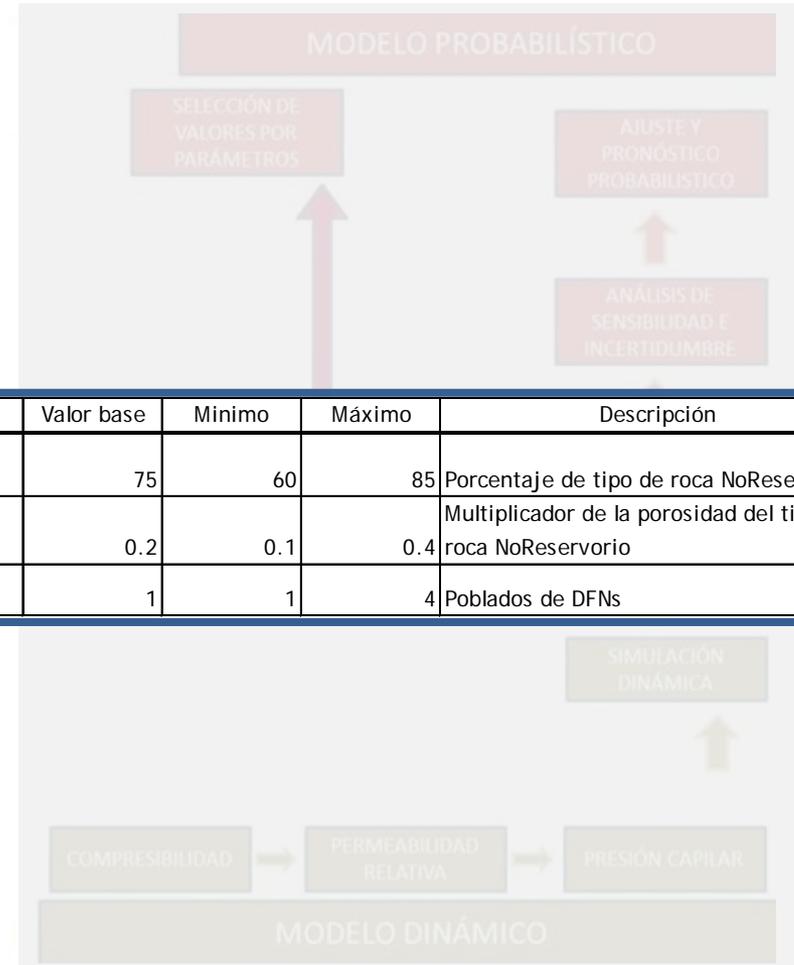


# Flujo de Trabajo

24-27 Octubre 2016  
 Llao Llao Hotel&Resort  
 Bariloche, Argentina



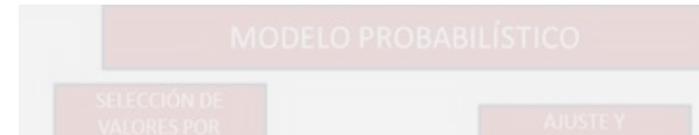
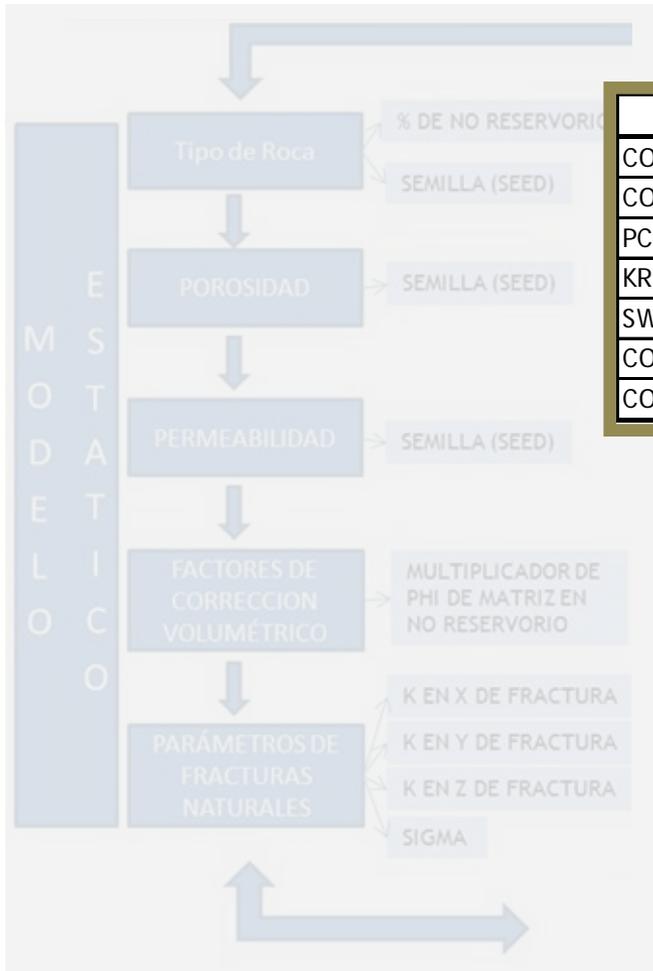
Parámetros	Valor base	Mínimo	Máximo	Descripción
Tipo de Roca	75	60	85	Porcentaje de tipo de roca NoReservorio
MULT_PORO	0.2	0.1	0.4	Multiplicador de la porosidad del tipo de roca NoReservorio
DFNs (ORDEN)	1	1	4	Poblados de DFNs



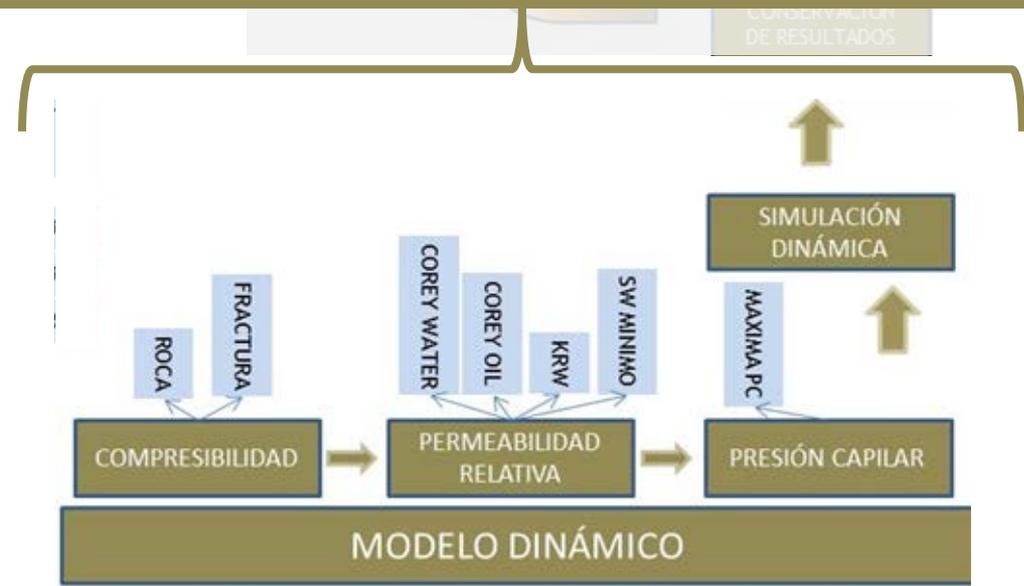


# Flujo de Trabajo

24-27 Octubre 2016  
 Llao Llao Hotel&Resort  
 Bariloche, Argentina



Parámetros	Valor base	Mínimo	Máximo	Descripción
COMP_MATRIX	7.02E-05	1.00E-05	0.0005	Compresibilidad de la matriz
COMP_FRAC	0.0005	0.0001	0.005	Compresibilidad de la fractura
PCmax	1.37	1	3	Presión capilar máxima
KRW	0.14	0.1	0.5	Parámetros función Corey
SWMIN	0.323	0.25	0.4	
COREY_W	2	1.5	3	
COREY_OW	2	1.5	3	

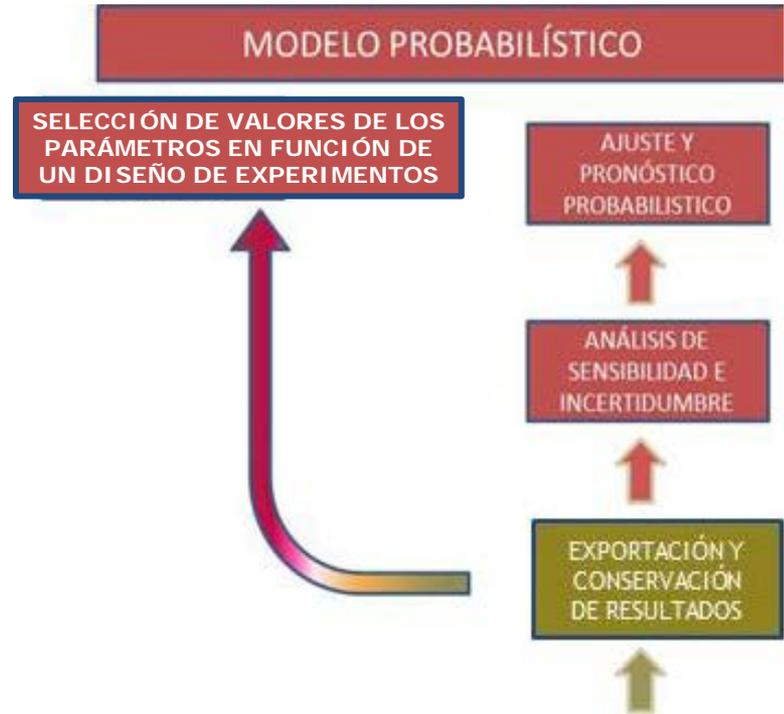
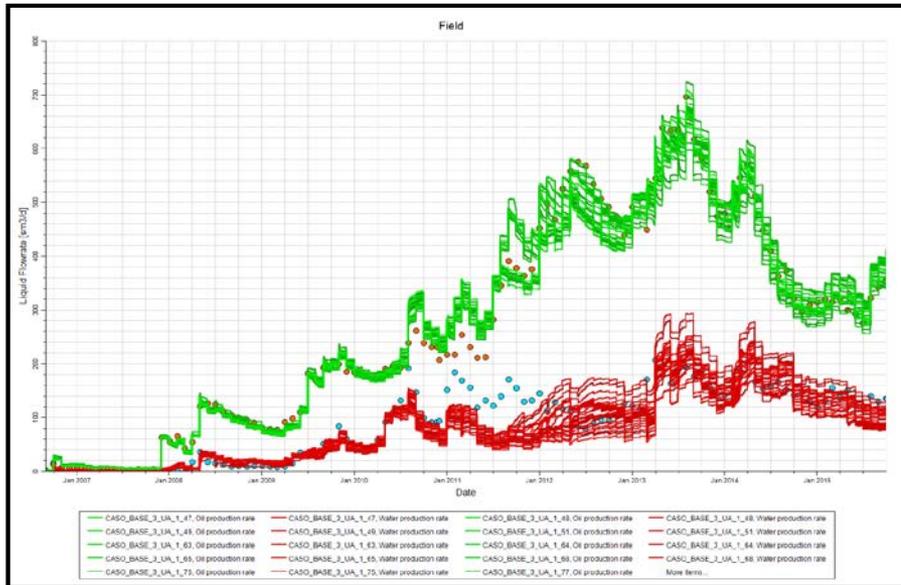


CONTROLES DE RESULTADOS



# Flujo de Trabajo

TipoRoca	MULT_PORO	DFNs	SWMIN	KRW	COREY_W	COREY_OW	PCmax	COMP_MATR	COMP_FRAC
75	0.38	2	0.36	0.23	2.55	2.66	2.15	1.49E-04	8.63E-03
62	0.16	2	0.33	0.34	2.78	2.18	1.44	3.10E-04	2.33E-03
83	0.24	2	0.32	0.45	2.97	2.14	2.39	9.80E-04	3.04E-03





# ANALISIS de SENSIBILIDAD

Se realiza este análisis para **mejorar el conocimiento del fenómeno que se pretende representar y su respuesta** frente a cambios en los parámetros que lo afectan

- ✓ Se incluyó el **mayor número** posible de parámetros
- ✓ **Rangos de variación amplio** que aseguran resultados con faja de variación acorde con la incertidumbre del modelo y que contenga a los registros históricos
- ✓ Uso de algoritmo **"Equally spaced sampler"** (muestreo con igual espaciamiento de selección de puntos entre el valor Min y Max)
- ✓ Conjunto de muestras con límites extremos del rango de variación de cada parámetro. Se utilizaron cuatro valores por cada parámetro dando un total de 36 modelos a correr

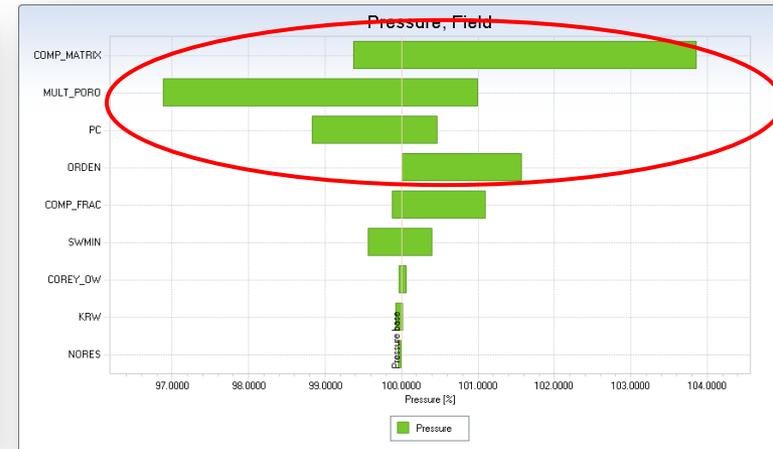
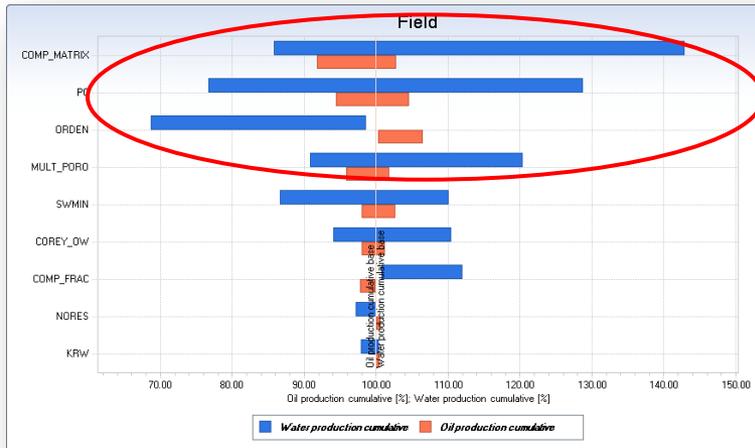
\$NORES	\$MULT_P	\$COMP_M	\$COMP_F	\$COREY_	\$KRW	\$SWMIN	\$ORDEN	\$PC
60	0.01	1E-05	0.0001	1.5	0.1	0.25	1	0.8
70	0.1733333	0.0001733	0.0017333	2.3333333	0.2666666	0.3333333	2	1.8666666
80	0.3366666	0.0003366	0.0033666	3.1666666	0.4333333	0.4166666	3	2.9333333
90	0.5	0.0005	0.005	4	0.6	0.5	4	4



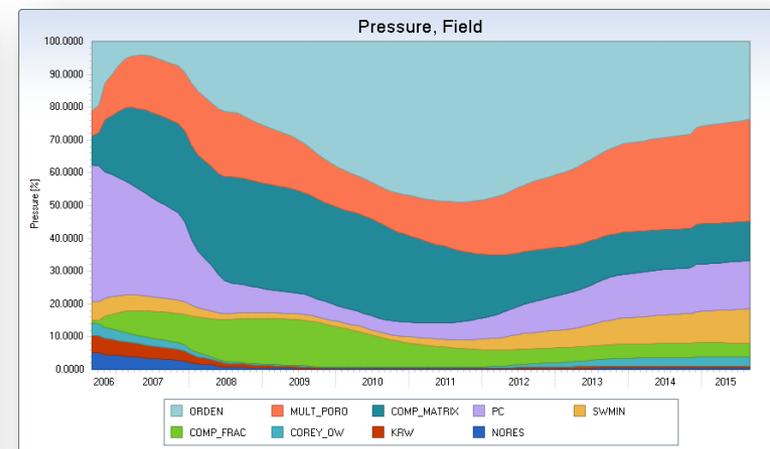
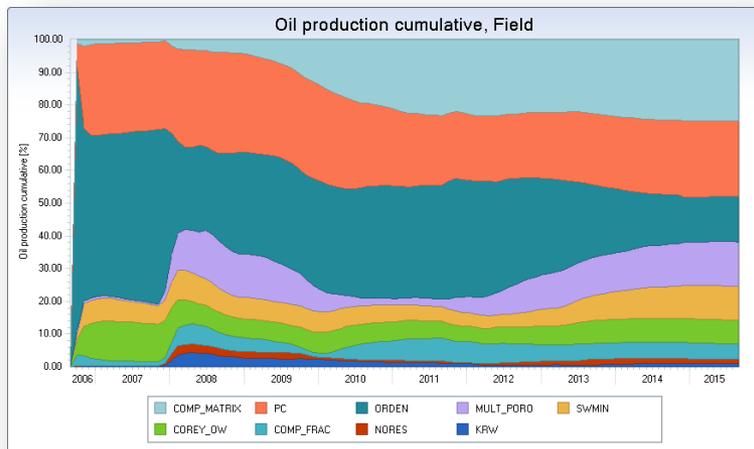
# ANÁLISIS de SENSIBILIDAD Resultados

24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina

- ✓ Análisis del **ajuste global del petróleo, del agua y de la presión**
- ✓ El eje de abscisas **adimensional** en función de % de variación respecto al caso base



- ✓ Variación de las influencias en función de **la historia de producción**



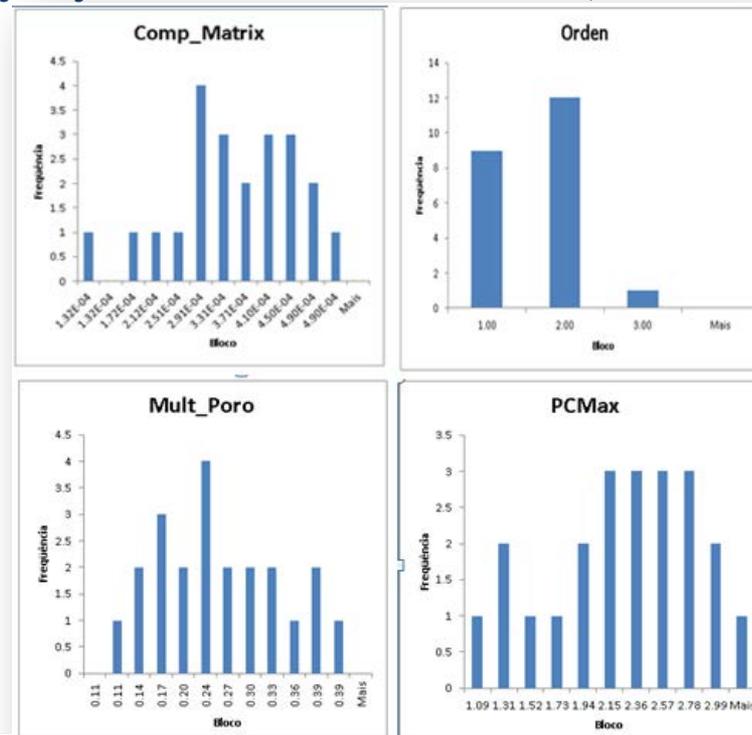


# ANÁLISIS de INCERTIDUMBRE

24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina

Se realiza un análisis de incertidumbre para **cuantificar el grado de dispersión de valores en los parámetros que ajustan el modelo**

- ✓ Con los rangos ajustados del análisis anterior los parámetros son combinados siguiendo un diseño **hipercubo latino cuadrático**. Con la incertidumbre inicial ya delimitada, es necesario identificar aquellos modelos que mejor ajustan a los **datos históricos (minimizan la Función Objetivo)**.



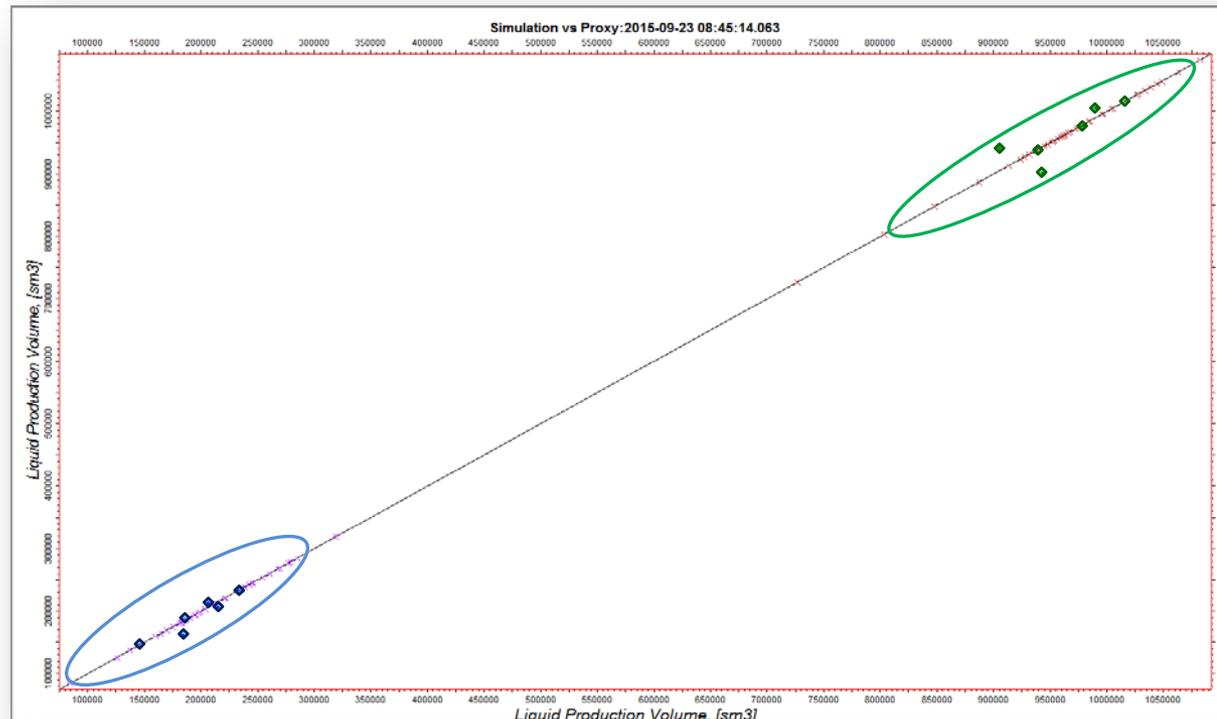
Los **histogramas "a posteriori"** calculados con los casos identificados ya no son uniformes indicando cuáles son **los valores más repetidos manteniendo su interdependencia**



# USO de MODELO PROXY

24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina

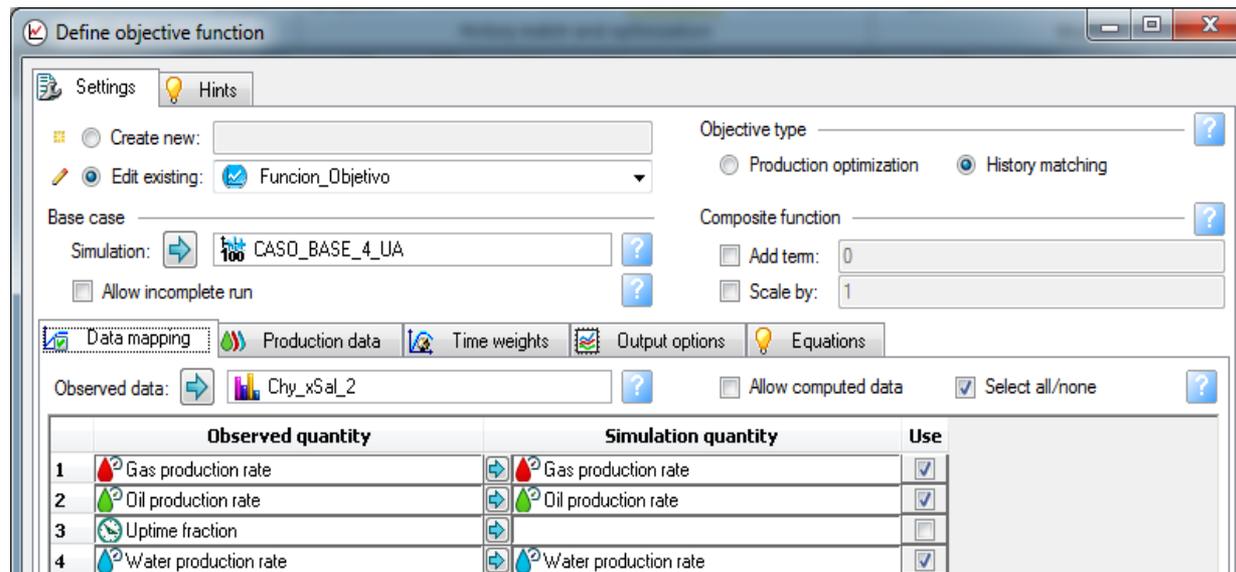
- ✓ Se genera un modelo aproximado (Proxy) o Superficie de Respuesta (SR). La SR tiene que ser **capaz de representar el comportamiento real no lineal mediante un modelo simplificado** de fácil aplicación
- ✓ Este tipo de aproximación puede ser realizada por medio de diferentes modelos en este caso utilizamos el **método de kriging**.
- ✓ Se utilizan 60 simulaciones pre-existentes, que se generaron en los estudios de sensibilidad e incertezas **para entrenar el Modelo Proxy**.
- ✓ Se generaron 6 nuevos modelos independientes para validación del modelo (**confirmation runs**)



# USO de MODELO PROXY

24-27 Octubre 2016  
 Llao Llao Hotel&Resort  
 Bariloche, Argentina

- ✓ Posteriormente se propagaron usando **Monte-Carlo** con 5000 nuevos experimentos usando el **modelo proxy validado** para la obtención de las respuestas sin **compromiso del tiempo computacional** (usar directamente el modelo de simulación es impracticable!)
- ✓ Se definió una **función objetivo** para el ajuste de historia

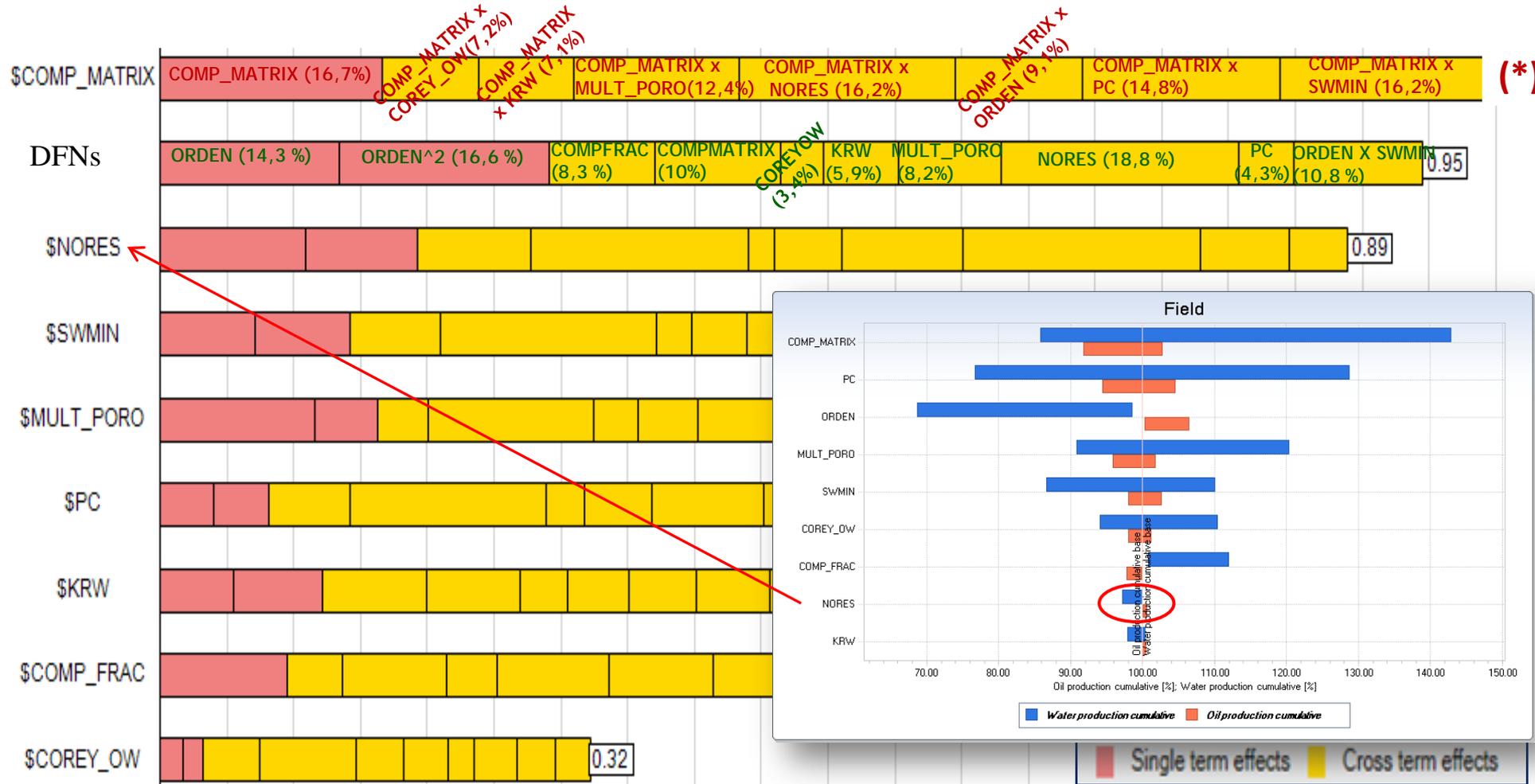


- ✓ Se realizó un **análisis de sensibilidad avanzado** utilizando el modelo proxy para detectar la **interacción cruzada** entre los parámetros (problema no lineal)



# SENSIBILIDAD CRUZADA

24-27 Octubre 2016  
 Llao Llao Hotel&Resort  
 Bariloche, Argentina



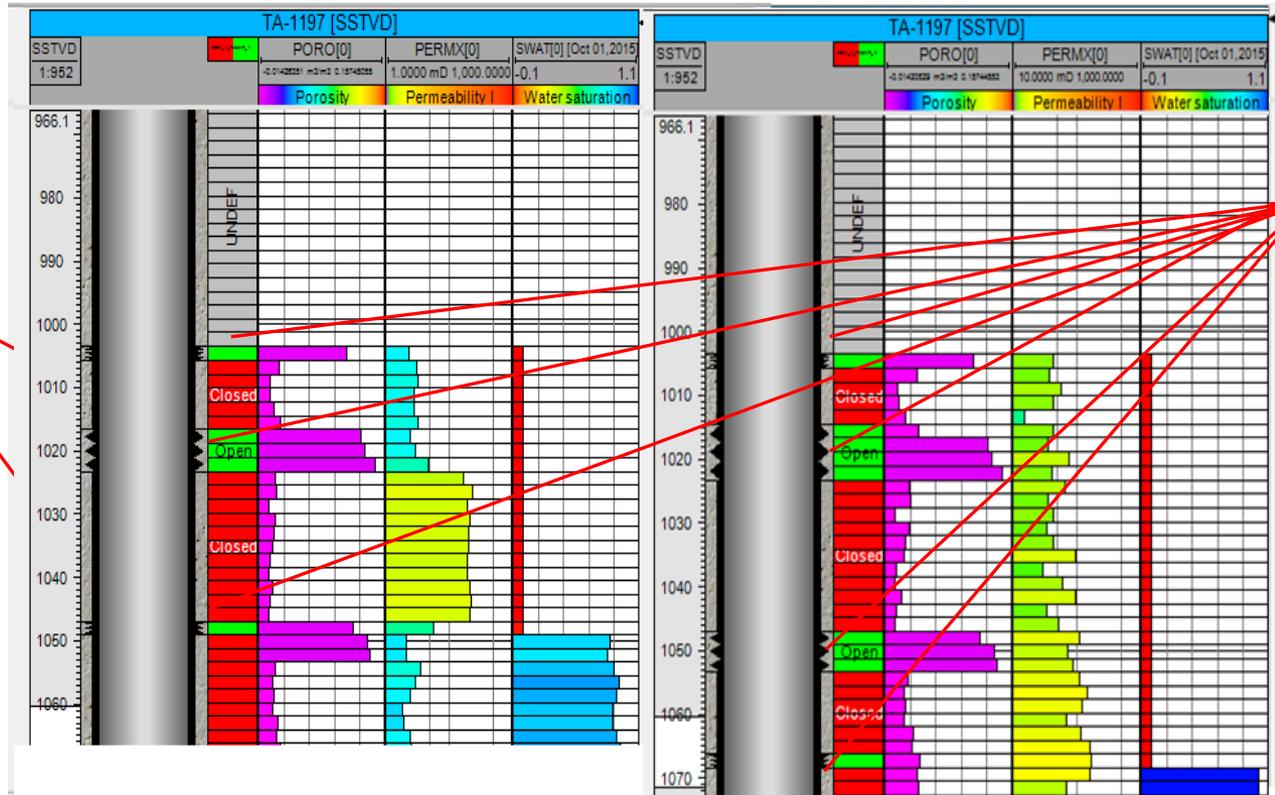
(\*) **COMP\_MATRIX** no tiene ninguna interacción con **COMP\_FRAC** > son sistemas independientes!

Comparando con el análisis simple de un parámetro por vez se detecta la importancia de aquellos parámetros "poco sensibles" por su interacción con el resto.



# ESCENARIOS de DESARROLLO

- ✓ Se desarrolló una **metodología** para definir punzados ajustándose a cada realización que tiene diferentes parámetros estáticos y dinámicos, lanzando de manera automática la simulación
- ✓ Con las condiciones de apertura de capas (**Phi, Sw inicial y Permeabilidad sistema Matriz/fractura**) se generaron punzados para cada pozo y cada realización



Punzados  
CASO BASE

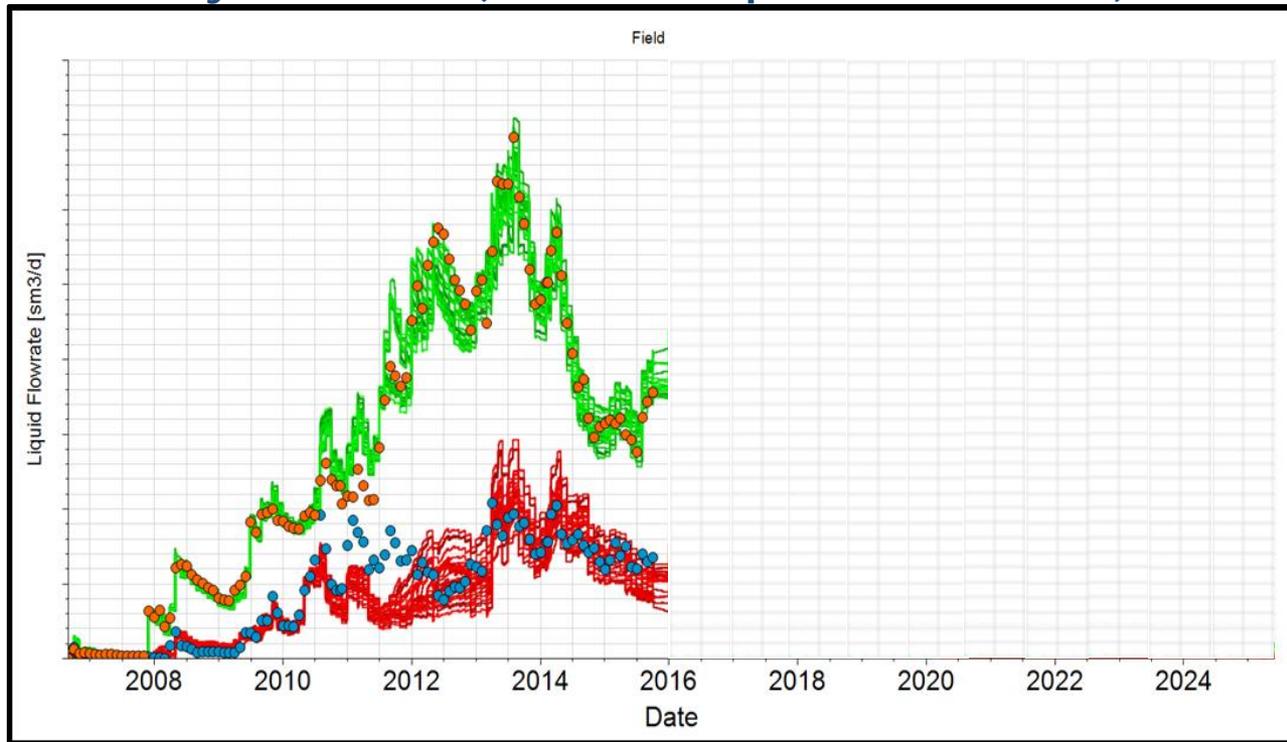
Punzados  
CORREGIDOS  
AUTOMATICAMENTE  
en CADA POZO  
y CADA CASO



# PRONOSTICO de PRODUCCIÓN

24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina

- ✓ Para **cada realización** que corresponde a un caso ajustado se plantea el mismo escenario de desarrollo (**pozos infill y pozos en nuevas zonas a desarrollar**)
- ✓ Para realizaciones con **ajustes históricos similares** los pronósticos de producción **pueden ser muy diferentes** (dilema de un **problema inverso**)

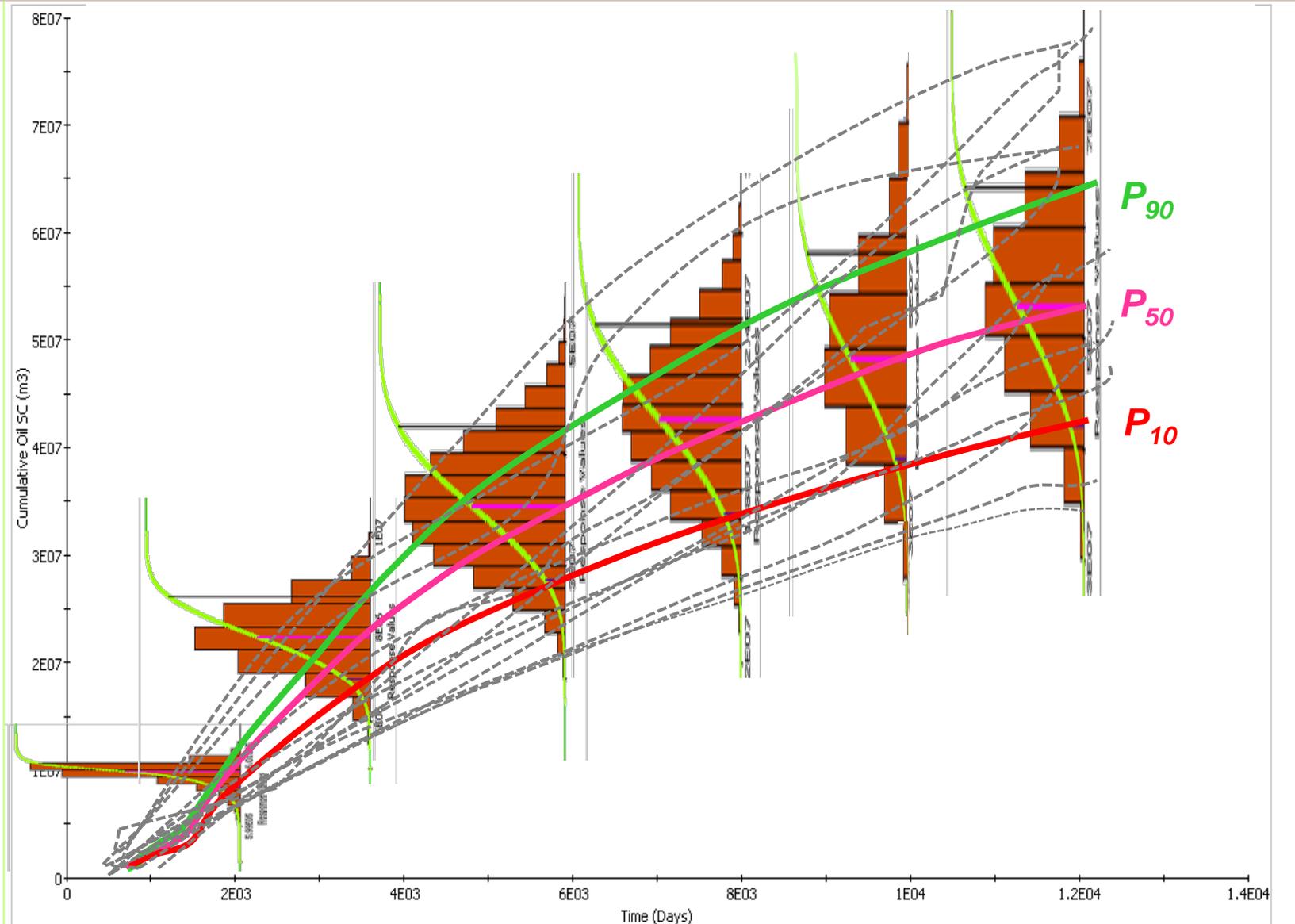


- ✓ Las **curvas representativas** de los percentiles  **$P_{10}$ ,  $P_{50}$  y  $P_{90}$**  son obtenidas a partir de histogramas construidos en **tiempos característicos** (mensual, trimestral, etc.) sobre el **grupo de pronósticos de los ajustes filtrados**



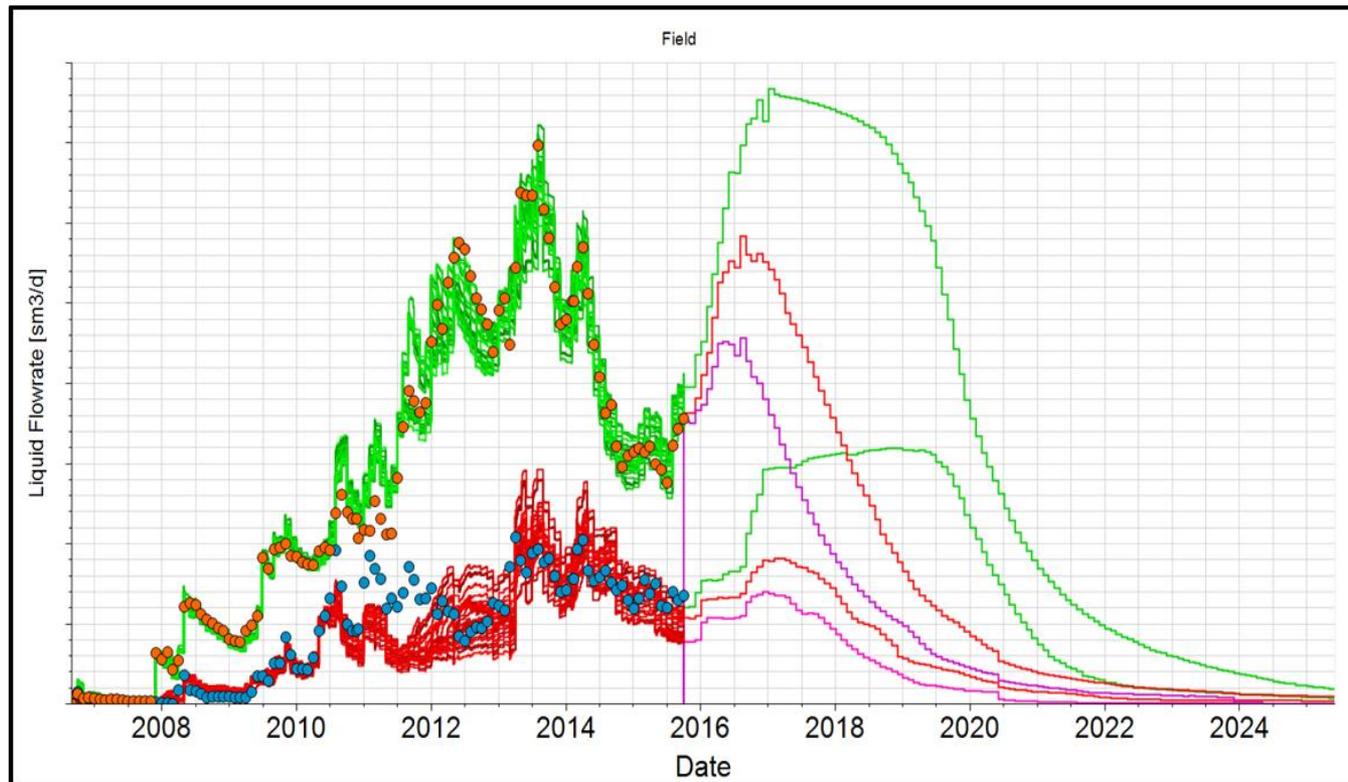
# PRONOSTICO de PRODUCCIÓN

24-27 Octubre 2016  
Llao Llao Hotel&Resort  
Bariloche, Argentina





- ✓ Las curvas de **pronóstico representativos** de este Estudio son obtenidas



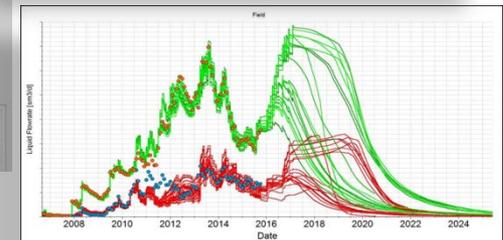
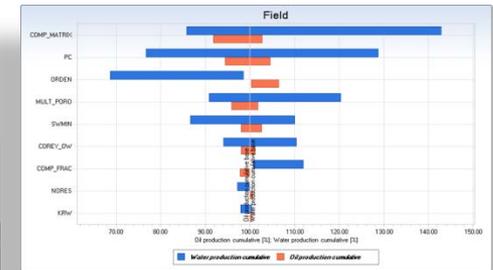
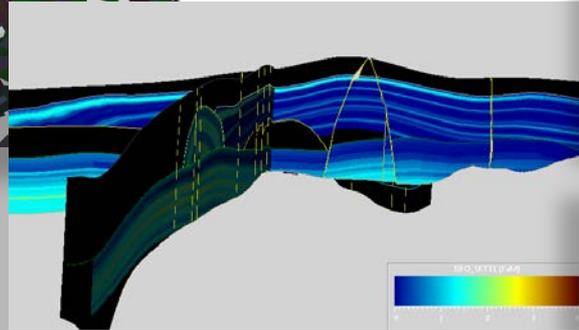
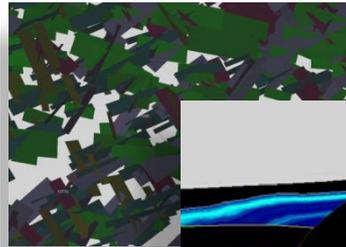


# CONCLUSIONES

- ✓ Implementación de un flujo de trabajo para **integración del modelo estático–dinámico**, con identificación de los **parámetros inciertos críticos** del problema. Este flujo es de fácil replicación en futuros estudios.
- ✓ Se realizó un **ajuste histórico global** que nos permitió comprender los principales procesos físicos que impactan en la productividad de los pozos.
- ✓ El **análisis de sensibilidad** del ajuste global del petróleo, del agua y de la presión permitió detectar los **parámetros con mayor influencia** y también, **mediante un modelo Proxy**, se **cuantificaron** sus principales **interrelaciones**.
- ✓ La **influencia de los parámetros se modifica a lo largo de la historia de producción**. Por ejemplo, la importancia relativa del modelado de DFNs es mayor en los primeros años disminuyendo frente a la compresibilidad en función del tiempo.
- ✓ Se obtuvo un **pronóstico probabilístico** identificando los percentiles **P<sub>10</sub>, P<sub>50</sub> y P<sub>90</sub>** para utilizar en el análisis de riesgo y evaluación económica de los proyectos de desarrollo del yacimiento.



## MODELADO ESTÁTICO Y DINÁMICO DE UN RESERVORIO DE ROCAS VOLCÁNICAS. CASO DE ESTUDIO: GRUPO CHOIYOI, CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA



**Muchas Gracias**