

MAPEO DE RESERVORIOS MULTICAPA A TRAVÉS DE LA INTEGRACIÓN DE BASES DE DATOS Y PROGRAMAS

Facundo D. Robles Hurtado¹ y Daniel E. Sotelo¹

¹Pan American Energy LLC. L. N. Alem 1180, C. Aut. de Buenos Aires.

Keywords: waterflooding, database, mapping, fault, macro, grid.

Abstract

Multilayer reservoir mapping integrating databases and softwares

A new workflow for the definition of geological models focused on the design of waterflooding projects in Cerro Dragón Area of the Golfo San Jorge Basin was developed and implemented during 2001. Since 2000, an aggressive policy on the development of the area has taken place, and efforts to develop the full potential of the different productive blocks have been made.

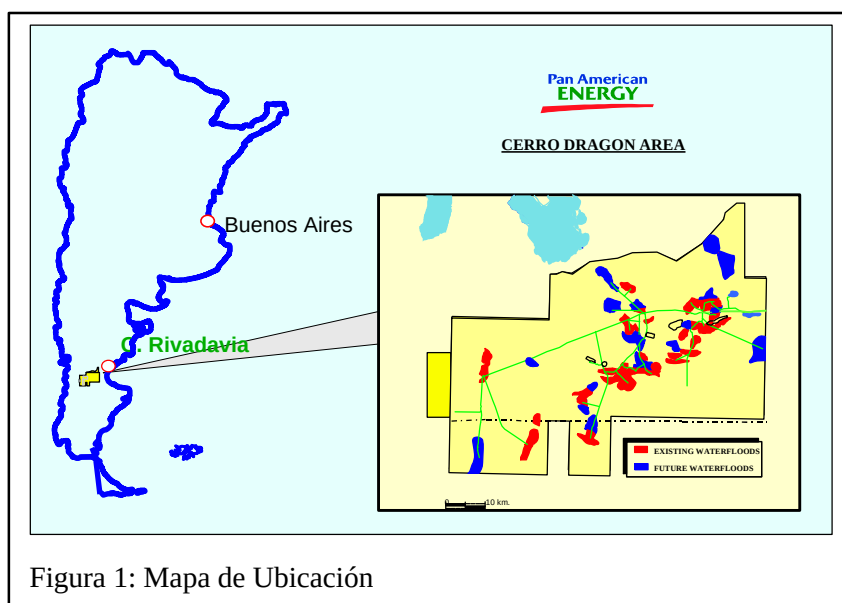
By June 2002, 3035 wells were drilled in Cerro Dragón Area, and 41 WF projects implemented. Each project involves from 10 to 100 wells. Each well contacts 10 to 30 productive sandstones within a 300 to 1500 meters productive interval.

Complete geological model construction involves the handling of huge amounts of data. The new workflow incorporates a combination of databases (BDIEP, OpenWorks), and softwares (SeisWorks, TDQ, StratWorks, OpenVision, Z-Map+, Excel, and Sahara). Mapping, a time consuming task, was simplified through automated mapping using Zmap+ scripts (ZCL module). The use of this workflow enabled us to successfully map up to 160 sands per project, significantly increasing time efficiency. Additionally, updating maps becomes very easy.

Using this procedure, the design of 11 new WF projects and the optimization of 7 present projects was done, resulting in more than 110 drilling proposals, conversions and over 800 workovers, and the consequent increase in the associated secondary reserves and the secondary to primary production ratio in the area.

INTRODUCCIÓN

El área de concesión Cerro Dragón se ubica sobre el flanco norte de la cuenca del Golfo San Jorge, en el centro-sur de la provincia del Chubut, Argentina (Fig. 1). El área es operada por Pan American Energy LLC,



que es propiedad de BP (60%) y Bridas Corp.(40%). A junio de 2002, 3035 pozos fueron perforados y 41 proyectos de recuperación secundaria se hallan implementados, con 280 pozos inyectores y 1031 productores

afectados. El 32 % de la producción del área es atribuible a recuperación secundaria, en tanto que en los productores afectados por proyectos de WF la relación alcanza el 62%.

Planteo del Problema

En el año 2000 se inició una política mucho más intensa de explotación de los yacimientos del área, con perforación de pozos de exploración y desarrollo, la implementación de nuevos proyectos de WF y la ampliación vertical (más reservorios) y areal (más inyectores) de los proyectos existentes. Se buscó mejorar el factor de recuperación de todos los bloques, a partir de modelos geológicos de detalle, que requieren la correlación y el mapeo de todos los reservorios, de modo de poder seleccionar mejor los niveles a incorporar a la recuperación secundaria, y determinar todas las reparaciones posibles (tanto buscando petróleo como agua) y las oportunidades de perforación.

Se planteó la necesidad de un flujo de trabajo nuevo, que optimice el uso de bases de datos y programas de geointerpretación, de manera de manejar volúmenes de datos sin precedentes hasta ese momento (Fig. 2). De esta manera se lograría la construcción de un modelo geológico que sea funcional a los objetivos buscados, maximizando el control de calidad sobre los procesos y automatizando tareas repetitivas de modo de obtener una sustancial reducción del tiempo empleado.

En este trabajo se presentan ejemplos de la aplicación del flujo de trabajo en los yacimientos Zorro y Oriental.

ASPECTOS GEOLÓGICOS

La producción de petróleo proviene mayoritariamente de las formaciones Mina El Carmen y Comodoro Rivadavia, que consisten en una secuencia continental mayormente pelítica con abundantes intercalaciones arenosas y piroclásticas. Las areniscas, de origen fluvial, son frecuentemente de escasa continuidad lateral, y, en general, no se hallan vinculadas hidráulicamente entre sí. Los fluidos no siempre presentan distribución gravitatoria dentro de cada reservorio, dependiendo de las condiciones petrofísicas del mismo. Además, dadas las bajas salinidades del agua de formación, que hacen casi indistinguible las capas petrolíferas de las acuíferas en los perfiles eléctricos, la evaluación de la apertura de capas se fundó históricamente en la evaluación de testigos laterales y en la correlación.

La estructuración dominante Jurásico tardío-Cretácica es distensiva e involucra a toda el área. Afectando al sector occidental del área, se sobreimpone en el Terciario tardío una fase compresiva. El fallamiento provoca la compartimentalización de los reservorios y determina, en muchos casos los límites de los proyectos de recuperación secundaria (WF).

BASES DE DATOS Y PROGRAMAS

El flujo de trabajo implica el uso de dos bases de datos y de múltiples programas residentes tanto en PC como en estaciones de trabajo (*workstation*). Los sistemas operativos son Windows 95 y Unix, respectivamente.

La Base de Datos Integrada de Exploración y Producción (BDIEP) es una base construida por la empresa Softlab para cubrir necesidades específicas de Pan American Energy. En ella se han volcado todos los datos de completaciones y reparaciones de los pozos del área (aproximadamente 64500 ensayos), y los datos de las capas interpretadas (topes y bases por pozo, espesor total y permeable, porosidad). Existen varias consultas prefabricadas que se adaptan a las distintas necesidades, y es posible diseñar nuevas.

En la base de datos OpenWorks (OW) de LandMark se alojan los datos que son necesarios para las tareas de interpretación que, en este flujo de trabajo, son íntegramente realizadas con los programas provistos por esta compañía. Los datos incluyen ubicación de pozos, perfiles, datos de ensayos, cubos sísmicos, etc.

La transferencia de datos entre ambas bases de datos normalmente requiere cierto grado de reelaboración que se hace con la planilla de cálculo Excel. También en esta planilla se determinan datos estadísticos, y se prepara la simbología de ensayos.

La interpretación sísmica de horizontes y fallas se hace con SeisWorks, la construcción de leyes de velocidad con Syntool, el modelo de velocidad con Depth Team Express y la conversión a profundidad con TDQ. La interpretación de pozos se realiza con distintos módulos de StratWorks: Correlation (correlación e impresión de cortes horizontalizados a varios niveles), Cross Section (preparación e impresión de cortes estructurales), Mapview (mapas provisorios, mapas de electrofacies y puntos de control de fallas que integran sísmica y pozos), Lithology (opcional, petrofísica básica y *cutoff*), Strat Column Editor (carga de columna estratigráfica), Well Template Editor (definición de plantillas de curvas para correlación, cortes y estimación de espesores) y Single Well Viewer (determinación visual de espesores permeables y porosidad).

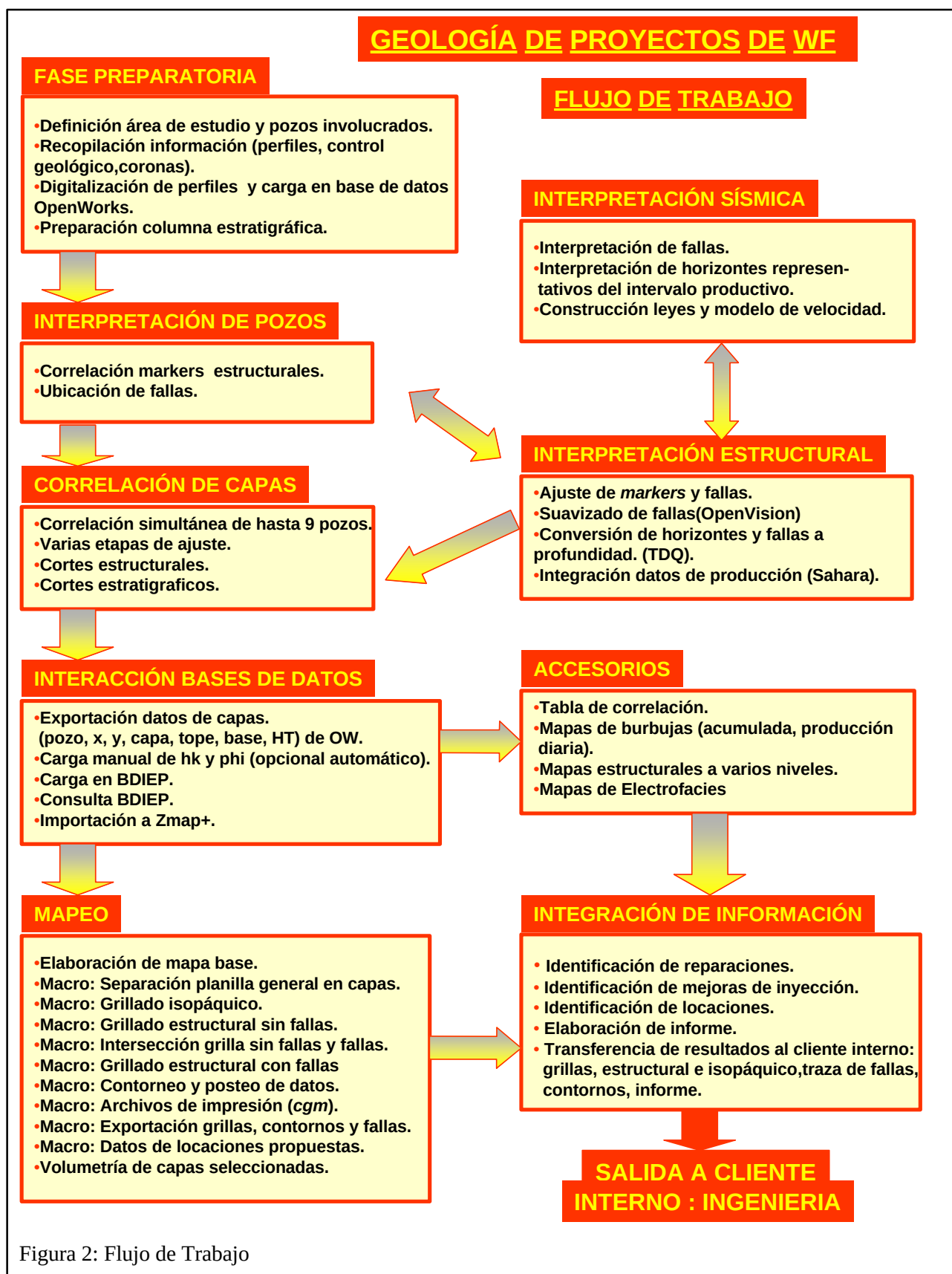


Figura 2: Flujo de Trabajo

Con Zmap+ se confeccionan mapas burbuja, estructurales, mapas base de capas, se hacen pruebas para determinar parámetros de mapeo y se editan los puntos de control (*pointsets*) antes de grillar las fallas. Con un editor de texto se crean y editan las macros que se ejecutan con ZCL, automatizando el proceso de mapeo.

El suavizado de fallas es posible cuando se identifican las irregularidades en una visualización tridimensional que provee OpenVision. La exportación de datos de pozo y topes y bases de capas se hace con el módulo Query Manager de OpenExplorer, con una consulta programada en lenguaje SQL. Como apoyo de la interpretación se usa Sahara, que permite incorporar al modelo geológico información relacionada con la inyección y producción.

Macros de Mapeo

En el programa Zmap+ se elaboran los mapas en una interfaz gráfica. Además, existe un módulo llamado ZCL, que contiene las mismas funcionalidades que Zmap+, pero que se ejecuta por líneas de comando. Adicionalmente, es posible registrar las operaciones que se llevan a cabo con Zmap+ de modo que queden registradas como comandos editables con un editor de texto. De esta manera se construyen los macros, agregando elementos y modificando las instrucciones registradas, de modo que quedan cuatro elementos identificables (Fig.3).

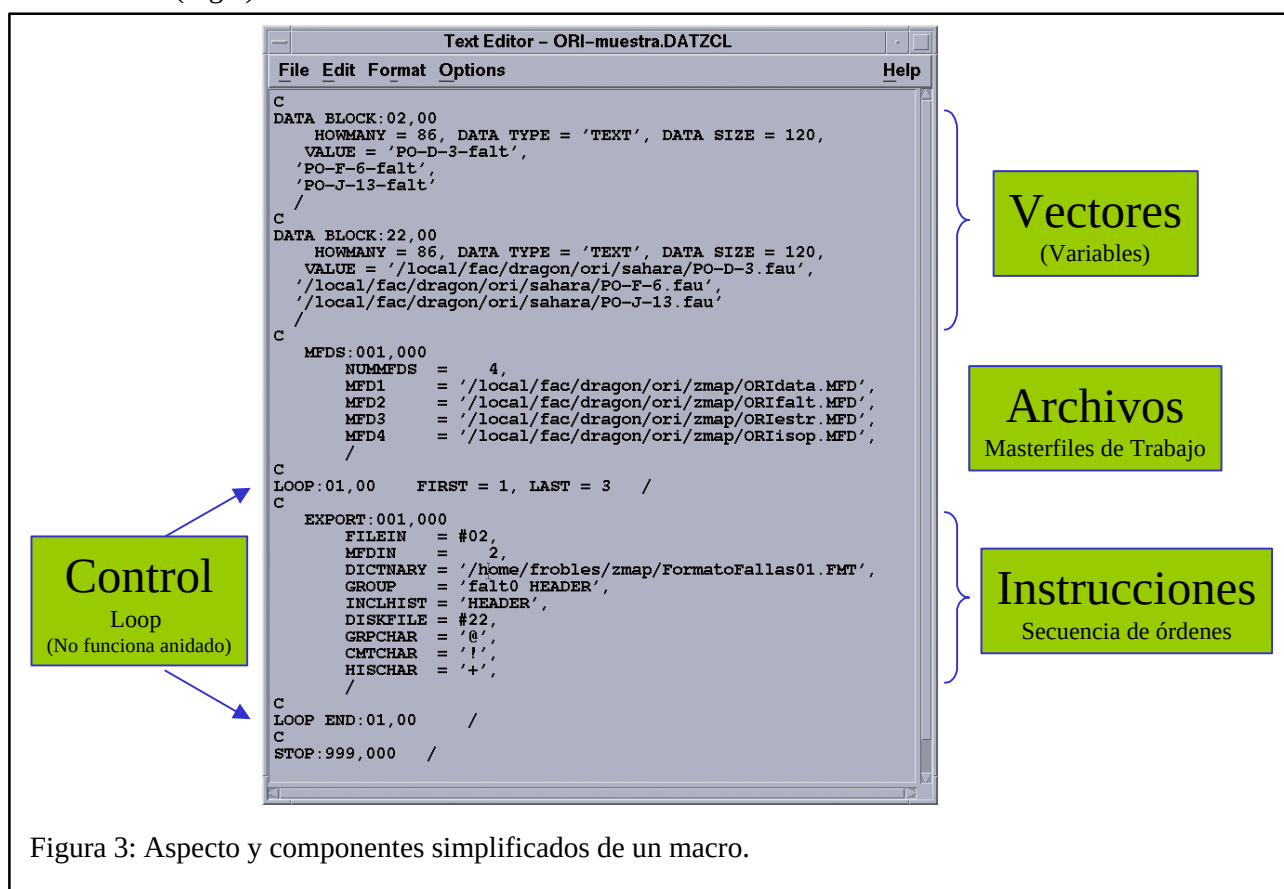


Figura 3: Aspecto y componentes simplificados de un macro.

Al registro de instrucciones se le agregan los vectores (*datablock*), en general uno por reservorio a ser mapeado, con el nombre indicativo del proceso que va a ser realizado. También se le indican los archivos (*master files*) de origen y destino de los datos a manejar. Luego se agrega el control, es decir, las instrucciones para que ejecute tantos ciclos como capas serán mapeadas (o como líneas hay en el *datablock*). Al cuerpo de instrucciones se le modifican parámetros de modo de indicarle que ejecute el proceso para el orden de capa que se corresponde con el número de ciclo (por ejemplo se modifican nombres de archivo de entrada y salida por una variable que es igual al número de ciclo).

FLUJO DE TRABAJO

Se describe a continuación el flujo de trabajo desarrollado, orientado específicamente a las necesidades de los proyectos de WF (Fig.2).

Fase Preparatoria

El orden de estudio de los distintos bloques está condicionado por diversos factores, entre los que se encuentran la prefactibilidad económica, la recuperación final de primaria y la disponibilidad de agua para inyectar.

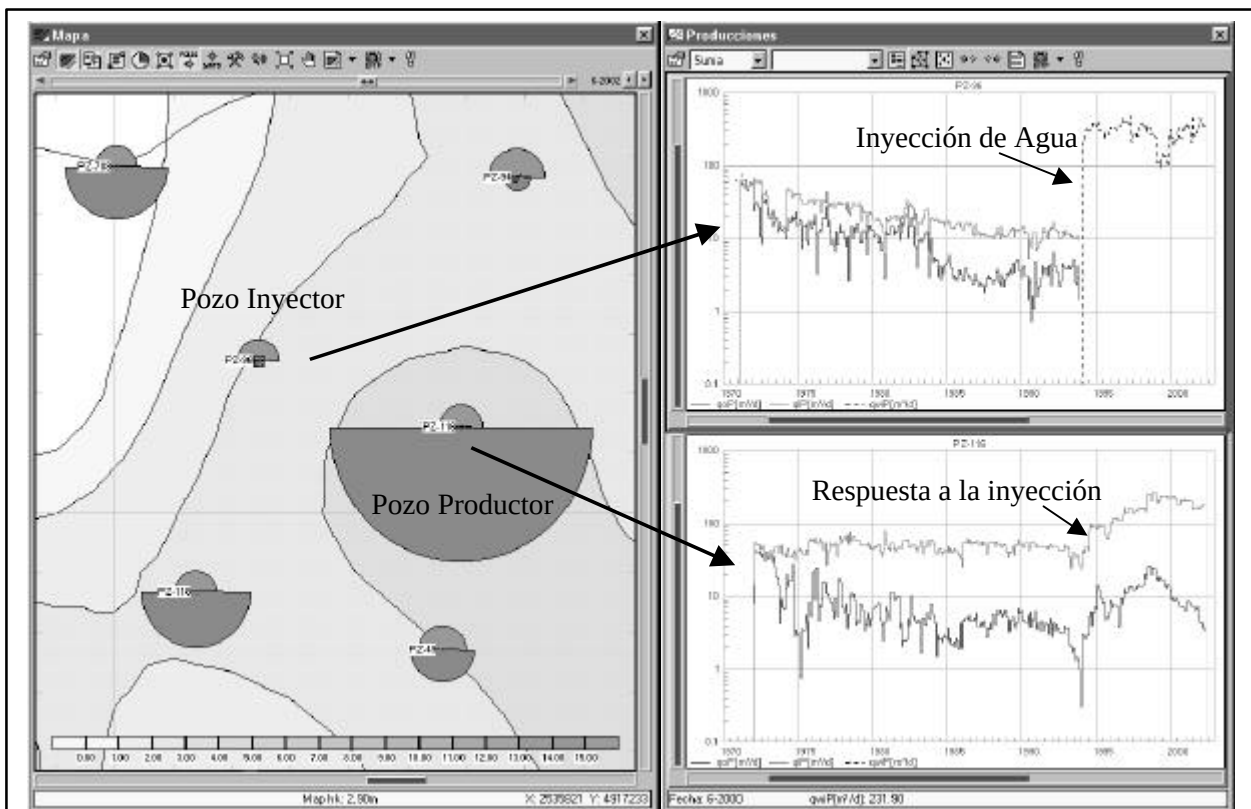


Figura 4: Uso de datos de producción de pozos para validación de modelo geológico. Nótese que el pozo productor es afectado por la inyección, por lo que se descarta cualquier tipo de desconexión total entre ellos.

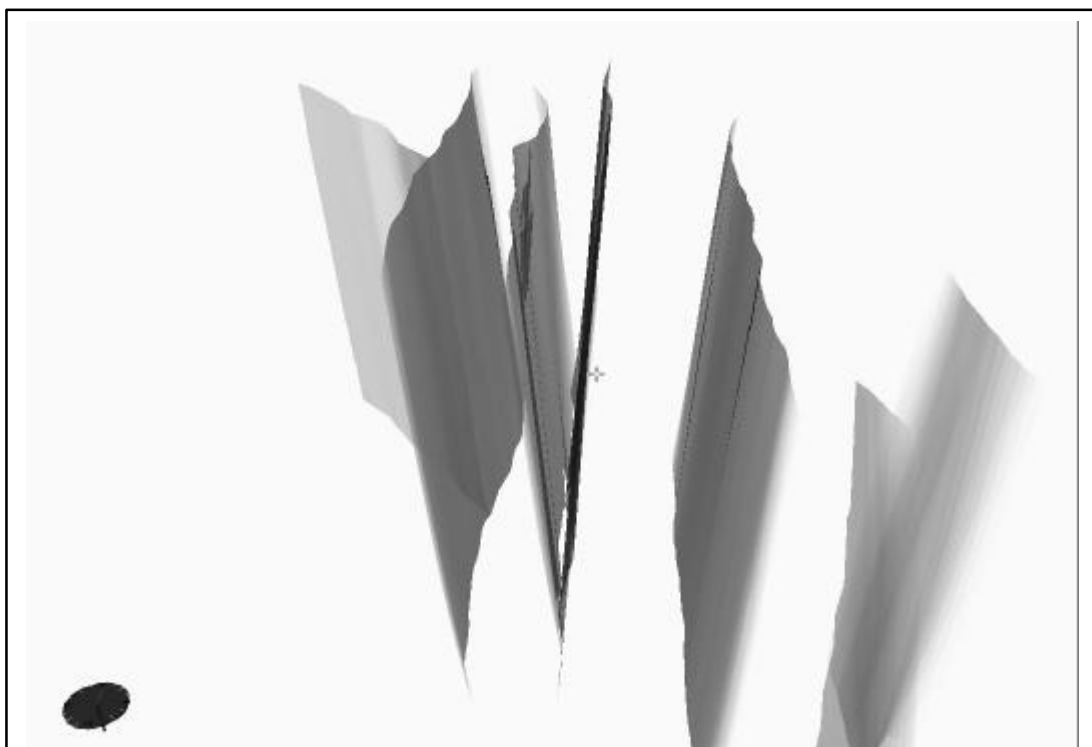


Figura 5: visualización tridimensional de fallas, luego de la fase de corrección (suavizado).

El primer paso es definir el área de estudio y los pozos involucrados. Los bloques se definen en general por características estructurales, aunque si la estructura es muy grande se definen límites arbitrarios de manera de abarcar hasta 100 pozos.

Se procede a recopilar toda la información que pueda resultar de utilidad (estudios previos, perfiles, legajos de pozos, informes de control geológico y coronas, etc.). Se hacen digitalizar todos los perfiles disponibles en papel y se los carga en la base de datos OW. Se hace una consulta a BDIEP de ensayos de pozos que se transfiere a OW, que sirve para ver resultados de ensayos en los cortes de pozos. Se elabora en Excel la columna estratigráfica que requiere el módulo de correlación y se la carga también en OW.

Interpretación sísmica 3D

En el área Cerro Dragón se han llevado a cabo en los últimos años importantes campañas de registración de sísmica 3D, por lo que es frecuente que los proyectos de WF estén abarcados por un cubo sísmico. La interpretación sísmica consta de tres pasos, relacionados entre sí: la interpretación de fallas, la interpretación de horizontes representativos del intervalo productivo, la construcción de leyes de velocidad y de un modelo de velocidades. El desarrollo de los proyectos de WF requiere una interpretación de mayor detalle que los objetivos de exploración y desarrollo tradicionales, ya que es necesario identificar hasta las fallas más pequeñas que puedan ser causa de desconexiones laterales de reservorios.

Interpretación de Pozos

Antes de comenzar, se construyen plantillas (*templates*) que contienen las curvas necesarias para la correlación, usualmente SP, inducción somera y profunda y conductividad y, además, simbología de ensayos de pozos y testigos laterales. Esta etapa comienza con la correlación de 5 niveles guía (*markers*) regionales que se corresponden con inflexiones profundas de la curva de conductividad y con la identificación de fallas que, por ser de tipo normal, se manifiestan por una sección faltante en alguno de los pozos correlacionados. A los *markers* regionales, se agregan otros que permitan una correlación de mayor detalle. En algunos casos se definieron hasta 27 *markers* locales sobre un intervalo productivo de 1400 m, distanciados 20 a 70 m entre sí. Este nivel de detalle permite diferenciar, en caso de leves diferencias de espesores entre pozos, si éste es debido a la mecánica de sedimentación y compactación o a fallamiento, pudiéndose identificar en este último caso fallas no resueltas por la sísmica 3D. Esta etapa es simultánea con la interpretación sísmica, de modo que se cuenta con una noción del marco tectónico, que permite comenzar la correlación en los pozos no fallados.

Interpretación estructural

Se denomina Interpretación estructural a la etapa en la que se hacen los ajustes necesarios a las interpretaciones de pozos y sísmica de modo que sean consistentes entre sí, ya que normalmente son realizadas por diferentes personas (geólogo y geofísico). Se introducen en esta etapa el uso de los datos de ingeniería y producción disponibles, como control del modelo geológico planteado (Fig. 4).

Luego se procede a una visualización tridimensional de horizontes y fallas de modo de corregir irregularidades y verificar que tengan un arreglo geológicamente factible (Fig. 5). En la etapa siguiente las fallas se convierten a profundidad utilizando el modelo de velocidades construido y se elaboran grillas de falla que integran las dos fuentes: los segmentos de falla interpretados en sísmica y los cortes identificados en los pozos. Las fallas interpretadas en las líneas sísmicas consisten de una sucesión de nodos unidos por segmentos. Cada uno de los nodos que unen los segmentos se convierte en un punto de control de la falla. La interpretación sísmica debe ser, por lo tanto, sintética y representativa para evitar la sobreabundancia de puntos de control, que producen superficies de falla irregulares.

Correlación de capas

Es una de las etapas más largas del trabajo. Se correlacionan todas las capas incluidas en el intervalo productivo, intentando respetar la nomenclatura preexistente. La columna estratigráfica definida permite agregar capas nuevas fácilmente. Usando el módulo de correlación de StratWorks se correlacionan hasta 9 pozos al mismo tiempo, lo que hace más fácil y rápido el proceso, permitiendo un mayor control y evitando la propagación de errores (Fig. 6). Los topes y bases de capas se propagan, como mínimo, hasta la primera línea de pozos donde la capa no se desarrolla y en lo posible a todos los pozos del proyecto.

Finalmente, se imprimen cortes estructurales y estratigráficos con todos los pozos del bloque, horizontalizados a varios niveles, de manera de seguir fácilmente el desarrollo de las capas. Estos últimos se utilizan también como control de calidad de la correlación.

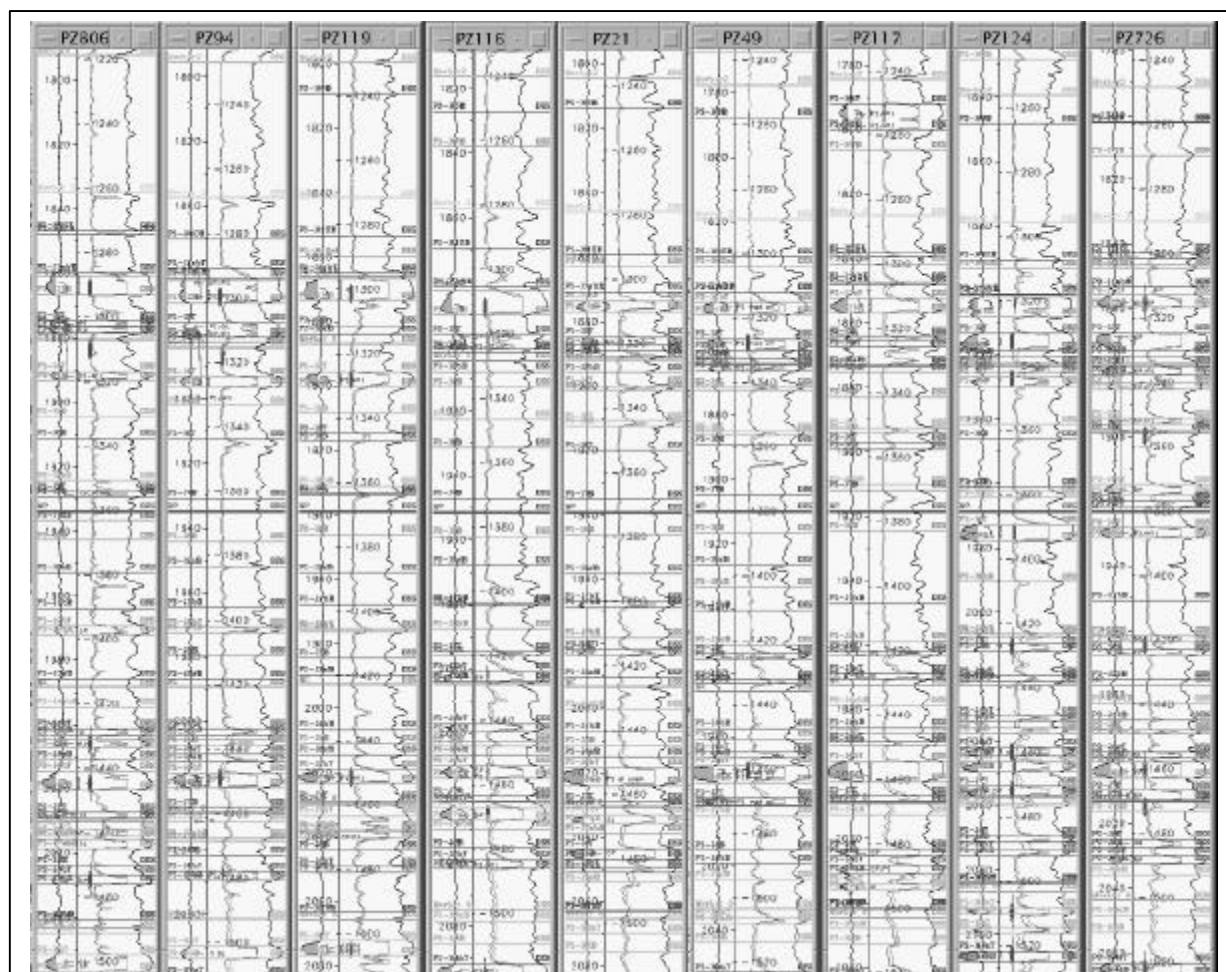


Figura 6: Pantalla de trabajo de correlación, con 9 pozos.

Interacción de bases de datos

Una vez concluida la correlación, se hace una consulta a la base de datos OW (programada en lenguaje SQL) que arroja los datos de todos los reservorios atravesados por los pozos (esta tabla contiene: Pozo, X, Y, KB, Capa, Tope, Base, Esp. Total). Esta tabla es llevada a Excel, donde se ingresan a mano los datos de espesor permeable (hk) y porosidad (phi) que se van estimando en pantalla, con un *template* que presenta todas las curvas registradas y calculadas necesarias (Fig. 7). Este proceso también se puede hacer de manera automática, aplicando valores de corte (*cutoff*) simultáneos de varias curvas (por ejemplo considerar permeable los valores de curva de SP normalizada menores a -7mV , resistividad profunda mayor a 4.5ohmm y porosidad de densidad mayor a 15%), pero no se han obtenido hasta el momento resultados satisfactorios. A pesar de ello se encuentran graficados en el *template* con el propósito de utilizarlos como orientación en la estimación visual de espesores.

Esta planilla es cargada en BDIEP y se hace una consulta que agrega los datos de ensayos y de tope y base de punzados, si los tuviere, o la evaluación de testigos laterales de impacto en el caso que la capa no hubiese sido punzada (Fig. 8).

La tabla es manipulada con Excel, donde se prepara la simbología de ensayos representativa de los fluidos y luego es importada a Zmap+ donde se lleva a cabo el mapeo.

Accesorios

En esta etapa del flujo de trabajo se está en condiciones de elaborar subproductos que sirven para la evaluación de recomendaciones, a saber: planos de burbuja de producción diaria y acumulada de petróleo, mapas estructurales a varios niveles. Con macros de Excel se preparan tablas de correlación con doble entrada pozos/capas con resultados de ensayos. La tabla resultante de la consulta a BDIEP es manipulada de modo de obtener datos estadísticos (espesor y porosidad promedio de cada reservorio, ranking de importancia de capas, productividad por metro de espesor útil, etc).

Esta etapa se realiza totalmente usando los módulos Zmap+ y ZCL (para las tareas repetitivas). En primer lugar se confecciona un mapa base, que contiene las coordenadas, escalas y orientación. Luego se hacen pruebas de grillado y contorno de los datos ajustando los parámetros de mapeo para que representen lo mejor posible la geometría de los reservorios, ya que no se editarán los mapas generados de manera automática. Los parámetros que más influyen sobre el mapa final son incremento de grilla, algoritmo de mapeo, factor de compresión del algoritmo de mapeo isopáquico, número de refinamientos de la grilla, distancia de extrapolación (Tearpock y Bischke. 1990).

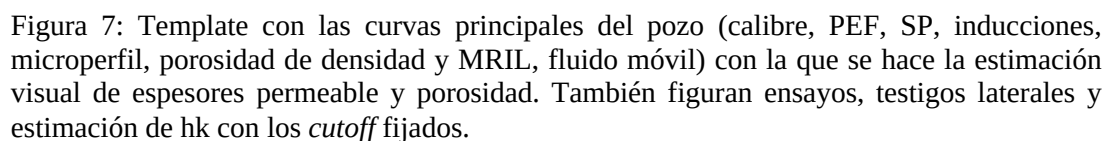


Figura 8: Planilla que contiene las consultas a las bases de datos. A la izquierda, resultado de la consulta a OW; en el centro, datos de hk y phi ingresados manualmente; a la derecha, datos de ensayos provistos por BDIEP.

Una vez definidos los parámetros de mapeo se procede a preparar y ejecutar macros para realizar las tareas repetitivas. Se comienza ejecutando un macro que hace copias del mapa base para la totalidad de las capas. El siguiente macro arma grillas de espesor permeable (hk) de cada capa. Para el armado de grillas de hk se asume que los espesores no se modifican a ambos lados de la falla por acción de esta, es decir que el fallamiento es post-sedimentario, aunque esto no siempre es correcto.

El tratamiento de las superficies falladas consta de tres pasos, para los que se arman sus respectivos macros. El primer macro, arma grillas estructurales del tope de cada capa sin considerar las fallas, es decir que resultan superficies continuas cuya pendiente aumenta abruptamente cerca de las fallas de mayor desplazamiento vertical. Estas superficies son intersectadas, en el segundo macro, con cada una de las fallas que fueron suavizadas y grilladas en la fase final de la interpretación estructural. La intersección da por resultado una línea tridimensional por cada falla que son agrupadas en un archivo (líneas de falla). En el tercer macro son usadas como restricción para el grillado estructural del tope de las capas (Fig. 9 y 10). Si existen pocos puntos de control (datos de pozos) o éstos se encuentran alineados (por ejemplo, en un bloque

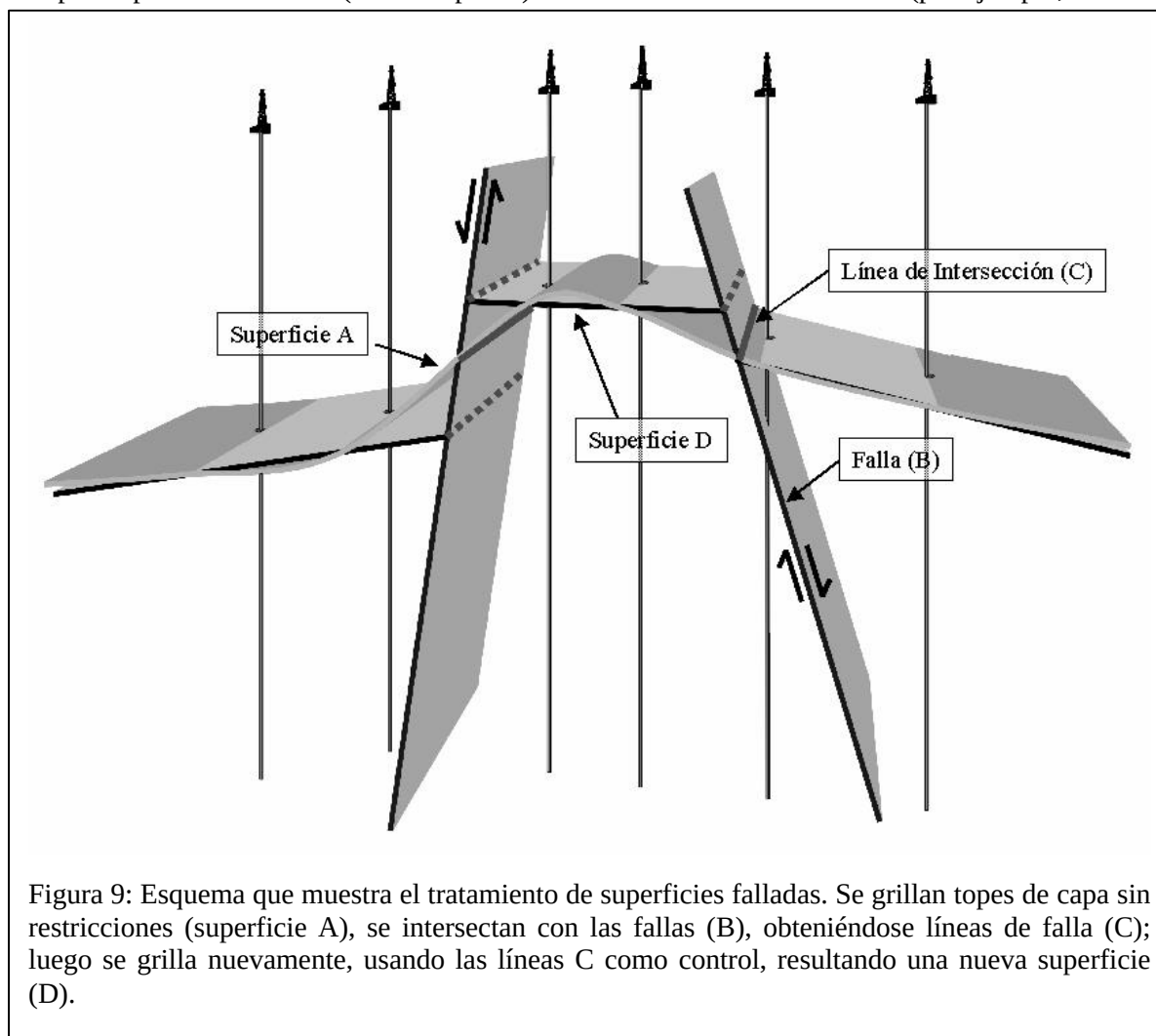


Figura 9: Esquema que muestra el tratamiento de superficies falladas. Se grillan topes de capa sin restricciones (superficie A), se intersectan con las fallas (B), obteniéndose líneas de falla (C); luego se grilla nuevamente, usando las líneas C como control, resultando una nueva superficie (D).

estrecho delimitado por fallas, donde sólo es posible ubicar una línea de pozos), las grillas estructurales adoptan formas irregulares. En estos casos se debe construir una grilla de rechazo (sección faltante) de falla, que permite al programa grillar la superficie considerando datos de ambos lados de las fallas, para construir el mapa estructural final (Fig. 10).

Con este método se logran líneas de fallas propias de cada capa. Esto evita el uso de polígonos de falla contruidos a partir de horizontes sísmicos que provocan errores en los mapas cuando se los aplica a niveles alejados de dichos horizontes (pozos mapeados en bloques incorrectos).

Posteriormente se ejecutan los macros que vuelcan, por cada capa, los datos sobre los mapas: se construyen contornos a partir de las grillas de hk (con relleno de color) y las grillas estructurales, se trazan las líneas de falla; se aplica en la locación del pozo un símbolo representativo del resultado del último ensayo de la capa

(si la capa se encuentra en inyección, cementada o bajo tapón se le da prioridad) y luego, con diámetro algo menor, otro símbolo que representa el resultado del primer ensayo de la capa. La simbología, que lleva colores indicativos de los fluidos (azul, agua; verde, petróleo; rojo, gas; magenta, capa sin entrada) y formas

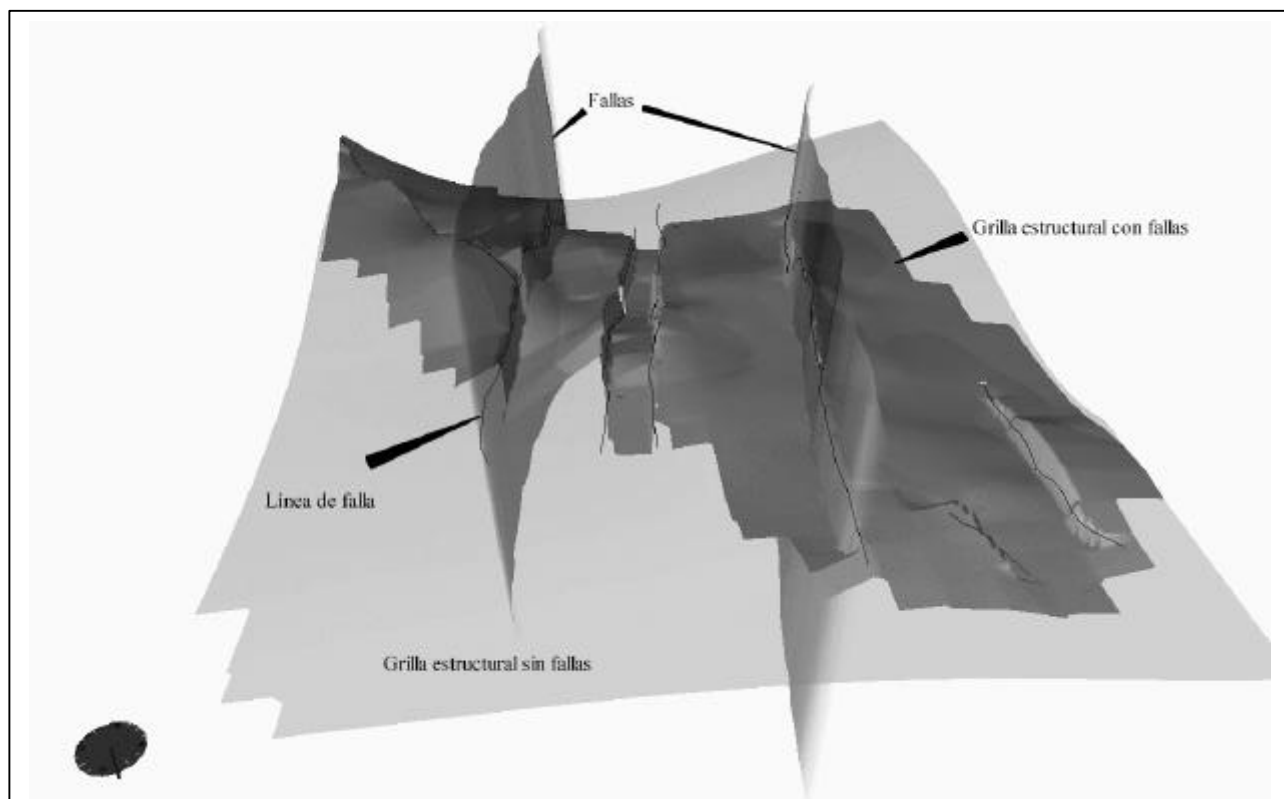


Figura 10: Vista tridimensional de una grilla construida a partir de puntos de control de falla alineados y datos de rechazo de la falla. El bloque central fue calculado con un único punto de control.

que representan distintos caudales y si el ensayo es individual o en conjunto, se revela muy apropiada para hacer una evaluación visual rápida del reservorio. Se continúa con nombres y símbolos de pozos (representativos de su estado actual) y los datos de las capas (cota bajo nivel del mar, espesor total, permeable, porosidad, primer y último ensayo, o en su defecto, evaluación de testigos laterales). A continuación se generan los archivos gráficos de impresión (Fig. 11), y se procede a la exportación de datos de pozos, grillas y contornos estructurales con falla y de espesor permeable.

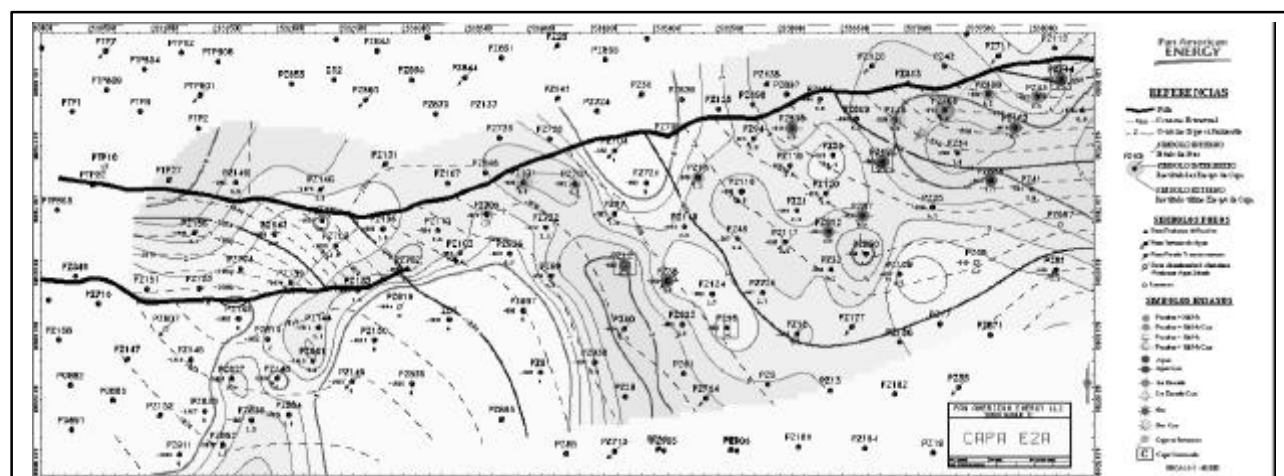
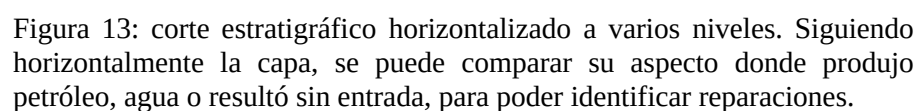
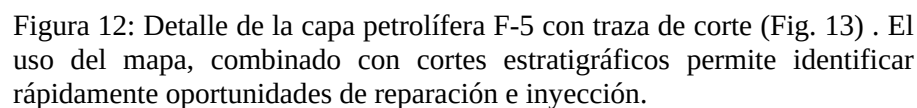


Figura 11: Ejemplo de mapa de una capa petrolífera.

En esta etapa se reúne toda la información obtenida y se la interpreta. Los mapas de burbujas de petróleo diario y acumulado (que muestran los inyectores cuando los hay), estructurales a varios niveles y de suma de espesor útil por pozo sirven para preseleccionar locaciones y candidatos a convertir a inyector de agua. Con los mapas de capas y los cortes estratigráficos, que permiten visualizar de manera sencilla el aspecto de una capa en determinado pozo, se preseleccionan todas las capas con posibilidades de ser reparadas o estimuladas, o incorporadas a la inyección (Figs. 12 y 13). Además se pueden seleccionar los pozos a convertir a inyector más apropiados para cada capa productiva.



Interacción con Cliente Interno.

El cliente interno de toda la información generada es el ingeniero de reservorios, que es quien diseña el proyecto y evalúa su rentabilidad. El primer producto que recibe son los mapas de capas, junto con grillas y trazas de fallas que son cargadas en el programa de simulación y seguimiento Sahara. A partir de este momento se incrementa la interacción, con la discusión de las propuestas de reparaciones, conversiones y locaciones. El producto final entregado consiste en el estudio geológico de recuperación secundaria del bloque analizado.

CONCLUSIONES

El flujo de trabajo descrito ha sido aplicado, a Junio de 2002, en 11 proyectos nuevos de recuperación asistida y en 7 ampliaciones de proyectos existentes.

Se generaron modelos geológicos de detalle orientados a recuperación secundaria, que incluyen mapas isopáquicos y estructurales de más de 1200 arenas. En dos años fue posible revisar las correlaciones de un cuarto de los pozos del área.

Se logró integrar efectivamente bases de datos que se operaban por separado. La organización de los datos lograda permite la regeneración rápida de los mapas, incorporando los pozos nuevos. A partir de la aplicación de este flujo de trabajo se cuenta con información digital de todos los procesos involucrados.

El tiempo requerido por cada una de las etapas del flujo de trabajo, en especial la elaboración de mapas, fue reducido sustancialmente, pasando de semanas a días.

Esto permitió dedicar más tiempo al análisis de oportunidades de mejora, que se tradujo en propuestas de más de 800 reparaciones y más de 110 locaciones, de las que, a la fecha, fueron perforadas 15, la mayoría de tipo *infill*, con producciones iniciales de hasta 140 m³/día de petróleo.

En proyectos nuevos, fue posible una mejor selección de capas a barrer con agua, en tanto que el número de capas inundadas aumentó entre 50 y 200%, y se amplió la distribución areal de la inyección en proyectos existentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la gerencia de Pan American Energy la autorización de la publicación de este trabajo; a L. Girolodi por el apoyo en la publicación de este trabajo; a A. Viola, C. Acuña, M. Cohen, D. Avagnina, P. Carnicero, M. Laffitte, R. Czeplowodski y C. Sylwan por las opiniones y aportes; a Carlos Caldara por la colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

Tearpock, D.J., y R.E. Bischke,. 1990. Applied Subsurface Geológicoal Mapping. Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey. 648pp.