

## Planeación, diseño y ejecución de la perforación del pozo más profundo de Bolivia, BOYUY-X2

*Mario Bertarelli*  
*Edwin Badani*  
*Rómulo Durán*  
*Repsol E&P Bolivia*

Artículo recibido en 2019-evaluado-revisado-correcto y aceptado en 2021

### Resumen

Se perforó un pozo exploratorio de 7,963 metros de profundidad en Bolivia. Está ubicado en la región sub-andina, en la parte sur de Bolivia, una región conocida por sus condiciones de perforación difíciles y una geología muy compleja, generando un desafío verdadero en cada una de las secciones a perforar.

BOYUY-X2 es el nombre de este pozo con el objetivo alcanzar los bloques inferiores a las formaciones históricamente productoras en el campo, las areniscas devónicas de Huamampampa. Se encuentra ubicado 70km al sur del campo Margarita, dentro del bloque Caipipendi, que aporta alrededor del 30% de la producción de gas del país.

El diseño del pozo BOYUY-X2 constituyó desde el principio del proyecto por la complejidad de los objetivos de subsuelo propuestos, demandando una configuración particular del agujero y un programa de tubería. Dentro de la problemática identificada relacionada con las operaciones de perforación, se revisarán los aspectos siguientes a profundidad:

- Objetivos profundos con alta incertidumbre geológica.
- Perforación de roca dura con condiciones abrasivas en grandes diámetros, tanto desde un punto de vista de diseño de barrenas y de herramientas direccionales.
- Estrategia y tecnologías nuevas en herramientas de ensanchamiento.
- Pérdidas de circulación en formaciones naturalmente fracturadas.
- Inestabilidad de agujero en formaciones sobrepresurizadas y presencia de fallas.
- Tecnología de cementación y colgadores de liner para asegurar la integridad del pozo.
- Herramientas especiales para aplicaciones de alta presión y temperatura.
- Enfoque MPD en agujero de producción para reducir incertidumbre de presiones de formación.
- Estrategia operacional para reducir tiempos invisibles durante la perforación y viajes de tubería.

Este artículo explica en detalle cómo el pozo BOYUY-X2 se planifica, pero especialmente cómo se perfora. Se discute cómo las incertidumbres geológicas afectaron el plan original y como el equipo del proyecto ajustó la estrategia operacional, empleando tanto experiencia local como probando nuevas tecnologías, para de esta manera alcanzar los objetivos planteados y haciendo un gran descubrimiento geológico.

**Palabras clave:** Perforación de un pozo profundo, incertidumbre geológica, implementación de ajustes al plan de perforación original; descubrimiento de un yacimiento profundo de hidrocarburos.

## Drilling strategy for the deepest well in Bolivia, BOYUY-X2

### Abstract

Recently the Boyux exploratory were with a total depth of 7963 m has been drilled in Bolivia. The area where this well is located has known for its difficult drilling conditions, duo to complex geology. The aim of this well has been to study the deeper located strata in the current oil purviner. Some of the most important challenges met by drilling team were:

- a) Geological uncertainty of the deep objectives
- b) Drilling high strength strata
- c) Lost of the drilling fluid in naturally fractured intervals
- d) Wellbore instability white drilling overpressured formations and throughfault intersections. In summary, this paper discusses the planning and drilling of this deep well.

The effects of the geological uncertainties on the original drilling plan and how the team implemented the necessary changes through the use of new technologies, allowed meeting the projected depth, finding an important oil discovery.

**Keywords:** Drilling a deep well, geological uncertainty, implementation of adjustments to the original drilling plan; discovery of a deep hydrocarbon reservoir.

### Antecedentes

El pozo Boyuy-X2 fue planificado originalmente como un proyecto exploratorio de 6500 metros de profundidad. Ubicado en la parte sur del bloque Caipipendi, a 46 kilómetros del pozo más cercano perforado en el campo Margarita en el subandino boliviano. El principal objetivo de este pozo era perforar, probar y poner en producción la formación Huamampampa en tres niveles diferentes: Ha, Hb y Hf; y darle continuidad al plan exploratorio del bloque. Es el segundo pozo en la estructura Boyuy, ubicado a 700 metros al este del Boyuy-X1 que alcanzó solamente los 2700 metros de profundidad, sin atravesar ninguna arena de interés. Otras referencias a tener en cuenta fueron los campos de Iñiguazu e Itaú, ubicados a 30 y 15 kilómetros de distancia respectivamente y por la

proximidad geográfica representaron pozos análogos de mucho interés para el análisis.

Desde la planificación del proyecto, por el requerimiento geológico de probar independientemente cada uno de los niveles del yacimiento que iban a atravesarse, el diseño del BUY-X2 fue diferente a como se habían perforado anteriormente los pozos en el bloque Caipipendi. Adicionalmente, por la profundidad proyectada del pozo en ese momento, el más profundo del bloque, se esperaban condiciones de alta presión y alta temperatura (HPHT); excediendo los 15,000 psi y los 300°F en el fondo. La condición HPHT suponía un nuevo reto para el equipo del proyecto, al ser la primera vez que se rompía esta barrera, haciendo necesaria una planificación más detallada y herramientas y equipos especiales, no comunes en el país.

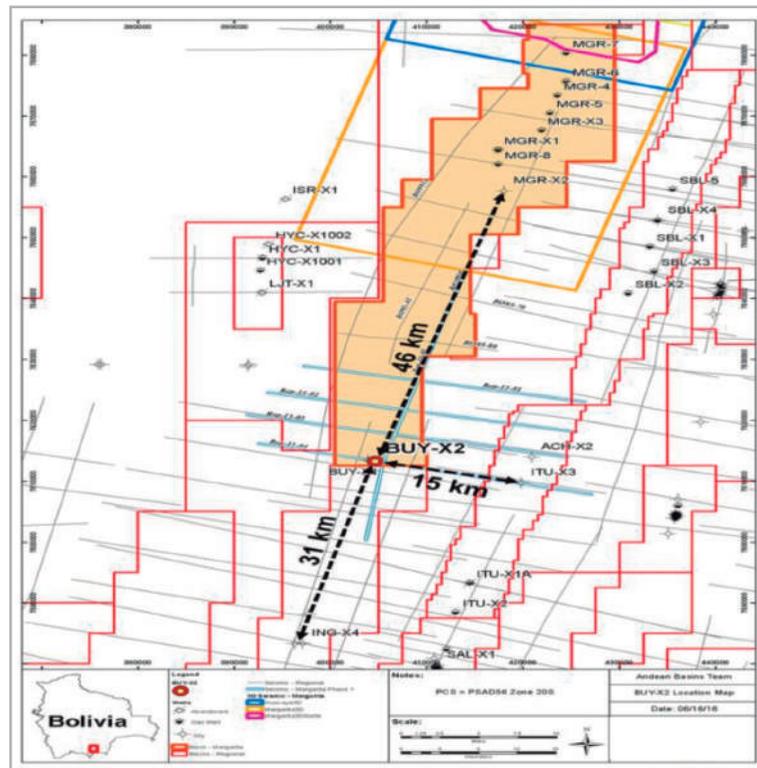


Figura 1. Ubicación geográfica pozo Boyuy-X2 dentro del Bloque Caipipendi.

## Construcción del camino y la planchada

El inicio de la construcción del camino y la planchada de perforación del Boyuy-X2, se inició el 10 de diciembre de 2016 y tuvo una duración de 156 días, entregándose para inicio de la movilización del equipo de perforación el día 15 de mayo de 2017.

Los desafíos principales con los que normalmente se cuenta para construir una localización en esta zona del país son los siguientes:

- Formaciones superficiales de gran dureza.
- Topografía muy accidentada, representativa de la zona sub-andina.
- Fuertes lluvias entre diciembre y abril que complican la ejecución de las obras.
- Presencia de comunidades múltiples de la localidad con las que se debe coordinar antes, durante y después de la ejecución del proyecto.

Normalmente se consideran los puntos siguientes dentro de un proyecto de construcción:

- Construcción de camino de acceso: Se minimiza su longitud aprovechando las rutas nacionales y vecinales que puedan existir y minimizar también el movimiento de tierras considerando la topografía del terreno. En el caso del Boyuy-X2 se tuvo que construir un camino de acceso de 2.2 km, con pendientes por encima de los 30°.
- Construcción de la localización: Planchada principal, campamento y zona de tubulares, fosa de quema, tratamiento de recortes, helipuerto. Las dimensiones estándar de la planchada principal están en el orden de 150 x 130 metros cuadrados.

Para tener una idea de lo que representa el trabajo previo al inicio de la perforación con referencia al movimiento de tierras:

- Construcción planchada:  
**Corte: 200,000 metros cúbicos. Relleno: 95,000 metros cúbicos**
- Construcción camino:  
**Corte: 61,000 metros cúbicos. Relleno: 17,000 metros cúbicos**



Figura 2. Localización principal Boyuy-X2 (150 x 130 m²).

### Movilización del equipo

Para perforar pozos de esta profundidad dentro del subandino boliviano, se necesitan equipos de perforación potentes, tanto por la profundidad que finalmente se alcanzará y los altos pesos que tienen que manejarse durante las corridas de las tuberías de revestimiento, (alrededor de 1 MMLbs).

Para la movilización completa de la unidad de perforación se necesitaron transportar 98 cargas con un total de 2800 toneladas, recorriendo alrededor de 45,000 kilómetros sin registrar incidentes con pérdidas de días.

PACKING LIST - RIG PTX 27		
	Cargas	Peso (Tons)
Unidades de poder	17	285
Sistema circulación	22	428
Torre y subestructura	51	812
Misceláneos	62	1053
<b>Total</b>	<b>152</b>	<b>2,578</b>

PACKING LIST – Rig Camp		
	Cargas	Peso (Tons)
Mini-campamento	19	111
Campamento principal	27	172
<b>Total</b>	<b>46</b>	<b>283</b>

## Planeación y diseño

El pozo Boyuy-X2 se diseñó originalmente para alcanzar los 6,500 metros de profundidad con una trayectoria vertical,

**Figura 3.** Según el pronóstico original se esperaba atravesar tres niveles de la arena Huamampampa, (objetivo principal) a diferentes profundidades: Ha a 3,000m, Hb a 4,000m y Hf a 6,200 metros.



**Figura 3.** Unidad de perforación Petrex-27 armada.

El programa incluía también pruebas individuales en cada uno de los niveles de yacimiento que se atravesarán, con la posibilidad de incluir alguna arenisca adicional que mostrara presencia de hidrocarburo (Icla o Santa Rosa).

Por las profundidades que esperaban alcanzarse, este pozo se planificó para condiciones de alta presión y alta temperatura (HPHT) en sus dos secciones inferiores: 8 ½" y 6", **Figura 4.** Fue la primera localización de este tipo para pozos dentro del Bloque Caipipendi requiriéndose un

análisis especial e importación y transporte de equipos y herramientas diferentes a las que históricamente se habían utilizado, entre las cuales figuran las siguientes: equipos de control de pozo (BOPs) para 15,000 psi con sellos para alta temperatura (350 °F), herramientas direccionales adecuadas para trabajos en alta temperatura (RSS, motores de fondo y MWDs) productos químicos tanto para fluidos como para cementación adecuados a estas condiciones y equipo MPD para la sección más profunda.

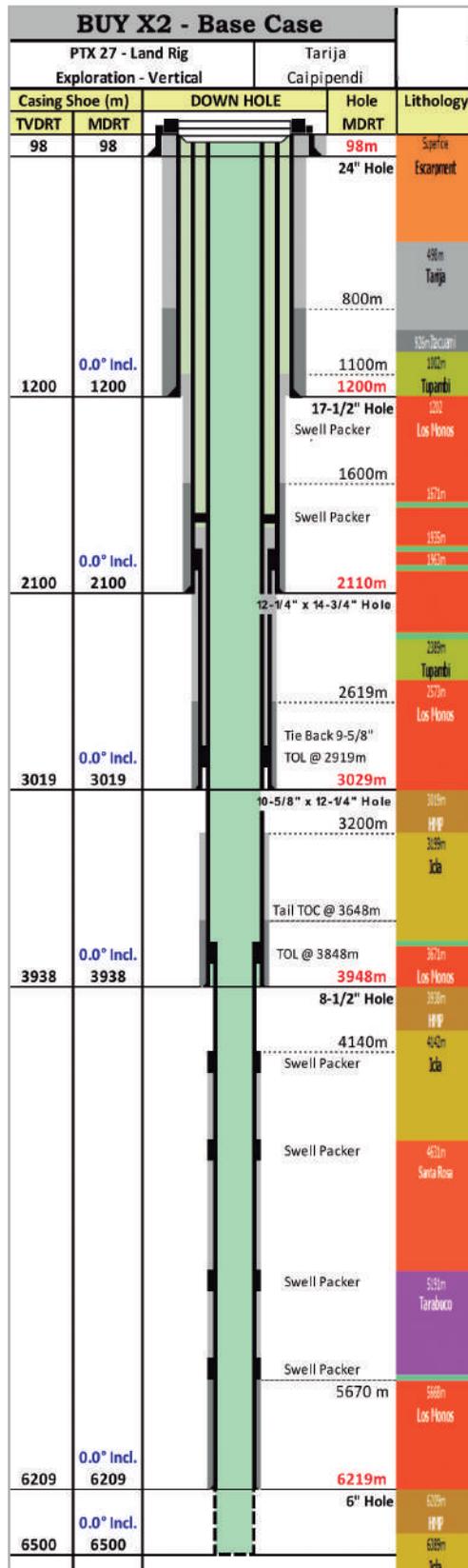


Figura 4. Diseño original del pozo.

El pozo fue planificado para siete secciones, de las cuales, seis se revestirían y una, la más profunda, quedaría en agujero abierto, de acuerdo a la configuración siguiente:

- 36" OH x 30" Casing
- 24" OH x 20" Casing
- 17 ½" OH x 13 3/8"
- 14 ¾" OH x 11 ¾" Liner
- 12 ¼" OH x 9 5/8" Casing
- 8 ½" OH x 7" Liner
- 6" OH (agujero abierto)

Las profundidades de los revestimientos quedarían como sigue:

- 30" Csg @ 98m (Conductor)
- 20" Csg @ 1200m (Tope Los Monos)
- 13 3/8" Csg @ 2100m
- 11 ¾" Liner @ 3019m (Tope Ha)
- 9 5/8" Csg @ 3938m (Tope Hb)
- 7" Liner @ 6209m (Tope Hf)

En el pronóstico se planificó atravesar las formaciones que eran muy heterogéneas (areniscas, lutitas, arcillas, diamictitas, conglomerados), de edades geológicas del carbonífero, devónico y silúrico. Se estimaba la presencia de fallas importantes a lo largo del pozo, que podrían ocasionar la repetición de formaciones o mayores espesores de lo históricamente encontrado en el campo para alguna de las formaciones.

Entre los riesgos principales durante la fase de planificación del pozo se identificaron los siguientes:

- **Incertidumbre geológica:** Como se ha venido mencionando, los pozos del sub-andino boliviano tienen una complejidad geológica al ser una zona con mucha deformación, generada durante la actividad intensa tectónica que sufrió durante la formación de la cordillera. Esto ocasiona, entre otros problemas, presencia de fallas, repeticiones, cambio en los espesores que se atraviesan, sobre-presurización e inestabilidad de formaciones. Esta incertidumbre a la hora de preparar el programa de perforación hace necesario cubrirse con contingencias para todos los escenarios posibles que pudieran encontrarse:

barrenas, tuberías, colgadores de liner, productos químicos, entre otros.

- **Pérdidas de circulación en formaciones naturalmente fracturadas:** Por la fuerte actividad tectónica, las formaciones que se atraviesan son naturalmente fracturadas. Esto ocasiona problemas de pérdida de circulación cuando se atraviesan con sobrebalance importante, por lo que es necesario diseñar el fluido de perforación con el objetivo principal de minimizar las pérdidas en el fondo.
- **Inestabilidad de la formación:** Este problema se encuentra principalmente en Los Monos, una formación lutítica y sobrepresurizada, incompatible de perforar con formaciones del Carbonífero u otras del Devónico como Iquiri o Huamampampa. La manera de controlar esta inestabilidad es tanto química con la formulación del fluido o mecánicamente con la densidad.
- **Formaciones duras y abrasivas:** Una de las características principales de las formaciones del sub-andino boliviano. La dureza de las rocas, desde los agujeros superficiales, resulta que las tasas de penetración sean muy bajas y la abrasividad hace que las carreras sean muy cortas, por lo que es necesario hacer viajes múltiples por sección.

- **Buzamientos de las capas:** Genera dificultad para mantener la verticalidad en el pozo, requisito indispensable durante las primeras etapas de la perforación con la intención de reducir su tortuosidad al máximo posible.

con ensamblajes agresivos, por la incapacidad de mantener la verticalidad con herramientas de rotación continua, (RSS).

### Ejecución y evaluación del diseño

Se debe iniciar estableciendo que el pozo empezó a tener variaciones con respecto a lo planificado desde que empezó la perforación, siendo necesaria la profundización de todos los agujeros con sus puntos de asentamiento respectivos de las tuberías, **Figura 5**. Si bien la profundidad final del pozo alcanzó los 7,963m (25° de inclinación en TD) atravesando sólo una arena de interés cuyo tope se encontró a 7,640m, no fueron necesarias secciones adicionales para llegar al objetivo de fondo. Los otros dos niveles de la arenisca Huamampampa que se esperaban, nunca se encontraron por la ubicación del pozo dentro de la estructura y la presencia de fallas que generaron repeticiones de otras formaciones.

Las condiciones hacia TD del pozo dentro del yacimiento fueron de aproximadamente 14,800 psi (11.4 ppg) y 353 °F (1 °F/30m), validando los supuestos que se tenían sobre las condiciones HPHT del pozo. Si bien los gradientes tanto de presión como de temperaturas no son muy elevados por la gran profundidad que se alcanzó en el pozo, los valores absolutos que se manejaron sí fueron importantes.

En relación a los riesgos analizados en la parte de planificación del proyecto se confirmó su presencia, pero sobre todo conocimiento y experiencia del campo por parte del equipo de proyecto que pudo mitigarlos exitosamente mediante el uso de tecnología y buenas prácticas operativas.

- **Incertidumbre geológica:** La columna litológica que finalmente se atravesó fue completamente diferente a la que se tenía planificado perforar.
- **Pérdidas de circulación:** Se perdieron más de 25,000 barriles durante la perforación del pozo Boyuy-X2 incluyendo alrededor de 10,000 en la sección superficial de 24", en la que se atravesaron las formaciones del Carbonífero.
- **Formaciones duras y abrasivas:** Se usaron 44 barrenas y más de 80 BHAs diferentes para llegar a TD del pozo, usando diseños innovadores con la mejor tecnología disponible en el mercado.
- **Altos buzamientos de las capas:** Presencia de fallas múltiples y necesidad de corregir la inclinación

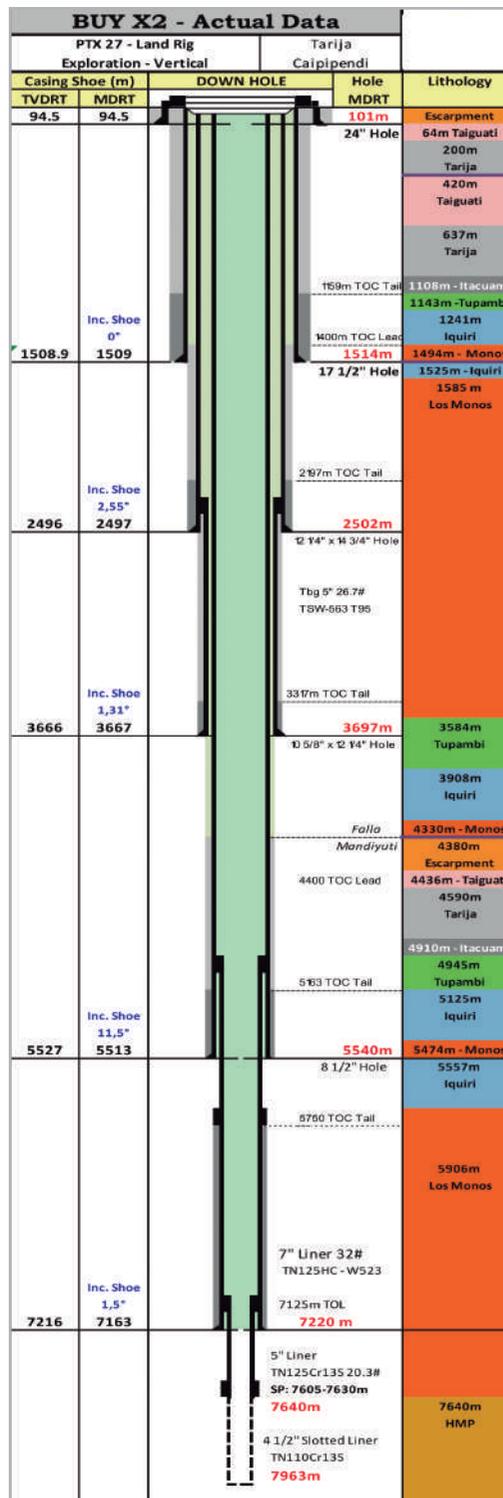


Figura 5. Estado mecánico BUY-X2.

Si se observa el estado mecánico final del pozo se puede apreciar que a pesar de la incertidumbre y de que fue necesario profundizar en prácticamente todos los agujeros, se mantuvo la misma configuración de diámetros y cañerías

que fue originalmente prevista. No fue necesario utilizar ningún diámetro adicional para llegar a los objetivos de fondo. De esta manera las profundidades de asentamiento quedaron como sigue:

- 30" Csg @ 95m (Conductor)
- 20" Csg @ 1509m (Los Monos)
- 13 3/8" Csg @ 2497m
- 11 3/4" Liner @ 3667m (Tupambi)
- 9 5/8" Csg @ 5513m (Los Monos)
- 7" Liner @ 7216m (Los Monos)
- 5" x 4 1/2" Liner @ 7960m (HMP)

La única diferencia con el diseño planificado fue la necesidad de incluir un liner combinado de 5" x 4 1/2" (pre-perforado), en el agujero de 6" colocado en la formación productora Huamampampa. La razón para esto fue la naturaleza intercalada entre areniscas-limolitas de este nivel, a diferencia de un bloque masivo de arena como normalmente se encontraba en Caipipendi, para minimizar la producción de sólidos.

## Resumen de las operaciones

### 1. Agujero 36" x Casing 30"

La perforación se inició el día 16 de julio con la barrena de 36" como agujero conductor. Se perforó hasta 101 m y se corrió y asentó la tubería hasta 95m, cementando hasta superficie. La tasa de penetración promedio para esta sección fue de 0.7 m/h. Es importante tener en cuenta que este pozo empezó con la perforación de la formación Escarpment (arenisca del carbonífero), roca de una alta dureza.

Durante la perforación de esta sección no se tuvieron pérdidas de circulación, siendo el problema principal las altas vibraciones ocasionadas por el gran diámetro de agujero sumado a la propia dureza de la roca. Una vez cementada la TR se instaló el equipo de superficie, el plato base y el sistema diverter de 29 1/2".

El tiempo AFE para esta sección era de 7.6 días y el tiempo real alcanzó los 9.5 días; principalmente producto de la dureza de la roca a perforar.

### 2. Agujero 24" x Casing 20"

La perforación del agujero superficial de 24" en el Boyuy-X2 puede haber sido la sección más demandante de todo el pozo. Tuvo una extensión de 1,400 metros, atravesando formaciones del Carbonífero: Escarpment, Taiguati, Tarija, Itacuami, Tupambi y del devónico superior: Iquiri. Las formaciones atravesadas tienen la particularidad de ser muy duras y abrasivas, generando tasas de penetración bajas y desgastes prematuros tanto de la estructura de cortes en los trépanos y en las herramientas direccionales y en los estabilizadores que entran en contacto con las paredes del agujero.

Esta sección del pozo se completó en 12 carreras y utilizando nueve barrenas diferentes, tanto rollercone como con cortadores fijos PDC. La tasa de penetración promedio fue de 2.1 m/h con una longitud promedio de 120 metros por carrera. Quedó demostrado que el uso de las barrenas PDC comparado con los rollercone, tecnología que históricamente se usaba para estos diámetros, permite obtener mayores tasas de penetración, generar menores vibraciones en fondo durante la perforación, hacer mayor metraje por carrera y reutilizar las barrenas al reducir su desgaste. Particularmente la tecnología Stingblade-Axeblade tuvo un desempeño destacado al perforar 524 metros en dos carreras, con una velocidad de 2.36 m/h.

Las herramientas de fondo que se seleccionaron en esta sección fueron de acuerdo a las lecciones aprendidas de pozos pasados y a la curva de aprendizaje que el operador y la empresa de servicio tienen del campo. Sistema de rotación continua (RSS Push-the-bit) con sección de poder

por encima para garantizar mayor potencia en el trépano, minimizando viajes hacia la superficie. Se hace hincapié en mantener la verticalidad a lo largo de estos agujeros superficiales para minimizar la tortuosidad final del pozo. Se debe considerar que son pozos muy profundos y con mucho tiempo de perforación, por lo que minimizando tortuosidades se logra reducir el daño potencial que se genera en las tuberías de producción posteriormente.

En este pozo la inclinación promedio de la sección fue de  $0.68^\circ$ , cumpliendo con los objetivos trazados. Al tratarse de herramientas "push-the-bit", **Figura 6**, las que se emplean en este diámetro y considerando la naturaleza abrasiva de las formaciones a perforar, se desarrollaron nuevos recubrimientos para los "pads" que direccionan la sarta, consiguiendo resultados excelentes y duplicando las horas efectivas en fondo, comparado con los modelos anteriores.



**Figura 6.** Evolución en steering-pads para RSS Push-the-bit.

Otro punto importante a considerar en esta sección fueron las pérdidas de circulación que se presentaron. El tipo de fluido que tixotrópico (altamente viscoso, con geles que se rompen fácilmente) y el rango de densidad estuvo entre 8.8 -9.1 ppg. Si bien la tixotropía del fluido obedece una estrategia para minimizar las pérdidas de circulación, comunes en formaciones naturalmente fracturadas como las del Carbonífero, se llegaron a registrar 9991 barriles de fluido perdidos a formación (8360 bbls perforando y 1634 bbls corriendo casing y cementando). Por el tipo de pérdidas que se experimentaron, su control se realizó con material LCM bombeado a través del puerto de circulación presente en el BHA, no con cemento.

El tiempo AFE para esta sección era de 37.9 días y el tiempo real de ejecución alcanzó los 58.3 días; debido a los 300 metros adicionales que se perforaron respecto al pronóstico, menor tasa de penetración de lo planificado y necesidad de más viajes de perforación para llegar a la profundidad objetivo.

### 3. Agujero $17 \frac{1}{2}''$ x Casing $13 \frac{3}{8}''$

El agujero intermedio de  $17 \frac{1}{2}''$  atravesó la parte superior de la formación Los Monos, con una extensión de 1,000 metros,

entre los 1,500 y 2,500 metros de profundidad. Se emplearon barrenas PDC y tanto RSS herramientas direccionales, como motores de fondo. La tasa de penetración promedio para esta sección fue de 3.3 m/h y la inclinación promedio alcanzó los  $2^\circ$ . Se tuvo un mejor avance con respecto a lo que había sido planificado originalmente, completando la sección en sólo tres carreras y con una longitud promedio de 330 metros por carrera.

Alrededor de los 1,900 metros de profundidad se tuvieron problemas severos tratando de mantener la verticalidad del agujero, generado por la presencia de una falla, ganando inclinación de forma violenta y sostenida y sin ver reacción de las herramientas direccionales (RSS) que se tenían en el fondo. Fue necesario corregir la trayectoria de vuelta a la vertical con un ensamblaje con motor de fondo (BH:  $1.5^\circ$ ), lo que se logró sin problemas, duplicando a la vez la tasa de penetración.

La formación Los Monos son lutitas sobre-presurizadas con tendencia a la inestabilidad si no se tratan adecuadamente mediante productos químicos y con la densidad del fluido. Es por eso que comúnmente se asienta una TR al entrar a la formación; las densidades de fluido que se requieren

para atravesarla de forma segura son incompatibles con las formaciones más débiles del Carbonífero, lo que se traduce en pérdidas de circulación. En el Boyuy-X2 el agujero de 17 ½” se perforó con un peso de lodo entre 11.0 – 13.0 ppg sin presentar ningún indicio de inestabilidad. Adicionalmente el tipo de fluido que se usa a partir del ingreso a Los Monos es base aceite, para garantizar ayudar en el control de estabilidad y mejorar los calibres de pozo.

El tiempo AFE para esta sección era de 42.8 días y el tiempo real de ejecución alcanzó los 31.3 días; esto debido a que se consiguieron mayores tasas de penetración de lo esperado y maniobras muy limpias, como resultado de la condición excelente del pozo, sin presencia de inestabilidad.

#### 4. Agujero 12 ¼” x 14 ¾” x Liner 11 ¾”

El Boyuy-X2 fue el primer pozo dentro del bloque Caipipendi diseñado con dos secciones de ensanchamiento. A continuación se describe la que tuvo una extensión de aproximadamente 1170 metros, dentro de la formación Los Monos.

La estrategia fue perforar primero un agujero piloto de 12 ¼” controlando la verticalidad con motor de fondo para ensanchar el agujero hasta 14 ¾” mediante el uso de herramientas de ensanchamiento concéntricas e hidráulicas. La decisión de hacerlo de esta manera obedecía

la naturaleza heterogénea de las formaciones y evitar estructuras de corte múltiples en un mismo ensamblaje de perforación. El agujero piloto se perforó en tres carreras con una tasa promedio de 3.3 m/h, con una inclinación promedio de 1.93°, comportamiento parecido al que se había tenido en el diámetro anterior en el que se atravesó la misma formación.

Hacia el final de la sección, cuando se esperaba ingresar al primer objetivo productor (Huamampampa – Ha), se presentó una falla importante con una repetición hacia la formación Tupambi, del carbonífero inferior, produciéndose pérdidas totales de circulación (1695 bbls en total) por el sobre-balance excesivo de presión. Se debe tener en cuenta que esta sección se perforó con un peso de lodo entre 13.0 – 13.8 ppg y las formaciones del carbonífero están normalmente presurizadas.

El ensanchamiento del agujero (1,168m en total) se realizó en dos viajes con herramienta de 14 ¾” y una tasa de 6.25 m/h, duplicando la de la perforación del agujero piloto. La tecnología utilizada con éxito para esta operación fue la que incluye la presencia de elementos stinger dentro de los bloques cortadores de los ensanchadores, **Figura 7**. De las dos carreras de ensanchamiento, una fue con bloques cortadores con la tecnología nueva alcanzando 1111 metros y otra con convencionales con 57 metros de avance.

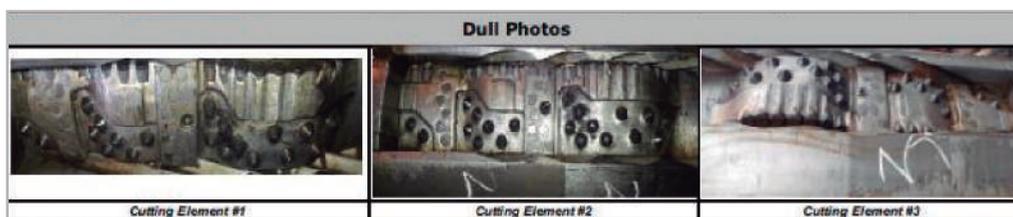


Figura 7. Bloques cortadores Stingblock 14 ¾”, (Dull grade: 1-2).

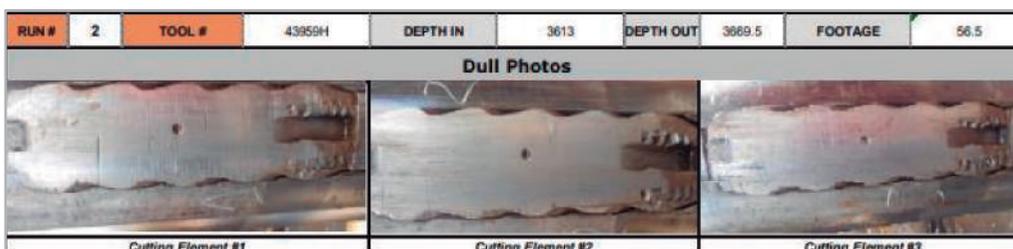


Figura 8. Bloques cortadores 14 ¾”, (Dull grade: 8-8).

Se puede observar un desgaste mucho mayor en la tecnología de bloques cortadores convencionales, a pesar que la longitud de ensanchamiento estuvo alrededor del 5% de la primera carrera.

Una vez ensanchado el agujero se procedió a correr y cementar el liner de 11 3/4" con centralización especial y equipos de flotación autollenante, para reducir el efecto de pistoneo mientras se baja en el pozo. El colgador que se utilizó fue uno expandible para aumentar el área de flujo y reducir el riesgo de empaquetamiento, tecnología que ha dado excelentes resultados en las operaciones de perforación en Bolivia.

El tiempo AFE para esta sección era de 48.17 días y el tiempo real de ejecución alcanzó los 62.38 días; debido a los 300 metros adicionales que se perforaron con respecto al plan, las problemas de pérdidas de circulación que se tuvieron hacia final de la sección y las carreras adicionales de registros eléctricos que se corrieron por requerimiento de exploración, (VSP: zero offset & 1.5 Km offset).

### 5. Agujero 10 5/8" x 12 1/4" x Casing 9 5/8"

El agujero de 10 5/8" x 12 1/4" fue el más largo del pozo, con una extensión total de 1843 metros, más del doble de lo que había sido planificado originalmente. La estrategia de perforación y ensanchamiento fue igual a la que se tuvo en el agujero anterior, perforando primero un agujero piloto de 10 5/8" y posteriormente ensanchándolo hasta 12 1/4" para poder bajar el revestidor de 9 5/8" sin problemas al fondo.

La perforación del agujero piloto se realizó tanto con barrenas PDC e impregnados, **Figura 9**, con motores de fondo y turbinas. La tasa promedio de perforación fue 1.27 m/h, necesitando 14 carreras y 12 barrenas diferentes para llegar a la profundidad objetivo. Las formaciones atravesadas fueron muy heterogéneas, predominantemente del Carbonífero. Es importante mencionar que en esta sección se encontró la presencia de la falla Mandiyuti, presente en toda la región del sub-andino boliviano, con un rechazo importante desde el Devónico hasta el Carbonífero Superior.



**Figura 9.** Barrenas PDC e Impregnados utilizados.

Para el ensanchamiento de la sección se requirieron cuatro carreras, realizando la operación a una tasa de 5.84 m/h, considerablemente más alta que lo que se alcanzó durante la perforación del agujero piloto, demostrando nuevamente los resultados excelentes de la nueva tecnología de ensanchamiento que se empleó en el Boyuy-X2.

La densidad del fluido tuvo que reducirse considerablemente desde 13.0 hasta 10.4 ppg por la aparición de formaciones más jóvenes y pérdidas de circulación (6497 bbls en total). Una vez que se estableció la densidad en este valor, fue

posible continuar con niveles estables hasta la profundidad final de esta sección en 5540 metros. A esta profundidad se corrió la tubería combinada de 10 3/4" x 9 5/8", siendo la tubería de producción más profunda corrida por cualquier operador dentro de Bolivia, alcanzando pesos en el gancho cercanos al millón de libras. La centralización también fue especial y el equipo de flotación autollenante como en la sección anterior.

El tiempo AFE para esta sección era de 86.7 días y el tiempo real de ejecución alcanzó los 150 días; explicado

por la extensión adicional de formación que se perforó y que alcanzó el doble de lo que originalmente había sido planificado. Se debe tener en cuenta también que las formaciones que se había planificado perforar con este diámetro eran muy diferentes a lo que se terminó perforando finalmente.

## 6. Agujero 8 ½" x Liner 7"

Desde esta sección se empezó a considerar el pozo como de alta presión y alta temperatura, por lo que antes de iniciar la perforación se instalaron las BOPs de 15,000psi. Estos preventores tenían instalados elastómeros para alta temperatura con capacidad de resistir hasta 350 °F. El objetivo de esta sección era alcanzar el tope de la formación objetivo Huamampampa (Hf), para bajar el liner de 7", objetivo que no pudo cumplirse por las altas

detecciones de gas que se presentaron y la incertidumbre del tope del yacimiento.

En total se perforaron 1680m de las formaciones Iquiri y Los Monos con trépanos PDC y tanto sistemas rotatorios (RSS) como motores de fondo, siguiendo la tendencia natural del pozo. La tasa de penetración promedio de la sección fue de 1.62 m/h, la inclinación promedio de la sección estuvo en 12.2° y la inclinación a TD en 1.5°. Se tuvo un comportamiento excelente de las herramientas RSS con sellos metal-metal en los pads de direccionamiento, alcanzando hasta 250 horas de operación efectiva en fondo, con temperaturas alrededor de los 270 °F. Adicionalmente desde esta sección se emplearon en los primeros 3,000 m de tubería de perforación protectores de tubería para proteger la zona más expuesta a esfuerzos laterales y minimizar el desgaste de la tubería.



Figura 10. Protectores de tubería & sellos metal-metal en RSS.

El peso del lodo en esta sección se manejó en un rango entre 13.5 y 15.6 ppg, incrementándose en la parte basal del agujero producto de las detecciones altas de gas que se observaron mientras se perforaba y en los viajes de tubería. En ningún momento se experimentaron pérdidas de circulación a lo largo de toda la sección.

Confirmando lo que había sido planificado en el diseño de pozo, hacia la parte final de este agujero se experimentaron condiciones HPHT: alrededor de 19,000 psi de presión hidrostática en el agujero y 315 °F de temperatura en fondo. Existieron limitaciones con las herramientas de fondo convencionales: 20,000 psi y 300°F, por lo que fue muy útil haber previsto la necesidad de herramientas de fondo para estas condiciones (tanto motores de fondo como MWDs).

Se corrieron registros eléctricos, siendo necesario emplear para esta profundidad el cable tuff-line, con capacidad de tensión mucho mayor al convencional, el cual permitió registrar sin problemas hasta la profundidad final de 7220 metros. Se bajó liner y cementó sin problemas de acuerdo a lo planificado.

El tiempo AFE para esta sección era de 167 días y el tiempo real de ejecución alcanzó los 98 días; principalmente debido a que la extensión de la sección se redujo en 500 metros aproximadamente, a que no se realizó DST en el intervalo Hb, (no apareció) y que las formaciones a perforar fueron más nobles que lo que estaba planificado, (Los Monos vs Icla, Santa Rosa, Tarabuco).

## 7. Agujero 6" x liner combinado 5" x 4 ½" pre-perforado

El agujero de 6" experimentó un cambio importante respecto a lo que había se había planificado, no solamente en profundidad y en longitud de sección sino también en las formaciones a atravesar. El plan inicial incluía perforar solamente el objetivo profundo de Huamampampa (Hf), sin embargo, por restricciones operativas fue necesario asentar el liner de 7" a la mitad de la formación Los Monos (400m por encima del tope de Huamampampa), presionando de esta manera a perforar estas dos formaciones, históricamente incompatibles, en un mismo agujero desde 7,220 hasta 7,963 metros.

Se perforó hasta 7,440 metros con barrenas PDC y motor de fondo en modo rotación, por la profundidad no se intentó en ningún momento realizar correcciones a la trayectoria. El peso de lodo era de 15.6ppg y el ECD durante la perforación alrededor de los 16.4ppg. A esta profundidad se encontraron pérdidas de circulación severas (2238 bbls), decidiéndose instalar un sistema MPD para realizar una reducción de densidad de fluido controlada y así poder combatir las pérdidas de circulación mientras se continuaba perforando.

El uso del sistema MPD supuso un cambio importante en la estrategia de perforación del pozo y permitió reducir la densidad del fluido de una forma más segura, teniendo en cuenta que se trataba de un proyecto exploratorio y el primero en el país en llegar a estas profundidades. En total, para poder reducir las pérdidas de circulación a un valor tolerable fue necesario bajar la densidad del fluido de 15.6ppg a 11.3ppg, que a esas profundidades supone una reducción de columna hidrostática de 5600psi aproximadamente. Es importante mencionar que esta reducción de densidad fue gradual, haciendo pruebas de presión de poro dinámicas, verificando siempre que se tuviera una ventana de perforación para continuar profundizando el pozo.

A los 7,640 metros se comprobó el ingreso al yacimiento Huamampampa, tanto por recortes de perforación, lecturas de sensor de Gamma-Ray y palinología. Se continuó la profundización del pozo, dentro de la formación Huamampampa, combatiendo las pérdidas de circulación y con lecturas de gas constantes. Se logró llegar a la profundidad final del pozo en 7963m, con un total de nueve carreras de perforación y una tasa de penetración de 0.85 m/h. La inclinación final fue de 25° y el azimuth de 235°. Durante todo el agujero de 6" no fue posible tener un control de la trayectoria al no tener herramientas direccionales para esas condiciones de pozo en este diámetro (HPHT). Se perdieron en esta sección 5652 barriles de fluido base aceite (753bbls dentro de la formación Huamampampa), reduciendo significativamente este número una vez que se instaló el sistema MPD.

Se corrieron registros eléctricos con cable (unidad tuff-line) confirmando temperatura de fondo de 353 °F / 178 °C. No fue posible terminar el programa completo de logging debido a la falla del cable eléctrico. Sin embargo, con la información con la que se contaba se confirmó que se trataba de un descubrimiento geológico y continuar con las operaciones de prueba del pozo.

Previo a continuar con la prueba del pozo y debido a la naturaleza intercalada del Huamampampa, se decidió cubrir el agujero con un liner combinado de 5" x 4 ½" pre-perforado. Se colocaron dos swell packers en el tramo 7615-7630 por encima del tope de HMP para evitar contaminación por inestabilidad de Los Monos durante la producción el pozo.

El tiempo AFE para este agujero era de 39 días mientras que el tiempo real alcanzó los 189 días. Hay que tener en cuenta que se perforaron 743 metros en lugar de los 281 metros originales, que las pérdidas de circulación fueron bastante severas en este tramo y que la incertidumbre geológica fue muy alta.



**Figura 11.** Cabeza rotativa y elementos de sello - sistema MPD.

## Conclusiones

La incertidumbre geológica tiene un papel muy importante en la planificación de los pozos. Es necesario considerar las contingencias adecuadas para herramientas, materiales y equipos críticos, evitando así desabastecimiento de los mismos.

Las formaciones del subandino, especialmente las del Carbonífero, se caracterizan por su dureza y abrasividad, incluso desde los agujeros superficiales. Es necesario contar con trépanos y herramientas de fondo robustas que puedan resistir el daño por abrasión, vibración e impacto.

El pozo llegó a su profundidad final aproximadamente con un 10% de tiempo no productivo (NPT), del cual la mitad corresponde a pérdidas de circulación, excediendo los 25,000 barriles de lodo. Es necesario trabajar en alternativas para reducir estos volúmenes en proyectos futuros.

Los pozos del subandino son de duración larga, por lo que la eficiencia debe buscarse no sólo en conseguir tasas de penetración más altas, sino en hacer viajes de tubería a mayor velocidad y de forma consistente. En el Boyuy-X2 se ha aplicado un control digital durante estas operaciones, que permitió reducir más de 20 días de operación, que redujeron el costo de perforación de este pozo alrededor de 3 millones de dólares.

## Semblanza del autor

### Mario Bertarelli

Ingeniero de perforación / supervisor de pozo a cargo de la planificación, diseño, ejecución y seguimiento de operaciones de pozos de petróleo y gas. Más de 10 años de experiencia en la industria del petróleo y el gas.