

## REVISIÓN CIENTÍFICA

## Evaluación comparativa de la perforación de pozos petroleros, mediante Casing Drilling Vs Perforación Convencional

Comparative evaluation of oil well drilling, using Casing Drilling vs Conventional Drilling

Cassandra Rosario Ocampo Veramendi

Ingeniería en Petróleo y Gas Natural,  
Facultad de Ciencias Exactas y  
Tecnología, UAGRM

cassandra.ocampo1410@gmail.com

## Resumen

En este documento se establece los coeficientes de impacto de la profundidad de la perforación sobre los tiempos y costos. Adicionalmente, el campo donde se encuentra los pozos explica en algunas circunstancias las diferencias de tiempo y costo de la perforación. Se llega a estas conclusiones en base a datos proporcionados por la empresa nacional del petróleo YPF, correspondientes a 35 pozos situados en los campos Boquerón, Yapacaní y Patujú del departamento de Santa Cruz. Las técnicas utilizadas para poner de manifiesto estos resultados incluyen el examen de las distribuciones conjuntas de probabilidad en tablas de contingencia y modelos de regresión lineal estimados por el método de los mínimos cuadrados.

**Palabras claves:** Casing Drilling, exploración, hidrocarburos, mínimos cuadrados, tablas de contingencia, tecnologías de perforación, Santa Cruz.

## Abstract

This document establishes the impact coefficients of the depth of the drilling on the times and costs. Additionally, the field where the wells are located explains in some circumstances the differences in time and cost of the drilling. These conclusions are reached based on data provided by the national oil company YPF, corresponding to 35 wells located in the Boquerón, Yapacaní and Patujú fields of the department of Santa Cruz. The techniques used to show these results include the examination of joint probability distributions in contingency tables and linear regression models estimated by the least squares method.

**Keywords:** Casing Drilling, exploration, hydrocarbons, least squares, contingency tables, drilling technologies, Santa Cruz.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Bolivia la perforación de pozos petroleros fue iniciada en 1911 en el Chaco (Cuevo y Charagua), por la empresa Farquhar. En 1913, la compañía Caupolicán perforó algunos pozos en la zona de Calacoto, próxima a la ciudad de La Paz. Se utilizaron equipos de percusión precarios sin éxito alguno. En 1922, la Standard Oil perforó a una profundidad de 561 metros, el pozo Bermejo 1 que resultó seco. Para el efecto utilizó un equipo traído desde Argentina. En 1924, la misma empresa perforó el pozo Bermejo 2, descubriendo en el intento una mezcla de petróleo y gas a la profundidad de 635 metros. Este fue el primer pozo productor de hidrocarburos en Bolivia.

En el año 1942 se ingresó al sistema de perforación rotativo con dos equipos accionados por motores a vapor. Esta forma de perforación pasó a la historia como una técnica atrasada y lenta. En 1953 llegaron 4 equipos de perforación del sistema rotativo con motores a diésel como combustible. Con el correr de los años, los equipos de perforación rotativos pasaron a ser activados con gas natural como combustible y otros están siendo accionados por motores eléctricos.

La perforación de un pozo se diseña teniendo en cuenta los factores relacionados a la naturaleza como tal, la formación geológica, el tipo de rocas, el gradiente de presión, los costos económicos y las perspectivas de exploración y desarrollo. En este oficio, es importante saber si se trata de formaciones de rocas consolidadas o deleznales, o formaciones de arcilla o arena.

El objetivo de esta investigación es realizar una evaluación comparativa de dos técnicas alternativas de perforación. En lo específico,

se caracteriza en primer lugar, las técnicas en términos de profundidad, tiempo y costo; en segundo lugar, se establecen relaciones explicativas de los tiempos y costos de perforación; y en tercer lugar, se propone modelos lineales para los costos de producción.

## 2. PROFUNDIDAD, TIEMPO Y COSTO

En la **Tabla 2.1** se presenta la distribución de frecuencias de los pozos según los campos de pertenencia, teniendo así, el 54% de los pozos perforados en el Boquerón, el 6% en Patujú y el 40% en Yapacaní.

Tabla 2.1. Pozos perforados por campo

	Frecuencia	Porcentaje
Boquerón	19	54
Patujú	2	6
Yapacaní	14	40
	35	100

Fuente: Elaboración propia en base al programa de perforación de (Y.P.F.B.)

Los campos Boquerón, Patujú y Yapacaní se encuentran ubicados al noreste de la ciudad de Santa Cruz; más específicamente, dentro del área de explotación denominado Sara Boomerang II, a una distancia de 260 km de la ciudad de Santa Cruz.

Fisiográficamente, esta zona correspondiente a la llanura chaco-beniana central, está situada en el extremo occidental del lineamiento conocido como Boomerang Hills. Se trata del potencial hidrocarburoso de los reservorios Yantata, Cajones (Cretácico) y Petaca (Terciario).

### PROFUNDIDAD DE PERFORACIÓN

En la **Tabla 2.2** se tiene la distribución de frecuencias de los pozos según las profundidades de perforación medidas en metros, con la tecnología Casing Drilling. La clase modal que comprende 18 pozos (51%), representa valores comprendidos entre los 840 y un poco más de mil metros.

Las 2 clases extremas no son equivalente desde el punto de vista de sus frecuencias. En efecto, mientras la primera comprende apenas 3 pozos (8%), las últimas abarca 14 pozos (40%). En cuanto a profundidades, la primera no llega a los 1000 metros; mientras que la última supera el los 1500 metros.

**Tabla 2.2.** Profundidad de perforación con Casing Drilling (en metros)

Frecuencia		%
500	840	3
840	1180	18
1180	1520	14
		35
		100

La tecnología Casing Drilling se asocia con los primeros tramos de perforación, cuando las dificultades que presenta el material no representan desafíos mayores. En este sentido, se perfora sin mayores problemas hasta los 1000 metros.

Se trata por ejemplo, en la formación Petaca, de areniscas blanquecinas, matrix limosa, cemento silíceo y levemente calcárea, friables de regular porosidad. Lo propio ocurre con la formación Yantata y en general con todos los pozos del Boomerang.

En la **Tabla 2.3** se presenta la distribución de frecuencia de la profundidad perforada con la técnica convencional desde una profundidad de (800 a 1000 metros), según la formación a atravesar, hasta la profundidad final según el programa de perforación de cada pozo. Se observa que la clase modal que contiene 21 pozos (60%), tiene por límites de profundidad, de más de 1000 a 2000 metros.

**Tabla 2.3.** Profundidad de perforación con la técnica convencional (en metros)

Frecuencia		%
800	1160	10
1160	1880	21
1880	2600	4
		35
		100

En la **Tabla 2.4** se presenta la distribución de frecuencia de las profundidades perforadas con la técnicas primero, Casing Drilling y después, convencional. Se observa que en la mayoría de los pozos perforados las profundidades oscilan entre 2540 y 2760 metros; mientras que la profundidad mayor alcanzada no supera los 3200 metros. Esto indica que estos pozos no son profundos teniendo en cuenta que en Bolivia, la mayor profundidad alcanzada hasta el momento es de 6500 metros en el pozo Tacobo X-1001, zona sur de Bolivia.

**Tabla 2.4.** Profundidad de perforación final de los pozos (en metros)

Frecuencia		%
2100	2540	10
2540	2760	15
2760	3200	10
		35
		100

### Tiempo

En cuanto al tiempo demorado en alcanzar las profundidades mencionadas, la unidad de medida es el día. Se presenta a continuación en la **Tabla 2.5**, la distribución de frecuencias lo mismo que su representación gráfica. Se pone de manifiesto que la clase modal correspondiente a 11 días y medio, con 19 pozos que representan el 54%.

En este tema surge el tema de la comparación de las 2 tecnologías, pues es de todo conocimiento que con Casing Drilling se avanza más rápido que con la tecnología convencional, reflejándose este avance en los costos y así, en la rentabilidad de la perforación teniendo en cuenta que el equipo de perforación cobra por día a la empresa operadora.

**Tabla 2.5** Tiempo de perforación con Casing Drilling (en días)

Frecuencia		%
7	10	11
10	13	19
13	20	5
		35
		100

En la **Tabla 2.6** se presenta la distribución de frecuencias del tiempo de perforación con la técnica convencional. Lo primero que se observa es que el tiempo promedio está en 21 días y medio, valor muy superior a los 11 días y medio de la primera técnica. En efecto, la clase modal con 20 pozos (57%), tiene por límites 18 y 25 días; siendo así que el límite superior es igual a 32 días de perforación.

Es importante anotar que la diferencia mencionada es debida al tipo de formación atravesada, mucho más compacta que la que se atraviesa en el primer tramo de la

perforación. Igualmente, es preciso señalar que la presión total que actúa en el pozo se ve afectada por la profundidad. En este sentido, las operaciones de bajada realizadas con la tubería, conocidas en la jerga del oficio como maniobra viaje, y suabeo, o sacado de herramienta, crean presiones adicionales que complican la perforación y así, su avance.

**Tabla 2.6** Tiempo de perforación con la técnica convencional (en días)

Frecuencia		%
15	18	8
18	25	20
25	32	7
		35
		100

En la **Tabla 2.7** se tiene el tiempo total de perforación en días, utilizando las 2 técnicas. El valor modal se encuentra entre 30 y 35 días, con una frecuencia del 43%. También es posible, perforar un pozo en menos tiempo, como por ejemplo, 27 a 30 días, (pozos someros) siendo así que la parte de pozos perforados de menor tiempo es el 31% de los casos. En el otro extremo, con tiempos superando los 35 días y llegando incluso a los 40, se tiene igualmente una fracción importante de pozos que en términos porcentuales significan el 26%.

**Tabla 2.7.** Tiempo de profundidad perforada con ambas técnicas (en días)

Frecuencia		%
27	30	11
30	35	15
35	40	9
		35
		100

**Costo**

En las 3 tablas que siguen a continuación se aborda las variables de costos. En la Tabla 3.4 se tiene el costo de la perforación con Casing Drilling. La clase modal que representa el 51% de los pozos perforados, cuesta entre 1.113 y 1.356 miles de dólares. Existen pozos que cuestan menos y otros que cuestan más. Los que cuestan menos son una proporción menor de apenas el 6%. Aquellos que cuestan más y llegan hasta casi el millón y medio de dólares, representan un buen 43% de los pozos perforados.

**Tabla 3.4.** Costo de la perforación Casing Drilling (Miles de dólares)

Frecuencia		%	
1032	1113	2	6
1113	1356	18	51
1356	1436	15	43
Total		35	100

En la **Tabla 3.5** se presenta el costo de perforación utilizando la técnica convencional. Se observa que estos costos son superiores a los costos de la técnica anterior. En efecto, la clase modal que contiene el 57% de los casos, comprende costos desde 2.6 hasta los 3.5 millones de dólares. Como en el caso anterior, existen pozos que cuestan menos y otros que cuestan más. Los que cuestan menos representan el 14%, con valores situados desde 2.2 hasta los 2.6 millones. En el otro extremo, están los pozos con costos elevados que representan el 29% de los casos con montos situados entre 3.5 y 4.4 millones.

**Tabla 3.5.** Costo de perforación con técnica convencional (Miles de dólares)

Frecuencia		%	
2235	2672	5	14
2672	3546	20	57
3546	4419	10	29
Total		35	100

Finalmente, en la **Tabla 3.6** se tiene el costo sumado de perforación por pozo distribuido en 5 clases de equivalencia. La clase modal que comprende el 40% de los casos tiene como límites 4.3 y 4.7 millones de dólares. Las clases extremas que compren 14% de los casos, representan costos de 3.5, en un extremo, y 5.5 millones de dólares en el extremo superior.

**Tabla 3.6.** Costo total de la perforación de los pozos (Miles de dólares)

Frecuencia		%	
3518	3904	5	14
3904	4291	4	11
4291	4678	14	40
4678	5064	7	21
5064	5451	5	14
Total		35	100

**3. EXPLICACIONES DE LOS TIEMPOS Y COSTOS DE LA PERFORACIÓN**

En esta sección se presenta 5 tablas de contingencia que ponen de manifiesto la relación de los tiempos y costos con las profundidades de perforación y con ellos mismos.

En la **Tabla 4.1** se tiene la distribución conjunta de los 35 pozos situados en la zona norte del departamento de Santa Cruz según el cruce del tiempo de la perforación y la profundidad perforada expresada en metros. Se observa que 80% de los pozos pertenece a la diagonal principal de la tabla, poniendo de manifiesto la pertinencia de la relación entre estas variables. El estadístico Chi<sup>2</sup> igual a 12.6 se encuentra en plena región crítica de la prueba, rechazando la hipótesis nula de ausencia de correlación. Por lo tanto a mayor profundidad perforada se tendrá más días en la perforación.

**Tabla 4.1.** Tiempo de perforación con Casing según la profundidad (en días y metros)

Profundidad	Tiempo		Total
	hasta 11	más de 11	
hasta 1100	15	4	19
más de 1100	3	13	16
Total	18	17	35
Chi <sup>2</sup>	12.6	0	

Fuente: elaboración propia

En la **Tabla 4.2** se presenta la relación de los costos de perforación con la tecnología Casing y los metros perforados. Se observa que el 66% de los pozos se encuentra en la diagonal de la tabla poniendo de manifiesto la relación entre estas variables. Esta observación es ratificada por el valor del estadístico del Chi<sup>2</sup> igual a 3.54 que se encuentra en la región crítica de la prueba, rechazando la hipótesis nula con un 6% de significación.

**Tabla 4.2.** Costo de perforación con Casing y profundidad (En metros y miles de dólares)

Profundidad	Costo		Total
	hasta 1351	más de 1351	
hasta 1100	12	7	19
más de 1100	5	11	16
Total	17	18	35
Chi <sup>2</sup>	3.54	0.06	

En la **Tabla 4.3** se observa el tiempo de perforación con la tecnología convencional en relación con la profundidad perforada. El valor del estadístico pone de manifiesto la fortaleza de esta relación, encontrándose en plena región crítica de la prueba. Así, el 77% de los pozos se encuentran en la diagonal principal donde a poca profundidad corresponde poco tiempo, y a mucha profundidad, mucho tiempo.

**Tabla 4.3.** Tiempo de perforación con la técnica Convencional según la profundidad (en días y metros perforados)

Profundidad	Tiempo		Total
	Hasta 20,5	Más de 20,5	
Hasta 1500	14	4	18
Más de 1500	4	13	17
Total	18	17	35
Chi <sup>2</sup>	10,3	0,001	

En la **Tabla 4.4** se tiene la relación del costo con Casing según el tiempo de perforación, donde a tiempos menores corresponde costos menores. El estadístico Chi<sup>2</sup> es igual a 8.3, mientras que la probabilidad asociada a este indicador es de 0.4, estableciéndose la relación entre variables.

**Tabla 4.4.** Costo de perforación con la tecnología Casing según el tiempo (Miles de dólares y días)

Tiempo	Costo		Total
	Hasta 1.35	Más de 1.35	
Hasta 11	13	5	18
Más de 11	4	13	17
Total	17	18	35
Chi <sup>2</sup>	8,3	0,004	

En la **Tabla 4.5** se pone en evidencia la relación de los costos de la perforación con la tecnología convencional y el tiempo perforado. El estadístico es igual a 4.9, mientras que la probabilidad asociada a este indicador es de 0.3 señalando que se encuentra en una región crítica de la prueba. Los 20 días separan en este sentido, los tiempos menores de los mayores, separando a los pozos en dos clases casi iguales. Lo mismo se puede decir del costo donde los 3 millones es el punto de corte entre los que cuestan más y lo que cuestan menos.

**Tabla 4.5.** Costo de perforación con la técnica convencional según tiempo (Millones de dólares y en días)

		Costo		Total
		hasta 3.031	más de 3.031	
Tiempo	Hasta 20	12	6	18
	Más de 20	5	12	17
Total		17	18	35
Chi <sup>2</sup>		4.9	0.03	

#### 4. MODELOS DE REGRESIÓN

En esta sección se presenta dos modelos de regresión donde la profundidad de perforación explica las variaciones en términos de tiempo y costos necesarios para realizar el trabajo.

##### 4.1. Tiempo de perforación

Para explicar el tiempo de perforación se propone el modelo que sigue:

$$p_{10}_i = a_0 + a_1 p_{5}_i + a_2 p_{6}_i + \epsilon_i; i = 1, 2, \dots, 35$$

donde:

$p_{10}_i$ : tiempo de perforación, en días;

$p_{5}_i$ : Profundidad perforada con el método Casing, en metros;

$p_{6}_i$ : lo mismo con el método convencional, en la misma unidad;

Mientras que los errores  $\epsilon_i$  se distribuyen idénticamente con media y covarianzas nulas, y varianza constante.

En la Tabla 4.1.1 se presenta la estimación de los parámetros que aparecen en la ecuación anterior. Para interpretar correctamente estos coeficientes se debe responder a la pregunta siguiente, ¿en cuánto se incrementa la variable explicada; i.e., el tiempo de perforación cuando

la variable explicativa, es decir, la profundidad de perforación, se incrementa en una unidad?

La respuesta se encuentra en el coeficiente asociado a  $p_5$ , (profundidad de perforación con el método Casing), y a  $p_6$ , (profundidad de perforación con el método convencional), iguales a 0.007 días (equivalentes a 10 minutos), y 0.009 días (equivalentes a 13 minutos).

Lo que quiere decir que por cada metro que se perfora con la tecnología del Casing, el tiempo se incrementa en 10 minutos; mientras que con la tecnología convencional, en 3 minutos más.

Tabla 4.1.1. Tiempo de perforación. Coeficientes de regresión

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	10,5	4,02	2,6	0,01
P5	0,007	0,002	3,6	0,001
P6	0,009	0,001	6,9	0

En la Tabla 4.1.2 se tiene los indicadores de la bondad del ajuste donde el coeficiente de determinación, igual al 62%, indica que las variaciones observadas en los tiempos de perforación de los 35 pozos son explicadas por estas 2 variables, más el coeficiente igual 10.5 días.

Como este valor es igual al tiempo transcurrido antes de la perforación misma, su valor puede ser entendido como el tiempo que demora la instalación del campamento y la torre de perforación.

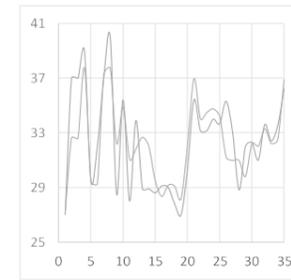
Tabla 4.1.2. Bondad del ajuste: el coeficiente que representa

R-squared	0,64	Mean dependent var	32,3
Adjusted R-squared	0,62	S.D. dependent var	3,5
S.E. of regression	2,2	Log likelihood	-75,2
Sum squared resid	150,5	F-statistic	28,6

En la **Tabla 4.1.3** en la presentación grafica podemos observar claramente, en la tabla que acompaña a la gráfica tenemos los valores de una selección de 11 pozos de perforación de los 35 pozos obtenidos como datos. Por la proximidad de las 2 funciones muestra la calidad del ajuste demográfico.

**Tabla 4.1.3.** Tiempo de la profundidad perforada (En días)

Pozo	Tiempo total	Estimado
1	27	27
4	39	38
7	37	37
10	35	35
13	29	33
19	27	28
22	33	34
25	34	34
28	29	31
31	31	32
34	34	32



##### 4.2. Costos totales de perforación

Para explicar el costo de perforación se propone el modelo que sigue:

$$p_{15}_i = a_0 + a_1 p_5 + a_2 p_6 + \epsilon_i; i = 1, 2, \dots, 35;$$

donde:

$p_{15}_i$ : costo de perforación, en dólares;

Mientras que  $p_5$  y  $p_6$  son como ya definidas. En la **Tabla 4.2.1** aparecen los coeficientes de regresión. El primer coeficiente que aparece como C, es un valor elevado que representa el costo que se debe soportar cuando no se ha perforado aun, metro alguno. Los otros 2 coeficientes responden a la pregunta ¿en cuánto se incrementa el costo de perforación cuando la profundidad del pozo se incrementa en 1 metro? La respuesta es como aparece en la tabla, us\$ 899, para la tecnología Casing, y us\$ 858 para la tecnología convencional.

**Tabla 4.2.1** Costos totales. Coeficiente de regresión

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	2187359	901338	2,43	0,02
P5	899	445	2,02	0,05
P6	858	295	2,91	0,01

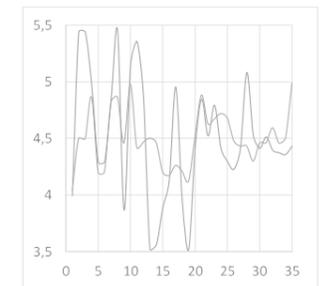
En la **Tabla 4.2.2** se tiene la bondad del ajuste. El coeficiente de determinación es igual al 16%, lo que significa que resta por explicar un porcentaje elevado de las variaciones observadas en los costos, aun cuando los coeficientes de asociados a la profundidad de perforación sean estadísticamente significativos.

R-squared	0,21	Mean dependent var	4498762
Adjusted R-squared	0,16	S.D. dependent var	532161
S.E. of regression	486524	Sum squared resid	7,57E+12
F-statistic	4,3	Prob(F-statistic)	0,02

Tabla **4.2.2.** Costos totales. Bondad del ajuste Finalmente, en la Tabla 4.2.3 se tiene una selección de pozos donde se ha observado el costo de perforación junto con el valor generado por el modelo. En el gráfico asociado se reconstruye las variaciones a pesar de la volatilidad de estos costos siguiendo la heterogeneidad de los pozos.

**Tabla 4.2.3.** Costos totales de perforación por pozo (En miles de dólares)

Pozo	Costo	Estimado
1	3,99	4,04
4	4,97	4,87
7	4,84	4,82
10	5,14	4,98
13	3,52	4,50
19	3,52	4,12
22	4,52	4,63
25	4,29	4,68
28	3,99	4,04
31	4,51	4,46
34	4,36	4,51



## 5. Conclusiones

En este documento se establece la profundidad de perforación como el factor determinante de tiempos y costos. Se establece que este impacto es diferenciado según la técnica que se utiliza en la fase correspondiente de la perforación.

En cuanto a los valores numéricos, se tiene que el tiempo de perforación se incrementa en 10 y 13 minutos, cuando la profundidad de perforación se incrementa en 1 metro con el método Casing, y con la tecnología convencional, respectivamente.

En lo referido al costo de perforación, a la pregunta ¿en cuánto se incrementa el costo de perforación cuando la profundidad del pozo se incrementa en 1 metro? La respuesta es en us\$ 899, para la tecnología Casing, y us\$ 858 para la tecnología convencional.

## 6. Referencias bibliográficas

Arenas, M., (2008), Introducción a la industria de los hidrocarburos, Santa Cruz, Bolivia: Plural editores.

Loza, H., (2007), Estadística para la toma de decisiones, Santa Cruz de la Sierra.

Bassante A., (2013), Evaluación y optimización de tuberías de revestimiento para pozos a perforar en los campos, Colombia.

Van Belen A., (2010), Casing While Drilling (CWD), Mendoza, and Argentina.

# REVISIÓN CIENTÍFICA

## Tiempos de respuesta en trámites de licencias ambientales

Response times in the process of environmental licenses

Juana Lourdes Vaca Flores

Unidad de Postgrado  
Facultad de Ciencias Exactas y  
Tecnología UAGRM

### RESUMEN

Se explica las variaciones del tiempo en exceso empleado en la elaboración de documentos ambientales mediante un conjunto de variables que incluyen el tipo tramitado, la clase de proyecto comprometido y la conformación del grupo de consultores. Se llega a estos resultados a partir de un registro de 130 proyectos tramitados por una consultora especializada en este tipo de encargos, a lo largo de los 5 años transcurrido entre 2012 y 2017. Se utiliza técnicas avanzadas de la inferencia estadística que incluye distribuciones de frecuencia, prueba de hipótesis en tablas de contingencia y un modelo de regresión de series temporales.

**Palabras claves:** autoridades competentes, legislación ambiental, licencias ambientales, modelos de regresión, tiempos en exceso.

### ABSTRACT

The variations in excess time used in the preparation of environmental documents are explained by a set of variables that include the type processed, the type of project committed and the conformation of the group of consultants. These results are obtained from a register of 130 projects processed by a consultancy specialized in this type of commissions, over the five years elapsed between 2012 and 2017. Advanced statistical inference techniques are used, including distributions of frequency, test of hypothesis in contingency tables and a regression model of time series.

**Keywords:** competent authorities, environmental legislation, environmental licenses, regression models, excess times.