

 UNIVERSIDAD
TORCUATO DI TELLA

ESCUELA DE NEGOCIOS

MBA 2010 - TESIS

***Modelo/Metodología Para la Toma de Decisiones en
Proyectos Relacionados a la extracción de
Hidrocarburos***

Autor: Juan Manuel Gavilán

Tutor: Verónica Elorza Casasnovas

Fecha: Junio 2012

Lugar: Ciudad Autónoma de Buenos Aires



UTDT
MBA 2010

TESIS
JUAN M. GAVILAN

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Verónica por todo el tiempo, seguimiento, orientación y compromiso que dedicó para el desarrollo de la tesis. A mis compañeros de grupo y cuerpo docente que han logrado que pudiera ampliar mis conocimientos escapándome de la Ingeniería en Petróleo. A mi jefe directo Cristian, que alentó a la empresa para la que trabajo Pan American Energy, para que me ayude financieramente a realizar el MBA. Y a mi novia Paz por haberme aguantado pacientemente durante todo el transcurso de esta maestría.

Juan Manuel Gavilán



RESUMEN

El presente trabajo estudia el ámbito de la toma de decisiones referido específicamente a la industria de extracción de reservas de hidrocarburos.

Se detallan las variables que más influyen en los proyectos relacionados con la producción de hidrocarburo, y cómo es posible modelar la incertidumbre que presentan, a través de la utilización de conceptos relacionados con la probabilidad y estadística.

Además se propone un proceso/metodología de análisis para tomar decisiones, el cual incorpora todos los elementos característicos para abordar en una decisión de alta calidad.



UTDT
MBA 2010

TESIS
JUAN M. GAVILAN

PALBRAS CLAVES

Toma de Decisiones

Proyectos de Reservas de Hidrocarburos

Cuantificación de Incertidumbre

**ÍNDICE**

INTRODUCCIÓN	6
CAPITULO I: DECISIONES DE ALTA CALIDAD	9
Elementos de una Decisión	10
Dificultades que rodean a los elementos de una decisión	13
Resumen	13
CAPITULO II: VARIABLES INVOLUCRADAS EN PROYECTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS	14
Qué son los hidrocarburos y dónde se encuentran almacenados	14
Variables presentes en la explotación de hidrocarburos	16
Variables Físicas.....	16
Variables Económicas.....	20
Precio de los hidrocarburos	23
Costos, Inversiones e Impuestos	24
Factores sociales que afectan a la producción	25
Resumen	26
CAPITULO III: RIESGO E INCERTIDUMBRE. CÓMO CUANTIFICAR INCERTIDUMBRE	27
Incertidumbre.....	27
Riesgo	28
Probabilidad de ocurrencia	29
Modelos de probabilidad.....	31



Simulación Montecarlo	38
Algoritmo de cálculo de Simulación Monte Carlo	40
Resumen	41
CAPITULO IV: MODELO / METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE LAS DECISIONES	43
Paso 1: Plantear los objetivos	43
Paso 2: Identificar alternativas.....	45
Paso 3: Evaluar alternativas	47
Paso 4: Comparar Alternativas versus objetivos para tomar la decisión ...	51
Resumen	53
CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	57



INTRODUCCIÓN

La demanda global de hidrocarburos manifiesta a lo largo de la historia un crecimiento sostenido a causa de los aumentos demográficos y el desarrollo económico de todas las clases de países, que demandan cada vez más energía para el desarrollo de sus actividades productivas.

Considerando que actualmente el suministro energético mundial está conformado en un 56 % por petróleo y gas (hidrocarburos), 21,6 % por carbón y 23,6 % por las energías no tradicionales como nuclear, eólica, hidroeléctrica y bio-combustibles entre otras¹, las compañías dedicadas a la producción de hidrocarburos son las que enfrentan, en mayor proporción, el consumo energético actual y serán las que tendrán que suplir de energía al mundo en el mediano largo plazo. Desafortunadamente, estas compañías, para enfrentar una demanda creciente de hidrocarburos, tienen que sumergirse en proyectos cada vez más riesgosos tanto técnicamente como financieramente, ya que el producto que ofrecen es un recurso natural no renovable cuya extracción se torna cada vez más costosa debido a que acceder al mismo es cada vez más complicado, como se puede apreciar en algunos de los casos, como la producción de petróleo en mares de aguas profundas.

La producción de hidrocarburos es una actividad productiva de alto riesgo caracterizada principalmente por la alta incertidumbre técnica que presenta el lugar físico donde se encuentran almacenados. Esta incertidumbre se debe a que no se conoce ni la cantidad ni las propiedades del hidrocarburo almacenado a priori de la toma de decisión para explotarlo. Junto a esta

¹ La matriz energética mundial y su probable evolución. El rol posible de las energías renovables. (Junio 2011). <http://www.prospectiva2020.com>.



incertidumbre técnica, se le suman las relacionadas con variables observables como el precio del petróleo o gas, tasas de interés, costos de producción, y hasta en algunos países como en Argentina, el riesgo en la continuidad de explotación debido a las fuerzas sindicales y/o sociales.

Por esta razón, el presente trabajo busca manifestar herramientas para la toma de decisiones, con el motivo de brindar a los gerentes de estas compañías el abordaje de la mejor decisión posible, teniendo en cuenta todas las incertidumbres y riesgos del negocio. A través de éste, se busca contestar las siguientes preguntas:

- *¿Cómo se puede modelar la gran incertidumbre presente en las variables involucradas en los proyectos de producción de hidrocarburos?*
- *¿Cómo es posible cuantificar el riesgo del éxito económico en proyectos relacionados con la producción de hidrocarburos?*

Como objetivo principal este estudio propone desarrollar un modelo/metodología de análisis para la toma de decisiones en proyectos relacionados a la extracción de reservas de hidrocarburos, y como objetivos secundarios se propone: analizar las variables que más afectan a la producción de reservas de hidrocarburos y cuantificar la incertidumbre que presentan las mismas a través del uso de conceptos probabilísticos.

Para contestar las preguntas y desarrollar los objetivos, el presente trabajo cuenta con cuatro capítulos. En el primer capítulo se describe a qué se llama una buena decisión, cuáles son sus elementos característicos, y la diferencia que existe entre una buena decisión y buenos resultados producto de la misma. El segundo capítulo contiene los conceptos de las variables técnicas, físicas y observables que caracterizan la actividad de producción hidrocarburífera. El tercer capítulo cuenta con la descripción de qué significa riesgo, incertidumbre de variables y la herramienta estocástica estadística



UTDT
MBA 2010

TESIS
JUAN M. GAVILAN

llamada “Montecarlo” que se utiliza para modelar la incertidumbre. Por último, en el cuarto capítulo se expone el modelo/metodología de análisis para lograr tomar la mejor decisión involucrando todas las variables y su incertidumbre.

De esta manera se concluye que, para cuantificar la incertidumbre presente en los proyectos relacionados a la extracción y producción de hidrocarburos, es necesario contar con un modelo/metodología de análisis para la toma de decisiones, el cual permita analizar todas las variables características de la industria y que permita ser examinado/revisado como proceso para evaluar la calidad del mismo.



CAPITULO I: DECISIONES DE ALTA CALIDAD

Que el resultado de un proyecto sea bueno, no significa que la decisión que ocasionó ese resultado haya sido bien tomada. Podría ser el caso que la decisión haya sido tomada por un gerente en base a su intuición y/o instinto, y una decisión con estas características no es una buena decisión, ya que podría presentar un peligro para el desarrollo del proyecto. Esto se debe a que estas clases de decisiones son tomadas en base a experiencias previas, en las cuáles los gerentes tratan de establecer patrones que ajustan con los parámetros de experiencias pasadas, sin considerar alternativas y sin seguir un proceso el cuál pueda ser evaluado.

La intuición es un proceso rápido, automático y no observable, por lo que no se puede calificar. Podría ser el caso de que el auge de las materias primas, cause un precio extremadamente alto, y que el proyecto tenga buenos resultados, sin embargo durante el proceso de decisión, el/os gerentes hayan omitidos alternativas, o precisamente ese proyecto no es los suficientemente seguro para el medio ambiente, por lo tanto esta clase de decisión no se encuadraría en Alta Calidad, aunque haya tenido muy buenos resultados en términos económicos.

Una decisión de alta calidad sería aquella que se alinea con los objetivos y valores de la compañía, que tiene en cuenta todas las alternativas posibles, que involucra toda la información disponible, ya sea certera o con incertidumbre, y que contempla las preferencias de la compañía. Los buenos o malos resultados dependen exclusivamente de la variabilidad (incertidumbre) de los factores involucrados en el proyecto.



Para poder llegar a establecer un modelo/metodología de toma de decisiones (como el que se describe en el capítulo IV), previamente es necesario describir qué caracteriza a una decisión de alta calidad. Por esta razón en el presente capítulo se detallan los elementos necesarios a tener en cuenta para abordar en una buena decisión.

Elementos de una Decisión

En el contexto específico en el cual se centra este trabajo, una decisión es una consciente e irrevocable locación de recursos con el fin principal de alcanzar determinados objetivos². En la industria de producción de hidrocarburos, básicamente los recursos son el tiempo y dinero, y los objetivos están relacionados con producir cada vez más hidrocarburos de manera económicamente sustentable.

Los resultados producto de la decisión tomada, no dependen de los gerentes, ya que estos dependen de la incertidumbre de las variables presentes, es decir que los gerentes no pueden intervenir para que los resultados estén alineados con los objetivos. Sin embargo, los gerentes tienen la potestad de intervenir en el proceso de toma de decisión, y por lo tanto son los responsables de la misma. En particular para la industria de los hidrocarburos, las decisiones son difíciles de abordar, debido a la gran incertidumbre que poseen las variables físicas y técnicas que se describirán en el capítulo II.

Para que una decisión sea considerada de alta calidad, el modelo/metodología debe contar con cinco principales elementos, que son:

Alternativas: no existe decisión a tomar, si no hay distintas alternativas por las cuáles decidir. Por ejemplo, si existe una ley/norma que indica que se

² Bratvold B. and Begg E. (2010). Making Good Decisions.



debe perforar un pozo de petróleo para que el yacimiento sea adjudicado, la perforación o no de un pozo no es una decisión, debido a que si se quiere la adjudicación del yacimiento, el gerente debe obedecer a la norma (no tiene otra opción), pero la profundidad del mismo sí sería una decisión, el gerente debe decidir entre varias profundidades (alternativas).

Objetivos: todo proceso de decisión debe contar con un objetivo u objetivos. Para las compañías, los objetivos tienen que estar alineados con sus valores, misión y visión. Por ejemplo, para una empresa privada, los objetivos de una decisión determinada, serían maximizar el valor de sus accionistas para producir hidrocarburo de manera económicamente sustentable (maximizar rentabilidad) sin dañar el medio ambiente. En cambio, para una compañía estatal, sus objetivos están enfocados en la maximización de la producción con el fin de suplir la demanda interna de combustible para la sociedad.

A su vez, cada uno de los objetivos debe poseer una escala de medición para que sea cuantificado, a la que se llama atributo, estos pueden ser el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Volumen de Producción Diaria, etc.. Además, generalmente las compañías poseen múltiples objetivos, como por ejemplo, Maximizar Producción y Maximizar Reservas. En estos casos, los objetivos deben poseer un cierto grado de preferencia, que es más importante en términos relativos. Para ello se le asigna un peso a cada objetivo, como por ejemplo un 60% a maximizar producción y un 40% a maximizar reservas.

Información: para llevar a cabo una de decisión, sólo es necesario considerar aquellas variables y factores que sus valores tienen implicancia en los objetivos y alternativas presentes en el proceso de decisión. Estos pueden existir de dos maneras: aquellos cuyo valor eventual se conoce con certeza, como pueden ser los costos y tasas de interés, y aquellos cuyo valor



eventual no se conoce con certeza, es decir que presentan incertidumbre, como son los parámetros físicos donde se encuentran almacenados los hidrocarburos o el precio futuro que puede llegar a tener el barril de petróleo. Estos últimos se desarrollarán en el **Capítulo II** y cómo se modelan/cuantifican su incertidumbre en detalle en el **Capítulo III**.

Consecuencias: son los resultados que se obtienen de la decisión luego de que la misma haya sido tomada, y las salidas de los eventos con incertidumbre hayan sido resueltos. Estas se miden en una escala cuantitativa para que sean comparadas con el valor del/os atributo/s del/os objetivo/s pre establecidos. Este resultado, como está influenciado por variables que presentan incertidumbre, no va a ser un dato determinístico, sino que será un dato que presenta probabilidad de ocurrencia (se describirá con más detalle en el Capítulo III). Ejemplo, la perforación de un pozo, da como resultado/consecuencia al indicador VAN, en un rango de posibles valores, los cuales se caracterizan a través de la probabilidad de ocurrencia al momento que la decisión es tomada.

A continuación se muestra un esquema (**Fig. 1**) que contempla la relación de los conceptos descritos anteriormente y cuál se describe con mayor detalle en el **Capítulo IV**:

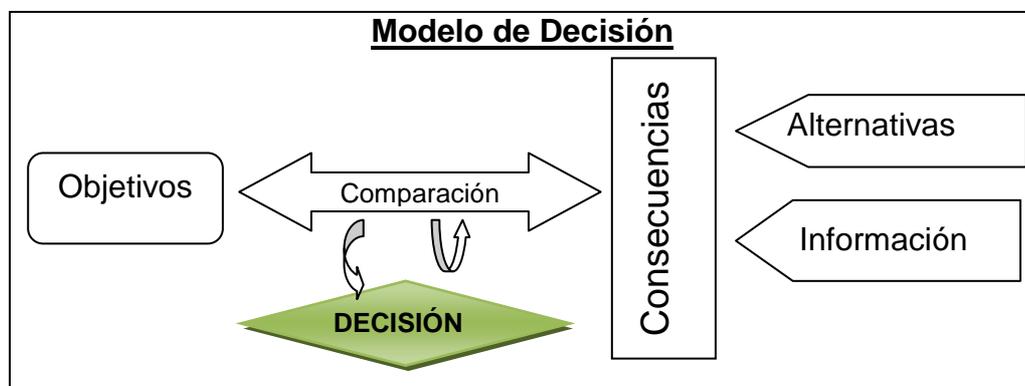


Figura 1: Esquema simplificado del modelo de decisión.



Dificultades que rodean a los elementos de una decisión

Al momento de definir los objetivos en una decisión, puede ser el caso que no se conozca la importancia (peso) de cada objetivo, o también que un objetivo se obtenga a expensa del otro, como por ejemplo, maximizar producción a expensa de disminuir reservas.

Es posible además que existan demasiadas alternativas, debido a que cada alternativa depende de una cierta área de la organización, y que para cada área existan varias alternativas. Es decir que el número de alternativas crece junto al número de áreas involucradas en el proceso de decisión. Además la incertidumbre que presenta la información, cuyo modelaje en algunos casos es muy dificultoso para los ingenieros, técnicos y geocientistas, afecta directamente a la complejidad del modelo para evaluar las consecuencias del mismo.

En definitiva, la complejidad del modelo aumenta con el número de alternativas, la dependencia entre ellas, los múltiples objetivos, la incongruencia entre los mismos y con la dificultad para modelar la información que presenta incertidumbre.

El modelo debe ser lo más simple posible, pero sus elementos no tienen que ser simples³. Para ello existen técnicas que permiten acotar objetivos y delimitar alternativas, que no van a ser objeto de estudio.

Resumen

En este capítulo se describió cuáles son los elementos con los cuales un proceso de decisión de alta calidad tiene que contar. Además se mencionó por qué el instinto no encuadra con un proceso de decisión y que los buenos resultados no significan que la decisión haya sido bien tomada.

³ Declaración de Albert Einstein.



CAPITULO II: VARIABLES INVOLUCRADAS EN PROYECTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS

En el Capítulo I se han descripto las características y elementos necesarios para abordar un proceso de decisión de alta calidad, dentro de un contexto de incertidumbre, el cual se puede aplicar a cualquier industria y/o negocio. Debido a que este trabajo se enfoca específicamente en el análisis de decisiones aplicado a la industria de producción y extracción de reservas de hidrocarburos, en el presente capítulo se describirán todas las variables y parámetros presentes en proyectos de producción de hidrocarburos.

Qué son los hidrocarburos y dónde se encuentran almacenados

Para entender por qué las decisiones sobre invertir en estos proyectos están sujetas a altos grados de incertidumbre, en esta sección se describirá de manera general cómo es posible hallar y producir hidrocarburos.

Los hidrocarburos son compuestos moleculares constituidos principalmente por Carbono e Hidrógeno. Estas moléculas al ser combustionadas en presencia de oxígeno (aire), generan calor, el cual se puede transformar en fuentes de energía, a través de motores, calderas, usinas, etc.⁴

Los hidrocarburos se encuentran naturalmente almacenados en forma de petróleo o gas a miles de metros bajo la superficie terrestre. Los mismos presentan para la sociedad un recurso natural escaso, ya que su existencia se debe a complejos procesos físicos y químicos que llevaron millones de años ocurrir basados en la degradación de la materia orgánica presente en la Tierra hace millones de años atrás.

⁴ El Abecé del Petróleo y del Gas, en el Mundo y en la Argentina. (Mayo 2000). Instituto Argentino de Petróleo y Gas (IAPG).



Esta materia orgánica que llevó millones de años degradarse y que también ocurrió hace millones de años (en las llamadas Eras Geológicas), se almacena en forma de petróleo o gas a miles de metros bajo la superficie (**Fig.2**) terrestre dentro de los poros que poseen las rocas, de la misma manera que una piedra “pomex” almacena agua cuando se la introduce bajo una canilla⁵.

A esta roca donde se encuentran almacenados los hidrocarburos, se la llama en la industria “Roca Reservorio”. La misma posee principalmente dos parámetros característicos para su evaluación, la “Porosidad” y “Saturación”, cuyo significado se describirá en la próxima sección. Existen además otras propiedades características de estas rocas, pero no serán mencionadas ya que no son objeto de estudio en este trabajo.

El acceso a estas Rocas Reservorios tiene una alta complejidad, debido a que para su hallazgo hay que realizar un agujero en la superficie terrestre de miles de metros de profundidad, involucrando herramientas muy potentes, las cuales necesitan gran energía, y con tecnología de punta. Las herramientas que llevan a cabo esta tarea, se las llama “Equipos de Perforación” (**Fig.3**), que tienen la particularidad de realizar un pozo entre 12 y 17 centímetros de diámetro, por 1 a 6 kilómetros de profundidad. Estos equipos generalmente son alquilados, y los costos involucrados para realizar los pozos oscilan entre 2 y 60 millones de dólares, dependiendo básicamente de la profundidad de los mismos. En caso que estos equipos haya que trasladarlos al mar (**Fig.4**), para acceder a los hidrocarburos desde la superficie marítima, estos costos se incrementan 10 veces aproximadamente.

⁵ Para más información sobre como es el proceso de formación, migración y acumulación de hidrocarburos, se recomienda la lectura de: Tarbuk and Lutgens. (2005). GEODe Ciencias de La Tierra, vol. 1.

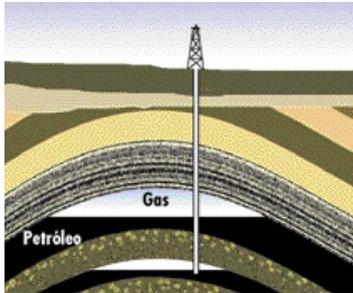


Figura 2⁶. Esquema del reservorio en donde se encuentran almacenados los hidrocarburos.



Figura 3⁷. Equipo de perforación de tierra.



Figura 4⁸. Equipo de perforación para el mar. Plataforma de Perforación.

Por todo lo mencionado anteriormente, se puede apreciar que perforar un pozo de 6 kilómetros de profundidad, valuado en aproximadamente 60 millones de dólares, para hallar reservas de hidrocarburos, sin duda presenta un alto grado de complejidad e incertidumbre, ya que existe la posibilidad que en ese punto bajo de la superficie terrestre no se hayan acumulado los hidrocarburos y por lo tanto la inversión se pierda totalmente.

Variables presentes en la explotación de hidrocarburos

En la sección anterior se explicó brevemente dónde se encuentran alojados los hidrocarburos y la dificultad que existe para extraerlos. En esta sección se describe las principales variables a tener en cuenta, las cuales están sujetas a incertidumbre, y que en el **Capítulo III** se desarrollará cómo cuantificar dicha incertidumbre.

Variables Físicas

Los reservorios de hidrocarburos poseen dos variables principales que dan cuenta de la magnitud del volumen de hidrocarburos almacenados bajo la superficie terrestre. Estas son la Porosidad y la Saturación.

⁶ <http://www.iapg.org.ar>

⁷ <http://www.spe.org>

⁸ <http://www.spe.org>



La Porosidad es la fracción que representa el volumen de espacios vacíos sobre el volumen total de una roca. Esta medida generalmente se presenta en porcentaje, y se obtiene indirectamente a través de mediciones eléctricas con herramientas dentro del pozo, o directamente con muestras de rocas en el laboratorio⁹.

$$\text{Porosidad [\%]} = (\text{Vol. Espacios Vacíos [m3]} / \text{Vol. De Roca [m3]}) \times 100$$

La Saturación de Hidrocarburos, es la porción dentro de un espacio vacío de una roca que se encuentra llena por hidrocarburo (**Fig.5**). Es decir, el volumen de hidrocarburo sobre el volumen total de espacios vacíos en una roca. Esta propiedad también se puede obtener indirectamente a través de mediciones eléctricas o en laboratorio con muestras de roca¹⁰.

$$\text{Saturación de HC} = \text{Vol. De HC [m3]} / \text{Vol. Espacios Vacíos [m3]}$$

Cabe mencionar que bajo la superficie terrestre a miles de metros de profundidad, no existe la posibilidad de encontrar aire, por lo tanto dentro del volumen de espacios vacíos de una roca, sólo pueden estar alojados agua y/o hidrocarburos.

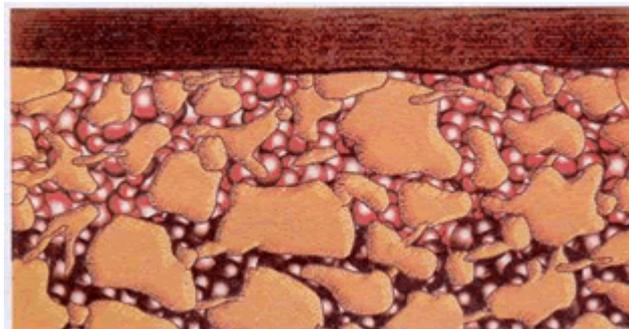


Figura 5. Representación esquemática donde se ilustra la ubicación de los fluidos dentro de los espacios vacíos de una roca.

⁹ Para mayor detalle sobre mediciones de estas propiedades, consultar: Amyx J. (1960). Reservoir Engineering, Physical Properties.

¹⁰ Para mayor detalle sobre mediciones de estas propiedades, consultar: Amyx J. (1960). Reservoir Engineering, Physical Properties.



Estas dos variables descriptas anteriormente no se conocen con certeza, es decir que a priori de la perforación de un pozo, no se sabe cuáles serán sus valores. Como ya se mencionó, para hallar sus valores, se debe realizar alguna medición, pero para ello es necesario invertir una gran suma de capital (contar con una gran cantidad de recursos financieros) para la perforación de un pozo. Por esta razón estas dos variables presentan incertidumbre en el valor que pueden adoptar. En el Capítulo III se describirá cómo cuantificar esta incertidumbre. A ellas también se las nombra en este trabajo, Variables No Observables, ya que las mismas no se pueden estimar a priori desde la superficie terrestre.

Para conocer el volumen total de hidrocarburos almacenados bajo la superficie terrestre, asimismo es necesario tomar cuenta de dos variables más, que son el Área y el Espesor del lugar físico donde se encuentran alojadas las rocas reservorio. Éstas tienen la ventaja que sus valores pueden conocerse a priori de la perforación de un pozo (sin necesidad de contar con grandes recursos financieros), a través del método llamado como reflexión sísmica. Existen además en la industria herramientas que complementan a la sísmica de reflexión, que son las llamadas gravimetría y aeromagnetometría, pero que no se detallarán debido a que son de complemento y no siempre son utilizadas, y su costo es ínfimo a comparación de la sísmica.

La sísmica de reflexión consiste en emitir ondas de sonido desde la superficie terrestre, o desde la superficie marítima, con el objetivo de generar pulsos que se transmiten hacia el subsuelo de la tierra y que sus reflexiones se captan en la superficie midiéndose su tiempo de llegada. La reflexión de ondas es un principio físico que se produce cuando una onda atraviesa formaciones de distinta densidad. Con este método, se obtiene una imagen del subsuelo terrestre, la cual arroja un valor estimado del área y espesor de



la roca reservorio¹¹. En el caso de realizar sísmica en la superficie terrestre (**Fig.6**), se utilizan explosivos o camiones que hacen vibrar el terreno para generar los pulsos (ondas), y para el caso que haya que registrar en la superficie marítima (**Fig.7**), se utilizan barcos que a través de pulsos acústicos en el mar generan pulsos que se transmiten hacia el fondo, penetrando en el subsuelo bajo el mar. Para ambos casos, mar o tierra, las ondas (pulsos) reflejados son captados a través de una especie de micrófonos (llamados geófonos) que miden tiempo.

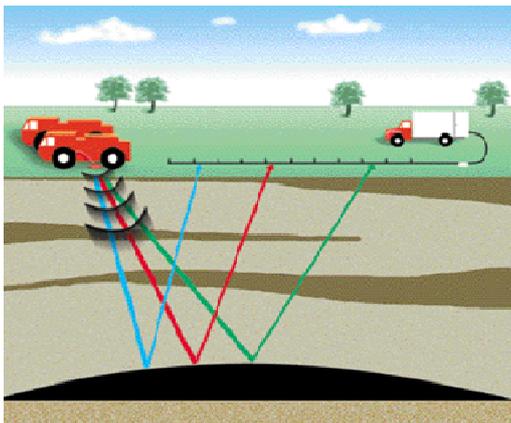


Figura 6. Prospección Sísmica en tierra, para obtener una imagen del subsuelo a través de las ondas reflejadas.

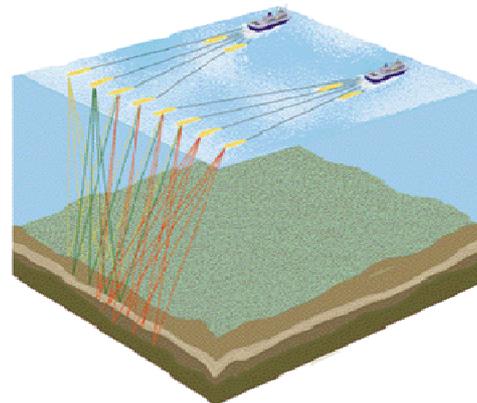


Figura 7. Prospección Sísmica en mar. Se utilizan barcos que van realizando las mediciones.

Anteriormente se describieron las variables necesarias para hacer una estimación del volumen de hidrocarburos alojados bajo la superficie terrestre, y se mencionó que algunas de ellas presentan cierto grado de incertidumbre debido a que no es posible conocer con certeza su valor a priori de la perforación de un pozo. La siguiente fórmula matemática cuyo valor presentará incertidumbre, representa el valor estimativo del volumen de hidrocarburos:

¹¹ Para mayor detalle sobre método de reflexión sísmica, consultar: Amdouh R. Gadallah and R. Fisher. (2009). Exploration Geophysics.



$$\text{Volumen HC} = (\text{Volumen de Roca} \times \text{Porosidad} \times \text{Saturación}) / \text{Factor}$$

$$\text{Volumen HC} = \text{Área} \times \text{Espesor} \times \text{Porosidad} \times \text{Saturación} / \text{Factor}$$

Este Volumen de hidrocarburos, es representando en la industria, con unidades de metros cúbicos (m³) o barriles (Bbl).

Como se describió anteriormente, el Área y Espesor se pueden establecer a priori de la perforación de un pozo a través de la prospección sísmica y tienen la característica de no presentar gran incertidumbre, en cambio la porosidad y saturación presenta un grado de incertidumbre, las cuales en el Capítulo III se menciona cómo se puede cuantificar, y el “Factor” es una medida que tiene en cuenta la contracción térmica de los hidrocarburos por la temperatura. Este último no presenta grandes variaciones y sus valores se conocen con certeza.

Variables Económicas

Una vez comprobada la existencia de un volumen de hidrocarburo considerable a través de la perforación de un pozo, las empresas tienen que proceder a su explotación. Para ello necesitan realizar una serie de inversiones en un período de tiempo determinado con el fin de producir hidrocarburos de manera económicamente sustentable. Es aquí donde se utiliza el concepto de Reserva de Hidrocarburos.

Reserva es todo aquel volumen de hidrocarburo que puede ser extraído de manera económicamente sustentable, es decir que tiene que ser rentable, en un período de tiempo determinado¹². En otras palabras, los flujos de cajas de los proyectos de las empresas de la industria tienen que generar Valor Actual Neto (VAN), durante la producción de ese volumen (Reserva) hidrocarburos, mayor o igual a cero.

¹² Craft B. (1991). Applied Reservoir Petroleum Engineering.



El valor económico y monetario de las compañías de la industria que se dedican a la producción de hidrocarburos, es directamente proporcional a las Reservas de Hidrocarburos que poseen. Para ello cada una de estas compañías deben demostrar a organismos internacionales que sus proyectos para el desarrollo y producción de hidrocarburos, sobre un Volumen de HC que han comprado en el subsuelo, arrojan VAN mayor o igual a cero. Por lo tanto, el indicador de Reservas de Hidrocarburo por compañía representa cuál es su magnitud económica en el mercado. En el **gráfico 1** se indica en orden decreciente, a las compañías más importantes a nivel mundial, según su magnitud económica en el mercado (reservas que poseen).

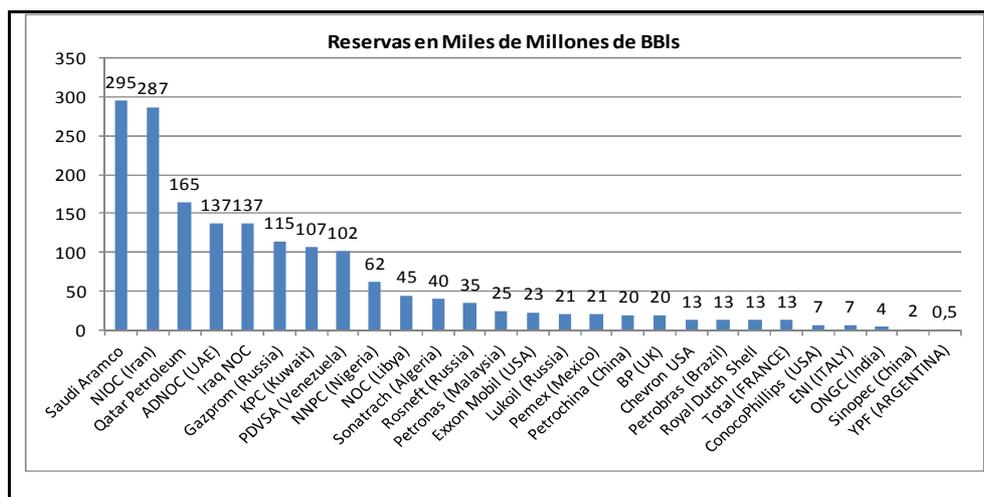


Gráfico 1¹³: Reservas por compañía a nivel mundial.

Del **gráfico 1**, se puede apreciar que en las empresas de América del Sur, se encuentra Venezuela en cuarto lugar, y Brasil en décimo quinta posición. Argentina con YPF se encuentra en los últimos lugares con 500 millones de barriles.

Cabe destacar que el tiempo (horizonte de inversión) juega un rol muy importante dentro del concepto de Reserva, ya que para que los proyectos

¹³ Revista Forbes. (Abril 2007). Oil Gas Reserves by Company or Country.
http://www.data360.org/dsg.aspx?Data_Set_Group_Id=1491



sean rentables durante un período determinado, el tiempo tiene que ser el suficiente, para que la suma de los flujos de fondos descontados a una cierta tasa de interés, tengan un determinado valor que hagan el VAN mayor igual a cero. Por esta razón, cuando los estados y/o gobiernos extienden los contratos de concesión a empresas privadas, sobre los yacimientos con reservas de hidrocarburos, el valor de sus Reservas certificadas aumenta considerablemente, y por lo tanto el valor económico monetario de las mismas.

En particular, en Argentina, esto ha ocurrido en las provincias de la región Patagónica en el año 2006, cuando los gobiernos extendieron hasta el año 2047 el tiempo de concesión de los yacimientos a empresas privadas, las mismas han incrementado sus Reservas (**gráfico 2**) considerablemente, ya que cuentan con mayor tiempo para su explotación, y por lo tanto los VAN para evaluar sus proyectos se incrementan.

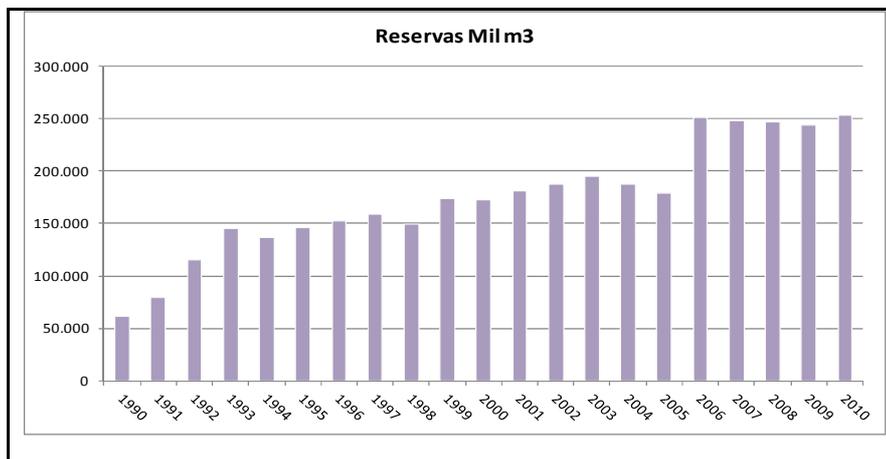


Gráfico 2¹⁴: Evolución de reservas certificadas en los yacimientos ubicados en las provincias de la región Patagónica de la Argentina

¹⁴ Secretaría de Energía. Ministerio de Planificación. (Enero 2012). Evolución de las Reservas en Argentina por Cuenca. <http://www.iapg.org.ar>



En el **gráfico 2**, se puede observar que en el 2006 existe un incremento de reservas en los yacimientos ubicados en la Patagonia, debido al incremento por parte del gobierno del tiempo de concesión de los yacimientos.

Considerando lo descripto en los párrafos anteriores, para este estudio el VAN será el indicador económico por excelencia para evaluar proyectos de hidrocarburos, que como todas las variables que componen al mismo están sujetas a incertidumbre, el valor de éste se presentará como probabilidad de ocurrencia, como se describe en el Capítulo III.

Precio de los hidrocarburos

Para evaluar el VAN, y por ende la rentabilidad de los proyectos, es necesario estimar los flujos de fondos o también llamado de caja, correspondientes al proyecto y luego descontarlos a una cierta tasa. Para ello se calculan los ingresos y se le restan los egresos (inversiones, gastos, impuestos, intereses, etc.). Es de notar que los ingresos dependen exclusivamente del precio futuro que puede llegar a valer el barril de petróleo, ya que los valores de los mismos van a ser la producción de volumen de hidrocarburo en un período determinado (generalmente meses o año), multiplicado por el precio.

El precio del hidrocarburo, por ser un commodity, está fijado internacionalmente por el mercado mundial. El mismo (**gráfico 3**) depende exclusivamente de los hechos y sucesos que ocurren a nivel mundial, tales como guerras cuando se ve amenazada la producción en los países del medio oriente (en 1990 guerra del Golfo, y 2003 invasión a Iraq), huracanes (en 2005 Katrina), crisis mundiales y riesgo de default económicos (en 2008), entre otros. Además en el **gráfico 3** se observa que ambos precios de referencia WTI (curva roja) y BRENT (curva azul) se ven afectados por los



sucesos mundiales. El WTI es el precio de referencia para la comercialización en América, y BRENT para comercialización en Europa.

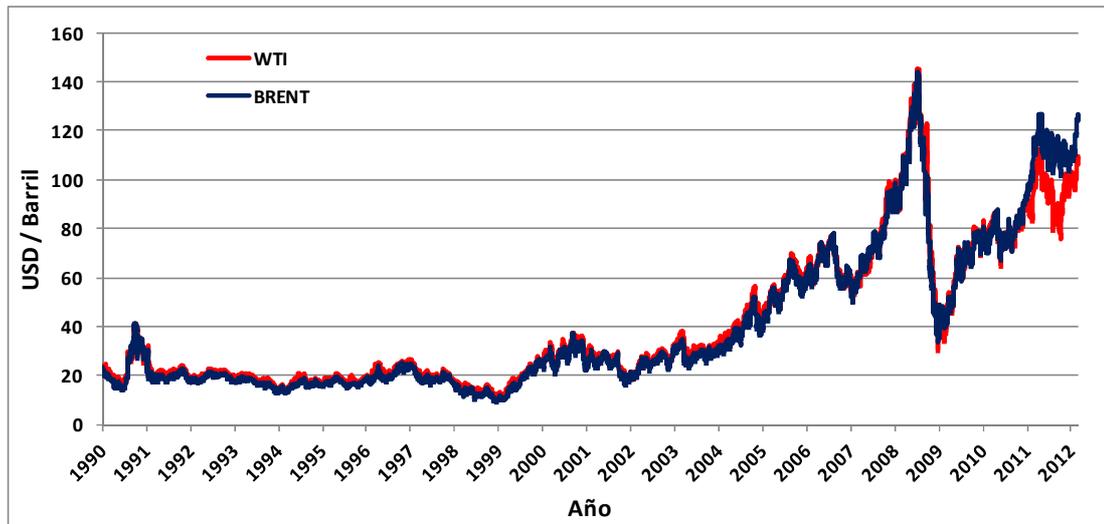


Gráfico 3¹⁵: Precio mundial histórico del precio del barril de petróleo.

Como se puede deducir del **gráfico 3**, el precio futuro del barril de petróleo es un dato que presentará cierto grado de incertidumbre, sin embargo el mismo se puede estimar observando los datos históricos, como será descrito con mayor detalle en el Capítulo III.

Costos, Inversiones e Impuestos

A diferencia de las variables mencionadas anteriormente, estas variables que afectan a los egresos de los flujos de caja, no presentan incertidumbre.

Los costos son todos los gastos incurridos para extraer, tratar, transportar y almacenar los hidrocarburos. Los mismos se conocen con certeza, debido a que suficiente con realizar una medición dentro de la compañía, o pedir presupuesto, estos son conocidos. Estos generalmente son datos con que se

¹⁵ U.S Energy Information & Administration. (Enero 2012). Spot Prices for Crude Oil and Petroleum Products. http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm



presentan en dólares por barril de hidrocarburo, y en caso de no conocerse existen estándares de mercados¹⁶ que son publicados para que las organizaciones se puedan comparar.

Las inversiones son las erogaciones para realizar la perforación de un pozo, que se conoce a priori y es directamente proporcional a la profundidad del mismo, y las necesarias para construir las instalaciones de superficie, como ductos y plantas de tratamiento (para separar el agua de los hidrocarburos).

Los impuestos son determinados por los Gobiernos, como el impuesto a las ganancias, ingresos brutos, regalías, entre otros.

Factores sociales que afectan a la producción

En la Argentina existen fuerzas sociales como los sindicatos que utilizan como medida de reclamo la afectación de la producción. Estas medidas las realizan con los cortes a los principales accesos a los yacimientos, procediendo a parar los pozos, o simplemente no concurriendo a la jornada laboral.

Esto se ve reflejado en la producción diaria de hidrocarburos, y se puede cuantificar como “días” inactivos de producción. Los días inactivos, multiplicados por la producción diaria, generan una disminución en el ingreso de los flujos de fondos.

Esta es una variable que presenta incertidumbre, ya que no se conoce con certeza a priori cuantos días inactivos de producción se tendrá. En el Capítulo III se describe cómo es posible cuantificar esta incertidumbre.

¹⁶ Survey of Parameters used in Property Evaluation. (Junio 2008). Society Of Petroleum Evaluations Engineers.



UTDT
MBA 2010

TESIS
JUAN M. GAVILAN

Resumen

En este capítulo se describieron las características presentes en las variables que afectan a la producción de hidrocarburos, aquellas que son certeras y las que presentan incertidumbre. Además, se mencionó que el concepto de reserva está relacionado a las condiciones económicas actuales, y por lo tanto, depende de la incertidumbre que posee el precio de venta del barril de petróleo.



CAPITULO III: RIESGO E INCERTIDUMBRE. CÓMO CUANTIFICAR INCERTIDUMBRE

En los capítulos anteriores se ha descrito por qué los proyectos relacionados a la producción de hidrocarburos están sujetos a una alta incertidumbre. Se ha mencionado que las variables presentes en los mismos (Capítulo II) no se conocen con certeza a priori de ejecutar un proyecto, por lo que el éxito económico de/los mismo/s están sujeto a un alto riesgo.

En el presente capítulo se describe cómo modelar la incertidumbre presente en la variables que afectan a la producción de hidrocarburos con el fin de dar un valor (cuantificar) al riesgo presente en esta clase de proyectos, para que el mismo sea introducido en el modelo/metodología de análisis de decisiones que se describe en el Capítulo IV.

Incertidumbre

Por los motivos descritos en el **Capítulo II**, se puede observar que toda la industria de la extracción de reservas de hidrocarburos maneja continuamente incertidumbre en la mayoría de sus variables, que si la misma no se tiene en cuenta para el desarrollo de la actividad económica, existe la posibilidad que aparezcan obstáculos para mantener una performance consistente en la organizaciones.

Se llama incertidumbre a la ausencia de conocimiento sobre el valor certero que tiene alguna variable determinada, en la cual dentro de este estudio se cuantificará a través del concepto de Probabilidad (se describe en la próxima sección). Un conocimiento certero sería por ejemplo el costo de producción de un barril de hidrocarburo, ya que si es necesario saber el valor que tiene esta variable, simplemente con realizar una medición dentro de la organización o pedir presupuesto es posible hallar su valor. En cambio el



valor de la reserva de hidrocarburo que se encuentra bajo la superficie terrestre es un conocimiento no certero (presenta incertidumbre), ya que no se puede conocer su valor en la superficie terrestre a priori de la perforación de un pozo.

La información juega un rol muy importante dentro del concepto de incertidumbre, ya que a través de ella es posible reducir la misma, y por lo tanto influir en el modelo/metodología de la toma de decisión. Por esta razón, existe un benchmarking del mercado, el cual es consultado por las compañías para conocer el valor que adoptan variables presentes en reservorios de yacimientos vecinos, permitiendo acotar valores posibles que pueden adoptar dichas variables, y así disminuir la incertidumbre.

Riesgo

Es importante aclarar el significado que tiene para este estudio el concepto de *riesgo*, ya que éste posee definiciones diferentes según el ámbito dónde se utilice, o también muchas veces para la industria de producción de hidrocarburos, el concepto es confundido con incertidumbre. Por ejemplo, para Economía y Finanzas, el riesgo está asociado a la variabilidad que puede llegar a tomar el valor de un determinado activo, es una medida de incertidumbre que se cuantifica con el concepto estadístico de La Desviación Estándar¹⁷.

Para este estudio y para la industria de producción de hidrocarburos, *riesgo* es una indeseable situación posible, la cual es determinada por el tomador de la decisión a priori, los cuales pueden ser los gerentes o los estándares que tienen las organizaciones involucradas en la industria. Por ejemplo, para algunas organizaciones si el precio del barril de petróleo cae por debajo de

¹⁷ Más información sobre el concepto consultar Zylbelberg A. (2005). Probabilidad y Estadística.



un determinado valor, puede originar que los proyectos sean no rentables o no alcancen estándares de rentabilidad requeridos; en cambio para otras organizaciones, para ese determinado valor del petróleo los proyectos si pueden ser rentables. Por lo tanto, se puede concluir que, el precio límite de rentabilidad de los proyectos son diferentes en ambas compañías, y su valor lo determina cada compañía según a sus estándares preestablecidos. Como consecuencia, se puede decir que el precio límite del barril de petróleo para que un proyecto sea rentable representa un *riesgo* que lo determina cada compañía o el gerente en cuestión antes de tomar una decisión.

El *riesgo* es consecuencia directa de la incertidumbre presente en las variables que afectan la producción de hidrocarburos, ya que hay valores posibles (que son determinados a priori por el tomador, riesgo) para los cuales los proyectos no son rentables. Este *riesgo* se cuantifica a través de la especificación de esa situación indeseable y su probabilidad de que suceda dicha situación. Por ejemplo, un proyecto dado tiene el 25 por ciento de chance (probabilidad) que su VAN sea menor que cero (riesgo).

Probabilidad de ocurrencia

Como se describió en la sección anterior, la probabilidad de ocurrencia será la medida que se utiliza para cuantificar la incertidumbre presente en las variables (descriptas en las secciones del Capítulo II) que afectan a la producción de reservas de hidrocarburos.

Si se arroja una moneda al aire, el valor de cara o cruz que resultará no se conoce a priori, es decir que existe una ausencia de conocimiento (incertidumbre) de dicho resultado. Esto ocurre de igual modo en la industria de hidrocarburos, los valores de las variables presentes no se conocen a priori de la perforación de un pozo. La probabilidad de que el resultado de arrojar una moneda y salga cara o cruz, es de 0.5, en cambio para el caso de



las variables presentes en la producción de hidrocarburos la probabilidad de que algunas de ellas tengan algún resultado es más compleja. A continuación se explica cómo hallar las probabilidades de dichas variables.

Por definición de la literatura, la probabilidad es la chance que existe que un evento determinado a priori ocurra de manera exitosa o no. Por ejemplo, el evento de arrojar una moneda y que salga cara, tiene probabilidad de ocurrencia igual a 0.5. La misma resulta del siguiente cálculo:

Probabilidad = Suma de eventos determinados / Suma de posibles Eventos

$$Probabilidad = Cara / (Cara + Cruz) = 1 / 2 = 0.5$$

Para el caso de la industria de producción de hidrocarburos, los eventos son los valores que pueden llegar a adoptar las variables descriptas en el Capítulo II.

Para desarrollar cómo obtener la probabilidad de ocurrencia de las variables que afectan a la producción de reservas de hidrocarburos, es necesario definir una serie de reglas que deben ser adoptadas por los individuos involucrados en la toma de decisión. Estas son:

- I- Definir el espacio de eventos posibles, es decir tener en cuenta todos los resultados posibles que pueden llegar a adoptar las variables involucradas.
- II- Los valores de probabilidad de ocurrencia de los posibles eventos deben estar dentro de la escala de valores de 0 a 1. Siendo el valor de 0 para que un evento sea totalmente imposible que ocurra, y 1 para que un evento sea totalmente certero que ocurra. Cuanto más cerca de 1 sea el valor de probabilidad de un evento, más chance existe de que ocurra el mismo.



III- La suma de las probabilidades de ocurrencia de cada evento dentro del espacio de posibles eventos tiene que ser igual a 1. Esto en la práctica significa que se tienen en cuenta todos los valores posibles de un cierto evento en un espacio de eventos posibles.

IV- La probabilidad de uno o múltiples eventos ocurrentes es la suma de las probabilidades individuales. Por ejemplo, la probabilidad de que salga cara o cruz en un mismo instante cuando se arroja una moneda es 1, ya que:

$$P(\text{cara})=P(\text{cruz})=0.5, \text{ entonces } P(\text{cara o cruz}) = P(\text{cara}) + P(\text{cruz}) = 1$$

Modelos de probabilidad

En la sección anterior se describió que para calcular la probabilidad de ocurrencia de un posible valor de una variable (evento), es necesario conocer a priori todos los valores posibles de dicha variable (Regla I, definir el espacio de eventos posibles). A estos posibles valores de una variable en cuestión, se los puede representar con una función llamada *Distribución de Probabilidad*¹⁸, que a su vez se la clasifica en: Distribuciones Continuas o Discretas.

Las distribuciones de probabilidad discretas son aquellas que caracterizan/representan a las variables que poseen un número finito de valores posibles (el espacio de eventos posibles es un número finito). Un ejemplo de este caso podría ser, la probabilidad (si se conoce) de perforar una cantidad finita de pozos dentro de un reservorio comprobado, resultando los mismos comerciales para la producción de hidrocarburos. El **gráfico 4** muestra la distribución de probabilidad de este ejemplo.

¹⁸ Zylbelberg A. (2005). Probabilidad y Estadística.



UTDT
MBA 2010

TESIS

JUAN M. GAVILAN

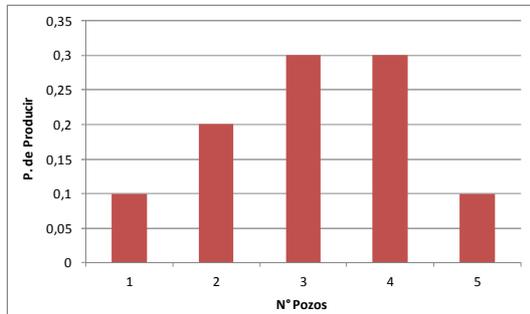


Gráfico 4: Distribución de probabilidad discreta

N° Pozos	P. De producir HC
1	0,1
2	0,2
3	0,3
4	0,3
5	0,1

Tabla 1: Valores de probabilidad reflejados en el gráfico 4.

Se debe tener en cuenta que la suma de las probabilidades de los valores posibles de la **tabla 1** es igual a 1, como se especifica en la **Regla III** de la sección anterior.

En contraposición a lo mencionado anteriormente, las distribuciones de probabilidades continuas son aquellas que caracterizan/representan a aquellas variables cuyos valores posibles se encuentran dentro un rango de posibles de valores. En otras palabras el espacio de eventos posibles, es un número infinito dentro de un rango posible de valores. Por ejemplo, el precio del barril de petróleo es una variable cuyo valor posible se encuentra dentro de un rango de valores.

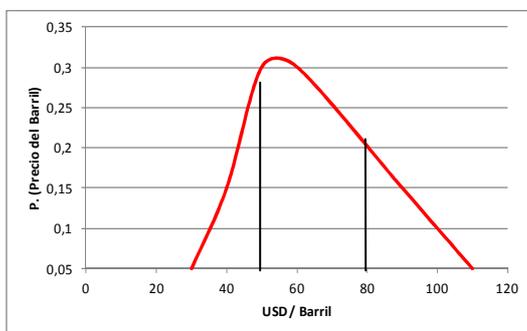


Gráfico 5: Distribución de probabilidad continua. También se llama curva de densidad de probabilidad.

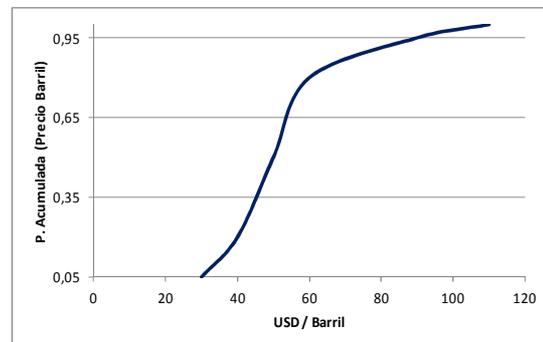


Gráfico 6: Acumulada de distribución de probabilidad.



Cabe destacar que el área bajo curva del **gráfico 5** representa la probabilidad de que el precio del barril esté dentro de un rango determinado, y del mismo modo la curva azul del **gráfico 6** representa el valor de este área. Todo el área bajo la curva, es decir los infinitos valores posibles dentro de ese rango (30 y 110 USD/Barril), tiene que ser igual a 1. Además en las distribuciones de probabilidades continuas, la probabilidad de que el valor sea igual a un número certero/finito, ejemplo 80,5 USD/Barril, es igual a cero (es casi imposible conocer el valor certero del precio). Pero la probabilidad de que el precio se encuentre entre 80 y 100 USD/Barril es 0.3, es decir que, es más posible que el precio se ubique dentro de un rango determinado.

Las distribuciones de probabilidad poseen mediciones estadísticas (parámetros estadísticos) que se utilizan para caracterizarlas. Estas son, la media, moda, desviación estándar, mediana, etc¹⁹.. Para fines de este trabajo sólo se desarrollará la media y la desviación estándar.

La media o también llamada en estadística Valor Esperado, es el promedio aritmético de los posibles valores de un escenario de eventos posibles. Matemáticamente se define como:

- Valor Esperado = $E = \mu = \sum x.P(x)$; para distribuciones discretas ; siendo x el valor posible del evento, y $P(x)$ su probabilidad de ocurrencia
- Valor Esperado = $E = \mu = \int x.f(x).dx$; para distribuciones continuas ; siendo x el valor posible del evento, y $f(x)$ su función de probabilidad de ocurrencia (curva roja de **Fig.11**).

¹⁹ Para más detalle sobre mediciones estadísticas consultar: Para Probabilidad y Estadística, por Alejandro D. Zylbelberg



Más allá del significado de las fórmulas, el Valor Esperado es simplemente el promedio de una serie de valores posibles.

La Desviación Estándar (DE) es una medida de cuán alejado están los valores posibles de una serie con respecto a su media²⁰. Cuanto más grande es este valor, mayor dispersión de valores poseerá el espacio de eventos posibles. Matemáticamente se representa de la siguiente manera:

- $DE = \sigma = [\sum P(x) \cdot (x - \mu)^2]^{1/2}$; para distribuciones discretas
- $DE = \sigma = [\int f(x) \cdot (x - \mu)^2 dx]^{1/2}$; para distribuciones continuas

Una vez que se ha descrito las medias de caracterización estadísticas (valor esperado y desviación estándar) de un espacio de eventos posibles, es de gran importancia mencionar que, existen funciones matemáticas que utilizan a los parámetros estadísticos para describir las distribuciones de probabilidad, las cuales en la próxima sección se utilizarán para la simulación Montecarlo. Es decir que, a través de alguna de las funciones matemáticas que existe en la bibliografía, con los datos de valor esperado y DE de una serie de valores, es posible describir la curva roja del **gráfico 5**.

En la **figura 8** se muestra una de las funciones más utilizadas en estadística, la llamada función Normal, o curva de Gauss.

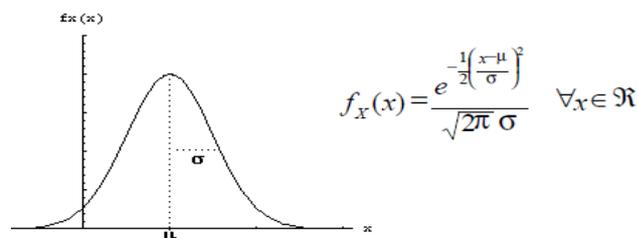


Figura 8: Función de distribución de probabilidad Normal (Campana de Gauss)²¹. Se caracteriza con los parámetros estadísticos media (μ) y DE (σ).

²⁰ Zylbelberg A. (2005). Probabilidad y Estadística.



Además de la función de Gauss como se muestra en la **figura 8**, también existen otras funciones de probabilidad muy utilizadas, la cuales se detallan en la **tabla 2**.

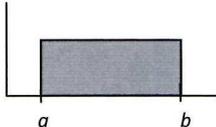
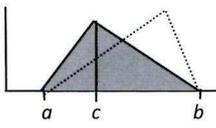
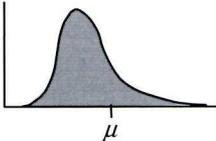
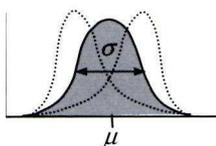
<p>Distribución Uniforme</p> <p>Mínimo, a</p> <p>Máximo, b</p>	 $\mu = (a+b)/2$ $\sigma^2 = (a-b)^2/12$
<p>Distribución Triangular</p> <p>Mínimo, a</p> <p>Máximo, b</p> <p>Más probable, c</p>	 $\mu = (a+b+c)/3$ $\sigma^2 = a(a-c) + c(c-a) + b(b-a) / 6$ $\equiv \mu^2 / 2 - (ab+bc+ac) / 6$
<p>Distribución Log Normal</p> <p>Media, μ</p> <p>Varianza (DE^2), σ^2</p>	 $\mu = \text{as specified}$ $\sigma^2 = \text{as specified}$
<p>Distribución Beta</p> <p>Parámetro de forma, a</p> <p>Parámetro de forma, b</p> <p>(Esta distribución puede tomar un gran variedad de formas, dependiendo de la relación entre a y b.)</p>	 $\mu = a/(a+b)$ $\sigma^2 = ab/[(a+b)^2 (a+b+1)]$

Tabla 2: Tipos de distribuciones de probabilidades continuas²².

También existen otros tipos de distribuciones de probabilidades continuas que no están listados en la **tabla 2**, como la distribución Gamma, T de Student, Ji Cuadrado y Exponencial, pero que no se utilizarán en este estudio.

²¹ Zylbelberg A. (2005). Probabilidad y Estadística

²² Crisall Ball Manual. Probabilistic Distributions.

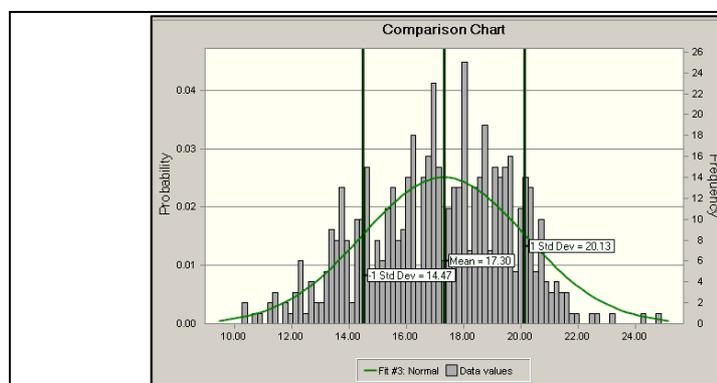


A continuación se describirá un ejemplo de cómo caracterizar la incertidumbre presente en la variable Porosidad descrita en el Capítulo II a través de una función de probabilidad continua de ocurrencia.

La Porosidad de un reservorio, en el caso que tenga características geológicas muy similares respecto al cual se quiere analizar, puede pertenecer a información interna de la compañía u obtenerse de un benchmarking. Una vez obtenidos los datos de porosidad (datos certeros, ya que se han perforados pozos y las mediciones arrojaron los valores), se procede a agruparlos en frecuencias relativas y graficarlos como muestra las barras grises del **gráfico 7**. Luego se compara la forma que tiene el gráfico de frecuencias relativas con alguna forma de distribución de probabilidad detallada en la **tabla 2**. Por último, la forma que más se asemeja a alguna curva de distribución de probabilidad será la función de distribución de probabilidad (curva verde del **gráfico 7**) que se utilizará para caracterizar la incertidumbre presente en la variable porosidad.

La curva verde del **gráfico 7** es la distribución de probabilidad que más se asemeja a la forma del gráfico de frecuencias relativas de los datos conocidos de la porosidad del reservorio con características similares al que se quiere analizar. La media (μ) y la DE (σ) se calculan de la serie de datos

Gráfico 7²³: Agrupamiento en frecuencias relativas de los datos certeros de la porosidad, junto a la curva de distribución de probabilidad continua Normal (curva verde).



²³ Realizado con Software Crisall Ball



que se conocen con certeza.

La comparación de la curva verde (función de distribución de probabilidad), con la forma del gráfico de frecuencias relativas (**gráfico 7**), sirve para elegir cuál es la función de distribución de probabilidad que más se asemeja a la forma del gráfico de frecuencias relativas, y por lo tanto esa función es la que se utilizará para cuantificar la incertidumbre de la variable en cuestión. Una de las maneras con que se puede realizar la comparación es a través de una de las utilidades que posee el software Crisall Ball²⁴.

Esta misma metodología se utiliza para cuantificar la incertidumbre de la variable Saturación de hidrocarburo descrita en el Capítulo II.

Para caracterizar la variable días inactivos de producción, debido a los factores sociales (Capítulo II), se puede utilizar una distribución de probabilidad Triangular. Los parámetros de “días” mínimo más probable y máximo “días” se pueden establecer con lo que reportan las compañías al estado. Por reporte interno dentro la compañía, en el 2011 hubieron un total de 35 días inactivos de producción debido a problemas sindicales²⁵. Esto se declara para todos los años, por lo tanto se puede armar una distribución triangular con los datos del **gráfico 8**.

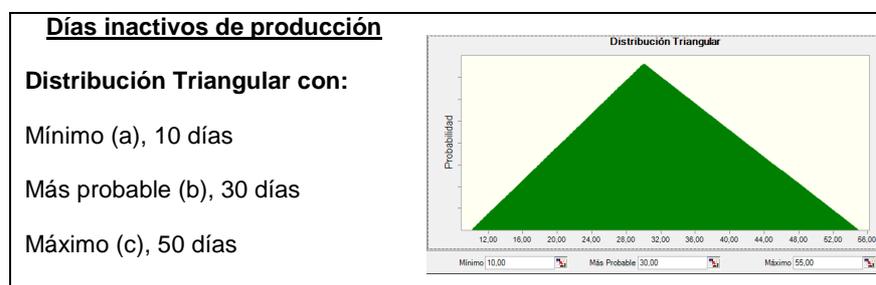


Gráfico 8²⁶: Distribución triangular, con la variable días inactivos de producción.

²⁴ Software registrado por ORACLE®.

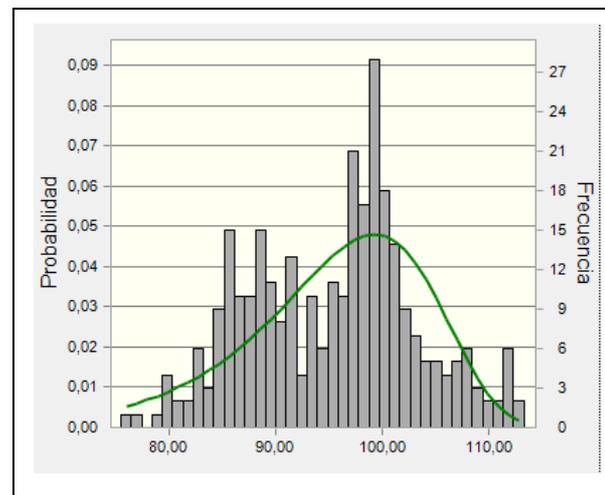
²⁵ Informe interno dentro de la compañía.

²⁶ Figura extraída del software Crisall Ball



Para caracterizar la variable Precio del Barril que presenta incertidumbre, se prosigue de la misma manera que para la variable Porosidad. Primero se seleccionan los datos de los precios históricos desde el 2010 hasta la fecha, debido a que se considera que los precios durante la crisis del 2008/2009 no son representativos de la evolución de los precios. Luego se los grafica en frecuencias relativas (barras de color gris en el **gráfico 9**) y por último se compara la forma del gráfico con la forma de alguna de las curvas de la **tabla 2** (curva verde **gráfico 9** es la función de probabilidad continua Beta).

Gráfico 9²⁷: Frecuencias relativas de datos de precio del barril de hidrocarburo junto a la función de distribución de probabilidad continua Beta.



Simulación Montecarlo

Simulación Montecarlo se basa en una poderosa y muy popular herramienta usada para realizar análisis de incertidumbre sobre variables. La misma combina las distribuciones de probabilidad continuas (descriptas en la sección anterior), a la que llamaremos INPUTS, con alguna fórmula en particular, como el VAN o el Volumen de HC (hidrocarburos) (variables descriptas en el Capítulo II), a los que llamaremos OUTPUTS.

La variable VAN es una fórmula matemática que contiene variables como el precio del barril de petróleo, producción, inversiones y costos, entre otros.

²⁷ Realizado con Software Crisall Ball.



Como fue desarrollado en el Capítulo II, el precio del barril y la producción son variables que presentan incertidumbre la cual a su vez, en la sección anterior se describió cómo caracterizar esa incertidumbre a través de las distribuciones de probabilidades continuas. Debido a que el VAN resulta de operaciones matemáticas con variables que presentan incertidumbre, se espera que el resultado del mismo sea con incertidumbre, la que se cuantificará a través del uso de la herramienta Simulación Montecarlo.

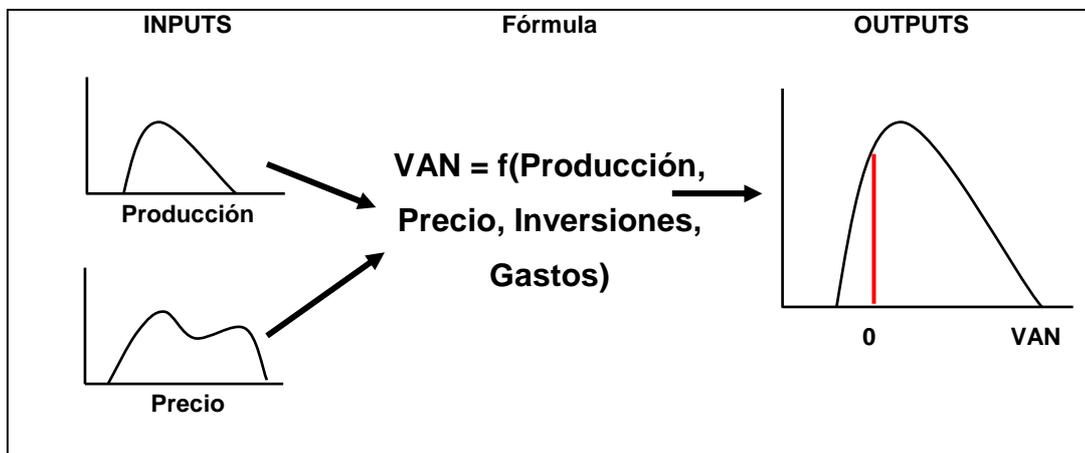


Figura 9²⁸: Esquema simplificado de la Simulación Montecarlo.

El VAN, cuya incertidumbre es descripta por la distribución de probabilidad presente en la **figura 9** (OUTPUTS) y que se ha generado a través de la Simulación Montecarlo, permite:

- I- Estimar la probabilidad de que la variable (OUTPUT, como el VAN) es menor igual a cero (línea roja **fig. 9**). Esto da idea del riesgo que afecta a un proyecto determinado, cuanto mayor es esta probabilidad, más riesgo tiene el mismo.
- II- Estimar la probabilidad de éxito del proyecto, es decir cuál es la probabilidad de que el VAN es mayor o igual a cero.

²⁸ Gali A. and Amnstrong M. (1999). Evaluation Oil Projects: Option Pricing, Decision Trees and Monte Carlo Simulation. SPE 52949.



III- Estimar la probabilidad de que el VAN o el Volumen de HC se encuentre entre 2 valores posibles.

IV- Calcular los parámetros estadísticos de la variable OUTPUT en cuestión, como la media, DE y percentiles (P10 y P90).

V- Realizar un análisis de sensibilidad de las variables (INPUTS) que influyen en mayor magnitud al resultado de la variable (OUTPUT), para identificar aquellas que ameritan mayor detalle para cuantificar su incertidumbre. Estos tipos de análisis se muestran en gráficos llamados tornados.

Algoritmo de cálculo de Simulación Monte Carlo

Los físicos que estudiaron el fenómeno de la aleatoriedad presente en los juegos de azar y de casino, establecieron el nombre de Monte Carlo inspirados en que la capital Mónaco, ciudad de Monte Carlo, se caracterizaba en el tiempo de la Segunda Guerra Mundial por sus Casinos más grandes del mundo²⁹.

El algoritmo de cálculo de la Simulación Montecarlo consiste básicamente en la generación de números aleatorios entre 0 y 1, luego a cada número aleatorio se le aplica la función de distribución de probabilidad acumulada (como la que se muestra de ejemplo **del gráfico 6**) la cual le corresponde para cada número aleatorio un valor de la variable con incertidumbre a calcular. En la **figura 10**³⁰ se ilustra el proceso.

²⁹ Reuven Y. Rubinstein. (2008). Simulation and The Monte Carlo Method.

³⁰ Craig S. (2005). An Introduction to Monte Carlo Methods.

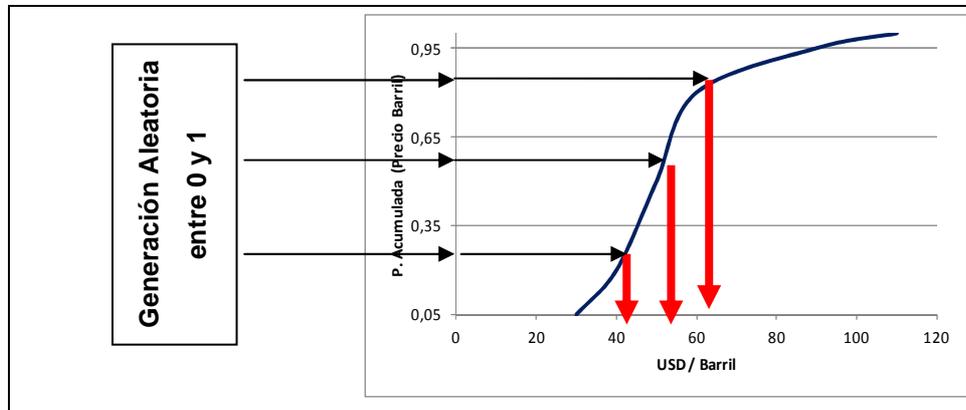


Figura 10: Proceso de calculo de Simulación Montecarlo a través de la generación de números aleatorios.

Para cada valor de la variable con incertidumbre (flechas rojas **fig.10**) originado a través de los números aleatorios, Monte Carlo calcula a través de la fórmula previamente definida (como el VAN, **fig.9**) los valores posibles de dicha fórmula, los cuales se pueden agrupar en un gráfico de frecuencias relativas.

Existen varios softwares que realizan la Simulación Montecarlo, para este trabajo se utiliza el Crisall Ball³¹.

Resumen

En este capítulo se detalló cómo es posible cuantificar la incertidumbre presente en las variables que afectan a la producción de reservas de hidrocarburo a través de las distribuciones de probabilidades continuas y discretas.

Además, se describió cómo es posible generar una curva de distribución de probabilidad, gracias a las funciones de probabilidad estudiada por la

³¹ Software registrado por ORACLE®.



UTDT
MBA 2010

TESIS
JUAN M. GAVILAN

bibliografía y los parámetros estadísticos para caracterizar una serie de datos.

Por lo último se concluyó que, para estimar la incertidumbre presente en una variable de evaluación la cual depende de otras variables que presentan incertidumbre, se utiliza la herramienta Simulación Montecarlo.



CAPITULO IV: MODELO / METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE LAS DECISIONES

En el **Capítulo I** se describen todos los elementos que debe poseer el modelo/metodología de análisis para la toma de decisiones (**Fig.1**) para que la decisión sea considerada de alta calidad.

Además el **Capítulo I** menciona que una decisión de alta calidad es aquella que se alinea con los objetivos y valores de la compañía, que tiene en cuenta todas las alternativas posibles y que involucra toda la información disponible.

Por lo tanto en este capítulo se desarrolla el modelo/metodología de análisis a través de una serie de pasos que involucran todos los elementos característicos de una decisión de alta calidad, incorporando los conceptos de riesgo e incertidumbre presente en las variables que afectan a la producción de hidrocarburos descritos en el **Capítulo III**.

El desarrollo del modelo/metodología se realiza a través de cuatro pasos que se describen a continuación:

Paso 1: Plantear los objetivos

Este es el paso más importante de todos, ya que de éste dependen los pasos sucesivos. En este paso se plasma el fin de la decisión, que es lo que se quiere alcanzar con la misma.

Para el caso de las organizaciones, los objetivos ya se encuentran establecidos por sus valores, misión y visión. Estos generalmente los establece la alta gerencia para dar dirección/rumbo a todas las operaciones llevadas a cabo por la organización. En cambio, en el caso de que una



decisión sea personal, los objetivos los tiene que establecer el tomador mismo de la decisión.

Los objetivos deben ser específicos y medibles, por lo tanto deben poseer una escala de medición para que puedan ser comparados con las alternativas. Esa escala de medición es el orden de magnitud que los caracteriza. Por ejemplo, en el caso del VAN, la escala de medición es monetaria, es decir dólares (USD), en cambio si el objetivo es de producción diaria, su escala está dada en volumen diario, como puede ser unidades de barriles por día (BBLs/D), o si el objetivo es reservas su escala de medición es volumen, como pueden ser barriles (BBLs).

En este paso se deben listar los objetivos, ya sean los establecidos por la propia organización o los establecidos por el tomador de la decisión en caso que la misma sea personal, y luego definir un coeficiente de ponderación según la preferencia que se tenga en alcanzar el mismo. En la **tabla 3** de la se muestra un ejemplo de una lista potencial de objetivos con su coeficiente de ponderación.

OBJETIVOS	ESCALA	CALIFICACIÓN (0 – 5)	PREFERENCIA (COEF. PONDERACIÓN)
Incrementar producción diaria promedio a 25 m ³ /D.	m ³ /D	5	5/13 = 0,38
Incrementar Reservas mayores a 300 Mil m ³ .	Miles de m ³	3	3/13 = 0,23
VAN mayor a 0 USD	USD	5	5/13 = 0,38
		Total = 13	Suma = 1

Tabla 3: Lista de los objetivos establecidos para tomar la decisión.

La columna “calificación” de la **tabla 3** contiene valores del 0 al 5 con el fin de obtener un coeficiente de ponderación que refleje el nivel de preferencia del objetivo. Se califica con 5 a aquellos objetivos en los cuales la



organización tiene preferencia predominante en que sean alcanzados, y con 1 a aquellos que presentan menos preferencia. El coeficiente de preferencia se obtiene de dividir el valor de la calificación sobre la suma total de las calificaciones (columna “preferencia” de la **tabla 3**). Estos coeficientes de preferencia son los que se utilizarán junto a los objetivos, para comparar con los resultados que arrojen las alternativas, que se van a describir en la próxima sección. Si fuese el caso de que el objetivo sea uno solo, de más está decir que no van a existir coeficientes de preferencias.

Los objetivos listados en este paso deben cumplir con las siguientes consignas:

- i- Deben ser los suficientemente claros y con una escala de medición apropiada, para que puedan ser comparados con los resultados de las alternativas.
- ii- No deben ser redundantes entre sí, es decir que uno no tiene que ser el refraseo de otro, sino el coeficiente de preferencia no tendría sentido.

Paso 2: Identificar alternativas

Las alternativas son las soluciones, opciones, planes operacionales, cursos de acción, etc., para alcanzar los objetivos identificados en el *paso 1*. Es decir que serán las opciones por las que el tomador de la decisión tendrá que escoger.

En este paso es donde se debe contestar la pregunta; ¿Cómo es posible alcanzar los objetivos?, y a través de técnicas de motivación de creatividad como pueden ser las de brain storming; árboles de decisión; análisis de



fortalezas, debilidades y amenazadas (FODA) entre otras³²; se deben obtener/listar todas las alternativas posibles. Es aquí donde la mejor herramienta para crear alternativas es la imaginación y una mente abierta por parte de todos los personajes involucrados en la toma de la decisión. En la **tabla 4** se ejemplifica alternativas posibles que caracterizan a un proyecto de producción de reservas de hidrocarburos.

<u>LISTA DE ALTERNATIVAS</u>	
1.	Perforar para explorar nueva área.
2.	Profundizar pozos existentes para desarrollar nuevos horizontes hidrocarburíferos.
3.	Perforar pozos en zona dónde se ha comprobado hidrocarburo, para acelerar la extracción de reservas.
4.	Perforar un pozo horizontal.
5.	Perforar un pozo vertical.
6.
N.

Tabla 4: Lista de alternativas posibles en un proyecto de extracción de reservas de hidrocarburos.

Es de gran importancia para estimular la postulación de alternativas que se genere un clima/atmósfera de creatividad dentro de las organizaciones, a través de la facilitación de técnicas comunicacionales dentro de los grupos. Es necesario que todos los miembros involucrados en la decisión permitan escucharse unos a otros en las alternativas que propongan. Ningún individuo debe desestimar las propuestas de los otros, ya que esa propuesta puede inspirar en otros un conjunto de alternativas posibles³³.

³² Para más detalle y estrategias de para motivar la creatividad, se recomienda: Creatividad Efectiva. Antonio Eroles.

³³ Técnicas de Creatividad Efectiva. Antonio Eroles.



Así mismo, las alternativas que se listan como en el ejemplo de la **tabla 4** deben poseer la característica de que puedan ser evaluadas con la información disponible, ya sea certera o con incertidumbre. Si alguna alternativa no puede ser evaluada, es decir que no pueda arrojar ningún resultado, ya que no es posible caracterizarla con la información disponible, esta debe ser descartada, por el sencillo motivo de que no se podrá comparar con el/os objetivo/s de la decisión a tomar. En el próximo paso se describe cómo evaluar resultados de cada alternativa.

Paso 3: Evaluar alternativas

En este paso se procede a calcular los resultados de cada alternativa listada en el *paso 2* las cuales cada una de ella incorpora información certera o con incertidumbre. En el esquema de la **figura 1**, las *consecuencias* (elemento de una decisión, **Capítulo I**) se calculan este paso, en otras palabras, las consecuencias, son los resultados de evaluar a cada alternativa con la información disponible.

Debido a que cada alternativa propuesta en el paso 2 contiene información con incertidumbre, para calcular los resultados de cada una de ellas se utiliza como herramienta, la simulación Monte Carlo (**Capítulo III**). Para realizar esta simulación Monte Carlo, es necesario modelar a todas las variables que presentan información con incertidumbre a través de alguna función de distribución de probabilidad (**Capítulo III**).

A continuación se desarrolla un ejemplo de cómo calcular el resultado de una de las alternativas listadas en el *paso 2*, que para este ejemplo es “*Perforar para explorar nueva área*” en la cual se usa el VAN como indicador económico principal



Como se menciona en el **Capítulo II**, el VAN se evalúa a través de los flujos de fondos que arroja la alternativa en un período de tiempo determinado, descontados a una cierta tasa de interés.

La tasa de interés es una variable que no presenta incertidumbre, la misma depende del contexto económico donde se esté desarrollando la organización, y generalmente el valor de la misma es definido por la alta gerencia. Un valor razonable que se usa en la industria es un 15% en promedio. Existen encuestas anónimas realizadas a organizaciones, en donde se publican el valor de tasa de interés que utilizan para evaluar sus proyectos. Una encuesta³⁴ muestra que las organizaciones utilizan un valor de tasa de entre 9 y 17%, dependiendo del contexto económico/político dónde se encuentre operando la organización. Por lo tanto el VAN de esta alternativa está dado por:

$$\text{VAN} = - \text{Inversiones} + (\text{Flujos de Fondos} / 1 + 15\%)$$

El período de tiempo que se supone para evaluar el VAN es de durante unos 20 años. Este depende de dónde se encuentre operando la organización. En Argentina, las concesiones de los yacimientos se dan por un período de 20 a 30 años aproximadamente.

Las inversiones son información certera, es decir que esta variable no presenta incertidumbre. Las mismas se pueden obtener pidiendo un presupuesto a la compañía que perfora el pozo y a la que construyen los ductos para transportar/almacenar los hidrocarburos. Para este ejemplo se supone 4 MMUSD (millones de dólares) para perforar un pozo de 3 Km de profundidad y 1 MMUSD para construir ductos y plantas de tratamiento.

³⁴ Survey of Parameters used in Property Evaluation. (Junio 2008). Society Of Petroleum Evaluations Engineers.



Los flujos de fondos están compuestos por los ingresos menos los costos. Los costos son variables certeras, una organización conoce los costos de procesamiento y transporte de los hidrocarburos que produce. Para el caso de los costos también existen encuestas anónimas donde las empresas presentan sus costos con el motivo de compararse. Para este ejemplo se supone un costo de 7 USD/Bbl (dólares por barril de hidrocarburo), que es un costo razonable para la industria.

En cambio, los ingresos presentan incertidumbre, debido a que los mismos dependen de la variable precio del barril de petróleo, días inactivos de producción y de la variable volumen de hidrocarburo almacenado, todas descritas en el **Capítulo II**. Por lo tanto, como el VAN tiene en su fórmula variables con incertidumbre, el mismo se calcula utilizando la Simulación Monte Carlo desarrollada en el **Capítulo III**.

Para proceder al cálculo del VAN se utiliza como herramienta el software Cristall Ball, que como se describió en el **Capítulo III**, el mismo se utiliza para realizar Simulaciones Monte Carlo.

El Cristall Ball es un software basado sobre plataforma Excel³⁵ el cual para correr las simulaciones se le deben indicar cuáles son las variables que presentan incertidumbre, y cuáles no presentan. A las variables que presentan incertidumbre, se les deben introducir la función de distribución de probabilidad, que se ha descrito en el **Capítulo III**. Por consiguiente se introducen las funciones de distribuciones Normal para la variable porosidad y saturación de hidrocarburo, Triangular para los días inactivos de producción y Beta para el precio del barril de petróleo. Con las distribuciones de probabilidad introducidas, y la fórmula del VAN, el Cristall Ball da como

³⁵ Software registrado por Microsoft®



resultado al VAN en valores posibles agrupados en frecuencias relativas, como se muestra en el **gráfico 10**.

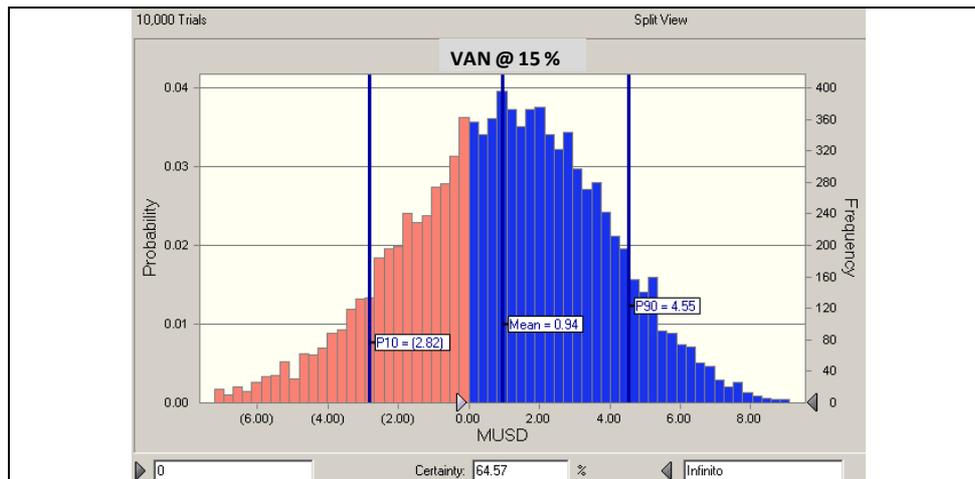


Gráfico 10³⁶: Resultado de la variable VAN, la cuál es consecuencia de la alternativa “Perforar un pozo exploratorio”.

Del **gráfico 10** se puede observar que la probabilidad de que el VAN sea mayor o igual a cero es de 0,6457 (dato calculado intrínsecamente por el software), es decir que la probabilidad que la alternativa “Perforar un pozo en un área exploratoria” sea rentable es de un 64,57 %, que en otras palabras, es lo mismo decir, que esta alternativa tiene un riesgo (VAN menor o igual a cero) del 35,4%. En el *paso 4* se desarrolla para qué se utilizan estos datos de probabilidad.

Además dentro de la fórmula del VAN, en los ingresos de los flujos de fondos, se encuentran las variables producción diaria y reservas, las cuales software calcula su distribución de probabilidad. Éstas se muestran en los **gráficos 11 y 12** respectivamente.

³⁶ Resultado de la Simulación Montecarlo realizada por el Cristall Ball



UTDT
MBA 2010

TESIS

JUAN M. GAVILAN

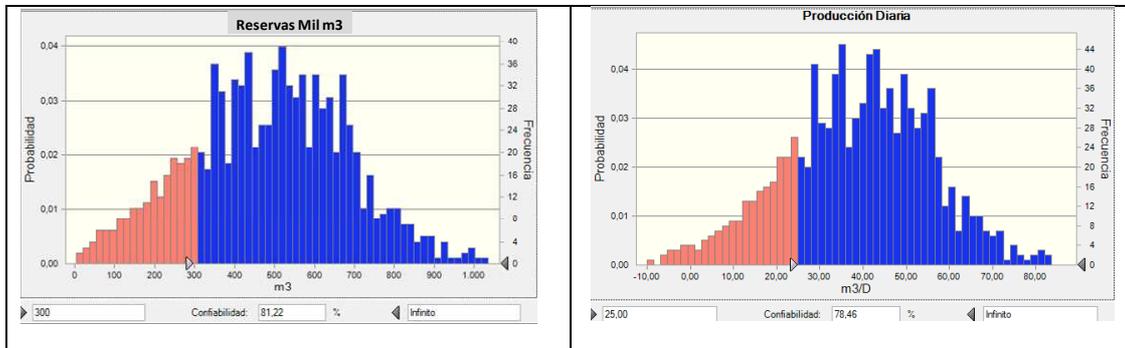


Gráfico 11: Resultado de la variable Reservas, calculada con software Crisall Ball.

Gráfico 12: Resultado de la variable Producción diaria promedio, calculada con software Crisall Ball

De los resultados arrojados para las variables producción diaria y reservas de hidrocarburos de la alternativa “Perforar un pozo en un área exploratoria”, se observa en el **gráfico 11**, que la probabilidad de que las reservas sean mayores a 300 mil m³ es del 81,22 % (dato calculado por el software), y que la probabilidad que la producción promedio sea mayor a 25 m³/D es del 78,46% (**gráfico 12**). Estos últimos valores de probabilidad, también se utilizan en el *paso 4* para comparar alternativas.

Lo descrito en **los gráficos 10, 11 y 12**, con su probabilidad de ocurrencia, se debe realizar para todas las alternativas listadas en el *paso 2* de la **tabla 4**.

Es importante aclarar que, para lograr los resultados de los **gráficos 10, 11 y 12** no es objeto de este trabajo detallar el procedimiento que se debe seguir con el software Crisall Ball, para ello se recomienda la lectura bibliográfica Oracle Crisall Ball Manual³⁷.

Paso 4: Comparar Alternativas versus objetivos para tomar la decisión

En este paso se procede a comparar los resultados de las alternativas planteadas en el *paso 3* versus a los objetivos planteados en el *paso 1*. En la

³⁷ Probabilistic Distributions. (2011). ORACLE. Crystal Ball User's Guide.



figura 1 del **Capítulo I** se esquematiza mediante una flecha doble esta comparación, con el motivo de escoger la alternativa que mejor cumple con los objetivos planteados y llegar a tomar la mejor decisión posible.

Para realizar esta comparación, este trabajo propone desarrollar una matriz que contenga los objetivos con sus coeficientes de ponderación (**tabla 5**), las alternativas listadas en el *paso 2*, y las probabilidades de ocurrencia calculadas den el *paso 3*. En la **tabla 5** a continuación se ejemplifica una matriz con estas características.

<u>OBJETIVOS</u>		<u>ALTERNATIVAS</u>			
	PREFERENCIA (COEF. PONDERACIÓN)	1. Perforar para explorar nueva área.	2. Perforar un pozo horizontal.	3. Perforar un pozo vertical.	N.
		Probabilidades calculadas en el paso 3			
Incrementar producción diaria promedio a 25 m3/D.	0,38	0,7846	X1	Y1	N1
Incrementar Reservas mayores a 300 Mil m3.	0,23	0,8122	X2	Y2	N2
VAN mayor a 0 USD	0,38	0,6457	X3	Y3	N3
		V1 = 0,73 (*)	V2 (*)	V3 (*)	VN (*)

COMPARACIÓN

Tabla 5: Matriz de comparación para decidir por la mejor alternativa posible.



Para hallar los valores de la matriz de comparación de la **tabla 5**, se realiza la suma de las probabilidades de cada una de las alternativas, ponderando cada probabilidad por el coeficiente de preferencia de cada objetivo. Es decir que:

$$V1 = 0,38 \times 0,7846 + 0,23 \times 0,8122 + 0,38 \times 0,6457 = 0,730$$

$$V2 = 0,38 \times X1 + 0,23 \times X2 + 0,38 \times X3$$

$$V3 = 0,38 \times Y1 + 0,23 \times Y2 + 0,38 \times Y3$$

$$VN = 0,38 \times N1 + 0,23 \times N2 + 0,38 \times N3$$

Dónde los valores de la matriz X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3, N1, N2 y N3 se calculan utilizando la simulación Monte Carlo en el *paso 3*.

Luego la decisión por la mejor alternativa corresponde a aquella que tenga el mayor de valor de suma ponderada, es decir que si la alternativa "Perforar en un área exploratoria" es la mejor a ser elegida, tiene que cumplir:

$$V1=0,730 > V3 > V2 > VN$$

Con este último paso se culmina con el proceso/metodología de análisis para la toma de decisiones.

Resumen

En este capítulo se trató exclusivamente sobre los 4 pasos del proceso/metodología de análisis que se propone en este trabajo para tomar decisiones. El mismo involucra los elementos característicos de una buena



UTDT
MBA 2010

TESIS
JUAN M. GAVILAN

decisión, la información disponible certera o con incertidumbre y el análisis de las variables presente en los proyectos de extracción de reservas de hidrocarburos, a través de la herramienta estadística llamada Simulación de Monte Carlo.



CONCLUSIONES

En la introducción de este trabajo se plantean dos interrogantes referidos a la industria de producción de hidrocarburos que surgen del alto riesgo económico e incertidumbre presente en todas sus variables.

Para contestar la primera pregunta *¿Cómo se puede modelar la gran incertidumbre presente en las variables involucradas en los proyectos de producción de hidrocarburos?* se ha recurrido al estudio e investigación de conceptos en el área de la probabilidad y estadística, los cuales han arrojado que, a través del uso de información certera sobre las variables más importantes que afectan a los proyectos de producción de reservas de hidrocarburos, y la utilización de funciones de distribución de probabilidad continuas, es posible cuantificar/modelar la incertidumbre presente en dichas variables. El uso de información certera se refiere a los datos conocidos que adoptan las variables en yacimientos vecinos, u observando los precios históricos para el caso del precio del hidrocarburo.

Para contestar la segunda pregunta *¿Cómo es posible cuantificar el riesgo del éxito económico en proyectos relacionados con la producción de hidrocarburos?* se ha acudido a investigar bibliografía de análisis de riesgo y toma de decisiones en conjunto con conceptos de probabilidad y estadística. Para cuantificar el riesgo económico, a través de variables económicas pre-establecidas (como el VAN) por el/os tomadores de la decisión, se utiliza la herramienta de simulación estadística llamada Simulación Montecarlo, la cual combina las distribuciones de probabilidad continua con las fórmulas matemáticas de las variables pre-establecidas, cuantificando al riesgo con un valor probabilístico.



Para que en una organización se puedan tomar decisiones de alta calidad sobre proyectos relacionados con la producción de reservas de hidrocarburos (que poseen variables con algún grado de incertidumbre) este estudio propone un modelo/metodología de análisis conformado por 4 pasos, el cual permite concluir que:

- les sirve a los tomadores de la decisión tener un pensamiento estructurado, objetivo, transparente y visible para el resto,
- puede ser auditado para juzgar por su calidad,
- evita que las decisiones sean tomadas en base a la intuición,
- incluye todas las variables y la incertidumbre que las caracteriza, identificando aquellas que más influyen en el resultado de la decisión
- asegura evaluar distintas alternativas o cursos de acción, para elegir aquella que más cumple con los objetivos planteados.

Por último también se concluye que este modelo/metodología de análisis para la toma de decisiones se puede utilizar tranquilamente para decisiones personales.



BIBLIOGRAFÍA

La matriz energética mundial y su probable evolución. El rol posible de las energías renovables. (Junio 2011). <http://www.prospectiva2020.com>.

Bratvold B. and Begg E. (2010). Making Good Decisions.

El Abecé del Petróleo y del Gas, en el Mundo y en la Argentina. (Mayo 2000). Instituto Argentino de Petróleo y Gas (IAPG).

Tarbuk and Lutgens. (2005). GEODE Ciencias de La Tierra, vol. 1.

Amyx J. (1960). Reservoir Engineering, Physical Properties.

U.S Energy Information & Administration. (Enero 2012). Spot Prices for Crude Oil and Petroleum Products.

http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm

Secretaría de Energía. Ministerio de Planificación. (Enero 2012). Evolución de las Reservas en Argentina por Cuenca. <http://www.iapg.org.ar>

Revista Forbes. (Abril 2007). Oil Gas Reserves by Company or Country. http://www.data360.org/dsg.aspx?Data_Set_Group_Id=1491

Survey of Parameters used in Property Evaluation. (Junio 2008). Society Of Petroleum Evaluations Engineers.

Zylbelberg A. (2005). Probabilidad y Estadística.



Probabilistic Distributions. (2011). ORACLE. Crystal Ball User's Guide.

Gali A. and Amnstrong M. (1999). Evaluation Oil Projects: Option Pricing, Decision Trees and Monte Carlo Simulation. SPE 52949.

Eroles A. (1999). Creatividad Efectiva.

Reuven Y. Rubinstein. (2008). Simulation and The Monte Carlo Method.

Craig S. (2005). An Introduction to Monte Carlo Methods.

Craft B. (1991). Aplied Reservoir Petroleum Engineering.

Informe interno dentro de la compañía.

Amdouh R. Gadallah and R. Fisher. (2009). Exploration Geophysics.