

ANÁLISIS DE RIESGO Y SIMULACIÓN DE MONTE CARLO EN LA VALORACIÓN DE PROYECTOS— APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS

Venus Minerva Díaz Guardia¹, Marialejandra Castillo Torres², Ph.D. Carlos Enrique Vecino Arenas³, M.Sc. Rubén Hernán Castro⁴, Gustavo Maya Toro⁵, M.Sc. Oscar Bravo Mendoza⁶

RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología que permite desarrollar una evaluación financiera eficiente, basada en un análisis de riesgo que integra variables técnicas y financieras mediante el uso de diagramas de influencia y simulación de Monte Carlo; logrando no sólo simplificar el modelo de simulación, sino además seleccionar apropiadamente las variables de mayor interés e impacto para el proyecto. La metodología desarrollada se aplica a la evaluación de un proyecto de recobro secundario mediante inyección de agua en un campo petrolero colombiano, resaltando la industria de los hidrocarburos como un claro exponente de la evaluación de proyectos bajo condiciones de incertidumbre, dadas sus altas inversiones y el gran número de variables técnicas y financieras que le afectan.

Palabras Claves: Análisis de Riesgo, Diagramas de Influencia, Evaluación financiera, Incertidumbre, Simulación de Monte Carlo, Inyección de Agua.

ABSTRACT

This paper presents a methodology to develop an efficient financial assessment through risk analysis that integrates technical and financial variables using influence diagrams and Monte Carlo Simulation, achieving not only simplify the simulation model, but also a selection appropriate variables that impact the project. This methodology is exemplified through its application in the evaluation of an enhanced oil recovery project in Colombian oil field, highlighting the oil industry as a prime example of a project evaluation under uncertainty, taken in account their high investment and high number of technical and financial variables that affect it.

Keywords: Financial Assessment, Uncertainty, Risk Analysis, Monte Carlo Simulation, Waterflooding.

1 Ingeniera Industrial. Candidata a M.Sc. en Ingeniería Industrial de la Universidad Industrial de Santander. venus.diaz@correo.uis.edu.co. Bucaramanga – Colombia.

2 Ingeniera Industrial. Candidata a M.Sc. en Ingeniería Industrial de la Universidad Industrial de Santander. marialejandra.castillo@correo.uis.edu.co. Bucaramanga – Colombia.

3 Ph.D. in Management. Universite de Montreal. M.Sc. in Finance University of Illinois. Profesor Titular de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales - UIS. cvecino@uis.edu.co. Bucaramanga – Colombia.

4 M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander. Ingeniero de Yacimientos. Instituto Colombiano del Petróleo (Ecopetrol S.A.). rubenhe.castro@ecopetrol.com.co. Piedecuesta - Colombia

5 Ingeniero de Petróleos. Candidato a M.Sc. Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander. Ingeniero de Yacimientos. Instituto Colombiano del Petróleo (Ecopetrol S.A.). gustavo.maya@ecopetrol.com.co. Piedecuesta - Colombia

6 Master of Bussiness Administration. University of Illinois. Gerente de Campos Menores. Ecopetrol S.A. oscar.bravo@ecopetrol.com.co. Bogotá D.C. - Colombia

1. INTRODUCCIÓN

El fin último de toda empresa es aumentar su valor, garantizando su permanencia e incrementando la riqueza para los inversores. La valoración de proyectos permite conocer la rentabilidad generada por los mismos para de esta forma, calcular la magnitud de su aporte al objetivo básico financiero de la empresa.

El enfoque clásico de valoración más conocido es el Flujo de Caja Descontado (FCD), que a pesar de tener diversas limitaciones, es la base y soporte para gran parte de los métodos de valoración posteriores. Si bien no se conocen sus orígenes, se resalta el reconocimiento del valor del dinero en el tiempo, expuesto por primera vez por Johan Witt, y el trabajo de Irving Fisher, quien hizo una comparación entre los flujos de caja futuros y la inversión necesaria para dar inicio al proyecto evaluado, creando las bases para la clásica evaluación del Valor Presente Neto (VPN) (Farber, 2004).

No obstante, el enfoque de FCD se ha quedado corto ante las exigencias crecientes que generan proyectos cada vez más complejos, que deben reaccionar ante el entorno cambiante del mundo actual de los negocios; así pues, el factor incertidumbre se convirtió en el centro de atención de los estudios y evaluaciones financieras en la actualidad haciendo cada vez más evidentes las deficiencias del FCD, especialmente el hecho de no tener en cuenta el impacto que tienen la variabilidad de los datos, y la flexibilidad de los proyectos ante diferentes factores, es decir, el efecto de la incertidumbre.

Como respuesta a este importante requerimiento, desde finales del siglo pasado se han venido desarrollando métodos alternos para apoyar el proceso de toma de decisiones; entre las principales se encuentran los “Árboles de Decisión”, aplicados al problema de decisiones de inversión de capital por primera vez por Magee (1964); la teoría de Opciones Reales (Myers, 1977) y la Simulación de Montecarlo, la cual es el interés en esta publicación.

Un claro ejemplo del amplio avance en el estudio y la aplicación del análisis de riesgo se presenta en la industria de los hidrocarburos, en donde las altas inversiones y el número de incertidumbres con un impacto representativo en los resultados financieros, dificultan el proceso de toma de decisiones haciendo imperativo el uso de modelos probabilísticos.

En consecuencia, la literatura presenta un número representativo de estudios de análisis de riesgos en la

exploración y producción petrolera, como lo muestran (Schiozer & Suslick, 2004) y (Guimaraes, 2003) quienes indican que el análisis de riesgo en la exploración y producción petrolera ha sido ampliamente estudiado.

En la presente investigación se exponen algunas herramientas para la administración de la incertidumbre, tales como los Diagramas de Influencia y la Simulación de Montecarlo, para lograr una evaluación financiera eficiente. Se expone además, la metodología propuesta, y su aplicación a un proyecto piloto de inyección de agua en un campo petrolero colombiano.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Dadas las dificultades y el nivel de incertidumbre de algunos proyectos, se requiere de un conjunto de técnicas y simplificaciones que ayuden a facilitar el proceso de toma de decisiones permitiendo una evaluación sencilla y exitosa, mejorando los resultados de los modelos de simulación sin sacrificar precisión en los mismos. Algunas de las simplificaciones más utilizadas en la industria corresponden a modelos empíricos, corridas previas de simulación, integración de incertidumbres, entre otras. La metodología utilizada en este trabajo, contiene la integración de dos técnicas usualmente empleadas de manera independiente.

La primer técnica es la **Simulación de Montecarlo**, que utiliza números aleatorios para derivar el resultado de un proceso probabilístico, para lo que emplea entradas con distribuciones de probabilidad asignadas a un conjunto de variables generando una distribución de probabilidad de salida después de una corrida de simulación. El desarrollo del método tal y como se conoce, empezó en 1944 con el uso de los primeros ordenadores en la construcción de las primeras bombas atómicas, pero fue Hertz en su trabajo “Risk Analysis in Capital Investment” (Hertz, 1964) quien introdujo esta técnica en el análisis de decisiones de inversión.

La Simulación de Monte Carlo tiene bondades representativas que la convierten en una excelente alternativa cuando se trata de evaluar proyectos con altos niveles de incertidumbre, dado que al evaluar múltiples escenarios brinda la posibilidad de visualizar todas las posibles correlaciones y efectos conjuntos de las variables, suministrando como resultado una distribución de probabilidad de la variable respuesta. De acuerdo con Savides (Savides, 1994) el análisis de riesgo y una simulación probabilística con Monte Carlo

son conceptos equivalentes, ya que por medio de esta última se puede reconocer el impacto del riesgo en los resultados de un proyecto.

La segunda herramienta son **los Diagramas de Influencia**, que fueron desarrollados por Howard y Matheson durante los años 70's, presentándose como una excelente alternativa para facilitar la selección de variables y sus interrelaciones. Su objetivo es obtener una representación gráfica que ayude a percibir la estructura de problemas de decisión con mayor facilidad. Esta simplicidad se aprecia en la facilidad de observar y generar relaciones entre variables aleatorias, decisiones y utilidades. Lo que a su vez facilita la construcción posterior de algoritmos y/o modelos de simulación. En resumen, permiten una representación compacta del conocimiento que se tiene sobre una situación de decisión bajo condiciones de incertidumbre.

En un diagrama de influencia intervienen tres tipos de nodos correspondientes a nodos de decisión, incertidumbre y utilidad. Los nodos de decisión se suelen representar por rectángulos e indican una situación de selección de alternativas. Los nodos de incertidumbre, se grafican por medio de óvalos y representan una variable probabilística que puede aportar riesgo al proyecto; finalmente los nodos de utilidad o valor se grafican mediante hexágonos y representan la función objetivo o el objetivo fundamental del proyecto.

En este punto se empieza a observar la relación entre los diagramas de influencia y la simulación de Monte Carlo, pues si bien este último es un método robusto y con gran aplicación en diferentes industrias, se encarga únicamente de generar los valores aleatorios a las variables que el evaluador solicite, pero la estructura o el algoritmo del modelo debe ser estructurado por el evaluador, y es aquí donde el diagrama de influencia se convierte en una ayuda determinante para el éxito de la valoración, permitiéndole identificar variables representativas y sus interrelaciones.

3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada, permite generar un modelo de análisis de riesgo sencillo, aunque es de aclarar, que en la gran mayoría de proyectos se requiere superar etapas de factibilidad técnica y comercial antes de realizar una evaluación financiera, sin las cuales éste estudio podría no tener relevancia.

3.1. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RIESGOS

Esta primera etapa de la evaluación contempla el efecto del entorno dinámico en que se desarrolla el proyecto, consciente de que existen múltiples factores con determinantes técnicas, económicas, sociales y políticas entre otras, que se modifican a través del tiempo e introducen incertidumbre sobre la capacidad del proyecto para cumplir efectivamente sus objetivos.

El primer paso corresponde a un **establecimiento del contexto**, en donde se busca definir una política de manejo de riesgos, que esté alineada con los objetivos estratégicos del proyecto, garantizar que las personas encargadas de la construcción del modelo tengan pleno conocimiento del proceso y establecer las bases para manejar un mismo lenguaje entre los integrantes del proyecto; por ende, el establecimiento del contexto debe incluir una completa revisión tanto teórica como práctica y una clara definición del alcance y la planeación del proyecto de acuerdo con el grado de conocimiento, necesidades y disponibilidad de recursos. Posteriormente se realiza la **evaluación y selección de riesgos** incluyendo un proceso primario de identificación mediante métodos clásicos como lluvia de ideas, Método Delphi, consultas a expertos entre otros. Una vez identificados de manera general, se procede a realizar la priorización y selección de los mismos mediante la construcción de una matriz de riesgos. El resultado de esta etapa, permite identificar aquellos riesgos con mayor probabilidad de ocurrencia, brindando un primer acercamiento a la identificación de las variables que deberán ser simuladas.

A continuación, se procede a **construir el diagrama de influencia**, que como se mencionó tiene la facultad de ayudar al analista a visualizar el proyecto como un sistema; permitiendo identificar causas comunes y emprender acciones de mitigación más efectivas y económicas; ya que al identificar relaciones de causalidad y atacar los riesgos claves se disminuye la probabilidad de ocurrencia de otros riesgos. Además, permite continuar con la priorización, poniendo en evidencia aquellos riesgos que tienen un impacto importante en el resultado final del proyecto, ya sea directa o indirectamente. En el Apéndice 1, se presenta el diagrama de influencia construido para la evaluación financiera de un proceso de inyección de agua, en éste se incluyen diferentes tipos de variables financieras, operacionales, de yacimiento, de entorno, entre otras; y sus posibles interrelaciones.

3.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Un modelo financiero es una herramienta de gerenciamiento de proyectos que permite proyectar posibles resultados con base en decisiones que se planea tomar en el presente, para dar respuesta a dudas acerca de ¿qué pasaría si...? en el futuro, y apoyar el proceso de toma de decisiones.

Con el objeto de construir un modelo que responda al comportamiento real del proyecto, introduciendo el efecto de las incertidumbres presentes en el mismo, se recomienda el uso de herramientas como Crystal ball®, @risk®, Risk Simulator®, entre otras, las cuales mediante el uso de Simulación de Montecarlo o Hipercubo Latino, permiten la asignación de una distribución determinada, representando el efecto de las fuentes de incertidumbre identificadas. Es entonces crucial definir cuál será la función de probabilidad que se ajusta mejor al comportamiento de la variable a modelar, para lo cual el analista puede: (1) realizar un ajuste de los datos históricos de la variable a modelar, el cual debe ser validado mediante pruebas de bondad de ajuste -Kolmogorov – Smirnov o chi-cuadrado; (2) solicitar el criterios de expertos, quienes con su conocimiento y experiencia pueden definir una distribución para una variable específica; (3) guiarse por la literatura, que tiene definidas algunas distribuciones, especialmente para parámetros técnicos como variables de yacimiento. Algunas de las distribuciones de probabilidad más conocidas y empleadas son:

Distribución normal: se caracteriza por tener forma de campana, dado que su media, moda y mediana tienen igual valor. Suele usarse para representar situaciones como la duración de un proyecto, el retorno esperado, entre otras. Aunque presenta un inconveniente, y es que no tiene límites, lo que podría aunque con una muy baja probabilidad, generar confusión en el análisis ya que se presentarían valores atípicos.

Distribución Triangular: Es conocida por su sencillez, ya que para su cálculo requiere únicamente de tres datos el mínimo, el más probable y el máximo; generalmente se utiliza para especificar situaciones que implican costos, inversiones, ventas de bienes, entre otras.

Distribución Uniforme: Esta distribución asigna igual probabilidad de ocurrencia a los diferentes eventos. A pesar de ser muy conocida, no es muy utilizada ya que pocos eventos se comportan de esta manera. Así que generalmente es utilizada cuando la incertidumbre

es muy alta y existe poco conocimiento respecto a la situación.

Distribución Lognormal: es una distribución continua muy parecida a la distribución normal, pero sesgada hacia un lado. Se usa para eventos en los que se tenga bajas probabilidades de obtener valores altos y que no presenten valores negativos. En aplicaciones de exploración y producción de petróleo es muy utilizada para representar el precio del petróleo, la permeabilidad, el espesor de yacimiento, los factores de recobro de crudo, las reservas y la producción por campo.

Distribución Beta o Pert: Esta distribución representa las variaciones sobre un intervalo fijo desde cero a un valor positivo, se denomina así ya que es tal como ocurre con los tiempos requeridos para completar una actividad en la programación de un proyecto. Para determinar los valores de la distribución a partir de la opinión de un experto se toman los valores pesimista, más probable y optimista.

Una vez definidas las variables a modelar y su distribución de probabilidad asociada, se procede al **establecimiento de la lógica del modelo financiero**, que debe incluir la identificación de los demás parámetros de evaluación del proyecto, y la estructuración de la evaluación. Con base en esta lógica se procede a la **construcción del modelo financiero**, que consiste en definir una estructura a partir de ecuaciones, suposiciones y parámetros, para obtener un resultado determinado que generalmente se fundamenta en un análisis de Flujo de Caja, del cual se desprenden las medidas de desempeño a evaluar tales como Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Relación Costo Beneficio (B/C) entre otras. Es importante resaltar que la lógica del modelo y su construcción, se basan en las relaciones previamente definidas en el diagrama de influencia y los riesgos identificados.

Posteriormente se procede a realizar una exhaustiva **recolección de datos**, que brinde información sobre las fuentes de ingresos, egresos, e incertidumbres; así como históricos, estadísticas, indicadores, entre otros. Alimentando con esta información el modelo construido.

Con el fin de verificar que el modelo funcione correctamente y esté representando la realidad que se desea evaluar, se procede a realizar una **validación del modelo**. Existen diferentes formas de efectuar esta validación, entre las que se encuentran (1) la opinión de expertos sobre los resultados de la simulación, (2) la exactitud con que el modelo pueda predecir datos

históricos, y (3) la comprobación de falla del modelo de simulación ante datos que harían fallar el sistema real. En esta etapa, se recomienda como parte de la validación, realizar un análisis de sensibilidad con el objeto de verificar el efecto de las variables definidas, u otras que se deban incluir, identificando las fuentes de riesgo que mayor impacto tienen en el retorno del proyecto, y determinando los factores de incertidumbre que merecen mayor análisis y cuidado. Para ello se emplean los muy conocidos análisis de tornado o análisis tipo araña.

3.3. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Una vez validado el modelo, se realizan las **corridas de simulación** que junto a un análisis de resultados, permitirán determinar la viabilidad financiera del proyecto, aquí la Simulación de Montecarlo generará múltiples escenarios cada uno de estos con una combinación particular de variables que se traducen en proyecciones anuales de ingresos y egresos, combinados con otros factores de índole financiero para generar distribuciones de probabilidad de las medidas de factibilidad financiera seleccionadas. El análisis, por generar resultados probabilísticos debe acompañarse del estudio de percentiles (en la industria del petróleo, es común emplear los percentiles 90-50-10), así como el análisis de la media, variabilidad y curtosis de la curva de distribución obtenida, entre otros estadísticos descriptivos. Así mismo, se recomienda evaluar el Valor en Riesgo (VAR), que es un método de cuantificación popular en el sector financiero en razón a su sencillez y facilidad de cálculo; éste se define como la peor pérdida esperada en un intervalo de tiempo determinado e indica cual es la probabilidad de que un proyecto o evaluación determinada genere pérdidas (Bravo & Sanchez, 2006).

4. APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la ejemplificación de esta metodología, se evaluó un proyecto piloto de inyección de agua en un campo colombiano. La inyección de agua es una de las técnicas de recobro más utilizada y reconocida, históricamente registra la mayor cantidad de proyectos exitosos, con altas contribuciones al recobro extra de petróleo en campos de todo el mundo. Por medio de esta técnica, los niveles de producción de petróleo aumentan, ya que éste es desplazado gracias al empuje que resulta de la

acumulación del agua inyectada, que pasa a invadir el volumen anteriormente ocupado por el petróleo.

Una vez aprobada la factibilidad técnica y experimental del proyecto piloto, (ICP-UIN, 2008) se procedió a realizar la evaluación financiera del proyecto de acuerdo a la metodología planteada y los perfiles de producción generados en la factibilidad técnica, mediante simulación con software corporativo de ECOPETROL S.A., que utiliza el método analítico de Craig Geffen & Morse (CGM). (Craig, Geffen, & Morse, 1955)

Dentro de la lógica del modelo se definió que éste debía evaluar en paralelo dos escenarios principales, el primero denominado Status Quo correspondiente al campo en condiciones actuales (sin inyección de Agua) y el segundo denominado *Waterflooding*, que representó el piloto de inyección; la comparación de estos dos escenarios permitió visualizar el aporte del proyecto al desarrollo del campo. Las variables de entrada de Montecarlo, junto con sus respectivas distribuciones de probabilidad y fuente de información, se presentan en el **Apéndice 2**.

Posteriormente se realizó la corrida de simulación que presentó como resultado un VPN con valor en riesgo nulo para el escenario Status Quo, como se muestra en la **Figura 1**; a diferencia del escenario *Waterflooding* en donde la probabilidad de obtener valores negativos es del 40% (Ver **Figura 2**).

Por otra parte, se observa una mayor dispersión en los resultados del escenario *Waterflooding*, ésta dispersión es equivalente a la posibilidad de obtener valores bastante representativos de hasta USD\$ 26'528.355, como lo muestra el percentil 90 (**Figura 2**) que a pesar de ser un escenario optimista, es un evento que el evaluador debe tener en cuenta.

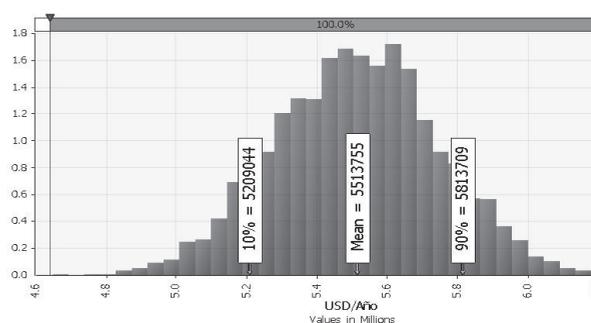


Figura 1. VPN Escenario Status Quo

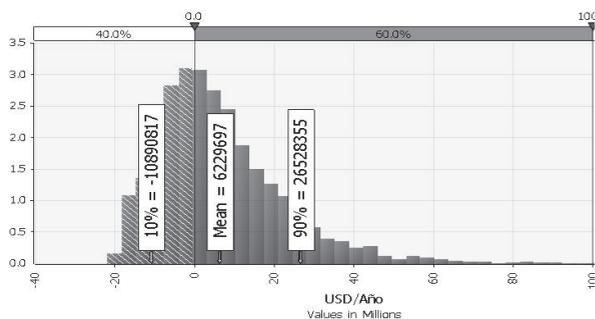


Figura 2. VPN Escenario Waterflooding

Comparando las medias del VPN de ambos escenarios, se observa una ligera superioridad en el escenario *Waterflooding* con un VPN esperado de USD\$ 6'229.697 frente a USD\$ 5'513.755 que presenta el escenario Status Quo.

Sin embargo, es importante observar que aunque el Status Quo parece más atractivo por presentar menos riesgo, su producción acumulada es de 1'344.249 barriles de petróleo, comparada con 2'920.117 barriles en el escenario *Waterflooding*, como se muestra en las Figuras 3 y 4, lo que representa una mejor recuperación en el segundo escenario y podría decirse (sujeto el nivel de aversión al riesgo del inversor) que justifica en parte el riesgo que se pudiera presentar.

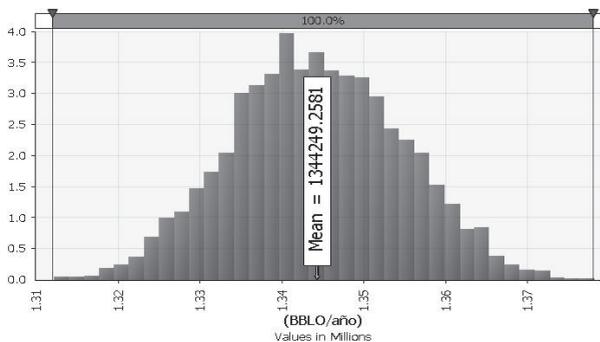


Figura 3. Producción Base - Status Quo

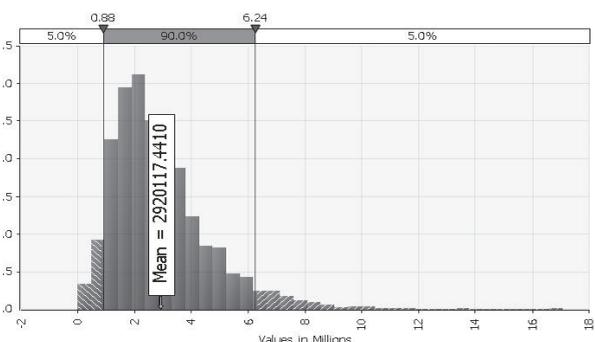


Figura 4. Producción Incremental *Waterflooding*

Por su parte, el resultado de los flujos de caja presentes en las figuras 5 y 6, confirman y evidencian la diferencia en el nivel de incertidumbre de los dos escenarios, la cual es reflejada en el tamaño de las áreas sombreadas, que mientras para el escenario Status Quo es casi imperceptible, para el escenario de *Waterflooding* manifiesta una alta incertidumbre que ciertamente no es un factor negativo para el proyecto, sino por el contrario la posibilidad de flujos muy superiores a la media del mismo.

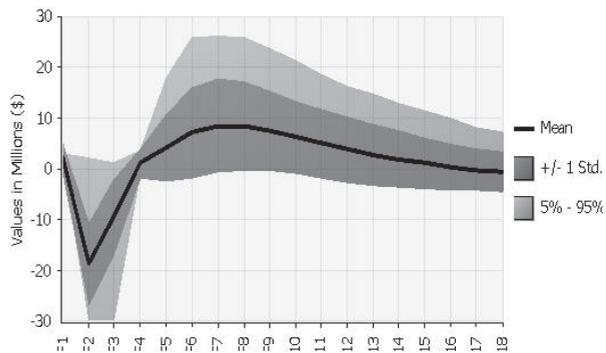


Figura 5. Flujo de Caja Escenario *Waterflooding*

El área sombreada de color gris oscuro, describe el flujo de caja esperado con más o menos una desviación estándar. Por su parte el área sombreada de color gris claro, representa el área para los percentiles 5 al 95. Permitiendo visualizar un abanico de posibilidades y no solo la clásica línea de la media esperada del proyecto.

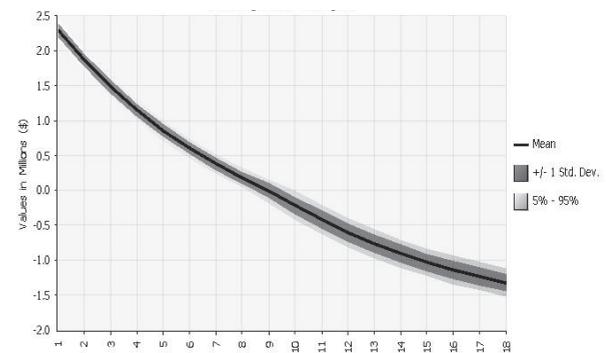


Figura 6. Flujo de Caja Escenario Status Quo

Si bien, es de aclarar que la decisión final sobre si se invierte o no en el proyecto está en manos del evaluador, quien deberá incluir además de los resultados expuesto un conjunto de variables no contempladas en la evaluación. Este análisis permite tener un panorama más amplio del proyecto, justificando gracias a la inclusión de diferentes escenarios los beneficios que podría llegar a generar la implementación del proyecto de inyección de agua.

5. CONCLUSIONES

La implementación de la metodología planteada permitió evidenciar la importancia de realizar una correcta identificación y caracterización de riesgos, ya que permite la definición de un modelo de evaluación financiera gracias a la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos con riesgo potencial, el cálculo de la magnitud de sus efectos y la definición de posibles cursos de acción y mitigación.

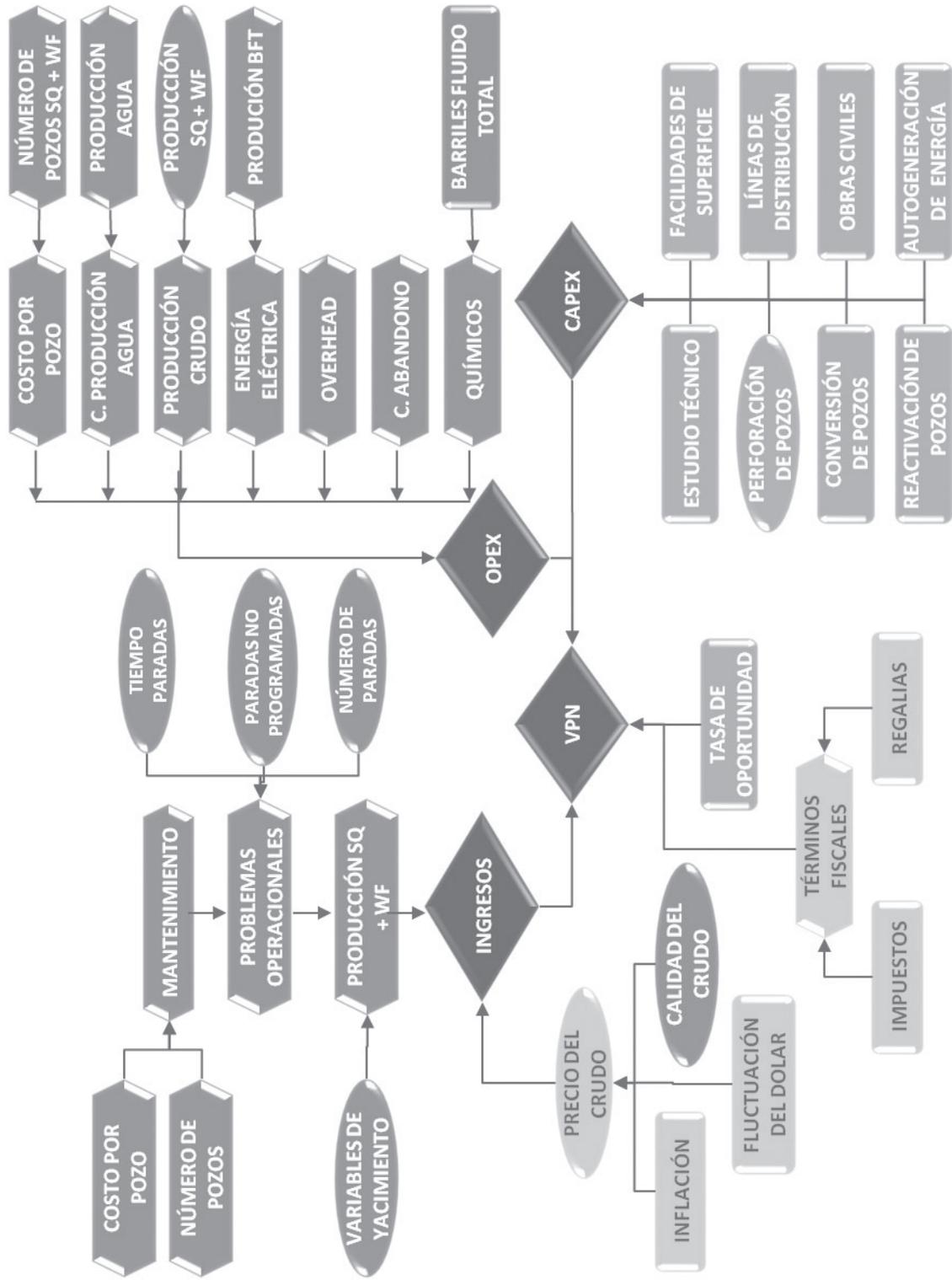
La evaluación probabilística permitió una sencilla toma de decisiones con base en información completa, a diferencia de una evaluación determinística que muy seguramente hubiera descartado la implementación del proyecto de inyección de agua.

Es importante resaltar que la aplicación evaluada corresponde a un proyecto piloto de inyección de agua, que no tiene como objetivo un beneficio económico, sino la adquisición de información y determinación de la viabilidad de su implementación, factores no tangibles que no se pueden calcular en una evaluación de este tipo, por lo que se recomienda como complemento para proyectos piloto, evaluación de prototipos y evaluaciones tempranas, complementar la evaluación con un análisis de opciones reales que permita valorar estos efectos intangibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bravo, O., & Sanchez, M. (2006). *Gestión Integral de Riesgos*. Bogotá - Colombia: Bravo & Sánchez. Segunda Edición.
2. Craig, F., Geffen, T., & Morse, R. (1955). Oil Recovery Performance of Pattern Gas or Water Injection Operations from Model Tests. JPT .
3. Farber, A. (2004). *50 Years of Finance.*, (págs. 2-5). Bruxelles.
4. Guimaraes, M. A. (2003). *Investment in Information in Petroleum, REal Options and Revelation*. Río de Janeiro.
5. Hertz, D. (1964). *Risk Analysis in Capital Budgeting*. Harvard Business Review .
6. ICP-UIIN. (2008). *Estrategias de Desarrollo para los Campos Lisama y Llanito*. Piedecuesta - Colombia: ECOPETROL S.A.
7. Magee, J. (1964). How to Use Decision Trees in Capital investment. Harvard Business Review , 79-96.
8. Myers, S. (1977). Determinants of Corporate Borrowing. Journal of Financial Economics , 147-175.
9. Rubinstein, M. (2002.). “Great Moments in Financial Economics: I. Present Value”. Journal of Investment Managment .
10. Savides, S. (1994). Risk Analysis in Investment Appraisal. Project Appraisal Journal , 3-18.
11. Schiozer, S., & Suslick, J. D. (2004). RISK ANALYSIS APPLIED TO PETROLEUM EXPLORATION AND Production: An Overview. Journal of Petroleum Science and Engineering , 1-9.

APÉNDICE 1. DIAGRAMA DE INFLUENCIA DE UN PROYECTO PILOTO DE INYECCIÓN DE AGUA



APÉNDICE 2. VARIABLES MODELADAS

VARIABLE	DISTRIBUCIÓN	FUENTE	RECOMEDACIONES EXPERTOS
Espesor de Arena (ft)	Lognormal	Históricos	Truncar la distribución en la media. Ya que espesores inferiores no son considerables.
Área (Acres)	Pert	Históricos	Suma de las áreas de los pozos involucrados +/- 10%
Permeabilidad Absoluta (mD)	Pert	Históricos	N.A.
Saturación de Aceite Original (fracción)	Pert	Criterio Expertos	Valor de la media calculado para el Screening, con variación de acuerdo al criterio de los expertos
Porosidad (fracción)	Pert	Históricos	N.A.
Factor de Daño	Pert	Literatura	Se asume el yacimiento en las condiciones iniciales.
Factor de Eficiencia de Recobro (fracción)	Pert	Criterio Expertos	Se toman las eficiencias de recobro utilizadas en simulación analítica.
Presión Estática del Yacimiento (psi)	Pert	Criterio Expertos	Se tomó el valor estimado de presión estática de campo de estudio, y variaciones recomendadas por los expertos
Coefficientes de paradas SQ (%)	Triangular	Histórico y Expertos	Se calculó a partir de las bitácoras de producción del campo de estudio
Coefficientes de paradas SQ (%)	Triangular	Históricos	Estimado de otros campos que ya habían inyectado agua
Variación OPEX (%)	Uniforme	Criterio de expertos	En los casos en que se tiene en cuenta el precio del petróleo, se podría asociar ligeramente su variación a este, con un retraso en el efecto.

Recepción: 19 de Septiembre de 2011

Aceptación: 20 de Diciembre de 2011