

**Evaluación de las Alternativas de Decisión de una Empresa de Exploración Petrolera
sobre la Conveniencia de Contratar un Estudio de Evaluación de Riesgo utilizando un
Modelo de Decisión**

Pablo Felipe Moreno García

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director

Javier Hernández Cáceres

Magister en educación

Universidad Santo Tomas, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Industrial

2021

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Evaluación de las Alternativas de Decisión de una Empresa de Exploración Petrolera sobre la Conveniencia de Contratar un Estudio de Evaluación de Riesgo Utilizando un Modelo de Decisión	11
1.1 Descripción del Problema	11
1.1.1. Formulación del Problema.....	13
1.2. Justificación del Problema	13
1.3. Alcance	14
2. Objetivos	15
2.1. Objetivo General	15
2.2. Objetivos Específicos.....	15
3. Marco de Referencia	16
3.1. Marco Teórico.....	16
3.1.1. Toma de Decisión Bajo Certidumbre	16
3.1.2. Toma de Decisión Bajo Riesgo.....	16
3.1.3. Toma de Decisión Bajo Incertidumbre	17
3.1.4. Consideraciones Previas a la Interpretación de la Regla de Bayes.....	18
3.1.5. Valor de la Experimentación	20
3.1.6. Valor de la Información Perfecta.....	20

3.1.7. Valor Esperado de la Información	20
3.1.8. Criterios para Valorar Decisiones	20
3.1.9. Árbol de Decisión	21
3.1.10. Determinación de los Pagos y Asignación de las Probabilidades.....	22
3.1.11. Juicio de expertos.....	23
3.2. Marco Conceptual.....	25
3.2.1. Riesgo	25
3.2.2. Riesgo ambiental.....	26
3.2.3. Exploración petrolera.....	26
3.2.4. Decisión	26
3.2.5. Nodo.....	26
3.2.6. Incertidumbre	26
3.3. Marco Histórico	27
3.4. Marco Normativo.....	28
3.5. Estado del Arte.....	29
4. Metodología	33
4.1. Tipo de Estudio	33
4.2. Instrumento de Recolección de Información	34
4.3. Fases de la Investigación	34
4.3.1. Fase 1	34

4.3.2. Fase 2	34
4.3.3. Fase 3	35
4.3.4. Fase 4	35
4.3.5. Fase 5	35
5. Análisis e Interpretación de Resultados	35
5.1. Decisiones Tomadas Bajo Incertidumbre	37
5.2. Escenario con Información A priori	40
5.3. Escenario con Información A posteriori	44
5.4. Resultados para Árbol de Decisión con Información A priori	49
5.5. Resultados para Árbol de Decisión con Información A posteriori	51
6. Conclusiones	52
7. Recomendaciones	54
Referencias	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Estructura de una matriz de pagos</i>	23
Tabla 2. <i>Normas aplicables a los riesgos tratados en el estudio</i>	28
Tabla 3. <i>Costos estimados bajo incertidumbre</i>	37
Tabla 4. <i>Matriz de costos en WINQSB</i>	38
Tabla 5. <i>Resultados para criterios bajo incertidumbre</i>	39
Tabla 6. <i>Estados para la ruta de decisión No</i>	40
Tabla 7. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo bajo</i>	41
Tabla 8. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo medio</i>	42
Tabla 9. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico no es de riesgo medio</i>	42
Tabla 10. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo alto</i>	43
Tabla 11. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico no es de riesgo alto</i>	44
Tabla 12. <i>Estados para la ruta de decisión No A posteriori</i>	45
Tabla 13. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo bajo A posteriori</i>	45
Tabla 14. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo medio A posteriori</i>	46

Tabla 15. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico no es de riesgo medio A posteriori</i>	47
Tabla 16. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo alto A posteriori</i>	47
Tabla 17. <i>Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico no es de riesgo alto A posteriori</i>	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Estructura de un árbol de decisión</i>	22
Figura 2. <i>Árbol de decisión para escenario con información A priori</i>	49
Figura 3. <i>Árbol de decisión para escenario con información A posteriori</i>	51

Resumen

En el presente proyecto de grado, se planteó como objetivo evaluar las alternativas a las que se enfrenta una empresa petrolera colombiana en la etapa de exploración, considerando la ruta más óptima en términos de reducción de costos al determinar la conveniencia y pertinencia para tal compañía de contratar o no un estudio de evaluación de riesgos.

Se definieron para la investigación tres tipos de pronósticos los cuales fueron: Pronostico de Riesgo Bajo(RB),Pronostico de Riego Medio(RM),y Pronostico de Riesgo Alto(RA),y a su vez eventos para representar posibles estados de naturaleza dados los pronósticos enunciados lo cuales fueron: Nivel Básico de Contaminación (CB),Nivel Medio de Contaminación (CM),y Nivel Alto de Contaminación (CA).A lo anterior, nodos de decisión como Si contratar estudio de análisis de riesgo y No contratar estudio de análisis de riesgo.

Para el desarrollo, se definieron los siguientes aspectos : principalmente, se concertaron criterios de especialistas con el fin de consolidar valoraciones para probabilidades a priori, condicionales, y montos económicos asociados a cada evento definidos en conjunto con los expertos, luego se simuló el proceso de toma de decisiones utilizando el criterio de Savage bajo condiciones de incertidumbre, y por último, la problemática planteada en el estudio fue configurada en estructuras de árboles de decisión para dos escenarios distintos: el primer escenario con información a priori, y el segundo escenario con información a posteriori. La graficación de cada árbol, fue posible mediante la implementación del software WINQSB para 32Bits.

Los resultados permitieron bajo condiciones de incertidumbre identificar como decisión óptima no contratar al estudio de riesgo, mientras que, de forma a priori a la decisión de hacer el estudio previo de análisis de riesgo y de forma a posteriori validar lo ya identificado a priori.

Palabras Claves: A posteriori, A priori, Árbol, Costo, Decisión, Experto, Probabilidad.

Abstract

In this degree project, the objective was to evaluate the alternatives faced by a Colombian oil company in the exploration stage, considering the most optimal route in terms of cost reduction when determining the convenience and relevance for such a company of contract or not a risk assessment study.

Three types of forecasts were defined for the investigation, which were: Low Risk Forecast (RB), Medium Irrigation Forecast (RM), and High-Risk Forecast (RA), and in turn events to represent possible states of nature given the Forecasts stated which were: Basic Pollution Level (CB), Medium Pollution Level (CM), and High Pollution Level (CA). To the above, decision nodes such as If to hire a risk analysis study and don't hire a study risk analysis.

For the development, the following aspects were defined: mainly, criteria of specialists were agreed in order to consolidate valuations for a priori and conditional probabilities, and economic amounts associated with each event defined in conjunction with the experts, then the process of decision making using the Savage criterion under conditions of uncertainty, and finally, the problem raised in the study was configured in decision tree structures for two different scenarios: the first scenario with a priori information, and the second scenario with information a posteriori. The graphing of each tree was possible through the implementation of the WINQSB software for 32Bits.

The results allowed under conditions of uncertainty to identify as an optimal decision not to hire the risk study, while, a priori to the decision to carry out the prior study of risk analysis and subsequently to validate what was already identified a priori.

Keywords: A posteriori, A priori, Tree, Cost, Decision, Expert, Probability.

Introducción

El análisis de decisión en la industria del petróleo, se ha convertido en un proceso que proporciona un fundamento cuantitativo a los profesionales cuyo perfil laboral está orientado a la toma de decisiones. Tal proceso, presenta algunos puntos críticos en los cuales se requiere tener en cuenta aspectos como: interpretación de resultados y comunicación de hallazgos [1].

Los gerentes de producción que en la mayoría de las veces son quienes dirigen proyectos de exploración de petróleo en la industria, requieren de tener a su disposición metodologías y herramientas de trabajo para poder simular de la mejor manera el escenario en el que se desarrolla el proyecto que lidera.

Debido a que cada nodo de la problemática, en el presente caso la exploración petrolera, representa un posible evento con atributos de probabilidad y costos, de gran importancia, el proceso de decidir qué hacer ante la oportunidad de explorar nuevas reservas de hidrocarburo se vuelve complejo por las variables que rodean el contexto, en otras palabras, por el nivel de contaminación producido tanto al ambiente como a las personas que habitan cerca del territorio intervenido.

Para dar respuesta a los objetivos de la investigación, y a la formulación del problema en esta investigación se utilizó el criterio experto de especialistas en la industria, la implementación de herramientas como el software WINQSB, y la aplicación de un método analítico que permitió esquematizar las alternativas que una empresa petrolera de la industria colombiana enfrenta en la etapa de exploración cuando evalúa si es pertinente y viable realizar estudios de análisis de riesgos por contaminación en la zona afectada por sus operaciones, facilitando todo lo anterior la identificación y selección de la mejor alternativa o alternativa óptima dentro de múltiples opciones. Tal método analítico, se conoce por su representación gráfica como árbol de decisión.

1. Evaluación de las Alternativas de Decisión de una Empresa de Exploración Petrolera sobre la Conveniencia de Contratar un Estudio de Evaluación de Riesgo Utilizando un Modelo de Decisión

1.1 Descripción del Problema

En proyectos dirigidos hacia la exploración de petróleo, tanto el riesgo como la incertidumbre resultan ser factores importantes a tener en cuenta. El riesgo, contempla supuestos utilizados que permiten estimar la rentabilidad o pérdida mediante variables que buscan cuantificarla, y las mismas, se basan en la probabilidad de ocurrencia de aquello que se pretende pronosticar. En cuanto a la incertidumbre se trata, es un conjunto de posibles sucesos que pueden darse a futuro, a los cuales no se les puede dar una probabilidad de ocurrencia [1].

En actividades de la industria petrolera, como lo es la exploración de hidrocarburos, la gestión del riesgo requiere tener una visión clara que permita detectar aquellos estados de naturaleza que representen posibles eventos de pérdidas o ganancias para la empresa objeto de estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, la identificación, clasificación, y cuantificación de los posibles eventos de ocurrencia que rodean la exploración de petróleo en empresas de la industria, constituyen objetivos de gran alcance donde mitigar el riesgo e implementar de forma apropiada un proceso de toma de decisión, vienen a ser criterios a considerar para evitar inestabilidades de entorno a lo largo del periodo de operación de la empresa [1].

Actualmente, entre las evidencias está: trabajos de exploración de hidrocarburos sin examinar alternativas que puedan generar ganancias o alertar sobre pérdidas. Ejemplo de lo anterior es: la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol), que se encuentra expuesta inicialmente a riesgos antrópicos tales como: sabotaje y terrorismo en actividades como la

exploración, donde debido a daños en la estructura se afecta el ambiente, lo cual se refleja en costos asociados a reparación y daños en el suelo [2].

Si bien es cierto que existen numerosas y robustas herramientas para la evaluación de los riesgos relacionados, estas no se utilizan de tal manera que se aproveche todo el potencial que pueden llegar a tener. Incluso, hay grandes compañías que en este aspecto se basan en la intuición y experiencia, no en recurrir a la ciencia a la hora de evaluar riesgos de todo tipo, los cuales pueden tener gran incidencia en como decidir sobre la disposición de sus paquetes de inversión hacia un determinado proyecto [2].

La problemática a tratar en términos de la solución planteada se caracteriza por: ser un contexto lleno de variables cuantificables en términos de probabilidades para cada posible evento de ocurrencia que al final representa un estado de naturaleza que puede resultar en ganancia o pérdida para la empresa.

Actualmente en Colombia, una gran polémica que enmarca el tema a tratar, es el fracking o fracturamiento del subsuelo. Esto constituye un escenario que viven las compañías petroleras y que, en caso de incumplir reglas ambientales, se someten a enfrentar demandas de gran impacto económico [3].

En el presente proyecto se identificó la oportunidad de estructurar la problemática utilizando configuraciones de árboles de decisión que una vez fueron evaluado, servirían como herramientas de soporte para generar recomendaciones a la compañía sobre las mejores alternativas a elegir antes de iniciar operaciones en posibles campos con hallazgos de hidrocarburo [4].

1.1. Formulación del Problema

¿Cuál ha de ser la alternativa más óptima para una empresa petrolera colombiana que le permita minimizar costos asociados a eventos originados por actividades operativas relacionadas a la fase de exploración considerando la posibilidad de contratar un estudio de análisis de riesgos ambientales?

1.2. Justificación del Problema

Evaluar de forma previa y adecuada los riesgos asociados a la exploración de petróleo en una empresa colombiana, representa una manera de gestión responsable de los recursos al momento de efectuar operaciones en los campos petrolíferos, ya que, de no tenerse en cuenta los posibles eventos de ocurrencia ya sea de ganancias o pérdidas, son serias las repercusiones económicas que puede tener la empresa objeto de estudio cuyo alcance es la exploración de crudo.

Sea cual sea su localización, no se puede omitir que existen factores que influyen de gran manera en el relacionamiento de la empresa operadora con las partes externas o Stakeholders, sin embargo, uno de los conflictos más destacados a raíz de tales acciones son los de tipo ambiental.

Es por esto, que evaluar las alternativas asociadas a los riesgos mencionados de forma técnica mediante la aplicación de teoría de la decisión, permitirá conocer sobre condiciones inciertas de una forma más precisa acerca de la realidad del problema, que basarse en la propia experiencia o intuición.

Un árbol de decisión constituye una herramienta importante al momento de estructurar problemas que implican riesgos, por lo que, optimizar el proceso de llevar a cabo o no, un estudio de evaluación de alternativas en cuanto a riesgos ambientales; permite visualizar de mejor forma, todo un desglose de posibles eventualidades que pueden tener un impacto negativo en las

ganancias de la empresa petrolera participante en el estudio, y de igual manera, permite revisar cuales riesgos tienen menor probabilidad de ocurrencia con el fin de mantenerlos en ese nivel probabilístico, buscando siempre optimizar los ingresos sin verse estos afectados por incurrir en faltas de tipo normativo en lo relacionados con lo ambiental.

Todos los posibles eventos condicionados por los factores referenciados anteriormente, permiten determinar el valor esperado de cada resultado obtenido a partir de la evaluación de alternativas [2].

Otro aspecto por el cual se llevó a cabo un proyecto como este, es lo relacionado con la toma de decisión en el tiempo; es decir, cuando tomar la decisión. El contexto puede ser cambiante, por lo que no tener una tipificación y evaluación de riesgos asociados a tales operaciones de campo, puede imposibilitar al momento de la variación dada, estimar en cuanto puede ascender la perdida por posibles sucesos, o la ganancia si los de mayor probabilidad de ocurrencia son identificados y tratados de la mejor manera antes de presentarse cualquier cambio del entorno.

Los resultados obtenidos en este trabajo de grado permitieron dejar planteado a a los tomadores de decisiones en la empresa petrolera del caso estudiado, una herramienta gráfica que les ayudará a observar de forma clara y estructurada, todas las posibles consecuencias de elegir una alternativa en vez de otra a la hora de analizar los estados de naturaleza que rodean la actividad de exploración.

1.3.Alcance

Considerar las alternativas de decisión sobre la conveniencia para una empresa de exploración petrolera en cuanto a contratar o no, un estudio de evaluación de riesgos ambientales, fue visto como una aplicación de gran utilidad ya que, lo que se buscaba era obtener de manera

más precisa una aproximación económica de posibles eventos causantes de pérdidas que pudieran disminuir las utilidades de la compañía.

Es por ello, que el alcance al que se planteó en el momento de estudio era llegar era, la de primeramente determinar si convenía o no, contratar un estudio de evaluación de riesgos ambientales, y posteriormente el de hacer recomendaciones sobre el proceso de toma de decisiones para de tal manera, seleccionar aquella alternativa con la menor pérdida esperada.

Con lo ya descrito, se buscó estructurar de forma gráfica y lógica, mediante un árbol de decisión, todos los posibles eventos que pudieran llegar a influir de forma probabilística en la generación de pérdidas en la empresa objeto de estudio.

2.Objetivos

2.1.Objetivo General

Evaluar las alternativas de decisión a las que se enfrenta una empresa petrolera colombiana en la etapa de exploración, considerando la conveniencia y pertinencia en términos de ganancias o pérdidas de contratar un estudio de evaluación del riesgo ambiental, por medio de un árbol de decisión.

2.2.Objetivos Específicos

- Describir el contexto de desarrollo del caso a estudiar, y las principales variables que en términos de probabilidades y valoraciones económicas representen estados de ganancia o pérdida, a través de juicios de expertos y búsqueda sistemática de la información.

- Evaluar las alternativas de decisión identificadas, y adaptarlas al perfil de la empresa de exploración petrolera objeto de estudio, con base a un criterio de decisión bajo incertidumbre.
- Estructurar la problemática planteada de manera gráfica por medio de un árbol de decisión, para obtener una valoración de las alternativas analizadas, utilizando el método de la esperanza matemática.

3.Marco de Referencia

3.1.Marco Teórico

El análisis de decisión, ofrece un marco conceptual y metodológico para llevar a cabo de forma adecuada un proceso de toma de decisiones [5].

De otra manera, el análisis de decisiones se usa como un proceso racional para seleccionar de todas las alternativas, la más óptima. Por lo que la bondad de una alternativa seleccionada, depende de la calidad de los datos que se utilicen para describir el caso de decisión [6].

Un proceso de toma de decisión puede ser de tres tipos:

3.1.1.Toma de Decisión Bajo Certidumbre

Proceso en el que los datos se conocen de forma determinística. Todas las funciones están bien definidas [6].

3.1.2.Toma de Decisión Bajo Riesgo

Proceso que se puede describir con distribuciones de probabilidades. El proceso de toma de decisión bajo riesgo, suele basarse en el criterio del valor esperado en el que se comparan

alternativas de decisión con base en la maximización de la utilidad esperada, o la minimización del costo esperado.

No obstante, como el modelo tiene sus limitaciones se modifica el criterio del valor esperado.

Lo anterior, se hace para enfrentar otro tipo de situaciones [6].

3.1.3. Toma de Decisión Bajo Incertidumbre

En este proceso a los datos no se les puede asignar peso, o factores de ponderación que permitan representar la importancia de los mismos en el modelo de decisión. La toma de decisión bajo incertidumbre, así como en bajo riesgo, implica acciones alternativas, cuyas retribuciones van a depender de los estados de naturaleza que son de carácter aleatorio [6].

La diferencia por inclinarse hacia uno u otro modelo, radica en que el caso de incertidumbre, la distribución de probabilidades, correspondiente a los estados s_j , $j:1,2,\dots, n$ se desconoce o no se puede determinar de forma precisa. Por lo que surgen entonces los siguientes criterios para analizar los diferentes problemas de decisión.

3.1.3.1. Criterio de Laplace. Se basa en el principio de la razón insuficiente, como se desconocen las distribuciones de probabilidades de los estados de naturaleza $P\{s_j\}$, no hay razón para creer que son distinta [6].

3.1.3.2.Criterio Maximín. Este criterio se basa en la actitud de siempre elegir la mejor entre las peores condiciones posibles. Si $v(a_i, s_j)$ es una pérdida, se selecciona la acción que corresponda al criterio minimax. $\min_{a_i} \{ \max_{s_j} v(a_i, s_j) \}$ [6].

3.1.3.3.Criterio de Arrepentimiento de Savage. Este criterio busca modelar el conservadurismo del criterio anterior, reemplazando la matriz de retribución (ganancia o pérdida), por una matriz de pérdida o pesadumbre [6].

$$r(a_i, s_j) = \{v(a_i, s_j) - \min_{a_k} \{a_k, s_j\} \text{ si } v \text{ es pérdida}\}$$

$$\max_{a_k} \{a_k, s_j\} - v(a_i, s_j) \text{ si } v \text{ es ganancia}$$

3.1.3.4.Criterio de Hurwicz. Este criterio está diseñado para reflejar aquellas actitudes de toma de decisiones que oscilen entre la más optimista y la más pesimista [6].

Tal oscilación se define así: $0 \leq \alpha \leq 1$.

Siendo α , el parámetro que representa el índice de optimismo. Si es 0 es una decisión conservadora, de lo contrario si es 1, es optimista. Una decisión adecuada es de 0.5. [6].

3.1.4.Consideraciones Previas a la Interpretación de la Regla de Bayes

3.1.4.1.Probabilidad Condicional. Es un tipo de probabilidad que permite modificar la creencia que se tiene acerca de la realización de un experimento aleatorio [7].

Para dos eventos A y B, donde $P(B) > 0$, se define la probabilidad condicional de A dado B, como:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \text{ [8].}$$

3.1.4.2.Eventos. Subconjuntos del espacio muestral Ω asociados a un experimento ϵ [7].

3.1.4.3.Eventos Mutuamente Excluyentes. Dados dos sucesos A y B, se dice que ambos son mutuamente excluyentes, sino pueden tener lugar su ocurrencia de manera simultánea, lo anterior se denota: $A \cap B = \emptyset$.

si el evento A es nulo, $A = \emptyset$, se tiene que $P(A) = P(\emptyset) = 0$.

sean $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ sucesos mutuamente excluyentes ($A_i \cap A_j = \emptyset$ si $i \neq j$) por lo que se tiene que: $P(\bigcup_{i=1}^n A_i) = \sum_{i=1}^n P(A_i)$ [7].

sean A y A^c eventos complementarios, $A \cup A^c = \Omega$, es decir la unión de dos eventos complementarios es la equivalencia con el espacio muestral, se tiene que $P(A) + P(A^c) = 1$ para todo evento A en Ω .

sea $(A \cup B)$, el evento definido como que ocurra A u ocurre B, se tiene que $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ [7].

3.1.4.4. Regla de Decisión de Bayes. Si puede realizarse un experimento imperfecto que proporcione información sobre el verdadero estado de naturaleza, entonces los datos de este experimento pueden combinarse con las probabilidades iniciales de los diversos estados, para dar una distribución probabilística actualiza.

Para ello se suele utilizar la regla de Bayes, la cual queda definida por:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)} \quad [8].$$

3.1.5. Valor de la Experimentación

Es necesario que antes de realizar cualquier experimento, se determine su valor potencial. Por lo que existen dos métodos complementarios para evaluar tal valor potencial [5].

3.1.6. Valor de la Información Perfecta

Este valor, supone de forma poco realista que la experimentación eliminará toda incertidumbre sobre cuál es el estado de naturaleza verdadero, haciendo un cálculo sobre cuál sería la mejora en el pago esperado [5].

3.1.7. Valor Esperado de la Información

En vez de solo obtener una cota superior para el incremento esperado en el pago, debido a que se lleva a cabo la experimentación. Aquí se excluye el costo del experimento para cada valor posible de S [5].

Pago esperado con experimentación = $\sum_s p(S = s)E[pago|S = s]$

3.1.8. Criterios para Valorar Decisiones

3.1.8.1. Criterio del Valor Esperado. Supone que aquella opción elegida en el proceso de toma de decisión es la que mejor pago esperado ofrece, ello implica que si los pagos son beneficios la que mejor beneficio de lo contrario si son costos, la que ofrezca el menor posible.

$$VE(X) = \sum_{i=1}^m X_i * \rho(X_i) \quad [9].$$

3.1.8.2.Criterio de lo más Probable. Tal criterio busca que se elija la alternativa con mejor valor para el estado con mayor probabilidad de favorecer al decisor. Este juicio suele utilizarse cuando el proceso de decisión no es repetitivo [9].

3.1.8.3.Criterio del Escenario Medio. Dado un espacio de estados numéricos, se hace posible establecer un escenario medio y buscar aquella alternativa que resulte ser óptima para tal escenario. Si las consecuencias son proporcionales al estado, el valor del criterio es equivalente al del estado [9].

Así mismo, se conoce otro criterio importante que tiene como característica principal al análisis del riesgo presente en cada evento para un estado de naturaleza dado, y es el siguiente:

3.1.8.4.Criterio del Valor en Riesgo. Esta consideración resulta útil cuando el conjunto de estados de naturaleza, es continuo o al menos tiene un número de posibles escenarios muy elevados [9].

3.1.9.Árbol de Decisión

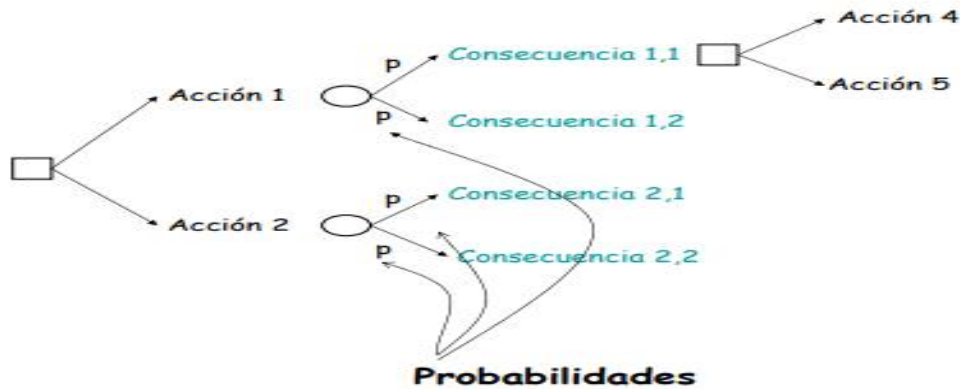
El árbol de decisión es una de las herramientas más eficaces en los modelos de teoría de la decisión. En términos cortos, una gráfica del problema que tiene el decisor en sus manos. Las características que tiene un árbol de decisión, principalmente son las bifurcaciones(nodos), y las ramas(arcos) [10].

En cada nodo se puede designar una selección de acciones, o puede establecerse un grupo de resultados inciertos. El primer grupo se conoce como nodo de decisión se representa por un cuadrado, el segundo se llama nodo de incertidumbre, y se representa por un círculo.

Cuando el decisor, se encuentra ante un nodo de decisión, debe elegir entre una de las ramas alternas para cubrirla en un recorrido, y si se encuentra en un nodo de incertidumbre, no tiene dominio sobre cual rama seguir, por lo que su trayectoria queda determinada por eventos aleatorios cuyas probabilidades son las asociadas con las ramas que brotan de este nodo [10].

En la gráfica siguiente, puede observarse la manera de estructurar un árbol de decisión de forma básica. Cabe aclarar, que dependiendo de la problemática analizada la estructura cambiará.

Figura 1. Estructura de un árbol de decisión.



Gráfica adaptada de [11]

3.1.10. Determinación de los Pagos y Asignación de las Probabilidades

Cada alternativa que se elija lleva involucrada un pago o un costo; las ganancias negativas, indican pérdidas. Por su parte las fuentes de las probabilidades, frecuencias observadas, que miden el grado subjetivo de credibilidad de un decisor con respecto de los estados posibles de naturaleza. Tales probabilidades, han sido útiles, en la transmisión de juicios, dentro de una organización donde numerosas personas, contribuyen en la toma de decisiones [10].

Por lo general el tomador de decisiones, tiene alguna información que debe tomar en cuenta para estimar la posibilidad relativa de los estados de naturaleza posibles. Es común traducir este tipo de información en una distribución de probabilidad, al considerar al estado de naturaleza como una variable aleatoria, siendo esta distribución denominada distribución a priori [5].

Con la elaboración de la matriz de pago se consigue analizar un conjunto de alternativas de decisión, y de igual manera se logra evidenciar los resultados correspondientes a todas las combinaciones de éstas con los estados de naturaleza.

Tabla 1. Estructura de una matriz de pagos

		ESTADOS DE NATURALEZA			
		E_1	E_2	...	E_m
ALT.DE DECISION	D_1	X_{11}	X_{12}		X_{1m}
	D_2	X_{21}	X_{22}		X_{2m}
	.				
	D_n	X_{n1}	X_{n2}		X_{nm}

Nota: * Disposición de los elementos de una matriz de pagos.

3.1.11. Juicio de expertos

El juicio de expertos, se trata de una opinión informada de expertos con una trayectoria en el tema a evaluar. Tales aseveraciones, pueden ser: evidencias, juicios o valoraciones. La identificación de personas con capacidad para proporcionar este tipo de juicios forma una parte crítica en el proceso de investigación, la cual debe tener en cuenta los siguientes criterios: (a) experiencia en la realización de juicios y tomas de decisiones basadas en evidencias o experticia,

(b) reputación en la comunidad donde ejerza tal condición, (c) disponibilidad y motivación para participar en el proyecto investigativo, (d) imparcialidad [11].

Pasos para obtener el juicio de expertos.

1. Preparar instrucciones y planillas de recolección de información.
2. Seleccionar a los expertos y entrenarlos en caso de ser necesario.
3. Explicar el contexto a ser analizado.
4. Posibilitar la discusión.
5. Establecer el acuerdo entre los expertos por medio del cálculo de consistencia.
6. Consideraciones a tener en cuenta para aplicar juicio de expertos.

3.1.11.1.Consideraciones a tener en cuenta para aplicar juicio de expertos.

3.1.11.1.1.Definir el Objetivo del Juicio de Expertos. se hace necesario que el investigador tenga claridad acerca de lo que busca con la opinión experta, ya que la misma puede presentar distintos propósitos [11].

3.1.11.1.2.Selección de Jueces. Se deben de tener en cuenta los criterios mencionados anteriormente, considerando la preparación académica, experiencia y reconocimiento [11].

3.1.11.1.3.Explicitar las Dimensiones de lo que se Pretende Medir o Cuantificar. Tal aspecto, permitirá que el experto pueda evaluar la relevancia, la suficiencia y pertinencia del estudio [11].

3.1.11.1.4. Establecer los Pesos Diferenciales de cada Dimensión. Se aplica este caso, cuando se manejan dimensiones con pesos distintos [11].

3.1.11.1.5. Diseño de Planillas. En este paso, la teoría indica un diseño adaptable a los objetivos de la investigación, esto para que cada dimensión a cuantificar tenga su espacio específico [11].

3.1.11.1.6. Calcular la Concordancia entre Jueces. Para esto se utilizan estadísticos como Kappa y Kendall [11].

Las consideraciones presentadas, son algunas pautas básicas que, al aplicarse de forma objetiva, garantizan un marco metodológico para obtener la información requerida en términos de pertinencia, calidad y objetividad.

3.2. Marco Conceptual

3.2.1. Riesgo

Para efectos del estudio, el término riesgo está asociado con la condición que representa la probabilidad de que un evento se convierta en algo negativo para el contexto analizado. Es decir, cuando se conocen no se conocen las valoraciones previas para caracterizar algún evento, pero es posible asignarle valores de probabilidad ya sea por experiencias dadas, estudios realizados o juicios de expertos [8].

3.2.2.Riesgo ambiental

Un riesgo ambiental es aquella situación o condición que puede conllevar a un daño parcial o total al ambiente [12].

3.2.3.Exploración petrolera

La exploración de petróleo es aquel conjunto de estudios pertinentes, que pretende buscar y localizar posibles depósitos de petróleo existentes en el subsuelo estudiado [14].

3.2.4.Decisión

Para el caso estudiado en este proyecto el termino decisión será considerado como la determinación para actuar ante una amplia gama de alternativas posibles, de tal manera que siempre se intente elegir la más optima [8].

3.2.5.Nodo

Representación gráfica (cuadrado) de un estado de decisión [8].

3.2.6.Incertidumbre

Condición del estado de naturaleza del evento en la que no es posible asignarle probabilidad de ocurrencia a cada resultado que pretenda obtener por las distintas variaciones que pueda tener esta [6].

3.3.Marco Histórico

La evaluación de riesgos en la industria petrolera, ha formado parte de un enfoque tradicional que por años se ha concentrado en disminuir la exposición a estados potenciales de pérdidas que, en el mediano o largo plazo, pueden afectar la operatividad de un proyecto energético.

En este sentido, la tendencia de aplicar la evaluación de alternativas de decisión sobre si es necesario para una compañía, considerar riesgos de gran repercusión antes de poner en marcha cualquier actividad petrolera, ya no apunta a tener que evitar a uno o más tipos de riesgos, sino que ha permitido incorporarlos como una variable importante que pueda ser transformada en ventaja competitiva [15].

El riesgo para quienes han evaluado proyectos petroleros, ha representado un vector que puede tener en el tiempo varias posiciones. Las empresas han estado sujetas a situaciones de riesgo que implican en definitiva sufrir variaciones con respecto a valores iniciales esperados que, a su vez, pueden terminar en pérdidas o ganancias [15].

Un ejemplo clásico en la industria petrolera ha sido la actividad exploratoria, que por muchas décadas ha estado condicionada por factores de riesgo que, en algunos casos, resultan en estados de naturaleza no controlables [15].

Sin duda alguna, llevar a cabo un proyecto de exploración donde existan costos elevados asociados a la ejecución de actividades, debe tener una razón muy fuerte por la cual materializarse.

Bajo este contexto, las empresas se han atrevido a invertir fuertes cantidades de dinero por el retorno de la inversión, y porque, al estudiar riesgos de tipo ambiental, han determinado que existen los espacios, condiciones y normas, que los hacen creer de forma probabilística que las ganancias pueden tener más espacio en el futuro que las pérdidas [15].

En los últimos 50 años con el avance de la tecnología, la industria de exploración de petróleo se ha ido expandiendo en todo el mundo, y con esa extensión han aparecido escenarios asociados a temas como lo ambiental [15].

La evaluación del riesgo asociado a actividades petroleras, ha sido un proceso crucial para la empresa de este ramo a la hora de tomar decisiones orientadas a la realización o no de proyectos de inversión. El uso de árboles de decisión, inicialmente tuvo lugar en ciencias sociales en el año de 1964 y 1979, con estudios realizados en la Universidad de Michigan. Posteriormente, hacia 1980 empezó a utilizarse en el campo estadístico con el propósito de encontrar algoritmos que permitieran resolver problemas de regresión y clasificación, y que esto hasta la actualidad sería de gran importancia para el desarrollo de lo que se conoce como aprendizaje automático [16].

De igual manera en los últimos años, los árboles de decisión han constituido la estructura base para la evaluación tanto económica como de riesgos asociados a cada actividad operativa en la industria petrolera, considerando condiciones de incertidumbre y riesgos. Estas estructuras han permitido hasta entonces definir claramente la decisión que se proyecta abordar, delimitando a cualquier proyecto, en función de su alcance [17].

3.4.Marco Normativo

Tabla 2. Normas aplicables a los riesgos tratados en el estudio.

Norma	Objeto de la Norma	Aporte de la Norma a la Investigación
Ley 99 de 1993	Se reordena el sector público encargado, de la gestión del medio ambiente y los recursos naturales renovable, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, y se dictan otras disposiciones. [18]	En la presente norma, se establecen parámetros a tener en cuenta en la consideración de los riesgos ambientales a causa de la exploración y explotación de hidrocarburos. Se considera de aporte ya que brinda información de cómo se caracterizan tales riesgos.

Norma	Objeto de la Norma	Aporte de la Norma a la Investigación
Ley 1523 de 2012	“Gestión del riesgo, responsabilidad, principios, definiciones y sistema nacional de gestión del riesgo de desastres.” [19]	Permite considerar los diferentes tipos de riesgos, teniendo en cuenta una evaluación de cumplimiento de las empresas operadoras hacia las comunidades cercanas en lo que respecta a desarrollo sostenible y calidad de vida.

Nota: Principales normas para caracterizar riesgos en actividades petroleras.

3.5.Estado del Arte

Este aparte tiene como objetivo, indagar sobre los distintos estudios que se han llevada a cabo con relación a estudios de alternativas basadas en identificación de riesgos y su conveniencia de forma aplicada a proyectos de exploración petrolera, cuyos resultados estén orientados a optimizar el rendimiento de las operaciones expuestas a riesgos de tipo ambiental.

En el artículo “*A Multicriteria Decision Model for Selecting a Portfolio of Oil and Gas Exploration Projects*”, [20] expresan que la aplicación de modelos de decisión con varios criterios y alternativas para evaluar proyectos de exploración de petróleo, inicialmente, deben considerar riesgos en los que la actividad operativa a realizar puede estar expuesta; entre ellos riesgos asociados a problemáticas sociales cercanas a los campos petrolíferos, y riesgos ambientales, estos últimos de gran reconocimiento a nivel mundial.

En el estudio referente, se evidencia que, para la estatal Petrobras, antes de ejecutar actividades de exploración, se identifican primeramente los pozos con mayores reservas estimadas, y a partir de esta clasificación, se identifican factores externos como daños a reservas ambientales, ríos, suelos productivos y afectaciones a comunidades cercanas a los pozos. Otro paso que sirvió

como guía metodológica de la investigación, fue que, según la experiencia encontrada los costos asociados se estiman por reparación de posibles daños al entorno operativo.

Según los autores citados, la gestión de estudios de riesgos previos a la exploración de petróleo y gas en Brasil utilizando arboles de decisión con software de alta capacidad, han logrado optimizar la asignación de recursos con ahorros de hasta 200 millones de dólares en proyectos de hasta 10 años de operación.

De igual manera, [21] en el trabajo “*La Toma de Decisiones en la Industrial del Petróleo y Gas*”, realizan un estudio sobre los métodos que pueden ayudar a quienes toman las decisiones en empresas de la industria, y resaltan que, evaluar la incertidumbre, reducir el riesgo, y escoger soluciones que puedan llevarse a la práctica, son los ejes principales para determinar la dirección de grandes recursos que se demandan para la exploración de petróleo.

En este artículo, se presenta un caso donde a través de árboles de decisiones se estructura la problemática y se establecen las decisiones que se debe tomar en un punto final del análisis. La metodología propuesta indicó que: los nodos de incertidumbre, corresponden a puntos con probabilidades asignadas por expertos quienes cuentan con pericia técnica y conocimiento de la región operada, y cada rama representa una alternativa que puede depender de diferentes factores con combinaciones de probabilidades y estimaciones monetarias.

Como soluciones del caso se obtuvieron: un proceso de análisis de decisiones promovido por factores impulsores de alternativas con mejores rendimientos dentro de un conjunto de opciones, y, en segundo lugar, una herramienta técnica adaptable y capaz de equilibrar el riesgo con el valor esperado.

En la misma línea, [22] en “*Aplicación de Modelos de Decision y Evaluación de Riesgos en Exploración, Perforación y Explotación de Petróleo*” expresan que los árboles de decisión han

sido una de las herramientas más utilizadas en la industria petrolera, y vista como un componente importante si lo que se pretende es tomar decisiones de manera explícita. En la práctica, los árboles de decisión suelen modelar comportamientos continuos con distribuciones discretas, y sus resultados pueden ser evaluados aplicando análisis de sensibilidad.

En el trabajo citado, se evidenció un caso para evaluar alternativas acerca de la exploración petrolera en un campo de la empresa Ecopetrol en los llanos orientales colombianos. De la metodología expuesta, se logró corroborar unas probabilidades o valoraciones de los eventos considerados a partir de personas dueñas de los procedimientos en el manejo ambiental, en el que se desarrolló una exploración petrolera, y en cuanto a lo ambiental, se tuvieron en cuenta características de la zona y a partir de allí se estimaron posibles circunstancias con costos asociados a daños si se incurre en afectación de recursos naturales.

Como resultados, se obtuvo que en caso de elegir la alternativa de estudiar riesgos ambientales y a partir de allí trazar directrices orientadas a ejecutar de manera segura operaciones de exploración, el valor esperado sería de 0.98 millones de dólares.

El criterio de expertos resulta útil cuando se evalúan proyectos tipo exploración de hidrocarburos, esto porque generalmente son quienes, por conocimientos, experiencia, y reconocimiento conocen el impacto en términos económicos, y en términos de probabilidad de ocurrencia. En “*Evaluación de las Estrategias Utilizadas por las Industrias Petroleras (Ecopetrol-Pacific Rubiales Energy) en la Resolución de Conflictos Socioambientales. Estudio de Caso del Municipio de Granada Meta. periodo 2014-2018*”, [23] utilizó una metodología en la que por probabilidades subjetivas de expertos en el Departamento del Meta, evaluó condiciones propias del contexto de operación donde a partir de árboles de decisión alimentados desde una matriz de pago pudo pronosticar un valor de pérdida de \$2.500 millones de pesos por solo afectar caudales

cercanos y poblaciones vecinas, a partir de lo cual se logró desarrollar e implementar un programa de monitoreo que generara reportes sobre el control de los estados potenciales de pérdida que podrían surgir a raíz del proyecto.

Lo expuesto por, [24] en: “*Los Impactos y el Conflicto Socioambiental por el Fracturamiento Hidráulico: Caso de Estudio en el Municipio de San Martín, Cesar-Colombia*”, dejó ver una clasificación de posibles estados de naturaleza asociados a la exploración petrolera en esta zona del país. Los impactos más predominantes que fueron identificados por expertos cuyas probabilidades cuantifican la ocurrencia en caso de darse, y los valores monetarios asociados a cada nodo del árbol de decisión utilizado representa la ganancia o costo de los resultados a los que se llega si se afectan recursos como: fuentes hídricas, aire, generación de movimientos sísmicos, afectaciones a la salud por el uso de sustancias tóxicas, y cambios en la dinámica social de las poblaciones.

Como productos obtenidos, se consiguió establecer un proceso de toma de decisión basado en la estimación de la incertidumbre y disminución del riesgo, buscando siempre la alternativa más óptima para la compañía.

Las referencias citadas en el desarrollo del estado del arte sirvieron para evidenciar la identificación trabajos investigativos, de donde se pudieron obtener referentes metodológicos y resultados acerca del análisis de alternativas de decisión en el momento previo a ejecutar actividades de exploración de petróleo, evaluando resultados con aplicación de estudios de riesgos, y sin aplicación de estudios de riesgos.

4. Metodología

4.1. Tipo de Estudio

El tipo de estudio de la investigación planteada, consistió en un estudio de caso.

La unidad de análisis fue una empresa del sector petrolero colombiano en la que se le evaluó si resultaba conveniente o no, contratar un estudio de evaluación de riesgos asociados a factores ambientales causados por el desarrollo de sus operaciones en lo que respecta a exploración de hidrocarburos. Las fuentes principales que se utilizaron en el estudio de caso, fueron: personas directamente relacionadas con la actividad de exploración de petróleo que figuraron como expertos proporcionando probabilidades subjetivas, y de igual manera, se utilizaron documentos de experiencias ya realizadas que contengan información sobre el caso [25].

Cabe mencionar que en una investigación como la que se planteó realizar en este trabajo de grado, las técnicas más utilizadas para llevar a cabo el estudio de caso pueden ser: observaciones estructuradas, entrevistas, los diarios, documentos científicos, entre otros [25].

Para el caso estudiado, se realizaron entrevistas semiestructuradas a expertos para conocer de primera mano los costos asociados por incurrir en faltas de tipo ambiental, y así mismo, las probabilidades de ocurrencia para cada estado de naturaleza que pudieran condicionar a la empresa objeto de estudio durante sus actividades diarias de exploración.

De otro modo, es preciso destacar que la tesis no fue de tipo experimental, es decir, las variables analizadas no se utilizaron para un escenario distinto en el que se propusieron a ser estudiadas [26].

4.2. Instrumento de Recolección de Información

La información requerida para determinar las probabilidades de los nodos de decisión, y valoraciones monetarias de los posibles eventos de ocurrencias que representarán los estados de naturaleza a los que se expone la empresa petrolera al ejecutar actividades de exploración, fue recolectada mediante entrevistas semiestructuradas a expertos que han laborado en la Empresa Colombiana de petróleoos ECOPETROL (ICP), los cuales proporcionaron probabilidades subjetivas a partir de su experiencia y reconocimiento en la industria.

4.3. Fases de la Investigación

4.3.1. Fase 1

Primeramente, se realizó una búsqueda sistemática de aquellos estados de naturaleza de tipo ambiental asociados a actividades de exploración de petróleo, los cuales, permitieron obtener información de valor para poder describir la problemática de forma estructurada, así como estudios similares que facilitaron orientar de manera objetiva lo que se pretendía hacer en este trabajo.

4.3.2. Fase 2

Posteriormente, se organizó la información recopilada con el fin de facilitar el planteamiento del modelo de decisión para el caso de estudio propuesto. Una vez realizado lo anterior, se describió el caso determinado y se estructuró por medio del análisis de la problemática.

4.3.3.Fase 3

En la tercera fase, se desarrollaron entrevistas semiestructuradas con expertos en la temática, con el fin de encontrar información primaria que, en términos de rentabilidad o pérdidas, y en términos probabilísticos ayudara a elaborar una matriz de pagos desde la cual se pudo alimentar el árbol de decisión a implementar.

4.3.4.Fase 4

Luego de haber una información clasificada y estructurada, se planteó el modelo de decisión para el caso de estudio que se buscaba analizar. Y seguidamente, se desarrolló tal modelo probabilístico utilizando criterios de decisión bajo incertidumbre y criterio de valor esperado mediante configuraciones de árboles de decisión en los que se pudo visualizar y elegir, la alternativa que resultó óptima para el caso estudiado en base a los resultados del modelo planteado.

4.3.5.Fase 5

Finalmente, considerando los criterios dados por expertos en el tema se determinó la o las mejores alternativas, que permitieron hacer recomendaciones a la compañía objeto de estudio sobre acciones orientadas a la toma de decisiones.

5.Análisis e Interpretación de Resultados

Los resultados que a continuación se presentan, fueron los que permitieron evidenciar los principales hallazgos para el caso de estudio concerniente a la valoración de alternativas de una empresa del sector petrolero colombiano ante eventos importantes para decidir si resulta

conveniente contratar o no, un estudio de análisis de riesgo de tipo ambiental antes de iniciar actividades operativas relacionadas a la exploración de hidrocarburo.

De manera previa, se tuvo en cuenta evaluar el proceso de toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre donde por su naturaleza, en este proceso a los datos no se les puede asignar peso, o factores de ponderación que permitieran representar la importancia de los mismos en el modelo de decisión.

Para lo anterior, se buscó una solución en la que fuera posible incorporar estimaciones probabilísticas adicionales de los eventos que facilitarían mediante el valor esperado identificar la mejor alternativa, para ello, se utilizó configuraciones de árboles de decisión para un escenario con información a priori y para otro escenario con información a posteriori.

Se consideraron como datos para estructurar la problemática a los juicios de expertos con conocimientos en el sector, los cuales a su vez indicaron valoraciones para el estudio en términos de probabilidades a priori y condicionales. De igual manera, los especialistas proporcionaron los impactos económicos para la empresa en términos de costos, tanto para el caso de decidir contratar el estudio previo a las operaciones como en el caso contrario a tal evento.

Cabe mencionar que se establecieron tres niveles de contaminación por exploración petrolera para el caso de estudio. Estos fueron: Nivel Básico de Contaminación (CB): aquella contaminación que por causas de actividades relacionadas con la exploración de petróleo no tienen la potencialidad de alterar fuentes hidrográficas, fauna, flora, y comunidades cercanas a los campos petroleros; Nivel Medio de Contaminación (CM): tipo de contaminación que por el nivel de avance de las actividades y procesos de exploración de petróleo hacen posible la alteración considerable de fuentes hídricas, fauna, flora y la forma de vivir de las comunidades cercanas al punto de extracción del hidrocarburo; Nivel Alto de Contaminación (CA): este tipo de contaminación puede

percibirse de forma absoluta puesto que, los daños causados al hábitat de especies tanto de animales como de vegetales, llegan a ser irreversibles o en la mayoría de las veces constituyen casos complejos para su restauración, y en cuanto al aspecto social compromete tanto la salud como economía de las personas cuyas forma de subsistir radica en actividades relacionadas al campo cercano al pozo o pozos donde se llevan a cabo procesos de exploración de petróleo.

5.1.Decisiones Tomadas Bajo Incertidumbre

Consultando a los expertos de manera inicial sobre los posibles impactos económicos en términos de costos que podría tener la empresa objeto de análisis, los mismos indicaron las siguientes alternativas para el contexto estudiado con los siguientes estados de naturaleza:

Tabla 3. *Costos estimados bajo incertidumbre*

Alternativas de Decisión/Estados de Naturaleza	Nivel de contaminación básico	Nivel de contaminación medio	Nivel de contaminación alto
No contratar estudio de análisis de riesgos	\$0	\$1.000.000.000	\$3.000.000.000
Contratar estudio de análisis de riesgos	\$40.000.000	\$1.540.000.000	\$3.540.000.000

Nota: * Impactos estimados bajo incertidumbre por expertos en caso de niveles básico, medio, y alto de contaminación producido por la compañía petrolera, y ante la decisión de contratar o no la realización del estudio de análisis de riesgos.

Lo establecido en la Tabla 3, indica que, según la experiencia de los especialistas consultados en la industria, y de acuerdo al alcance que tiene la empresa a través de sus proyectos de exploración de petróleo, de no contratarse un estudio previo de análisis de riesgos pudiera darse el evento en que el costo fuera 0, o 40 millones en caso de que se contratara. Lo anterior fue cuantificado en \$0 porque no representa nada para la compañía el no hacer estudio y que el nivel de contaminación fuese básico ya que tal nivel puede que no sea producido por esta o si lo es, es

de fácil mitigación. El valor de 40 millones se estableció por el monto asociado al valor comercial del estudio de riesgos.

En caso de no contratarse la ejecución del estudio de análisis de riesgo y de resultar un nivel de contaminación medio, la compañía ya tendría que considerar costos por alrededor de 1000 millones de pesos, y en caso de que se contrate el desarrollo del estudio de análisis de riesgos la empresa debería considerar costos de aproximadamente 1540 millones de pesos, contemplando la realización del estudio con valor comercial de 40 millones, 500 millones por mejora de procesos de exploración para disminuir el nivel de contaminación y 1000 para hacer frente al nivel de contaminación descubierto.

De no contratarse y resultar un nivel medio de contaminación según los expertos los costos podrían incrementarse por lo que cuando se quisiera tomar medidas correctivas al respecto posiblemente los costos representarían dos veces de lo considerado en la opción de contratarse.

Para el nivel de contaminación alto, la interpretación de las alternativas y estados de decisión siguen la misma dinámica.

Tabla 4. *Matriz de costos en WINQSB*

Decision/State	State 1	State 2	State 3
Prior Probability			
Alternative 1	0	-1000	-3000
Alternative 2	-40	-1540	-3540

En la Tabla 4, se observa que para que el software WINQSB fuera consecuente con lo que se requería, es decir tratar costos y no ganancias para poder elegir de forma objetiva la alternativa bajo el criterio seleccionado, tales estimaciones fueron ingresadas con signo (-).

En la Tabla 5, se puede observar los resultados para los distintos criterios de decisión bajo incertidumbre a partir del análisis de la matriz de costos proporcionada por los expertos.

Tabla 5. Resultados para criterios bajo incertidumbre

	Maximin Value	Minimax Value	Hurwicz(p=0.5) Value	Minimax Regret Value	Equal Likelihood Value	Expect Vale
Alternative 1	(\$3,000) **	0**	(\$1,500) **	0**	(\$1,333.33) **	0**
Alternative 2	(\$3,540)	(\$40)	(\$1,790)	\$540	(\$1,706.67)	\$373.33

Considerando los criterios de decisión bajo incertidumbre establecidos en el marco teórico de la investigación, se seleccionó para el desarrollo de la misma al criterio de *Pesadumbre o arrepentimiento de Savage*, esto porque su enfoque permitió moderar al criterio Minimax (Maximin) [7].

Lo anterior significa que el criterio de Savage a partir de una matriz de pesadumbre elige a la más óptima como aquella donde la pérdida sea la menor entre las demás pérdidas, para el caso de estudio planteado en la investigación la alternativa que representara el menor costo posible.

Con base a los resultados obtenidos en la Tabla 5, y de acuerdo al Minimax Regret Value la decisión 1 representa la alternativa más óptima para la empresa petrolera. Es decir, desde el punto de vista de la incertidumbre resultó más conveniente no contratar el estudio de análisis de riesgos.

5.2. Escenario con Información A priori

Para el análisis del primer escenario, se determinó en conjunto con los expertos definir los siguientes estados de acuerdo a las decisiones principales para la empresa, las cuales fueron para el caso de estudio: si contratar el estudio de riesgos, y no contratar el estudio de riesgos.

Para el caso de que la empresa no decida contratar la realización del estudio previo de análisis de riesgos, se establecieron los siguientes estados de naturaleza con sus respectivas probabilidades y costos dados en millones de pesos colombianos.

En la Tabla 3, se puede detallar los diferentes estados determinados en conjunto con los expertos de acuerdo al contexto analizado para la empresa. En dicha tabulación, de igual manera pueden observarse valores de probabilidades proporcionadas por los especialistas, así como costos en los que podría incurrir la empresa dado que suceda tal evento.

Tabla 6. Estados para la ruta de decisión No

No Contratar Estudio		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.4	0
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.5	1000
Nivel Alto de Contaminación (CA)	0.1	3000

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de no hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado.

La Tabla de pagos 6 fue estructurada para interpretarse de la siguiente manera: en el caso de que la empresa objeto de estudio no decidiera contratar un estudio previo a la exploración de petróleo, y en el marco en que se dé un nivel básico de contaminación (CB) con probabilidad del 40%, el costo que tendría que pagar la compañía fue establecido en \$0. En los eventos de niveles medios y altos de contaminación, con probabilidades del 50% y 10% respectivamente, los costos

asociados para el nivel medio es 1000 millones, mientras que para el nivel alto es de 3000 millones de pesos colombianos.

Para el caso en que la empresa decida contratar la realización del estudio previo de análisis de riesgos con costo de \$40.000.000, se determinaron los siguientes estados de naturaleza con sus respectivas probabilidades y costos dados en millones de pesos colombianos

En la Tabla 7, puede constatarse los estados de naturaleza para el caso en que se decidiera hacer estudio incluyendo valores de probabilidad y costos para cada evento.

Tabla 7. Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo bajo

Pronóstico de Riesgo Bajo (RB)		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.7	0
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.3	1000

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado para pronóstico de riesgo bajo.

Para la Tabla de pago 7, la interpretación debe obedecer a lo siguiente: una vez la empresa petrolera decide hacer estudio de análisis de riesgo y existe un pronóstico de riesgo bajo (RB), de tal pronóstico a su vez puede explorarse las posibilidades de que, el nivel de contaminación sea básico (CB) con una probabilidad del 70% y un costo de \$0, y la posibilidad de que se pudiera dar un nivel medio de contaminación con probabilidad del 30% y un costo de 1000 millones de pesos colombianos.

En la Tabla 8, se encuentran los estados de naturaleza para el contexto en que, la empresa decidiera contratar el estudio de análisis de riesgos previo y de resultar pronóstico de riesgo medio (RM) la compañía podría considerar una inversión de 500 millones de pesos para mejorar sus procesos de exploración, reduciendo los niveles de contaminación.

Tabla 8. *Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo medio*

Con Pronóstico de Riesgo Medio (RM)-\$500.000.000		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.55	0
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.45	1000

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado para pronóstico de riesgo bajo.

Los parámetros establecidos en la Tabla 8, significaron lo siguiente: dada la decisión de realizar el estudio previo de análisis de riesgos en la empresa, el nivel básico de contaminación que podía existir al 55% de probabilidad de ocurrencia tendría un costo de \$0. Para el caso de un nivel medio de contaminación al 45% de probabilidad de ocurrencia el costo asociado a tal evento es de 1000 millones de pesos.

En la Tabla 9, podrá encontrarse al detalle los estados de naturaleza para la opción de no darse un pronóstico de riesgo medio dada la decisión de que se contrató el estudio para explorar posible evento. Lo anterior incluyó valores para probabilidad y costos asociados.

Tabla 9. *Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico no es de riesgo medio*

Sin Pronóstico de Riesgo Medio (RM)		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.5	0
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.35	1000
Nivel Alto de Contaminación (CA)	0.15	3000

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado sin pronóstico de riesgo medio.

En el caso de contratar el estudio previo de análisis de riesgos en la empresa petrolera, para la opción de no darse un pronóstico de riesgo medio, se consideró en el momento del estudio los siguientes estados de naturaleza con sus respectivas probabilidades y costos asociados: para el nivel de contaminación básico una probabilidad de 0.5 y un costo asociado de 0, para el nivel de contaminación medio una probabilidad de 0.35 y un costo asociado de 1000 millones de pesos, y por último, para el nivel de contaminación alto una probabilidad de 0.15 y un costo asociado de 3000 millones de pesos.

En la Tabla 10, se encuentran los estados de naturaleza para el contexto en que, la empresa decidiera contratar el estudio de análisis de riesgos previo y de resultar pronóstico de riesgo alto (RA) la compañía podría considerar una inversión de 500 millones de pesos para mejorar sus procesos de exploración, reduciendo los niveles de contaminación.

Tabla 10. *Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo alto*

Con Pronóstico de Riesgo Alto (RA) -\$500.000.000		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.45	0
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.55	1000

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado para pronóstico de riesgo alto.

Con base a lo establecido en la Tabla 10, dada la decisión de realizar el estudio previo de análisis de riesgos en la empresa, mientras exista un pronóstico de riesgo alto y una posible inversión de 500 millones para mejorar los procesos de exploración evitando mayores niveles de contaminación, el nivel básico de contaminación que podría existir al 45% de probabilidad de ocurrencia tendría un costo de \$0. Para el caso de un nivel medio de contaminación al 55% de probabilidad de ocurrencia el costo asociado a tal evento es de 1000 millones de pesos.

En la Tabla 11, se encuentran los estados de naturaleza para el contexto en que, la empresa decidiera contratar el estudio de análisis de riesgos previo, y considerar la inexistencia de un pronóstico de riesgo alto (RA).

Tabla 11. *Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico no es de riesgo alto*

Sin Pronóstico de Riesgo Alto (RA)		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.2	0
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.5	1000
Nivel Alto de Contaminación (CA)	0.3	3000

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado para cuando no hay pronóstico de riesgo alto.

Al explorar la opción de no darse un pronóstico de riesgo alto (RA), en conjunto con los criterios dados por expertos se establecieron los siguientes niveles de contaminación como posibles eventos a ocurrir: nivel básico de contaminación (CB) con probabilidad de 0.2 y costo asociado de 0, nivel medio de contaminación (CM) con probabilidad de 0.5 y costo asociado de 1000 millones y nivel alto de contaminación (CA), con probabilidad de 0.3 y costo asociado de 3000 millones.

5.3. Escenario con Información A posteriori

Por estudios que ha realizado la firma evaluadora de riesgo en compañías similares a la descrita, se estimaron probabilidades de sus pronósticos como se detallan en las tablas que a continuación se presentan:

En la Tabla 12, pueden encontrarse los estados de naturaleza definidos para la rama de decisión de no contratar el estudio previo de riesgos aun cuando hay registros de experiencias aplicadas en el sector.

Tabla 12. Estados para la ruta de decisión No A posteriori

No Contratar Estudio		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.3	0
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.5	1000
Nivel Alto de Contaminación (CA)	0.2	3000

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de no hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado. Todo con información A posteriori.

De no contratar el estudio previo conociendo la experiencia que tiene la compañía evaluadora, las probabilidades y costos asociados definidos por los expertos fueron: para un nivel básico de contaminación con una probabilidad de 0.3 el costo asociado fue de 0, para un nivel medio de contaminación con probabilidad de 0.5; la empresa de darse este evento podría incurrir en un costo de 1000 millones, y para un alto nivel de contaminación con una probabilidad de 20%, el costo en asumido se fijó en 3000 millones de pesos.

Para el caso en que la empresa si decidiera contratar la realización del estudio previo de análisis de riesgos, por parte de los especialistas se determinaron los siguientes estados de naturaleza con sus respectivas probabilidades y costos dados en millones de pesos colombianos.

Tabla 13. Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo bajo A posteriori

Pronóstico de Riesgo Bajo (RB)		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.7	40
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.3	1040

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado para pronóstico de riesgo bajo. Todo con información A posteriori.

Partiendo de que, la empresa petrolera decidiera contratar el estudio previo de análisis de riesgos por valor de 40 millones, y de darse un pronóstico de riesgo bajo, las probabilidades y costos asociados a cada evento fueron la cuantificadas en el siguiente orden: bajo un nivel básico de contaminación la probabilidad de ocurrencia fue de 0.7 con un costo asumible por la compañía que podría ser de 40 millones, mientras que para un nivel medio de contaminación al 0.3 de probabilidad de ocurrencia tal estimación monetaria fue tasada en 1040 millones.

En la Tabla 14 puede observarse que, en caso de un pronóstico de riesgo medio la empresa petrolera optaría por realizar una inversión de 500 millones de pesos para mejorar sus procesos de exploración con el fin de disminuir el nivel de contaminación.

Tabla 14. *Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo medio A posteriori*

Con Pronóstico de Riesgo Medio (RM) -\$500.000.000		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.5	540
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.5	1540

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado para pronóstico de riesgo bajo. Todo con información A posteriori.

Los eventos posibles en caso de considerarse un pronóstico de riesgo medio fueron dos: el primero fue un nivel de contaminación básico con probabilidad de 0.5 y costo asociado de 540 millones, y para el segundo, un nivel de contaminación medio con probabilidad de 0.5 pero con una estimación en términos de costo de 1540 millones de pesos.

En la Tabla 15 se establecieron niveles de contaminación como posibles eventos asociados a probabilidades subjetivas y costos asociados proporcionados de igual manera por los especialistas consultados.

Tabla 15. *Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico no es de riesgo medio A posteriori*

Sin Pronóstico de Riesgo Medio (RM)		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.5	40
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.35	1040
Nivel Alto de Contaminación (CA)	0.15	3040

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado sin pronóstico de riesgo medio. Todo con información A posteriori.

Al considerar la opción de no darse un pronóstico de riesgo medio de igual manera fueron considerados los niveles bajo, medio y alto de contaminación con probabilidades de 0.5,0.35 y 0.15 respectivamente. Para cada posible evento de contaminación los costos fueron de 40 millones para el nivel básico,1040 millones para el nivel medio, y de 3040 millones para el nivel alto.

En la Tabla 16 puede observarse los niveles de contaminación en el caso de que, la empresa evaluara la inversión de 500 millones para mejorar sus procesos de exploración, y así mismo, la probabilidad y costo asociado a cada evento.

Tabla 16. *Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico es de riesgo alto A posteriori*

Con Pronóstico de Riesgo Alto (RA) -\$500.000.000		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.2	540
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.8	1540

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado para pronóstico de riesgo alto. Todo con información A posteriori

De acuerdo a la Tabla 16 si el pronóstico de riesgo es alto, la probabilidad de que el nivel de contaminación sea bajo fue de 0,2, la probabilidad de que existiera un nivel de contaminación medio fue de 0,8 y la probabilidad de que el nivel de contaminación sea alto es de 0,0. Los costos asociados para los dos primeros eventos considerados fueron 540 y 1540 millones de pesos respectivamente.

En la Tabla 17 se puede encontrar los niveles de contaminación tomados como eventos para el caso de no darse un pronóstico de riesgo alto, y las probabilidades y costos estimados en conjunto con los expertos.

Tabla 17. *Estados de naturaleza para cuando se contrata estudio y el pronóstico no es de riesgo alto A posteriori*

Sin Pronóstico de Riesgo Alto (RA)		
Estado de Naturaleza	Probabilidad	Costo (Millones) (\$)
Nivel Básico de Contaminación (CB)	0.2	40
Nivel Medio de Contaminación (CM)	0.5	1040
Nivel Alto de Contaminación (CA)	0.3	3040

Nota: * Estados de naturaleza para la decisión de hacer estudio de riesgos previo a la exploración de petróleo. Incluye valores de probabilidad y costos asociados a cada estado para cuando no hay pronóstico de riesgo alto. Todo con información A posteriori.

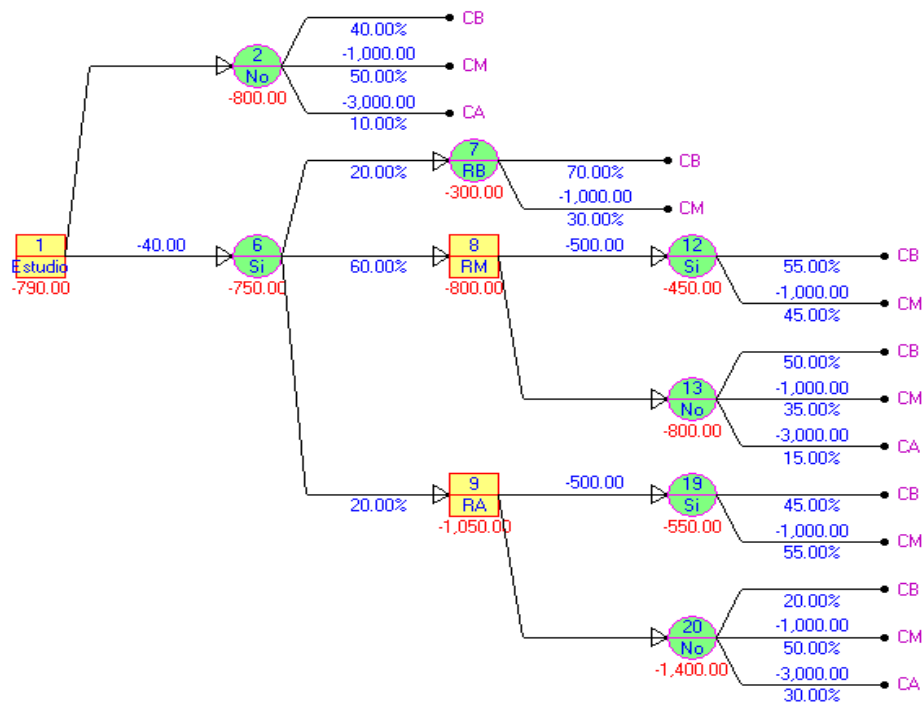
De no darse un pronóstico de riesgo alto, las probabilidades y costos para cada nivel de contaminación fueron determinadas de la siguiente manera: en el evento de existir un nivel de contaminación básico con 0.2 de probabilidad el costo aproximado fue de 40 millones, para el contexto en que se dé un nivel de contaminación media con probabilidad de 0.5 el costo en asumido por la empresa se proyectó en 1040 millones de pesos, y por último, para el nivel de contaminación alto con 0.3 de probabilidad el costo asociado fue de 3040 millones de pesos.

En la Figura 2, se puede observar la estructuración del árbol de decisión utilizando información a priori de acuerdo a las estimaciones dadas por los expertos tanto para los eventos caracterizados como niveles de contaminación como para los nodos decisivos intermedios caracterizados como pronósticos de riesgos.

Los valores con signos negativos hacen referencia a costos por lo que el programa WINWSB los lee como posibles salidas de recurso y no como entrada o ganancia, tal procedimiento se realizó para lograr obtener resultados cuyas interpretaciones fueran coherentes con los objetivos que se establecieron previamente en el proyecto.

5.4.Resultados para Árbol de Decisión con Información A priori

Figura 2.Árbol de decisión para escenario con información A priori



De acuerdo al árbol de decisión con información a priori, y evaluando cual trayectoria dentro de las posibles representa a la alternativa óptima, pudo evidenciarse algunos aspectos importantes. La compañía debe de darle importancia a aquellas acciones que desde su parte

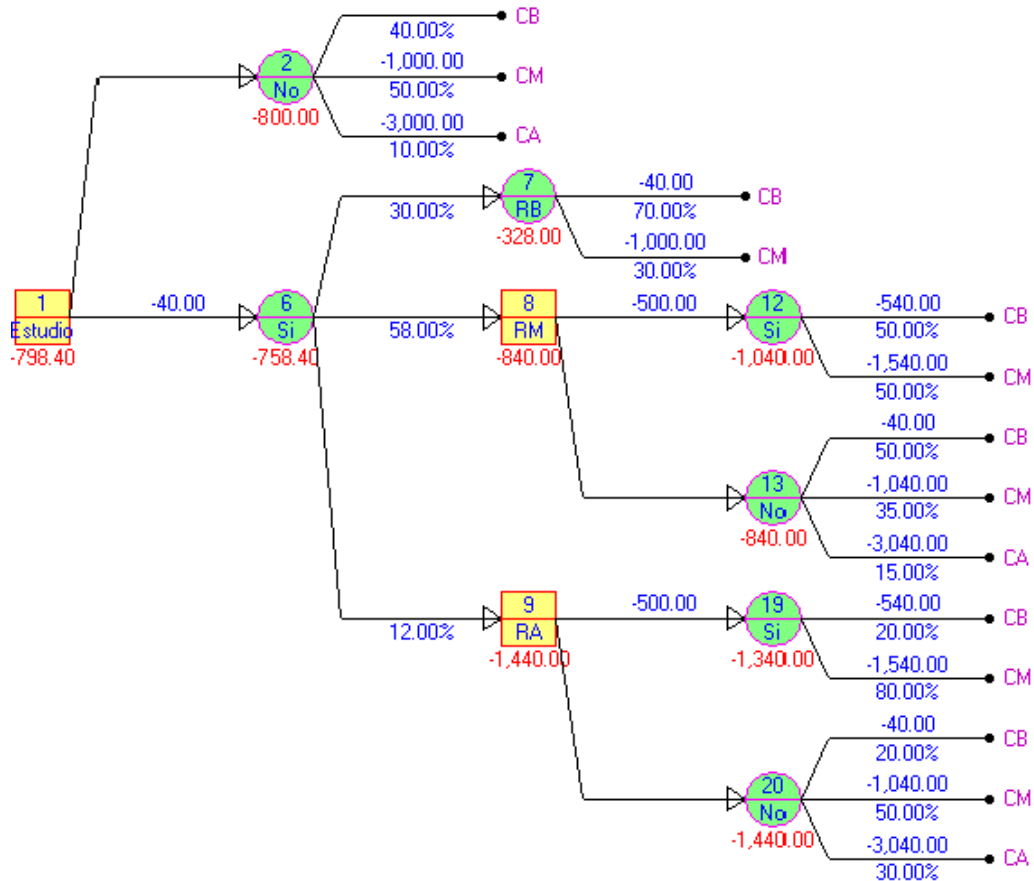
operativa pueden originar pronósticos de tipo medio en los que les haría incurrir en mejoras de procesos exploratorios por el orden de 500 millones, mientras que para pronósticos de tipo alto debería tratar de manejar de mejor manera acciones que puedan originar contaminaciones de tipo medio y alto.

Con base a los nodos finales totales de contratar y no contratar la realización del estudio se puede observar que, a partir de la información proporcionada la decisión más óptima para la empresa en este primer momento es realizar el tal estudio con valores esperados de $VE=-790$ millones frente a no contratar estudio de análisis de riesgos cuyo valor esperado fue de $VE=-800$ millones.

La diferencia de 10 millones con respecto a no hacer el estudio le permitiría explorar de manera segura, ya que de no definir estrategias de manejo de riesgos a partir de un estudio previo podría hacerla incurrir en costos adicionales en caso de surgir niveles de contaminación medio y alto no detectados de alrededor de los 800 millones de pesos.

5.5.Resultados para Árbol de Decisión con Información A posteriori

Figura 3.Árbol de decisión para escenario con información A posteriori



De acuerdo con la política de decisión representada en el árbol; la alternativa óptima es la de contratar el estudio de riesgo, puesto que el VE=-798.40 millones es menor ligeramente que VE=-800 millones en términos de valor absoluto por su naturaleza de costo.

Los expertos indicaron que, es de suma importancia prestarles atención a los niveles de contaminación de tipo medio ya que estos si no se manejan de forma apropiada son eventos muy volátiles para convertirse en eventos de alto impacto.

Adicionalmente, cabe aclarar que, si la decisión resultante estuviera fortalecida desde un pronóstico de riesgo alto, la inversión adicional podría incrementarse y se recomendaría de forma evidente considerar su ejecución.

6.Conclusiones

En el proyecto realizado, se obtuvieron resultados sobre la evaluación de las alternativas afrontadas por una empresa petrolera colombiana en la fase de exploración con base en los procesos de decisión bajo incertidumbre, y con cuantificación probabilística del valor esperado utilizando árboles de decisión.

La metodología utilizada para la obtención de los datos fue la consulta a expertos en materia de exploración e impactos de la industria petrolera en ambiente, este procedimiento de recolección de datos fue la manera más viable en términos de consecución de la información por lo hermético de los sistemas de información de las empresas del sector ya que la mayoría tienen políticas de confidencialidad de sus proyectos muy fuertes que no hacen posible el acceso a datos más reales y exactos.

Las probabilidades subjetivas soportadas en experiencias individuales de los expertos hicieron posible estructurar la problemática utilizando modelos de matrices de pagos donde se pudieron establecer las alternativas de contratar y no contratar al estudio previo de análisis de riesgos con sus respectivos estados de naturalezas que a su vez presentaron valores de impactos económicos en términos de costos para la toma de decisión bajo incertidumbre, y adicionalmente, probabilidades a priori y condicionales para la estimación probabilística en las configuraciones de árboles de decisión para los escenarios con información a priori y con información a posteriori.

Dentro de la industria petrolera colombiana, según expertos consultados, los niveles medios de contaminación con impactos ambientales causados por la ejecución de operaciones exploratorias de petróleo constituyen variables volátiles, que de no ser controladas a tiempo pueden convertirse muy rápido en impactos de alto pronóstico los cuales demandan inversiones adicionales al respecto, para el caso de estudio de aproximadamente 500 millones. Las probabilidades de ocurrencia para los niveles de contaminación de tipo medio en los dos escenarios contemplados estuvieron en un 50%.

El criterio de decisión bajo incertidumbre de Savage se utilizó en el desarrollo del estudio y permitió analizar la matriz de costos construida con cada estimación económica en la que, a partir de este, la decisión óptima resultante fue: Decisión 1 (No contratar estudio) con valor de \$0, frente a la Decisión 2 (Contratar estudio) con valor de 500 millones. El criterio de decisión en mención, no consideró el peso o probabilidad de ocurrencia para cada evento.

Los árboles de decisión como técnica estadística permitieron imprimirle más objetividad al análisis de la problemática estudiada, pues los mismo haciendo uso del criterio del valor esperado facilitaron la combinación de pesos probabilísticos y pesos económicos de eventos tales como lo fueron los niveles de contaminación considerados.

Los hallazgos con base a los árboles de decisión fueron: para el primer escenario o escenario a priori $VE = -\$790.000.000$ de contratar al estudio de análisis de riesgos frente a $VE = -\$800.000.000$ de no contratar la realización del estudio de riesgos. De acuerdo a tales resultados se seleccionó como alternativa óptima hacer el estudio, puesto la diferencia de 10 millones con respecto a no hacerlo representó una ventaja tanto en términos económicos como en términos de seguridad operacional, ya que, de no hacerse el estudio y de darse los eventos la empresa podría incurrir en costos adicionales de alrededor de los 800 millones de pesos.

Para el escenario a posteriori, la política de decisión a partir de los resultados estuvo orientada hacia la decisión de contratar al estudio de riesgos, puesto que su valor esperado de -798.4 millones con respecto a los -800 millones de no hacerlo reconfirmó lo encontrado de forma a priori.

7.Recomendaciones

El análisis de riesgos que son cuantificables actualmente en el sector petrolero, constituye un factor de suma importancia a ser revisado. La no consideración de un nivel de contaminación causado a raíz de actividades de exploración de petróleo puede representar pérdidas o inversiones no contempladas con naturaleza de costo para las empresas del sector.

Partiendo de lo descrito inicialmente, se recomienda a la empresa petrolera de forma previa consolidar una política de decisión con base a estudios técnicos que impliquen el análisis del riesgo en términos probabilísticos utilizando herramientas avanzadas de investigación de operaciones como los árboles de decisión que faciliten a la alta gerencia inmiscuirse de forma activa en el proceso de toma de decisiones y conocer los pro y contras de elegir una alternativa y no otra.

Resulta relevante para cualquier empresa del sector petrolero, fabricar un banco de registros históricos con diferentes contextos en el que se pueda simular de forma continua el comportamiento del entorno en función de las operaciones exploratorias realizadas por la empresa, y conformar un grupo de investigación con capacidad de construir políticas de decisiones basadas en hechos reales destinadas a minimizar pérdidas y maximizar ganancias.

De igual manera, se recomienda a la empresa analizada establecer alianzas con los grupos de investigación en el área de investigación operativa I y II de universidades nacionales para simular soluciones demandadas en la industria para poder hacerle cara a un evento en el que se

tenga que decidir sobre si en términos de conveniencia y pertinencia, resulta óptimo aplicar estudios como el realizado en el presente proyecto.

Como ultima recomendación está que, la empresa analizada en el caso de estudio debería tener un manejo del riesgo que le permita controlar el nivel de contaminación medio puesto según los expertos un 50% de probabilidad de ocurrencia puede convertirse en una variable de alto impacto que al final representaría más salida de recursos económicos en forma de inversión adicional, destinada a mejoras en los procesos de exploración para mitigar los efectos negativos producidos por su operatividad.

Referencias

- [1] A. M. Troya Jiménez, *Artist, Riesgo e Incertidumbre en la Evaluación Económica del Proyecto de Perforación de Pozos de Desarrollo*. [Art]. Universidad Nacional de Piura, 2018.
- [2] W. Bailey, B. Couét, F. Lamb y P. Rose, «Schlumberger,» 2001. [En línea]. Available:
https://connect.slb.com/~-/media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/win00/p20_35.pdf.
- [3] H. F. Aldana Jimenez, «Repositorio Universidad Militar Nueva Granada,» 11 Julio 2014. [En línea]. Available:
https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11660/FABIAN_ALDANA_GIP_NOCTURNO_1300810.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
- [4] A. Avellanada A, «Petróleo e impacto ambiental en Colombia,» *Revista de la Universidad Nacional de Colombia*, vol. 6, n° 24, pp. 21-28, 1990.
- [5] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, de *INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES*, Cuarta ed., México, Mc Graw Hill, 1997, pp. 864-883.
- [6] H. A. TAHA, de *INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES*, Séptima ed., México, Prentice Hall, 2004, pp. 503-520.
- [7] L. O. Mesa Páez, M. Rivera Lozano y J. A. Romero Davila, «Laboratorio de modelamiento y simulacion Universidad del Rosario,» Febrero 2011. [En línea]. Available:

https://www.urosario.edu.co/Administracion/documentos/investigacion/laboratorio/miller_2_2.pdf.

- [8] R. BRONSON, de *TEORIA Y PROBLEMAS DE INVESTIGACION DE OPERACIONES*, Primera ed., México, Mc Graw Hill, 1983, pp. 196-210.
- [9] B. Vitoriano, «Facultad de Ciencias Matemáticas de la Universidad COMPUTLENSE de Madrid,» 2007. [En línea]. Available: https://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/a_dt_UCM.pdf. [Último acceso: 24 Septiembre 2020].
- [10] L. G. Moreno Osorio, de *TEORIA DE LA DECISION*, Primera ed., Bogotá, Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2011, pp. 38-45.
- [11] J. Escobar-Pérez y Á. Cuervo-Martínez, «VALIDEZ DE CONTENIDO Y JUICIO DE EXPERTOS: UNA APROXIMACIÓN A SU UTILIZACIÓN,» *Avances en Medición*, vol. 6, pp. 27-36, 2008.
- [12] daphnia, «Riesgos medioambientales en la empresa(identificación de riesgos medioambientales),» *daphnia*, n° 16, pp. 1-8, 1999.
- [13] . E. Otto Thomasz, . M. E. Castelao Caruana, J. M. Massot y M. Eriz, «RIESGO SOCIAL: MEDICIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN GRUPOS FOCALIZADOS,» *Cuadernos del CIMBAGE*, n° 16, pp. 27-51, 2014.
- [14] PDVSA, «PDVSA,» 1995. [En línea]. Available: <http://www.pdvsa.com/images/pdf/cuadernos/Exploracion.pdf>. [Último acceso: 24 Septiembre 2020].

- [15] . L. Del Regno, «Evaluación de proyectos y el riesgo: un enfoque para la industria del petróleo y del gas,» *Petrotecnia*, pp. 56-72, 2010.
- [16] G. Choque Aspiazu, «Mente errabunda,» 1 Mayo 2009. [En línea]. Available: <http://menteerrabunda.blogspot.com/2009/05/arboles-de-decision.html#:~:text=El%20C3%A1rbo1%20de%20decisi%C3%B3n%20suele,probabilidad%20nodos%20hojas%20y%20arcos.&text=El%20uso%20de%20C3%A1rboles%20de,en%20la%20Universidad%20de%20Michigan..> [Último acceso: 24 Septiembre 2020].
- [17] G. Morales Reyes, «Repositorio digital Instituto Politecnico Nacional de México,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/5338/2/44-2.pdf>. [Último acceso: 24 Septiembre 2020].
- [18] C. d. l. R. d. Colombia, «Secretaría Distrital del Hábitat de Bogotá,» 22 Diciembre 1993. [En línea]. Available: <http://habitatbogota.gov.co/transparencia/normatividad/normatividad/ley-99-1993#:~:text=Descripción%3A,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones..> [Último acceso: 23 Septiembre 2020].
- [19] C. d. l. R. d. Colombia, «secretaria del senado,» 24 Abril 2012. [En línea]. Available: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1523_2012.html. [Último acceso: 23 Septiembre 2020].

- [20] Y. Gama Lopes y A. Teixeira de Almeida, «A MULTICRITERIA DECISION MODEL FOR SELECTING A PORTFOLIO,» *SOBRAPO*, vol. 33, n° 3, pp. 417-441, 2013.
- [21] E. Coopersmith, D. Graham, J. McVean y E. Storaune, «La toma de decisiones en la industria del petróleo y gas,» *Oilfield Review*, pp. 1-9, 2000.
- [22] D. G. GARCÍA MUNZER, «Repositorio Uniandes,» 2005. [En línea]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22135/u260791.pdf?sequence=1>.
- [23] M. A. Hernández Cárdenas, «Repositorio Intitucional Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales,» 2020. [En línea]. Available: <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/3600/1/EVALUACION%20DE%20LAS%20ESTRATEGIAS%20UTILIZADAS%20POR%20LAS%20INDUSTRIAS%20PETROLERAS%20%28ECOPETROL-PACIFIC%20RUBIALES%20ENERGY%29%20EN%20LA%20%20RESOLUCION%20DE%20CONFLICTOS%20SOCIOAMBIENT>.
- [24] E. A. Hernández Marín , «Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia-bdigital,» 2018. [En línea]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/70386/1/1047391786.2018.pdf>. [Último acceso: 25 Septiembre 2020].
- [25] C. A. Bernal Torres, de *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales*, Tercera ed., Bogotá, PEARSON EDUCACIÓN, 2010, pp. 120-130.

- [26] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, «METODLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN,» México, McGraw-Hill, 2006, p. 102.