



Universidad Nacional Autónoma de México

Programa de Posgrado en Ciencias de la Administración

T e s i s

**Evaluación financiera de inversión en proyectos de
infraestructura para la producción de etanol en México
probada bajo el enfoque de opciones reales.**

Que para obtener el grado de:

Maestro en Finanzas

Presenta: L.A. Luis Francisco Capellán Esparza

Tutor: Dr. Francisco López Herrera



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

Difícilmente se consigue alcanzar una meta sin la intervención de las personas que mediante su ejemplo y apoyo te motivan a brindar tú máximo esfuerzo para alcanzar tus objetivos.

Es por eso que dedico esta tesis a Dios; a mis padres, Laura y Luis; mis hermanos, Laura y Alejandro; y a mi abuelo Manuel, todos ellos mi fuente de motivación e inspiración diaria.

AGRADECIMIENTOS

Seguramente jamás encontraré las palabras suficientes para agradecerle a mi segunda casa, la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo lo que me ha dado en estos años. No me refiero únicamente a los recursos económicos, materiales y humanos invertidos para realizar esta investigación, y sin los cuales esta tesis no se habría podido llevar a cabo, sino también a las invaluable lecciones de vida que he tenido oportunidad de recibir como miembro de su comunidad y que, en conjunto con las lecciones aprendidas en el seno familiar, me han formado como ser humano.

Deseo agradecer con particular énfasis a mi tutor, el Doctor Francisco López Herrera, quien participó en la dirección de esta investigación desde su concepción y ha sido una fuerza impulsora de este proyecto a través de sus comentarios, consejos, motivación y apoyo, así como del ocasional y casi siempre bien merecido regaño requerido para retomar el curso de la investigación. Adicionalmente deseo aprovechar para expresar mi sincera admiración a la labor de investigación y difusión de la ciencia del Doctor López Herrera en nuestro país, reconociendo que no solo la calidad de su trabajo, sino el entusiasmo con el que lo realiza lo hacen un verdadero ejemplo a seguir.

Agradezco al resto de mis sinodales el Dr. Jorge Cardiel Hurtado, el Dr. Héctor Salas Harms, el Maestro Néstor Álvarez Rodríguez y el Maestro Gonzalo Luna Guerra por sus valiosos comentarios que permitieron enriquecer este trabajo de investigación.

También deseo agradecer a José Guzmán Lara por su colaboración en la concepción de este proyecto, así como a mi padre y a mi hermano por sus oportunas observaciones y comentarios.

Finalmente deseo agradecer a todos aquellos familiares y amigos que me veo obligado a omitir su nombre por falta de espacio, pero que colaboraron inyectándome de ánimo y motivación para conseguir esta meta.

TABLA DE CONTENIDO.

| | |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | vi |
| LISTA DE TABLAS. | viii |
| INTRODUCCIÓN. | xi |
| 1. MARCO TEÓRICO. | 1 |
| 1.1 Métodos Tradicionales de Evaluación de Proyectos de Inversión..... | 3 |
| 1.1.1 Métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo. | 3 |
| 1.1.1.1 Valor Presente Neto. | 3 |
| 1.1.1.2 Tasa Interna de Retorno (TIR). | 4 |
| 1.1.1.3 Tasa Interna de Rendimiento Modificada o Enfoque Terminal..... | 8 |
| 1.1.1.4 Relación Beneficio/ Costo (B/C)..... | 10 |
| 1.1.1.5 Limitaciones de los Métodos que consideran el valor de dinero en el tiempo..... | 11 |
| 1.1.2 Métodos que no consideran el valor del dinero en el tiempo. | 12 |
| 1.1.2.1 Período de Recuperación..... | 12 |
| 1.1.2.2 Tasa Simple de Rendimiento Sobre la Inversión (Return Over Investment o ROI)..... | 12 |
| 1.1.2.3 Limitaciones de los métodos que no consideran el valor del dinero en el tiempo..... | 13 |
| 1.1.3 Otros Métodos Alternativos de Evaluación de Proyectos de Inversión. | 14 |
| 1.1.4 Tasa de rendimiento requerida y Tasa de descuento en inversiones. | 15 |
| 1.1.4.1 Rendimiento Requerido y Costo de Capital. | 16 |
| 1.2 Opciones Financieras..... | 18 |
| 1.2.1 Opciones Americanas y Europeas..... | 25 |
| 1.2.1.1 Opciones Exóticas..... | 26 |
| 1.2.2 Modelos de Valoración de Opciones. | 27 |
| 1.2.2.1 Modelo Binomial..... | 28 |
| 1.2.2.2 Modelo Black-Scholes..... | 30 |
| 1.3 Opciones Reales. | 33 |
| 1.3.1 Proceso de Aplicación de Opciones Reales. | 36 |
| 1.3.2 Tipos de Opciones Reales..... | 38 |
| 1.3.2.1 Opción de Esperar. | 38 |

CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| 1.3.2.2 Opción de Expandir..... | 39 |
| 1.3.2.3 Opción de Contraer..... | 40 |
| 1.3.2.4 Opción de Abandonar..... | 40 |
| 1.3.2.5 Opciones “en” Proyectos..... | 41 |
| 1.3.2.6 Tipos Avanzados de Opciones Reales..... | 42 |
| 1.3.3 Valoración de Opciones Reales..... | 43 |
| 1.3.3.1 Ecuaciones Diferenciales Parciales..... | 43 |
| 1.3.3.2 Enrejado..... | 44 |
| 1.3.3.3 Simulación..... | 44 |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 46 |
| 2.1. Desarrollo del Método de las Opciones Reales..... | 47 |
| 2.2 Métodos de Valoración..... | 50 |
| 2.2.1. Método de la Ecuación Diferencial Parcial..... | 50 |
| 2.2.2. Método del Enrejado..... | 51 |
| 2.2.3. Simulación..... | 53 |
| 2.2.4. Modelos Híbridos..... | 54 |
| 2.3 Principales problemas para valorar las opciones reales..... | 55 |
| 2.3.1 El Subyacente..... | 55 |
| 2.3.2 La Volatilidad..... | 57 |
| 2.4 Las opciones reales aplicadas a las ramas de la energía y agricultura..... | 59 |
| 2.5. Las opciones reales "sobre" y "en" proyectos..... | 63 |
| 3. BIOENERGÍA..... | 66 |
| 3.1. La Biomasa como fuente de energía..... | 67 |
| 3.1.1 Contexto bioenergético..... | 70 |
| 3.1.2 Potencial a largo plazo: La transición hacia las fuentes renovables de energía..... | 71 |
| 3.2 Energía limpia..... | 71 |
| 3.2.1 Biodiesel como ejemplo alternativo de un biocombustible..... | 71 |
| 3.2.2 Alternativas Tecnológicas..... | 75 |
| 3.3 Usos de la biomasa en México..... | 75 |
| 3.3.1 Agroenergética..... | 76 |
| 3.3.2 Nuevas Agroindustrias..... | 77 |
| 3.3.3 Cultivos energéticos para México..... | 78 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4 Panorama Actual..... | 80 |
| 3.4.1 Desarrollo Mundial..... | 80 |
| 3.4.2 Oportunidades de desarrollo para México. | 81 |
| 3.4.3 Oportunidades de desarrollo del Etanol en México. | 83 |
| 4. EL PROYECTO DE INVERSIÓN..... | 85 |
| 4.1 Planteamiento del proyecto..... | 86 |
| 4.2 Análisis FODA del proyecto..... | 87 |
| 4.3 Requisitos del mercado y sus clientes..... | 88 |
| 4.3.1 Identificación de oportunidades..... | 89 |
| 4.3.2 Estrategia..... | 90 |
| 4.3.3 Cultivo del maíz..... | 93 |
| 4.3.3.1 Producción de etanol..... | 95 |
| 4.3.4 Competencia..... | 96 |
| 4.3.5 Recursos necesarios..... | 96 |
| 4.3.5.1 Tecnología..... | 96 |
| 4.3.5.2 Conocimiento y experiencia..... | 96 |
| 4.3.5.3 Materiales..... | 97 |
| 4.4 Proceso de distribución (comercialización)..... | 97 |
| 4.5 Origen del producto..... | 98 |
| 4.6 Difusión y promoción..... | 98 |
| 4.7 Proceso de producción..... | 100 |
| 4.8 Maquinaria y equipo..... | 102 |
| 4.9 Insumos, mano de obra y servicios auxiliares..... | 103 |
| 4.10 Obra civil e infraestructura..... | 103 |
| 4.11 Organización Administrativa..... | 104 |
| 4.11.1 Procedencia de la mano de obra..... | 104 |
| 4.11.2 Organigrama de la empresa..... | 104 |
| 4.11.3 División de trabajo y salarios..... | 105 |
| 4.12 Riesgos y rendimientos..... | 106 |
| 4.12.1 Abastecimiento..... | 106 |
| 4.12.2 Inversión y Financiamiento..... | 107 |

| | |
|--|------------|
| 5. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE INVERSIÓN. | 108 |
| 5.1 Métodos que no consideran el valor del dinero en el tiempo. | 110 |
| 5.1.1 Periodo de Recuperación. | 110 |
| 5.1.2 Tasa Simple de Rendimiento. | 110 |
| 5.1.3 Tasa Promedio de Rendimiento. | 111 |
| 5.2 Métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo. | 112 |
| 5.2.1 Valor Presente Neto. | 112 |
| 5.2.2 Tasa Interna de Rendimiento. | 112 |
| 5.2.3 Relación Beneficio/Costo. | 113 |
| 5.2.4 Índice de Rendimiento. | 113 |
| 5.2.5 Tasa Interna de Rendimiento Modificada. | 114 |
| 5.3 Evaluación por Opciones Reales. | 115 |
| 5.3.1 Opción real de entrada. | 115 |
| 5.3.2 Opción de Abandono. | 120 |
| 5.3.3 Opción de Esperar. | 123 |
| 5.3.4 Opción de Elegir. | 124 |
| 5.3.5 Opción de Expansión. | 127 |
| 5.3.6 Opción de Contracción. | 130 |
| 5.3.7 Opciones Barrera. | 132 |
| 5.3.7.1 Opción Barrera <i>put</i> | 132 |
| 5.3.7.2 Opción Barrera <i>call</i> | 134 |
| 5.3.8 Opciones reales “en” el proyecto. | 135 |
| 5.3.9 Opciones Compuestas. | 138 |
| 5.3.9.1 Opción Secuencial. | 138 |
| 5.3.9.2 Opción Paralela. | 141 |
| 5.3.10 Opción Arcoíris. | 144 |
| 5.3.11 Opción con Volatilidad Cambiante. | 147 |
| 6. VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA. | 150 |
| 6.1 Lógica difusa. | 151 |
| 6.2 Percepción Difusa. | 153 |
| 6.3 Conjuntos Borrosos. | 153 |
| 6.4 Aplicación de la lógica difusa. | 153 |

| | |
|---|------------|
| 6.4.1 Aplicación en la valoración de opciones. | 155 |
| 6.4.2 Método Collan-Mezei-Fullér de valoración de opciones reales empleando números borrosos. | 155 |
| 6.4.3 Calcular el valor de la opción real empleando el método Collan-Mezei- Fullér..... | 157 |
| 6.4.4 El método de Collan-Mezei-Fullér aplicado. | 158 |
| 6.5 Opción real de Entrada empleando el modelo de Collan-Mezei-Fullér. .. | 160 |
| 6.6 Opción real de Abandono empleando el modelo de Collan-Mezei-Fullér. | 163 |
| 6.7 Opción real de Contracción empleando el modelo de Collan-Mezei-Fullér. | 165 |
| 6.8 Opción real de Expansión empleando el modelo de Collan-Mezei-Fullér. | 169 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 172 |
| BIBLIOGRAFÍA. | 176 |
| ANEXO I. Determinación de la tasa libre de riesgo..... | I |
| ANEXO II. Estimación de la volatilidad..... | VII |
| ANEXO III. Costo de Capital Promedio Ponderado. | XI |

LISTA DE FIGURAS.

| | |
|--|-----|
| Figura 1: Posición compradora de un <i>call</i> | 20 |
| Figura 2: Posición vendedora de un <i>call</i> | 21 |
| Figura 3: Posición compradora de un <i>put</i> | 22 |
| Figura 4: Posición vendedora de un <i>put</i> | 23 |
| Figura 5: Representación gráfica del modelo binomial. | 28 |
| Figura 6: Comparación de Métodos | 55 |
| Figura 7. Modelo de distribución y destino del etanol | 91 |
| Figura 8. Diagrama operativo de una estación de etanol..... | 92 |
| Figura 9. Tecnología para la producción del etanol | 95 |
| Figura 10. Modelo de la cadena productiva del etanol..... | 98 |
| Figura 11. Esquema del proceso de producción del etanol. | 100 |
| Figura 12. Organigrama de una planta productora de etanol..... | 105 |
| Figura 13. Mapa de nodos para un árbol binomial de diez periodos. | 118 |
| Figura 14. Variaciones del VP de los flujos del proyecto para diez años..... | 118 |
| Figura 15. Valoración de la opción real de entrada..... | 119 |
| Figura 16. Valoración de la opción real de abandono..... | 121 |
| Figura 17. Árbol recursivo visto como triángulo de Pascal..... | 121 |
| Figura 18. Valoración de la opción real de esperar..... | 125 |
| Figura 19. Valoración de la opción real de elegir. | 125 |
| Figura 20. Valoración de la opción real de expansión..... | 129 |
| Figura 21. Valoración de la opción real de contracción..... | 129 |
| Figura 22. Valoración de la opción real barrera <i>put</i> | 133 |
| Figura 23. Valoración de la opción real barrera <i>call</i> | 133 |
| Figura 24. Valoración de la opción real “en” el proyecto. | 137 |
| Figura 25. Variaciones del VP de los flujos del proyecto para cinco años..... | 139 |
| Figura 26. Valoración de la opción sobre la primera etapa. | 140 |

Figura 27. Valoración de la opción sobre la segunda etapa. 141

Figura 28. Valoración de la opción real compuesta. 141

Figura 29. Variaciones del VP de los flujos del proyecto a cinco años.
..... 142

Figura 30. Valoración de la opción paralela que no puede ejercerse
anticipadamente. 143

Figura 31. Valoración de la opción paralela. 144

Figura 32. Árbol tetranomial con variaciones de VP de los flujos del
proyecto..... 145

Figura 33. Valoración de la opción real arcoiris. 146

Figura 34. Variaciones de VP de los flujos del proyecto considerando
volatilidad cambiante. 148

Figura 35. Valoración de la opción real con volatilidad cambiante. 149

Figura 36. Proceso difuso. 152

Figura 37. Representación de un número borroso..... 156

Figura 38. Relación de VPND opción de entrada y un número
borroso. 162

Figura 39. Relación de VPND opción de abandono y un número
borroso. 165

Figura 40. Relación de VPND de opción de contracción y un número
borroso. 168

Figura 41. Relación de VPND opción de expansión y un número
borroso. 171

LISTA DE TABLAS.

| | |
|--|-----|
| Tabla 1: Similitud entre un <i>call</i> y una oportunidad de inversión | 36 |
| Tabla 2: Emisiones promedio del Biodiesel comparadas con las del Petrodiesel. | 73 |
| Tabla 3. Comparación del <i>flashpoint</i> | 74 |
| Tabla 4. Comparación de rendimiento típico de cosechas para producción de aceite. | 74 |
| Tabla 5. Tipo de recurso y tecnología para la obtención de biodiesel | 75 |
| Tabla 6. Análisis FODA del proyecto. | 87 |
| Tabla 7. Materia prima necesaria para la producción de bioetanol a partir de maíz. | 97 |
| Tabla 8. Materiales necesarios para la producción de bioetanol a partir de maíz. | 97 |
| Tabla 9. Maquinaria y equipo requerido para la producción de bioetanol a partir de maíz. | 102 |
| Tabla 10. Insumos requeridos para la producción de bioetanol a partir de maíz. | 103 |
| Tabla 11. Mano de obra requerida para la producción de bioetanol a partir de maíz. | 103 |
| Tabla 12. Equipo de transporte..... | 103 |
| Tabla 13. Energéticos. | 103 |
| Tabla 14. Terreno. | 104 |
| Tabla 15. Infraestructura | 104 |
| Tabla 16. Mano de Obra Producción. | 105 |
| Tabla 17. Mano de Obra Administración..... | 106 |
| Tabla 18. Mano de Obra Ventas. | 106 |
| Tabla 19. Inversión requerida. | 107 |
| Tabla 20. Flujos de Efectivo..... | 109 |
| Tabla 21. Flujos de Efectivo a lo largo de la vida del proyecto. | 109 |
| Tabla 22. Periodo de recuperación. | 110 |
| Tabla 23. Evolución de la Tasa simple de rendimiento..... | 110 |
| Tabla 24. Evolución de la Tasa promedio de rendimiento. | 111 |
| Tabla 25. Cálculo del VPN..... | 112 |
| Tabla 26. Cálculo de la TIR. | 112 |
| Tabla 27. Cálculo de la B/C. | 113 |
| Tabla 28. Cálculo del IR..... | 113 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 29. Cálculo de la TIRM. | 114 |
| Tabla 30. Escenarios de costos opción real de entrada. | 160 |
| Tabla 31. Escenarios de ingresos opción real de entrada. | 160 |
| Tabla 32. Escenarios de costos a valor presente opción real de entrada..... | 160 |
| Tabla 33. Escenarios de ingresos a valor presente opción real de entrada..... | 161 |
| Tabla 34. Escenarios de costos acumulados opción real de entrada. | 161 |
| Tabla 35. Escenarios de ingresos acumulados opción real de entrada. | 161 |
| Tabla 36. VPND por escenario opción real de entrada..... | 161 |
| Tabla 37. Escenarios de costos opción real de abandono..... | 163 |
| Tabla 38. Escenarios de ingresos opción real de abandono. | 163 |
| Tabla 39. Escenarios de costos a valor presente opción real de abandono. | 163 |
| Tabla 40. Escenarios de ingresos a valor presente opción real de abandono.. | 164 |
| Tabla 41. Escenarios de costos acumulados opción real de abandono. | 164 |
| Tabla 42. Escenarios de ingresos acumulados opción real de abandono. | 164 |
| Tabla 43. VPND por escenario opción real de abandono..... | 164 |
| Tabla 44. Escenarios de costos opción real de contracción. | 166 |
| Tabla 45. Escenarios de ingresos opción real de contracción. | 166 |
| Tabla 46. Escenarios de costos a valor presente opción real de contracción... | 166 |
| Tabla 47. Escenarios de ingresos a valor presente opción real de contracción. | 167 |
| Tabla 48. Escenarios de costos acumulados opción real de contracción..... | 167 |
| Tabla 49. Escenarios de ingresos acumulados opción real de contracción..... | 167 |
| Tabla 50. VPND por escenario opción real de contracción..... | 167 |
| Tabla 51. Escenarios de costos opción real de expansión. | 169 |
| Tabla 52. Escenarios de ingresos opción real de expansión. | 169 |
| Tabla 53. Escenarios de costos a valor presente opción real de expansión..... | 169 |
| Tabla 54. Escenarios de ingresos a valor presente opción real de expansión. | 170 |
| Tabla 55. Escenarios de costos acumulados opción real de expansión..... | 170 |
| Tabla 56. Escenarios de ingresos acumulados opción real de expansión..... | 170 |
| Tabla 57. VPND por escenario opción real de expansión..... | 170 |

INTRODUCCIÓN.

En *Política* Aristóteles relata que en una noche estrellada en la ciudad de Mileto el filósofo Tales estudiaba el cielo, entre las estrellas alcanzó a reconocer un patrón que, de estar en lo correcto, significaba que la próxima cosecha de oliva sería muy buena. Tales pensó en la manera de sacar provecho de la información con que contaba e ideó un esquema que le permitiría ganar dinero en caso de que su pronóstico fuera acertado. El esquema ideado por Tales consistía en pagar una modesta suma por adelantado a los dueños de las prensas requeridas para extraer el aceite de oliva, esta suma le daba el derecho de rentar las prensas a la tarifa regular de la temporada baja, la cual sería considerablemente menor que la tarifa que cobrarían si la cosecha resultaba ser buena. En caso de que la cosecha resultara ser mala Tales perdería la suma que pagó por adelantado, pero su pronóstico resultó acertado y vendió el derecho de rentar las prensas a un grupo de campesinos que gustosos pagaron a Tales una cantidad que le permitió recuperar lo que había pagado a los dueños de las prensas más un margen de ganancia considerable.

Este relato de Aristóteles es a menudo referido como uno de los primeros contratos de opciones conocido y, muy probablemente, es el primer antecedente histórico de una opción real. A diferencia de una opción financiera Tales está adquiriendo el derecho de hacer uso de un activo físico, las prensas aceiteras.

El enfoque para la valoración de opciones reales es una evolución de la teoría de las opciones financieras que tiene aplicaciones a la evaluación financiera de los proyectos de inversión, a través de las opciones reales al encargado de realizar la evaluación financiera del proyecto de inversión le es posible cuantificar el valor que añaden la flexibilidad e incertidumbre en los proyectos de inversión. No obstante que las opciones reales permiten capturar el valor adicional presente en todos los proyectos y especialmente son de gran utilidad en la evaluación financiera de proyectos muy riesgosos o asociados a condiciones de gran incertidumbre no se ha conseguido la plena adopción de este enfoque. Las razones de esto pueden ser varias, aunque distintas fuentes coinciden que entre las principales causas se debe considerar a la aparente dificultad técnica de la teoría de las opciones financieras y a que el procedimiento para llevar a cabo la valoración de las opciones reales le resulta ajeno a los encargados de llevar a cabo la evaluación financiera de los proyectos de inversión.

En México el panorama no es distinto al que se presenta en el resto del mundo ya que, con la salvedad de algunos casos puntuales, el enfoque de valoración de opciones reales no es empleado como parte integral del proceso de evaluación financiera de los proyectos de inversión, por lo que inadvertidamente los inversionistas potenciales estarían rechazando proyectos al emplear los métodos de evaluación convencional que podrían ser rentables de ser analizados bajo el enfoque de las opciones reales.

INTRODUCCIÓN

Es en este punto donde surge la duda, ¿puede el enfoque de valoración de opciones reales ayudarnos a detectar oportunidades de rentabilidad en proyectos de inversión asociados a un elevado riesgo e incertidumbre en México?, para acotar la investigación a un tipo de proyecto específico se seleccionó un tipo de inversión asociada a un elevado nivel de riesgo e incertidumbre como lo son los proyectos para la producción de etanol en México, esto dada la escasa experiencia con que se cuenta en nuestro país en el desarrollo de este tipo de proyectos y el uso apenas incipiente de este combustible alternativo en nuestro país.

Al respecto se plantea como hipótesis que la aplicación de la metodología de valuación de las opciones reales implícitas en los proyectos de inversión para la producción de etanol en México hace posible asignar un valor a las alternativas que este enfoque nos presenta, permitiendo detectar oportunidades de rentabilidad en dichos proyectos que los métodos convencionales de evaluación no consideran.

Es así que el objetivo principal de este trabajo de investigación es analizar la aplicación del enfoque de valoración de opciones reales a la evaluación financiera de un proyecto de inversión para la producción de etanol en México.

Como objetivos adicionales se pretende fomentar la aplicación del mismo a través de un enfoque práctico y replicable por otros practicantes, así como presentar los avances destacables recientes en la investigación sobre nuevas metodologías para valorar opciones reales a través del planteamiento y la aplicación de un método para la valoración de opciones reales empleando lógica difusa.

Considerando lo anterior fue que se desarrolló y estructuró este trabajo de investigación de la siguiente manera.

En un primer capítulo se presenta el Marco Teórico de esta investigación, en el cual se cubren conceptos relevantes para la comprensión del enfoque de valoración de las opciones reales, se abarca desde los métodos de evaluación de proyectos de inversión convencionales hasta las opciones reales cubriendo temas como las características del inversionista y la valoración de opciones financieras.

El segundo capítulo aborda la Revisión de la Literatura relativa a las opciones reales, en el desarrollo de este capítulo se analizan los diversos avances que se han tenido en este enfoque de valoración de proyectos desde sus orígenes como una propuesta del catedrático Stewart C. Myers hasta los avances experimentados en la década más reciente de la mano de investigadores como Lenos Trigeorgis, Jonathan Mun, Thomas Copeland, Robert Pindyck, y muchos

otros que han colaborado al auge en la publicación y difusión de los avances recientes en el campo de las opciones reales.

La bioenergía es el tema central del tercer capítulo en el cual se resaltan conceptos necesarios para el análisis del caso de estudio posterior, y adicionalmente se plantea un panorama general del desarrollo de esta industria incipiente en nuestro país.

En el cuarto capítulo se realiza el planteamiento de un proyecto de inversión para la generación de bioetanol en México, cabe destacar el apoyo de la Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C., la que proporcionó el caso y la información sobre la cual se fundamenta la evaluación financiera de este tipo de proyectos de inversión.

Se realiza la evaluación financiera del proyecto de inversión en el capítulo cinco, en primer lugar se emplean los métodos convencionales para la evaluación financiera, tanto los que consideran el valor del dinero en el tiempo como los que no lo hacen, posteriormente se presenta el análisis bajo el enfoque de las opciones reales, tanto las de tipo básico como algunas de tipo avanzado.

Adicionalmente se presentan aplicaciones de un método para la valoración de opciones reales que emplea lógica difusa para asociar los costos e ingresos proyectados de un proyecto de inversión a un número borroso sobre el cual es posible calcular el valor de la opción real analizada, así como su comparación con los resultados del capítulo anterior.

Al final de la investigación se presentan algunas conclusiones y recomendaciones, entre las que se destaca: que es posible evaluar los proyectos de inversión para la generación de etanol en México empleando el método de opciones reales; el modelo empleado para la valoración de las opciones reales en esta investigación puede ser replicado fácilmente por los practicantes interesados en hacerlo; la inversión en este tipo de proyectos analizados bajo un enfoque convencional nos podría llevar a concluir erróneamente que algunos tipos de proyectos de inversión son poco rentables, sin embargo el análisis de las opciones reales permite realzar su valor dependiendo de la opcionalidad inherente a cada proyecto; se debe fomentar la investigación de nuevas metodologías que permitan no solo valorar las opciones reales sino facilitar su adopción por los practicantes al relacionar las actividades tradicionales para la valoración de un proyecto de inversión con la técnica requerida para valorar opciones reales.

1. MARCO TEÓRICO.

MARCO TEÓRICO

Al comenzar esta investigación resulta relevante establecer el marco teórico sobre el que se desarrollará la misma para lo cual en este primer capítulo se presentan distintos temas sustantivos para el desarrollo de esta tesis.

En primera instancia se presentan los métodos tradicionales de evaluación de proyectos de inversión, entre estos resultan de particular importancia los métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo. Los métodos de Flujos Descontados de Efectivo (FDE) son aceptados comúnmente por la mayoría de los analistas financieros como la herramienta básica y fundamental del análisis de un proyecto de inversión. El punto de vista convencional es que el Valor Presente Neto (VPN) de un proyecto es la medida del valor que ese proyecto añadirá a la empresa que lo lleve a cabo. De esta forma, de invertir en un proyecto con VPN positivo (o negativo), aumentará (o disminuirá) el valor de la organización que invierta en él.

En valuación financiera el valor de una compañía es el valor presente de los flujos de efectivo esperados de los activos de la empresa, sin embargo los métodos de FDE han fallado en la consideración de las alternativas involucradas en cada uno de estos proyectos. Como se estudiará en capítulos posteriores, dichas alternativas añaden valor al proyecto en función de la flexibilidad del mismo. Adicionalmente se abordarán los métodos que no toman en consideración el valor del dinero en el tiempo, mismos que complementan a los métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo, pero que al igual que estos, fallan en recoger los efectos de la flexibilidad inherente al proyecto y que se presenta a lo largo de la vida del mismo.

Posteriormente se muestran los temas de la tasa de rendimiento requerida para la inversión, así como la estimación del costo de capital. Esto brinda una perspectiva sobre las características de los inversionistas, sus expectativas generales al momento de realizar una inversión, así como los beneficios que estos esperan recibir por realizar dichas inversiones. Al conjuntar los temas de métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo con los que no lo hacen, así como los rendimientos requeridos y el costo de capital tenemos un panorama general de los métodos de evaluación de proyectos de inversión tradicionales, que es de gran utilidad en el desarrollo de la investigación, ya que permite ser posteriormente contrastado con la propuesta del enfoque de opciones reales.

Continuando el desarrollo del marco teórico se presenta el concepto de las opciones financieras, sus tipos, las características y métodos de valoración asociados a estos instrumentos financieros. Esto a manera de preámbulo para presentar el tema central de gran parte de esta investigación: el enfoque de las opciones reales que considera la incertidumbre como una variable para los modelos de valuación. Al emplear opciones reales el marco de toma de decisiones cambia por completo, al igual que la manera de enfocar un problema, ya que al comprender que la incertidumbre genera oportunidades es necesario

rediseñar las estrategias de valuación deben enfocarse la evaluación de la inversión en términos de la fuente, tendencia y evolución de la incertidumbre, de forma tal que se logre determinar el grado de exposición de la inversión (cómo se traducen los eventos externos a ganancias o pérdidas) y reposicionar los planteamientos logrando tomar la mayor ventaja posible de la incertidumbre.

El enfoque de opciones reales intercala los efectos de tiempo e incertidumbre en la valuación a través de la teoría financiera que respalda los modelos de valoración de opciones, es por esto que debe explorarse con profundidad dicha teoría antes de determinar y definir las opciones involucradas en la toma de decisiones con respecto a activos reales.

Las opciones reales necesitan no sólo ser consideradas de forma explícita y ser evaluadas, sino que también el valor de estas opciones puede ser sustancial. Muchas inversiones y adquisiciones, que no serían justificables por otros métodos de valuación, pueden tener un valor muy atractivo si se consideran las opciones incluidas en ellas.

1.1 Métodos Tradicionales de Evaluación de Proyectos de Inversión.

Los proyectos de inversión pueden ser evaluados atendiendo a diferentes consideraciones, pero en los enfoques tradicionales los aspectos a considerar más importantes son el tiempo de recuperación y el rendimiento, por ello existen diferentes métodos de evaluación que se pueden dividir en términos generales como métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo y métodos que no consideran el valor del dinero en el tiempo.

1.1.1 Métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo.

Los flujos de efectivo y los efectos del tiempo sobre éstos son la base de cálculo de estos criterios para el análisis de inversiones. Este tipo enfoque obedece entonces al valor del dinero en el tiempo, a continuación se profundiza en los distintos métodos que corresponden a este tipo de enfoque.

1.1.1.1 Valor Presente Neto.

Este concepto puede definirse como el valor presente del conjunto de flujos de efectivo que se derivan de una inversión descontados a la tasa de rendimiento requerida menos la inversión inicial, todo valuado al momento justo de desembolsar la inversión.

Si consideramos a “k” como el costo del capital (o la tasa de rendimiento requerida) de la inversión, se define el Valor Presente Neto (VPN)¹:

¹ Ver Ricardo Pascale, *Decisiones financieras*, pp.55-58

MARCO TEÓRICO

$$VPN = \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+k)^j} - F_0$$

(Ec. 1.1)

Donde:

VPN: Valor Presente Neto del Proyecto.

F_j: Flujo de efectivo en el periodo j.

F₀: Inversión inicial.

k: Tasa de rendimiento requerida.

n: Número de periodos que se espera dure el proyecto.

j: Número de periodo, normalmente expresado en fracciones de año.

El criterio de aceptación o rechazo de la inversión se establece en función del monto del VPN, la regla es aceptar toda inversión cuyo VPN sea mayor a cero. La clasificación de conveniencia de las inversiones en este criterio se efectúa sobre la base de valor de éstos en orden decreciente (esto es, las inversiones más atractivas serán aquellas con mayor VPN).

Para comprender mejor el concepto del VPN mayor a cero podemos considerar el siguiente ejemplo: Una inversionista tiene la oportunidad de pedir un préstamo a una institución de crédito el día de hoy a tasa *k* por un monto equivalente a la inversión inicial más el VPN de un proyecto de inversión que desea desarrollar en paralelo, lo que representa que el préstamo y el proyecto tendrán la misma duración. Si la inversionista toma el préstamo el día de hoy podría destinar la parte proporcional correspondiente a la inversión inicial del proyecto y considerar el resto de los recursos (el VPN) como su ganancia. Suponiendo que la proyección de los flujos de efectivo fue acertada y que la inversionista recibe cada flujo exactamente el mismo día en que debe realizar un pago sobre la deuda, los flujos generados del proyecto deben ser suficientes para pagar la totalidad del capital recibido más los intereses.

1.1.1.2 Tasa Interna de Retorno (TIR).

La Tasa Interna de Retorno (TIR)^{2 3} es la medida de rentabilidad alternativa al VPN más empleada. La diferencia principal que esta técnica tiene con respecto a otros criterios se encuentra en la tasa de descuento que utiliza. El caso más general de las inversiones es cuando éstas generan flujos durante varios periodos⁴. Cuando se conoce la inversión inicial que los produce, puede obtenerse la tasa de interés que reporta dicha inversión.

² *Ibidem*, pp.50-52

³ Ver Stephen Ross *et al.*, *Corporate finance*, pp. 163-175

⁴ Usualmente expresados en fracciones de año.

Supóngase una inversión inicial denominada F_0 que genera flujos de efectivo durante los años 1, 2, 3,..., n, representados por $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$. Dado que los flujos de efectivo se generan durante varios años, deben traerse a valor presente para que tomen en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Para esto, deben multiplicarse por el factor de descuento "x":

$$x_j = \frac{1}{(1+i)^j} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde:

x: Factor de descuento.

j = año de evaluación.

i = tasa de descuento.

La tasa de descuento genera un valor presente total, al aplicarse sobre los flujos esperados este valor será igual al valor presente de la inversión considerada para obtenerlos. La tasa que iguala esta ecuación recibe el nombre de tasa interna de retorno (TIR). Es decir, la TIR es aquella i que satisface:

$$F_0 - \frac{F_1}{(1+i)} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + \frac{F_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{F_n}{(1+i)^n} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

$$F_0 = \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i)^j} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

$$\sum_{j=0}^n \frac{F_j}{(1+i)^j} = 0 \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Bajo este criterio, los flujos de efectivo y la tasa de interés utilizada para descontar los flujos son incógnitas que serán determinadas a partir del conocimiento de las características particulares del proyecto. La regla de decisión general del inversionista bajo este criterio será la de aceptar todo proyecto cuya TIR sea mayor que la tasa de interés a la que se descontarán los flujos de efectivo y por el contrario, rechazar todo proyecto cuya TIR sea menor que la tasa de interés a la que se descontarán los flujos de efectivo.

Tomando como ejemplo un proyecto con una inversión inicial de 100 pesos con un solo flujo de efectivo que se obtiene al año siguiente de 110 pesos, si buscamos calcular el VPN de este proyecto tendríamos:

MARCO TEÓRICO

$$VPN = \frac{F_1}{(1+i)} - F_0 = \frac{110}{(1+i)} - 100$$

(Ec. 1.6)

Si planteamos arbitrariamente que la tasa de descuento en la ecuación anterior equivale a 8% tendríamos entonces un VPN de 1.85 pesos, lo que no satisface la ecuación 1.5 para que 8% sea considerada la TIR, en un segundo intento planteamos la tasa de descuento en 12% lo que nos arroja un VPN de -1.79 pesos lo cual tampoco satisface la ecuación 1.5. Finalmente este procedimiento de ensayo y error lleva a establecer que la tasa de descuento al 10% satisface la ecuación 1.5 y que por lo tanto representa la TIR del proyecto. La regla de decisión general de este criterio establece que si la tasa de descuento del proyecto es inferior a 10% los inversionistas deberán aceptar el proyecto, y por el contrario, si la tasa de descuento es superior a 10% los inversionistas deberán rechazar el proyecto. En caso de que la tasa de descuento del proyecto fuera exactamente 10% los inversionistas podrían aceptar o rechazar el proyecto de manera indistinta y deberán considerar otros criterios para fundamentar su decisión.

La regla general de decisión de la TIR a menudo nos llevará a la misma conclusión que la regla de decisión del VPN, sin embargo existen casos en que los criterios nos darán conclusiones en sentidos totalmente opuestos, esto es producto de los problemas asociados al criterio de la TIR que se exponen a continuación:

Problema de determinar si el proyecto es orientado a inversión o financiamiento.

Para ilustrar el primer problema asociado al enfoque de la TIR consideremos dos proyectos denominados A y B. El proyecto A requiere una inversión inicial de 100 pesos, se obtendrá un flujo de efectivo al año siguiente de 130 pesos, la TIR de este proyecto es 30%, para este proyecto el VPN disminuye a medida que la tasa de descuento se incrementa, por lo que se aplica la regla general de decisión de la TIR.

En el proyecto B los flujos de efectivo presentan un ingreso positivo de 100 pesos en el presente y requieren del pago de la inversión un año después por 130 pesos, la TIR también será de 30% sin embargo el VPN del proyecto será negativo cuando la tasa de descuento sea inferior a la TIR y por el contrario el VPN del proyecto será positivo cuando la tasa de descuento sea mayor a la TIR. En casos como el proyecto B la regla de decisión será opuesta a la regla general de decisión de la TIR, es decir se aceptará el proyecto si la TIR es inferior a la tasa de descuento y se rechazará el proyecto si la TIR es mayor que la tasa de descuento.

Los proyectos tipo A son de tipo convencional y pueden denominarse como proyectos orientados a la inversión, por el contrario los proyectos tipo B son

inusuales en el sentido que generan un ingreso en el presente y los costos son diferidos al futuro. Este tipo de proyectos se denominan como proyectos orientados al financiamiento y son similares a obtener un préstamo de una institución de crédito.

Problema de las tasas internas de rendimiento múltiples.

Consideremos un proyecto que requiere el día hoy una inversión inicial de 100 pesos, posteriormente al año siguiente se obtiene un ingreso de 230 pesos y al segundo año requiere nuevamente de una inversión por 132 pesos, debido a que el proyecto tiene un egreso de efectivo, posteriormente un ingreso de efectivo y nuevamente un egreso de efectivo es posible decir que el proyecto presenta dos cambios de signo. Al realizar el cálculo de la TIR se obtiene que tanto 10% como 20% satisfacen la ecuación 1.5 y que, por lo tanto, el proyecto cuenta con dos TIR's⁵. En este tipo de casos no tiene sentido emplear la TIR como criterio de decisión sobre la rentabilidad del proyecto de inversión.

Problema de escala.

Suponiendo que un inversionista tiene dos proyectos de inversión, uno denominado "W" es para acondicionar un terreno en la ciudad como estacionamiento y otro denominado "Y" es para construir en el mismo terreno un edificio de oficinas. Las características de los proyectos los hacen mutuamente excluyentes al requerir el mismo espacio físico para su realización, en el caso de "W" es necesaria una inversión inicial de un millón de pesos (mdp), tiene un VPN de 0.5 mdp, y una TIR del 50%. Para "Y" se requieren 10 mdp, tiene un VPN de 1 mdp, y una TIR de 10%.⁶ La regla de decisión de la TIR llevaría a elegir el proyecto "W" por tener una TIR más grande, sin embargo la regla de decisión del VPN llevaría a elegir el proyecto "Y" al tener un VPN mayor, de tal manera que

⁵ Encontrar la TIR de un proyecto de inversión es similar a encontrar las raíces de una ecuación polinomial, de tal manera que para un proyecto con flujos de efectivo de F_0 a F_T la fórmula para calcular la TIR requiere del uso de la tasa de interés i que satisfaga la ecuación 1.5, como se ha comentado con anterioridad. Si entendemos a x como el factor de descuento de la ecuación 1.2, la fórmula para obtener la TIR se convierte en:

$$VPN = F_0 + \frac{F_1}{x} + \frac{F_2}{x^2} + \frac{F_3}{x^3} + \dots + \frac{F_T}{x^T} = 0$$

La raíz del polinomio (x^*) se asocia con el valor de la TIR cuando:

$$TIR = \frac{1}{x^*} - 1$$

Cada raíz de valor positivo inferior a uno puede ser asociada a una TIR, aplicando la regla de Descartes de los signos se obtiene que una serie de flujos de efectivo puede tener hasta M TIRs positivas, donde M es el numero de cambios de signo de los flujos de efectivo.

⁶ El ejercicio supone que ambos proyectos tienen el mismo plazo de vida, idéntico nivel de riesgo y que los inversionistas cuentan con los recursos suficientes para llevar a cabo uno u otro proyecto.

MARCO TEÓRICO

se observa otro problema con la TIR ya que ésta no considera la escala de la inversión inicial, “Y” requiere de una mayor inversión inicial que dará en términos relativos un rendimiento inferior a los inversionistas al que se obtendría de invertir en “W”, sin embargo en términos absolutos la inversión en “Y” permite obtener un rendimiento superior en medio millón de pesos al que se obtendría con “W”. Al presentarse este tipo de proyectos es mejor emplear el VPN como el principal criterio de decisión para determinar la rentabilidad de la inversión.⁷

Problema de la temporalidad de los flujos de efectivo y la tasa de descuento.

Considerando nuevamente dos proyectos mutuamente excluyentes, “Z” con una inversión inicial de 10,000 pesos, un VPN de 669 pesos si la tasa de descuento es de 10% ó de 109 pesos si la tasa de descuento es de 15% y una TIR de 16.04%. Y el proyecto “X” con una inversión igualmente de 10,000 pesos, un VPN de 751 pesos si la tasa de descuento es de 10% ó de -484 pesos si la tasa de descuento es de 15% y una TIR de 12.94%. Al igual que en el problema de escala la regla de decisión de la TIR nos llevaría a seleccionar el proyecto “Z” por tener una TIR mayor que el proyecto “X”, sin embargo al analizar el comportamiento del VPN de cada proyecto en función a los cambios en la tasa de descuento, se observa que ambos proyectos tienen el mismo VPN a una tasa de 10.55%. Cuando la tasa de descuento es mayor a esta cantidad el VPN del proyecto “Z” es superior al de “X” y cuando la tasa de descuento es inferior a 10.55% el VPN del proyecto “X” es superior al de “Z”, derivado de que los flujos de efectivo del proyecto “X” se concentran hacia el final de la vida de este, mientras que los flujos del proyecto “Z” se concentran en sus primeros años. De manera tal que cuando la tasa de descuento es inferior a 10.55% la regla de decisión de la TIR nos estaría orientando a seleccionar un proyecto con un VPN menor que otro proyecto que requiere la misma inversión inicial. En este tipo de condiciones no resulta conveniente comparar directamente la TIR de un proyecto con la del otro y es preferible emplear la TIR incremental.⁸

No obstante los problemas planteados con el enfoque de la TIR, es justo reconocer que este enfoque presenta una ventaja sobre el VPN y es la principal razón por la que se mantiene vigente, es una regla simple que permite sintetizar la información sobre la rentabilidad del proyecto en una tasa de rendimiento.

1.1.1.3 Tasa Interna de Rendimiento Modificada o Enfoque Terminal.

En las descripciones de TIR y VPN, se afirmó que sus conclusiones eran coincidentes a menudo. Sin embargo, también se han presentado las

⁷ También es posible realizar el cálculo de la TIR incremental que hace comparables ambas alternativas, esta se obtiene al restar los flujos de efectivo del proyecto de menor presupuesto a los flujos de efectivo de mayor presupuesto, el resultado son nuevos flujos de efectivo conocidos como flujos de efectivo incrementales que se emplean para calcular la TIR con el procedimiento comentado a lo largo de este capítulo y que nos permite identificar el valor adicional que nos aporta el proyecto de un presupuesto mayor sobre el de menor presupuesto.

⁸ Ver nota 7

condiciones bajo las que existe discrepancia al comparar dos o más inversiones bajo estos criterios y donde los resultados que arrojan pueden ser diametralmente opuestos. Como se presenta en el problema de la temporalidad de los flujos de efectivo a medida que éstos estén distribuidos en el tiempo en forma diferente se pueden presentar estos resultados divergentes, adicionalmente de suponerse la reinversión de los flujos de efectivo se llega a soluciones contradictorias.

La diferencia en estas reinversiones estriba en que el criterio de TIR implica la oportunidad de reinvertir los flujos de efectivo intermedios a una misma tasa, mientras que el criterio de VPN supone que estos flujos se reinvierten a la tasa de descuento. Estos problemas tienen origen en el desconocimiento de una estimación razonable para la tasa de reinversión, sin embargo, hay ocasiones que ésta puede conocerse.

Cuando puede conocerse la tasa de reinversión, debe calcularse el valor terminal de los flujos de efectivo capitalizando los flujos intermedios hasta el final de la vida útil de la inversión a la tasa de reinversión a considerar. La tasa de rentabilidad terminal será la i que satisface^{9 10}:

$$F_0 = \frac{\text{Valor Terminal}}{(1+i)^n} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Donde:

F_0 = Inversión inicial.

n = Vida útil de la inversión.

Valor Terminal = Suma de los flujos de efectivo compuestos a la tasa de reinversión, a partir del período 1 hasta el n .

$$\text{Valor Terminal} = \sum_{k=1}^n F_k (1+tr)^{n-k} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Donde:

tr = Tasa de reinversión.

Para aplicar esta técnica a la de VPN, se reinvierten los flujos intermedios a la tasa de reinversión indicada y al obtener el valor terminal de éstos, se descuenta a la tasa de descuento.

⁹ Ver José Antonio Morales Castro y Arturo Morales Castro, *Proyectos de inversión en la práctica*, p. 293

¹⁰ Ver Ricardo Pascale, *op. cit.*, pp.92-93

MARCO TEÓRICO

En la medida en que se conozcan las tasas de reinversión apropiadas, tanto la tasa de rentabilidad terminal como el VPN terminal reportarán una medida de rentabilidad más afinada que las versiones comunes de ambos criterios.

1.1.1.4 Relación Beneficio/ Costo (B/C).

Esta relación¹¹ surge del cociente ente los flujos de efectivo actualizados a la tasa de rendimiento requerida (k) y el valor actual de la inversión:

$$\text{Relación } \frac{B}{C} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+k)^j}}{F_0} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Donde:

F_j: Flujo de efectivo en el periodo j.

F₀: Inversión inicial.

k: Tasa de rendimiento requerida.

n: Número de periodos que se espera dure el proyecto.

j: Número de periodo, normalmente expresado en fracciones de año.

Si la inversión se realiza en m años y los beneficios comenzaran a partir de m + 1, la ecuación es:

$$\text{Relación } \frac{B}{C} = \frac{\sum_{j=m+1}^n \frac{F_j}{(1+k)^j}}{\sum_{j=0}^m \frac{F_j}{(1+k)^j}} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Donde:

F_j: Flujo de efectivo en el periodo j.

F₀: Inversión inicial.

k: Tasa de rendimiento requerida.

n: Número de periodos que se espera dure el proyecto.

j: Número de periodo, normalmente expresado en fracciones de año.

m: Periodo en que concluye la inversión.

Una inversión es aceptable bajo este criterio cuando la relación es mayor a 1. La clasificación de conveniencia de las inversiones, se establecerá según el valor del cociente, cuando éste rebese el 1.

¹¹ *Ibidem*, pp.58-59

1.1.1.5 Limitaciones de los Métodos que consideran el valor de dinero en el tiempo.

Los métodos de FDE son una técnica bien establecida que ha sido empleada por varias décadas para valorar proyecto e incluso el funcionamiento de la organización en su conjunto. La teoría detrás de esta técnica es muy sólida y los resultados son tan buenos como lo sean los datos utilizados para llevar a cabo los cálculos -una verdad que se aplica a cualquier modelo-. Los métodos de FDE son efectivos en múltiples escenarios aplicables a la valoración de proyectos inversión y las subsecuentes decisiones de inversión que se debe realizar. Sin embargo fallan en capturar ciertas realidades presentes en la dinámica del mundo de los negocios moderno. Algunas de sus principales limitaciones son:

1. Toman un enfoque determinista basado en un solo conjunto de datos para ingresar en el modelo. El VPN de un proyecto puede llegar a ser calculado usando sólo dos flujos de efectivo, los ingresos estimados y egresos estimados. Sin embargo, en la vida real existe incertidumbre sobre los propios flujos de efectivo y por ende éstos deben ser analizados desde un enfoque probabilista. Se puede argumentar que un análisis de sensibilidad ayuda a que los métodos FDE respondan mejor a la incertidumbre, sin embargo, la realidad es que la deficiencia del método permanecerá presente ya que cada escenario de inversión estará basado en un patrón fijo.
2. Los métodos de FDE asumen un patrón fijo para el resultado del proyecto, que no toma en consideración la flexibilidad de la gerencia para cambiar el curso del proyecto. Los proyectos en el mundo de hoy consideran múltiples decisiones contingentes. Es posible expandir un proyecto si los resultados iniciales son abrumadoramente favorecedores, en caso contrario es posible decidir no llevar a cabo la inversión en su totalidad al contraer el proyecto o abandonarlo en definitiva. El valor de estas decisiones contingentes no es capturado por los métodos de FDE ya que asumen que el proyecto seguirá su camino predeterminado.
3. Para contabilizar el riesgo asociado con el rendimiento del proyecto, los métodos FDE descuentan los flujos de efectivo a una tasa superior al añadirle a la tasa libre de riesgo una prima por el riesgo inherente a la inversión. Mientras más grande sea el riesgo, mayor será la prima de riesgo que se debe agregar. Esto significa que sólo los aspectos negativos del riesgo se toman en cuenta, sin considerar las recompensas. Basado en el principio de las inversiones eficientes se debe reconocer que mientras mayor sea el riesgo, mayor, también, será el rendimiento; pero si el costo de fondeo del proyecto aumenta en relación directa al riesgo ignorando el rendimiento del proyecto se castiga el riesgo

MARCO TEÓRICO

produciendo que proyectos con gran potencial de éxito sean rechazados por la incertidumbre asociada a éstos.¹²

1.1.2 Métodos que no consideran el valor del dinero en el tiempo.

Como su nombre lo indica y en contraposición a los métodos anteriores, estos métodos no consideran los efectos que el tiempo tiene sobre el dinero, lo cual deriva en cálculos más simples, aunque no siempre válidos para determinar la viabilidad de la inversión en un proyecto determinado. Si bien estos métodos no presentan estimaciones muy confiables en proyectos donde la incertidumbre es grande en términos generales se puede señalar que siguen en uso por la sencillez de su cálculo.

1.1.2.1 Período de Recuperación.

También es llamado período de repago o reembolso¹³. Se define como el lapso en el cual los beneficios derivados de una inversión, medidos en términos de flujos de efectivo, recuperan la inversión inicialmente efectuada:

$$\frac{F_0}{\sum_{j=1}^t F_j} \geq 1$$

(Ec. 1.11)

Donde:

F_0 = Inversión inicial.

F_j = Monto anual del flujo de efectivo.

t = Período de recuperación, para el cual se resuelve la ecuación.

En estos flujos no se cuentan las depreciaciones y otros cargos que no implican egresos dentro de los costos, pero sí se consideran los cargos financieros (intereses por ejemplo), mismos que ya se encuentran implícitos en los flujos. La clasificación de inversiones bajo este criterio se efectúa sobre la base de la extensión de su período de recuperación. La aceptabilidad de las inversiones se da sobre la base del establecimiento de ciertos estándares que responden a necesidades específicas al inversionista.

1.1.2.2 Tasa Simple de Rendimiento Sobre la Inversión (Return Over Investment o ROI).

Se define como el cociente entre el promedio de ganancias netas (de depreciaciones e impuestos) sobre inversión inicial (la inversión en activos fijos más el capital de trabajo).¹⁴

¹² Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *Project valuation using Real Options*, pp.47-48

¹³ Ver Ricardo Pascale, *op. cit.*, pp. 64-67

¹⁴ *Ibidem*, pp. 67-69

$$ROI = \frac{\text{Ganancia promedio anual neta}}{\text{Inversión inicial}}$$

(Ec. 1.12)

Existen discrepancias en esta definición, pues en ocasiones se toman las ganancias sin descontar depreciaciones o impuestos o se considera el concepto de una ganancia promedio, la ganancia de un año representativo o la del primer año (de dudosa utilidad).

También existen problemas en la definición de inversiones pues a veces no se añade a la inversión en activos fijos la inversión que representa un incremento al capital de trabajo. En otros modelos se considera una inversión promedio, cuando es el caso se le denomina Tasa Promedio de Rendimiento. Bajo este criterio, una inversión es aceptable en la medida que su tasa de rendimiento (ROI) sea superior a una determinada tasa de corte y el *ranking* entre varias inversiones se asigna sobre la base de sus tasas de retorno.

La principal ventaja de este método es que se calcula sencillamente a partir de datos que se obtienen con facilidad, aunque existen algunas deficiencias de este criterio, entre las que pueden mencionarse:

- a. No tiene en cuenta el valor tiempo del dinero, pues es indiferente que un beneficio se reciba en el primer año que en el décimo, es decir, ignora la vida útil de la inversión.
- b. Se comete a menudo el error de emplear como tasa de corte la tasa de retorno requerida por los accionistas. Es equivocado utilizarla porque los flujos se consideran netos de intereses y otros costos financieros, entonces se estaría midiendo el rendimiento de la inversión considerando sus costos de financiamiento (no se tendría el análisis de la inversión neta).

1.1.2.3 Limitaciones de los métodos que no consideran el valor del dinero en el tiempo.

Estos métodos guardan limitaciones similares a los métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo, al plantearse desde un enfoque determinista. Adicionalmente cuentan con sus propias limitaciones inherentes a su clasificación ya que el no considerar el valor del dinero en el tiempo no permite ofrecer una visión completa del valor verdadero de la inversión a lo largo de la vida del proyecto. Si bien estos métodos son de fácil cálculo y brindan un panorama sencillo para tomar decisiones de inversión, no son una herramienta que refleje verdaderamente la forma en que los proyectos de inversión se comportan en el mundo real.

1.1.3 Otros Métodos Alternativos de Evaluación de Proyectos de Inversión.

Los practicantes en materia de evaluación financiera de proyectos de inversión han identificado las limitaciones de los métodos convencionales y han propuesto métodos alternativos para llevar a cabo dicha evaluación. A continuación se realiza una pequeña reseña de los tres principales métodos alternativos de evaluación de proyectos de inversión.

Simulación Monte Carlo

Este método es una extensión, más no un sustituto de los métodos de FDE, ya que mientras que en los métodos de FDE se toma un conjunto de datos para ingresar en el modelo y se calcula el VPN del proyecto, la simulación Monte Carlo hace exactamente ese cálculo pero miles de veces variando los valores de los datos ingresados al modelo cada vez. La simulación arroja una distribución de los posibles VPN's del proyecto, siendo el promedio de estos el VPN del proyecto de acuerdo al método convencional.¹⁵

Análisis del Árbol de Decisión.

Este análisis es una herramienta más sofisticada que los métodos de FDE y asignan un valor al proyecto tomando en consideración las posibles etapas múltiples que comprenden al proyecto en sí, así como a las decisiones contingentes que es necesario tomar en el transcurso de la vida del mismo. Se diferencia de los métodos FDE en el sentido de que considera el riesgo de mercado y usa probabilidades para determinar posibles resultados en lugar de tasas de rendimiento ajustadas al riesgo. Aunque este tipo de análisis considera las decisiones contingentes esto no le exime de tener sus propias limitaciones. Estas limitaciones están relacionadas con la determinación de probabilidades y el descuento, a los que se considera como elementos básicos para obtener un resultado óptimo y los cuales son determinados por esta metodología en forma no estandarizada y hasta cierto punto subjetiva.¹⁶

Opciones Reales.

Este es un método que por su importancia para esta investigación es tocado con mayor profundidad más adelante, por el momento basta decir que las Opciones Reales no son un sustituto de ninguno de los métodos anteriormente mencionados. Al contrario los usa como herramientas y permite integrarlos como parte de un marco de trabajo sofisticado que dota a los analistas y a los tomadores de decisiones de mayor información de relevancia para proponer o determinar el mejor curso de acción a seguir.

¹⁵ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *op. cit.*, p.48

¹⁶ *Ibidem*, p.49

1.1.4 Tasa de rendimiento requerida y Tasa de descuento en inversiones.

Los cuatro aspectos fundamentales que aparecen en el análisis de inversiones son:

- a. Elección del criterio para efectuar la evaluación de la inversión.
- b. Definición de los flujos relevantes para trabajar con el criterio seleccionado.
- c. Análisis del riesgo de los proyectos.
- d. Tasa de rendimiento requerida.

Este último, la tasa de rendimiento requerida¹⁷, puede utilizarse como tasa de descuento en los diferentes modelos de análisis de inversiones. En el criterio de VPN es la tasa a la que se descuentan los flujos de fondos para obtenerlo, en el de la TIR es la tasa contra la que se compara la rentabilidad obtenida para establecer su conveniencia.

La tasa de rendimiento requerida es el mínimo rendimiento aceptable para una inversión. Esta tasa requerida en la teoría financiera no se refiere a la que la administración de la empresa tiene en consideración sino a la que tienen como objetivo los inversionistas. El momento en que se efectúa una inversión, se destinan recursos a ella y se estaría posponiendo (o definitivamente abandonando) otra opción de inversión que reportaría una rentabilidad i , es decir, se pierde la oportunidad de efectuar una inversión de un riesgo similar.

Como definición general, se define a la tasa de rendimiento requerida de una inversión como la tasa que se deja de obtener en la mejor inversión alternativa de riesgo similar.

Con respecto a la postura relativa al riesgo, los inversionistas pueden ser:

- a. Aversos al riesgo,
- b. Neutrales al riesgo, o
- c. Buscadores de riesgo.

La teoría y la práctica del análisis de inversiones suponen que los inversionistas son generalmente aversos al riesgo. En términos de inversiones, la aversión al riesgo implica que el inversionista, por tomar riesgo, requiere de una compensación en el rendimiento que obtendrá de dichas inversiones, situación que deriva en un concepto básico en el análisis de inversiones: el rendimiento requerido de una oportunidad de inversión depende del riesgo del proyecto que se está considerando.

A medida que se opta por las inversiones que implican un mayor riesgo, el inversionista exigirá mayor rendimiento. En caso de no existir riesgo, de cualquier forma se requerirá un rendimiento, representado por la tasa libre de

¹⁷ Ver Scott Besley y Eugene Brigham, *Fundamentos de Administración Financiera*, pp.215-216

MARCO TEÓRICO

riesgo (r_f). Al ir incrementando el riesgo, la compensación por éste, debe irse proporcionando con el rendimiento. Bajo este esquema, la tasa de rendimiento requerida¹⁸ ($E(R_i)$) es la suma de una tasa libre de riesgo (r_f) más una prima por el riesgo (P_r):

$$E(R_i) = r_f + P_r \quad (\text{Ec. 1.13})$$

1.1.4.1 Rendimiento Requerido y Costo de Capital.

El costo de capital puede referirse como la tasa de rendimiento requerida por aquellos que suministran de capital a la empresa. Para los propósitos de evaluación de inversiones, el costo de capital puede interpretarse como los rendimientos esperados que toman en cuenta el riesgo involucrado. Así pues, ambos términos (tasa de rendimiento requerida y costo de capital), pueden ser términos intercambiables.

El costo de deuda (k_d) y el costo de inversión (k_e) son las tasas de rendimiento requeridas por los representantes de cada una de estas características (acreedores e inversionistas, respectivamente). También en estas tasas se toman en cuenta las oportunidades de inversión y por lo tanto, el riesgo involucrado.

Las empresas tienen un costo promedio del capital¹⁹ que resulta de:

$$k_0 = (1 - t)k_d \frac{D}{D + FP} + k_e \frac{FP}{D + FP} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Donde:

t = Tasa de impuesto sobre la renta.

k_d = Tasa de costo de deuda.

k_e = Tasa de costo de los fondos propios.

FP = Monto de los fondos propios.

D = Monto de deudas.

El promedio ponderado de las tasas de costo de deuda después de impuestos y de los fondos propios (k_0) debe utilizarse como la tasa de rendimiento requerida cuando se evalúa una nueva inversión. Al efectuar una inversión se están comprometiendo fondos que pueden provenir de acreedores (los que provienen de las deudas) y de inversores (los que son aportados por los propietarios). La aversión al riesgo es un supuesto implícito ya mencionado anteriormente. Tanto los acreedores como los inversores demandan rendimientos acordes con los

¹⁸ Ver Frank Reilly y Keith Brown, *Investment analysis & portfolio management*, pp. 16-27

¹⁹ Ver Stephen Ross *et al.*, *op. cit.*, pp. 340-344

riesgos involucrados; por lo tanto, las nuevas inversiones tienen su tasa de rendimiento requerida particular, que depende de su nivel de riesgo. Usar el costo promedio del capital de la empresa implica reconocer que el riesgo del nuevo proyecto es igual que el promedio de la empresa.

Las nuevas inversiones y cada proyecto (salvo casos muy especiales), deben analizarse con su propio rendimiento requerido (costo de capital), esto es, la tasa de rendimiento requerida depende del destino al que se asignen los recursos.

La tasa de rendimiento requerida depende del riesgo involucrado en cada inversión; existen tres modelos generales de inversión para los cuales se arrojará una tasa diferente:

a. Análisis de una inversión financiada en un 100% con fondos propios y que es impulsada por una empresa que también se financia totalmente con fondos propios. El riesgo operativo es igual en ambos casos, como no existe endeudamiento el riesgo que se considera es el derivado de los flujos de la inversión, la tasa de rendimiento requerida será igual a “ k_e ”.

b. Análisis de una inversión que tenga endeudamientos en su componente de financiamiento y que la proporción de deudas a fondos propios, así como el riesgo operativo, sean iguales que los de la empresa en su conjunto. La tasa de rendimiento requerida en este caso, será el costo promedio de capital (k_0), aunque este caso es muy particular y rara vez observado en la práctica.

c. Análisis de una inversión que tiene un riesgo operativo diferente al riesgo operativo de la empresa. Sin embargo, el financiamiento de la inversión mantiene las mismas proporciones de deudas a fondos de la empresa en su conjunto. En esta situación debe trabajarse con el rendimiento requerido que refleje el nivel de riesgo operativo propio de la inversión. Este enfoque puede requerir de la obtención de un coeficiente Beta similar al empleado en el modelo de *Capital Asset Pricing Model* (CAPM).²⁰

²⁰ También conocido como Modelo de Valoración de Activos de Capital, fue desarrollado hacia mediados de la década de los 60's por William Sharpe, Jack Treynor, Jan Mossin y John Lintner. La finalidad del modelo es establecer el rendimiento esperado de un activo en función de la tasa libre de riesgo vigente en el mercado, el rendimiento esperado del mercado y la sensibilidad del rendimiento del activo financiero en relación al rendimiento del mercado, esto es:

$$E(R_i) = r_f + \beta(E(P_{i,t}) - r_f)$$

También ver Stephen Ross *et al*, *op. cit.*, pp. 263-304

MARCO TEÓRICO

Desafortunadamente, no existe una herramienta teórica que permita resolver en forma general y correcta todas las situaciones, aunque estas aproximaciones que nos otorgan un marco teórico, son de utilidad para el tratamiento del tema.²¹

1.2 Opciones Financieras.

Una opción representa el derecho mas no la obligación que del tenedor de ésta para vender o comprar una cantidad determinada de un bien o activo subyacente (puede ser una acción, mercancía básica, divisa, instrumento financiero, etc.) a un precio preestablecido (llamado precio de ejercicio o precio *strike*) dentro de un período determinado que comprende cualquier fecha anterior o igual a la fecha de expiración de la opción²².

De acuerdo a Malkiel las opciones han sido negociadas entre particulares desde hace varios siglos, ya sea como instrumentos independientes o como parte de otros valores, Malkiel ejemplifica esto contando cómo fue que en el siglo XVIII las opciones fueron utilizadas para especular sobre el precio de las flores durante el frenesí de los bulbos de tulipán en Holanda²³.

Aunque las opciones son instrumentos relativamente sencillos, también son los más flexibles y sofisticados que existen en la administración de riesgos. En los mercados financieros internacionales se comercian opciones sobre acciones, divisas, instrumentos de deuda y sobre tasas de interés, así como contratos de futuros.

Muchas entidades mexicanas utilizan opciones de divisas, de tasas de interés y de precios de mercancías básicas para especular o cubrirse ante eventuales cambios del mercado. Las opciones sobre tasas de interés internacionales y tipos de cambio tienen una gran importancia para los mexicanos que participan en los mercados cambiarios y de divisas. Por ejemplo, los bancos mexicanos tienen activos y pasivos en dólares estadounidenses y sus portafolios con frecuencia están expuestos al riesgo de un alza en las tasas de interés internacionales. De igual manera, algunas empresas mexicanas son deudoras netas en dólares estadounidenses y, en la medida que avance la apertura económica, están más expuestas a movimientos de tipos de cambio, no sólo del peso frente al dólar sino también del peso/yen, peso/dólar canadiense, etc. Todos estos riesgos pueden cubrirse con opciones.

Una manera sencilla de entender la esencia de un contrato de opciones es estableciendo su similitud con una póliza de seguro. Por ejemplo, si una persona desea asegurar su automóvil contra riesgos de accidente durante un año, le paga a una compañía aseguradora una prima (cuyo monto dependerá de la probabilidad de que el accidente suceda). A cambio, la aseguradora subsanará

²¹ Ver Anexo III sobre el cálculo de CCPP aplicado al caso de estudio de esta tesis.

²² Ver Stephen Ross *et al.*, *op. cit.*, p.618

²³ Ver Burton Malkiel, *A walk down Wall Street*, Norton, Nueva York, 2000.

con cierta cantidad de dinero en caso de que en el transcurso del contrato ocurra un accidente, si el siniestro no se presenta el asegurado pierde su prima y únicamente pagó por la protección. Aunque el enfoque no siempre se centra en estas coincidencias, la póliza de seguro es una opción.

De hecho, la aseguradora vendió la opción de recibir una indemnización determinada; opción que puede ser ejercida únicamente si existe el accidente. Lo que en los mercados internacionales se conoce como opciones es lo que se refiere a opciones financieras (de acciones, índices accionarios, divisas, tasas de interés) y opciones sobre mercancías básicas (petróleo, plata, café, etc.). Éstas funcionan como una póliza de seguros en la siguiente forma: un inversionista con acciones de una empresa quiere proteger el precio de venta de dichas acciones. Puede pagar una prima por una opción de venta para adquirir derecho a vender sus acciones a un precio dado (el precio de ejercicio) durante un período determinado. Si el precio de las acciones baja hasta el precio de ejercicio o incluso por debajo de éste, el inversionista estará protegido. Puede vender sus acciones al precio más alto posible, de acuerdo con su contrato de opción. Sin embargo, si el precio de las acciones se mantiene por arriba del precio de ejercicio, la opción expira sin haberse utilizado y el inversionista sólo pierde la prima de cobertura.

Como es un derecho y no una obligación, el poseedor de la opción puede elegir no ejercer el derecho y permitir que la opción expire. Existen dos tipos generales de opciones:

- Opción *put* u opción de venta
- Opción *call* u opción de compra

En principio, todos los contratos de opciones, ya sea para comprar (*call*) o para vender (*put*) deben especificar las siguientes características:

- El activo o bien subyacente.
- El monto o precio del activo subyacente.
- El precio de ejercicio al cual se puede ejercer la opción (también conocido como precio *strike*).
- El tiempo de vencimiento.

Una opción *call*²⁴ ²⁵ indica el derecho (mas no la obligación) del comprador de la opción a comprar el activo subyacente a un precio de ejercicio, en cualquier tiempo determinado anterior o igual a la expiración de la opción. El comprador paga un precio (prima) por este derecho. Si a la fecha de expiración, el valor del activo es menor al precio de ejercicio, la opción no se ejerce y expira sin valor. Si, por otro lado, el valor del activo es mayor que el precio de ejercicio, entonces

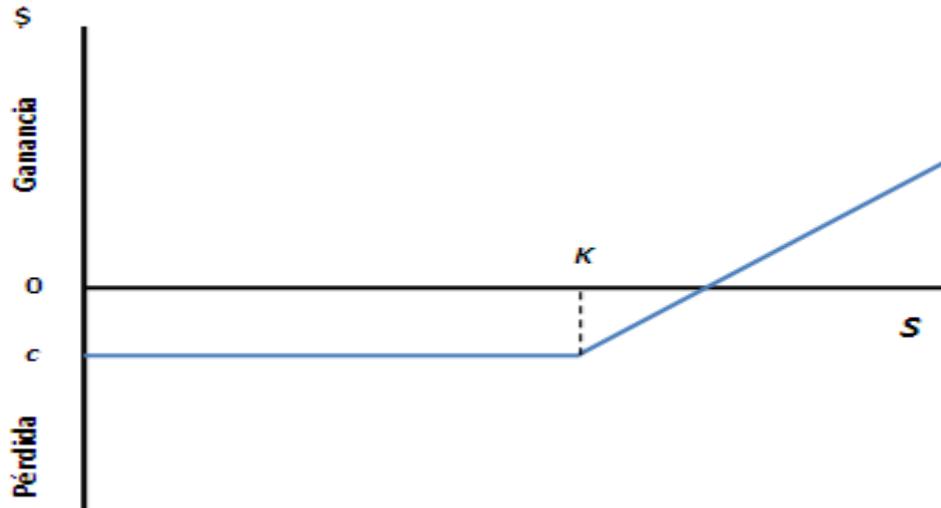
²⁴ Ver Stephen Ross *et al.*, *op. cit.*, p. 619

²⁵ Ver John C. Hull, *Options, futures and other derivatives*, pp. 181-182

MARCO TEÓRICO

la opción es ejercida; esto es, el tenedor de la opción compra el activo al precio de ejercicio y la diferencia entre el valor del activo y este precio constituye la ganancia bruta de la inversión. La ganancia neta de la inversión es la diferencia entre la ganancia bruta y el precio pagado por el *call* al inicio.

Figura 1: Posición compradora de un *call*



Fuente: Elaboración propia con información tomada de *Project valuation using Real Options*.²⁶

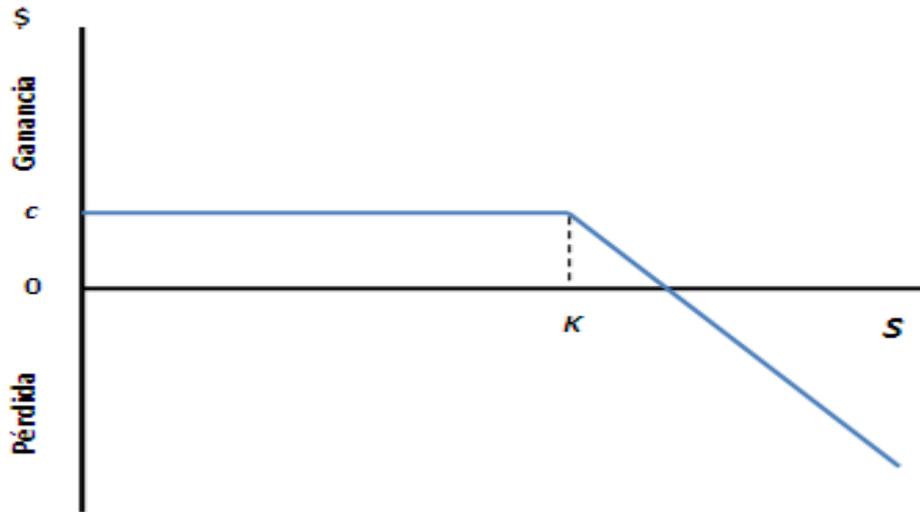
El diagrama de perfil de riesgo, en la Figura 1, (pérdidas o ganancias) ilustra el pago en efectivo de la compra de una opción *call*, también llamada *call* largo, al momento de su expiración. El eje Y muestra las ganancias o pérdidas netas derivadas de los movimientos en el precio del bien subyacente, una vez que se adquirió la opción. El eje X indica el precio del bien subyacente (S), teniendo a K como el valor de precio de ejercicio, el comprador de la opción paga una prima, la cual representa una pérdida neta indicada como c en la figura. Para un *call*, el pago final neto es negativo (e igual al precio pagado por el *call*) si el valor del activo subyacente es menor que el precio de ejercicio y bajo este esquema, la pérdida máxima ascendería al monto de la prima. Si, por otro lado, el precio del activo subyacente es mayor que el precio de ejercicio, el pago bruto es la diferencia entre el valor del activo subyacente y el precio de ejercicio y el pago neto es la diferencia existente entre el pago bruto y el precio de la prima de la opción *call*.

En la Figura 2, se muestra el perfil de riesgo o ganancia del vendedor de la opción *call*, llamado también *call* corto. Es una imagen inversa a la anterior: el vendedor de esta opción recibe una prima (c), a medida que el precio del bien subyacente permanece por debajo del precio de ejercicio (K), la opción no se ejerce y su utilidad es la prima. Pero si se ejerce, el vendedor está obligado a ofrecer cierta cantidad del bien subyacente al precio de ejercicio, que por definición, será menor al del mercado. Mientras mayor sea el precio en el

²⁶ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu., *op. cit.*, p. 4

mercado con respecto al precio de ejercicio, mayores serán las pérdidas netas del vendedor de la opción y esto es representado por la función con pendiente negativa. Esta línea no corta el eje de las X en K pues aunque la opción se ejerza, el vendedor no registrará una pérdida neta hasta que el precio de mercado sea tan alto en relación con el precio de ejercicio que sobrepase el monto de la prima.

Figura 2: Posición vendedora de un *call*



Fuente: Elaboración propia con información tomada de *Project valuation using Real Options*.²⁷

Una opción *put*^{28 29} le otorga a su comprador el derecho (mas no la obligación) de vender cierta cantidad de un bien (el activo subyacente) a un precio determinado (precio de ejercicio), durante un lapso previsto (cualquier fecha puede ser anterior o igual a la fecha de expiración). Para adquirir este derecho, se debe pagar una prima, si el precio del activo subyacente es mayor que el precio de ejercicio la opción no será ejercida y expirará sin valor. Si, por otro lado, el precio del activo subyacente es menor que el precio de ejercicio, el poseedor de la opción *put* ejercerá la opción y venderá la acción al precio de ejercicio, siendo el pago bruto la diferencia entre el precio *strike* y el valor de mercado del activo. Una vez más, al incluir el costo inicial pagado por el *put* (prima), se obtiene el pago neto de la transacción.

A continuación la Figura 3 muestra el perfil de riesgo o ganancia del comprador de una opción *put*, también denominado *put* largo. El eje Y indica las ganancias y pérdidas netas, que corresponden a movimientos del precio del bien subyacente durante el plazo de vigencia de la opción. El eje X mide el precio del activo subyacente, siendo K el precio de ejercicio. El comprador de la opción paga una prima que representa el gasto neto p , si el precio del activo subyacente es mayor que el precio de ejercicio, el comprador del *put* solamente

²⁷ *Ibidem*

²⁸ Ver John C. Hull, *op. cit.*, pp. 182-183

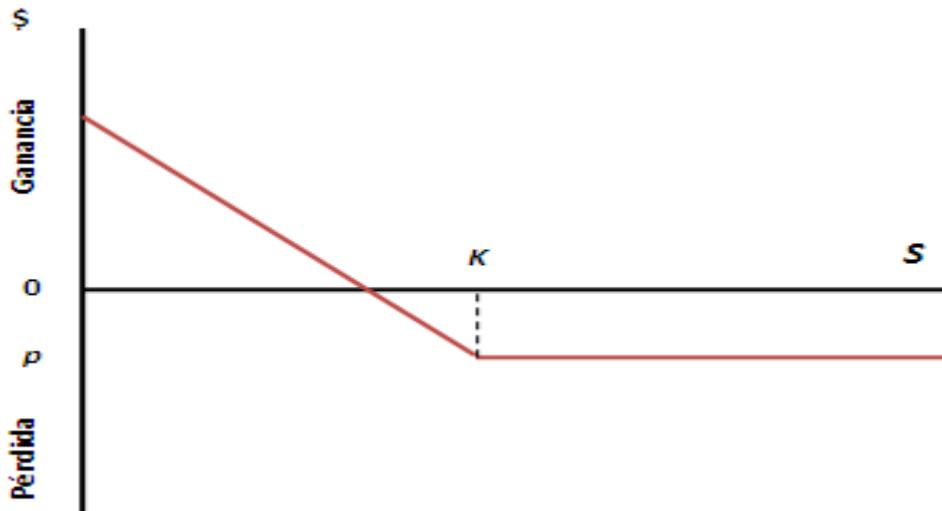
²⁹ Ver Stephen Ross *et al*, *op. cit.*, p.621

MARCO TEÓRICO

pierde la prima. En cambio, si el precio es menor o igual que K el tenedor del *put* puede ejercerla y vender el activo al precio de ejercicio. Mientras más bajo sea el precio de mercado con relación al precio de ejercicio, mayores serán las ganancias, hecho que demuestra la función de pendiente negativa. Ésta no corta el eje X en K pues si el comprador ejerce su opción de venta, sus utilidades netas serán positivas hasta que recupere la prima.

El comprador de un *put* tiene un riesgo conocido y limitado de pérdida, y una posibilidad desconocida de ganancias, limitada a que el precio del subyacente baje hasta cero (no es ilimitada porque este precio no puede ser negativo).

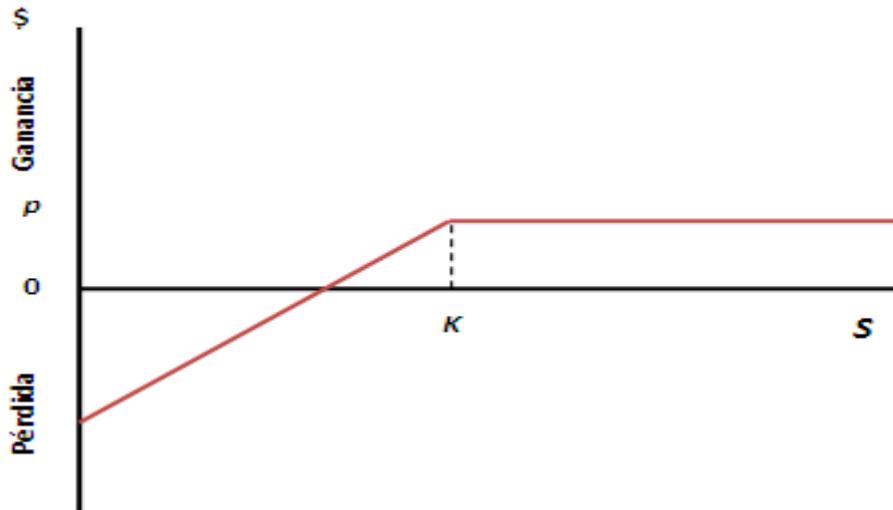
Figura 3: Posición compradora de un *put*



Fuente: Elaboración propia con información tomada de *Project valuation using Real Options*.³⁰

La Figura 4 muestra el perfil de riesgo o ganancia del vendedor de una opción *put*, también conocido como *put* corto. Análogamente, representa el inverso del gráfico anterior. El vendedor de un *put* recibe la prima (p) y a medida que el precio del activo subyacente sea mayor que el de ejercicio (K), el vendedor conserva la prima. Una vez que la opción es ejercida su vendedor está obligado a comprar una cantidad del bien subyacente de acuerdo con el contrato de opción, al precio de ejercicio (que por definición, es superior al de mercado). Mientras menor sea el precio de mercado, respecto al de ejercicio, mayores serán las pérdidas netas del vendedor de la opción *put*. La aseveración anterior puede observarse en la línea con pendiente positiva, que no corta el eje X en K ya que incluso cuando se ejerce la opción el vendedor no registrará una pérdida neta sino hasta que el precio de mercado sea más bajo que el de ejercicio, generando una pérdida que supere la ganancia neta obtenida de la prima. El vendedor de una opción *put* tiene una ganancia potencial conocida y limitada, y una pérdida potencial desconocida y limitada a que el precio del subyacente baje hasta cero.

³⁰ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu,, *op. cit.*, p.4

Figura 4: Posición vendedora de un *put*

Fuente: Elaboración propia con información tomada de *Project valuation using Real Options*.³¹

Las primas de las opciones se determinan mediante la interacción de la oferta y la demanda, que depende de las variables que relacionan el activo subyacente con los mercados financieros^{32 33}:

- **Valor Actual del Activo Subyacente:** Las opciones son acciones que derivan su valor de un activo subyacente, de tal forma que los cambios en el valor de éste afectan el valor de las opciones sobre ese activo. Como los *calls* dan el derecho de comprar el activo subyacente a un precio establecido, un incremento en el valor de dicho activo incrementará su valor. Por otro lado, los *puts* se vuelven menos valiosos al incrementar el valor del activo subyacente.
- **Varianza en el Valor del Activo Subyacente:** El comprador de una opción adquiere el derecho de comprar o vender el activo subyacente a un precio fijo. Mientras más alta sea la varianza en el valor de ese activo, mayor será el valor de la opción. Esto se cumple tanto para los *puts* como para los *calls*. Aunque pareciera obvio que un incremento en la medida de riesgo (varianza) debería incrementar el valor, el supuesto no es redundante al tener en cuenta que las opciones son diferentes a otros instrumentos ya que los compradores de opciones nunca pueden perder más que el precio que pagaron por ellas; de hecho, tienen el potencial de ganar retornos significativos al existir movimientos de precio grandes.
- **Precio de Ejercicio de la Opción:** Una característica clave que se usa para describir una opción es su precio del ejercicio. En el caso de *calls*, donde el comprador adquiere el derecho de comprar a un precio fijo, el valor del *call*

³¹ *Ibidem*,

³² Ver John C. Hull, *op. cit.*, pp. 183-194

³³ Ver Frank Reilly y Keith Brown, *op. cit.*, pp. 975-976

MARCO TEÓRICO

declinará mientras dicho precio se incremente. En el caso de *puts*, donde el comprador tiene derecho de vender a un precio fijo, el valor incrementará mientras este precio se incrementa.

En un *call*, si el precio de mercado es menor que el de ejercicio, la opción no puede ser ejercida y queda “fuera del dinero” (“*out of the money*”). Si el precio de mercado es igual al de ejercicio, entonces sí puede ejercerse y se dice que está “en el dinero” (“*at the money*”). Cuando el precio de mercado es mayor que el de ejercicio, la opción puede ejercerse con una utilidad, en la medida que el precio de mercado sea más alto en relación con el precio de ejercicio y en este caso se dice que la opción está “dentro del dinero” (“*in the money*”). Cuando una opción *put*, está fuera del dinero su valor es menor.

- **Tiempo de Duración de la Opción:** Las opciones son activos que se deprecian con el tiempo. De la misma forma en que una póliza de seguro por un año cuesta más que otra por una semana, una opción a más largo plazo cuesta más que una a plazo menor. Tanto los *puts* como los *calls* incrementan su valor dependiendo de su duración. Esto es porque mientras más grande sea el período es mayor el tiempo que el activo subyacente tiene para variar su valor, y la opción para ejercerse, haciendo que el valor para ambos tipos de opciones crezca. Adicionalmente, en el caso de un *call* donde el comprador tiene que pagar un precio fijo a la expiración, el valor presente de este precio fijo disminuye cuando la duración de la opción se incrementa haciendo que el valor del *call* aumente.
- **Tasa de Interés Libre de Riesgo correspondiente al período de vida de la Opción:** Cuando el comprador de una opción paga el precio de la opción, se involucra un costo de oportunidad por haber invertido en una opción en vez de elegir otro instrumento financiero. Este costo dependerá del nivel de las tasas de interés y el tiempo hasta la expiración de la opción. La tasa libre de riesgo también entra en la valuación de opciones cuando el valor presente del precio de ejercicio se calcula, pues este precio no tiene que ser pagado (o recibido) hasta la expiración de los *calls* (o *puts*). Cuando la tasa de interés aumente, se incrementará el valor de los *calls* y se reducirá el valor de los *puts*.
- **Dividendos Pagados sobre el Activo Subyacente:** El valor del activo subyacente puede disminuir si se hacen pagos de dividendos sobre este activo durante la duración de la opción. En consecuencia, el valor de un *call* es una función decreciente del monto esperado de los pagos de dividendos, y el valor de un *put* es una función creciente de los pagos esperados de dividendos.

Una manera más intuitiva para enfocar los pagos de dividendos en las opciones *call* es el costo de posponer el ejercicio de las opciones “*in the money*”. Considérese una opción sobre una acción cualquier, una vez que la opción *call* está “*in the money*”, esto es, el poseedor de la opción tendrá un pago bruto al

ejercer la opción. El ejercer la opción *call* proveerá al tenedor con la acción y lo hace acreedor a los dividendos sobre la acción en períodos subsecuentes. El no ejercer la opción implicará que estos dividendos se pierdan.

El tiempo al vencimiento y la varianza determinan el valor por tiempo de una opción y la relación entre el precio del bien subyacente con el precio de ejercicio determinan el valor intrínseco. El valor total de una opción está dado por:

$$\text{Valor de la Opción} = \text{Valor por Tiempo} + \text{Valor Intrínseco}$$

(Ec. 1.15)

1.2.1 Opciones Americanas y Europeas.

Una distinción primaria entre las opciones Americanas y las Europeas es que las primeras pueden ser ejercidas en cualquier tiempo anterior a su expiración, mientras las segundas solamente se pueden ejercer en la fecha de expiración. La posibilidad de un ejercicio anticipado hace que las opciones Americanas sean más valiosas que sus similares Europeas; también por eso son más difíciles de valorar aunque existe un factor de compensación que permite que lo continuo (ejercicio en cualquier período anterior a la fecha puntual) sea valuado usando modelos diseñados para lo discreto (ejercicio en la fecha puntual)³⁴.

En muchos casos, la prima de tiempo asociada a la vida restante de una opción y los costos de transacción hacen que el ejercicio anticipado no sea la decisión óptima. En otras palabras, los tenedores de opciones "*in the money*" generalmente obtendrán más vendiéndolas a alguien más (en caso de que no quieran conservarlas) que ejerciéndolas anticipadamente.

Aunque el ejercicio anticipado no es lo más recomendable generalmente, existen al menos dos excepciones a la regla:

- Cuando el activo subyacente paga grandes dividendos, ya que esta característica reduce el valor del activo y cualquier opción *call* sobre ese activo. En este caso, las opciones *call* pueden ejercerse justo antes de una fecha anterior a la entrega de dividendos si la prima de tiempo de las opciones es menor que la disminución esperada en el valor del activo a consecuencia del pago de tal dividendo.
- Cuando un inversionista tiene una *put* "*in-the money*" sobre un activo en un período en que las tasas de interés son altas. En este caso, la prima de tiempo del *put* puede ser menor que la ganancia potencial de ejercer el *put* anticipadamente y ganar interés sobre el precio del ejercicio.

³⁴ Ver The Options Clearing Corporation, *Characteristics and risks of standardized options*, p.7

1.2.1.1 Opciones Exóticas.

Son opciones derivadas de las opciones Europeas y Americanas, que involucran mecanismos de ejercicio y/o pago más complicados. De acuerdo a las categorías establecidas por Hull³⁵ existen las siguientes opciones exóticas:

- *Packages* (Paquetes): Un *Package* es una cartera de opciones Europeas estándar, contratos adelantados (*forwards*), efectivo, y el bien subyacente mismo. Existen diferentes tipos de paquetes como el *bull spread*, el *bear spread*, el *butterfly spread*, *calendar spread*, *straddles* y *strangles*.
- Opciones Americanas no estándar: Para las opciones estándar americanas el ejercicio puede ocurrir en cualquier momento durante la vida de la opción, y el precio de ejercicio siempre es el mismo. Para las americanas no estándar el ejercicio puede ser restringido a un periodo, o su precio de ejercicio puede variar. Por ejemplo en las opciones llamadas Bermudianas se puede realizar un ejercicio anticipado a fechas determinadas durante la vida de la opción (por ejemplo, la opción sobre un bono que sólo puede ser ejercida en la fecha de pago del cupón es una opción Bermudiana).
- *Forward Start Options*; son aquellas que comenzarán su vida en algún punto en el futuro. En ocasiones son utilizadas como opciones incentivo, normalmente se establece que comenzarán su vida cuando la opción este “*at the money*”.
- *Compound Options*, son opciones sobre opciones. Hay cuatro tipos principales de *compound options*, *call* sobre *call*, *call* sobre *put*, *put* sobre *call* y *put* sobre *put*. Supongamos que usted tiene un *call* que en una primera fecha de ejercicio le otorga el derecho de adquirir un segundo *call* en un primer precio de ejercicio, si decide ejercer la opción, el segundo *call* le da el derecho mas no la obligación de adquirir en una segunda fecha de ejercicio el subyacente a un segundo precio de ejercicio.
- *Chooser Options*, son opciones en las que el tenedor puede elegir la fecha de ejercicio, o si desea ejercer la opción como un *call* o un *put*.
- *Barrier Options*, son opciones donde la retribución depende que un subyacente alcance un precio determinado en un periodo de tiempo también determinado. Dentro de este tipo de opciones existen las opciones *knock-out* que cesan de existir cuando el subyacente alcanza cierto nivel, en contraparte existen las opciones *knock-in* que comienzan a existir cuando el subyacente alcanza un precio determinado.

³⁵ Ver John C. Hull, *op cit*, p.529-544

- *Binary Options*, tienen pagos descontados. Por ejemplo un *call* de *cash or nothing*, no paga nada si el precio de la acción termina por debajo del precio de ejercicio al final del periodo, y paga una cantidad fija si termina por encima del precio de ejercicio.
- *Lookback Options*, son un tipo de opción dependiente de eventos. El pago en este tipo de opción puede depender del precio mínimo o máximo del subyacente alcanzado durante la vida de la opción.
- *Shout Options*, son opciones en donde el tenedor de la opción tiene el derecho de “gritar” (*shout*) una vez durante la vida de la opción, el tenedor de la opción tendrá el derecho a recibir una compensación correspondiente al precio máximo después del “grito”. Por ejemplo si usted tiene una opción *shout* con un precio de ejercicio de \$30, y usted “grita” cuando el precio del subyacente alcance \$40, entonces si ejerce la opción y el precio del subyacente termina por debajo de \$40 usted recibirá la diferencia entre el precio de ejercicio y el precio al momento del grito (\$10), y si el precio del subyacente termina por encima de \$40 será compensado por la diferencia entre el precio final y \$30.
- Opciones Asiáticas, son opciones donde el pago depende en el precio promedio durante la vida o parte de la vida de una opción. El pago para el precio promedio de un *call* es “ $\max(0, S_p - K)$ ” donde el “ S_p ” es el precio promedio de un subyacente durante un periodo y “ K ” es el precio de ejercicio, en el caso de un *put* se calcula “ $\max(0, K - S_p)$ ”. Se considera que las opciones asiáticas responden mejor a las necesidades de la tesorería de una empresa, así como suelen ser más baratas que las demás opciones, pero la dificultad de su cálculo han frenado su uso.
- Opciones que involucran múltiples activos, las opciones que involucran dos o más factores de riesgo son también llamadas *rainbow options* (opciones arcoíris). Por ejemplo los contratos de futuros sobre bonos que se negocian en la *Chicago Board of Trade* permite al vendedor elegir entre un gran número de bonos al cumplimiento.
- *Basket Options*, las opciones canasta dependen de una cartera de activos subyacentes. Estos activos suelen ser acciones, índices accionarios o monedas.

1.2.2 Modelos de Valoración de Opciones.

La teoría de valoración de opciones ha mostrado algunos cambios desde 1973 cuando Fisher Black y Myron Scholes publicaron su trabajo *The Pricing of*

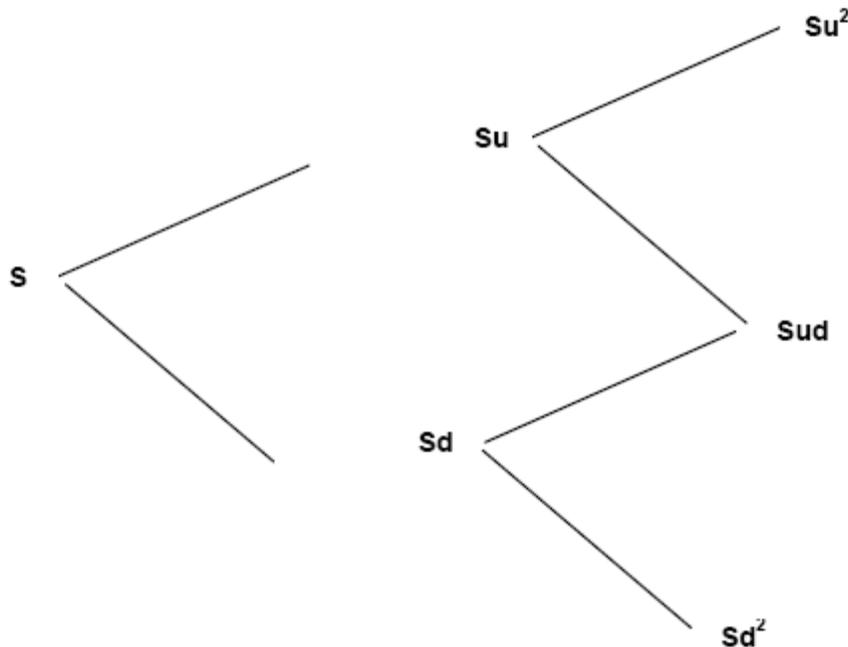
MARCO TEÓRICO

*Options and Corporate Liabilities*³⁶ donde desarrollaron un modelo revolucionario para valuar opciones Europeas protegidas de la entrega de dividendos. Black y Scholes utilizaron un “portafolio de réplica” para obtener su fórmula final. Este portafolio estaba compuesto por el activo subyacente y el activo libre de riesgo que tenía los mismos flujos de efectivo que la opción que se estaba evaluando. Mientras esta derivación es matemáticamente complicada, existe un modelo binomial para valuar opciones que es bastante más simple y que contiene la misma lógica.

1.2.2.1 Modelo Binomial.

El modelo binomial^{37 38} está basado en una formulación simple para el proceso de precio del activo, en el cual el activo, en cualquier período de tiempo, puede moverse de uno a dos precios posibles. La fórmula general de un proceso de precio accionario que sigue de una binomial es de la siguiente forma:

Figura 5: Representación gráfica del modelo binomial.



Fuente: *Project valuation using Real Options*³⁹

En la figura anterior S es el precio actual del subyacente; el precio se mueve hacia arriba hasta “Su” con probabilidad “p” y hacia abajo hasta “Sd” con probabilidad “(1 – p)” en cualquier periodo de tiempo.

³⁶ Ver Fisher Black y Myron Scholes, *J. of Political Economy*, 81(3), pp. 637-654

³⁷ Ver Frank Reilly y Keith Brown, *op. cit.*, pp. 971-974

³⁸ Ver John C. Hull, *op cit.*, p.241-256

³⁹ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *op. cit.*, p.70

En la creación del portafolio de réplica el objetivo es el uso de una combinación de una tasa libre de riesgo de los factores de deuda e inversión y el activo subyacente para crear los mismos flujos de efectivo que en la opción que se está evaluando. En este apartado aplican los principios del arbitraje, además de que el valor de la opción debe ser igual al valor de su portafolio de réplica. En el caso de la formulación general mencionada antes, donde los precios de la acción pueden moverse tanto hacia arriba (S_u) como hacia abajo (S_d) en cualquier periodo de tiempo, el portafolio de réplica para un *call* con precio de ejercicio K , implica que será necesario pedir prestado una cantidad (B) y adquirir " Δ " unidades del activo subyacente, donde:

$$\Delta = \frac{C_u - C_d}{S_u - S_d}$$

(Ec. 1.16)

Donde:

Δ = Número de unidades del activo subyacente que se han comprado.

C_u = Valor del *call* si el precio de la acción es S_u .

C_d = Valor del *call* si el precio de la acción es S_d .

En un proceso binomial multiperiodico, la valuación debe proceder iterativamente; esto es, empezando con el último período de tiempo y moviéndose hacia atrás en el tiempo hasta el punto actual. Los portafolios que replican la opción son creados en cada paso y deben evaluarse; obteniendo así, valores para la opción en cada periodo de tiempo. La salida final para el modelo binomial de valoración de opciones es el valor de la opción en términos de los portafolios de réplica, compuestos por " Δ " acciones (opción delta) del activo subyacente y la tasa combinada de deuda e inversión libre de riesgo.

$$call = S\Delta - B$$

(Ec. 1.17)

Donde:

call: Valor del *call*.

S : Valor actual del subyacente.

Δ : Opción delta.

B : Cantidad que se pide prestada para replicar la opción.

El modelo binomial representa un enfoque para los determinantes del valor de una opción. El valor de una opción no está determinado por el precio esperado del activo, sino por su precio actual, que por supuesto refleja las expectativas sobre el futuro.

Esto es una consecuencia directa del arbitraje, si el valor de la opción se desvía del valor del portafolio de réplica, los inversionistas pueden crear una posición

MARCO TEÓRICO

de arbitraje; esto es, un negocio que no requiere inversión, no involucra riesgo y entrega retornos positivos.

Si el portafolio que replica el *call* cuesta más que el *call* en el mercado, un inversionista podría comprar el *call*, vender el portafolio de réplica y de esta forma garantizar la diferencia como ganancia. Los flujos de efectivo en las dos posiciones se compensarían uno con otro, originando inexistencia de flujos en períodos subsecuentes. El valor de la opción también aumenta al extenderse el tiempo hasta la expiración, al aumentar los movimientos de precio (u y d), y al incrementarse la tasa de interés.

1.2.2.2 Modelo Black-Scholes.⁴⁰

El dilema de la valoración de opciones financieras cautivo el interés y la imaginación de los teóricos financieros particularmente en la década de los sesenta, es en este ambiente que Fisher Black y Myron Scholes desarrollaron un análisis revolucionario para determinar el valor de las opciones financieras, dicho análisis refleja la relación entre el precio de una acción y el valor de la opción sobre dicha acción a través de una ecuación parcial diferencial que recoge los cambios en distintas variables necesarias para valorar la acción.⁴¹ Posteriormente Robert Merton colaboraría en el desarrollo de modelo con la publicación de *Theory of Rational Option Pricing* al eliminar el arbitraje como variable que afecte el valor de la opción.⁴² El desarrollo del modelo ha sido un aporte fundamental para el auge global de los mercados de derivados, razón por la cual Myron Scholes y Robert Merton recibieron el premio Nobel de Economía 1997, con mención especial para Fisher Black quien había fallecido dos años antes.

Mientras que el modelo binomial representa la aproximación intuitiva para los determinantes del valor de una opción, se requiere un gran número de entradas (en términos de los futuros precios esperados) en cada nodo. El modelo Black-Scholes no es alternativo al binomial, es más bien un caso límite de éste.

El modelo binomial es un modelo en tiempo discreto para los movimientos del precio de un activo, que incluye un intervalo de tiempo (t) entre estos movimientos. Mientras se acorta este intervalo de tiempo, la distribución límite que se forma mientras t se aproxima a 0, puede tomar dos formas:

- Si al aproximarse t a 0, los cambios de precio van haciéndose menores cada vez, la distribución límite es la normal y se trata de un proceso de precio continuo.

⁴⁰ *Ibidem*, p.281-311

⁴¹ Ver Fisher Black y Myron Scholes, *op. cit*

⁴² Ver Robert Merton, *Bell J. of Economics and Management Science*, Spring-1973, pp.141-183

- Si al aproximarse t a 0, los cambios en precio permanecen espaciados, la distribución límite es la Poisson; esto es, una distribución que permite saltos de precio y se habla de un proceso de precio discreto.

El modelo Black-Scholes aplica cuando la distribución límite es la normal y se asume explícitamente que el proceso de precio es continuo y no existen cambios bruscos en los precios de los activos.

La versión del modelo presentado por Black-Scholes fue diseñada para valorar opciones Europeas, que están protegidas de dividendos. Esto implica que el modelo no puede ser afectado por la posibilidad de ejercicio anticipado ni por pagos de dividendos.

El valor de una opción *call* (c) en el modelo Black-Scholes puede ser descrito como una función de las siguientes variables:

- S = Valor actual del activo subyacente.
- K = Precio de ejercicio de la acción.
- t = Tiempo a la expiración de la opción.
- r = Tasa de interés libre de riesgo que corresponde a la duración de la opción.
- σ^2 = Varianza en el valor del activo subyacente.

El modelo puede expresarse de la siguiente forma:

$$c = SN(d_1) - Ke^{-rt}N(d_2) \tag{Ec. 1.17}$$

Donde:

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)t}{\sigma\sqrt{t}} \tag{Ec. 1.18}$$

$$d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{t} \tag{Ec. 1.19}$$

El proceso de valoración de opciones usando el modelo Black-Scholes involucra los siguientes pasos:

Paso 1: Se utilizan las entradas de Black-Scholes para estimar d_1 y d_2 , usando las ecuaciones 1.18 y 1.19, respectivamente.

Paso 2: Se estiman las distribuciones normales $N(d_1)$ y $N(d_2)$ correspondientes a estas variables normales estandarizadas.

Paso 3: Se estima el valor presente del precio de ejercicio, usando la versión para tiempo continuo de la fórmula de valor presente: Ke^{-rt}

Paso 4: El valor de la *call* se estima empleando el modelo Black-Scholes

MARCO TEÓRICO

Las determinantes de valor en este modelo son las mismas que en el binomial: el valor actual del activo subyacente, la variabilidad en el valor del subyacente, el tiempo de duración de la opción, el precio de ejercicio y la tasa libre de riesgo. El principio de los portafolios de réplica que se utiliza para la valuación binomial, también sustenta este modelo. De hecho, el portafolio de réplica se encuentra implícito en el modelo Black-Scholes.

$N(d_1)$, que es el número de acciones que se necesitan para crear el portafolios de réplica se llama opción delta. Este portafolio es autofinanciado y tiene el mismo valor que el *call* en cada estado de la vida de la opción.

Las probabilidades $N(d_1)$ y $N(d_2)$, implícitas en el modelo de valoración de opciones también tienen uso en el análisis. Representan (en términos aproximados) el rango de probabilidad de que la opción estará "*in the money*" en la fecha de expiración, esto es, la probabilidad de que " $S > K$ ". $N(d_1)$ representa el final superior del rango porque siempre será mayor que $N(d_2)$.

Los modelos anteriormente descritos pueden usarse para evaluar cualquier activo que tenga las características de una opción, con algunas modificaciones en la aplicación de los modelos de valoración de opciones dependiendo del caso, a continuación se sugieren algunos ajustes que se podrían necesitar para hacer estos modelos:

Caso del activo subyacente que no se intercambia.

La teoría de valoración de opciones, tal como se presenta en los Modelos Binomial y Black-Scholes, se construye bajo la premisa de que puede crearse un portafolio de réplica usando el activo subyacente y el préstamo bilateral (*borrowing / lending*) libre de riesgo. Mientras que éste es un supuesto perfectamente justificable en el contexto de opciones listadas o acciones en el mercado, se vuelve menos robusto cuando el activo subyacente no es intercambiado y entonces el arbitraje no es factible. Cuando las opciones a evaluar se construyen sobre activos que no son intercambiados en ningún tipo de mercado los valores de los modelos de valoración de opciones deben ser interpretados con mucha cautela.

Caso cuando el precio del activo no sigue un proceso continuo.

Como se comentó con anterioridad, el modelo de valoración de opciones Black-Scholes se deriva del supuesto de que el proceso de precio del activo subyacente es continuo (lo que significa no existen cambios bruscos de precio). Si se viola dicho supuesto, como en muchas opciones sobre subyacentes que no cotizan en mercados organizados, el modelo subestimaré el valor de las opciones "*out of the money*". Una solución es usar estimaciones de varianza más altas para evaluar este tipo de opciones y menores estimaciones de varianza para las opciones "*at the money*" o las "*in the money*"; otra solución es

el utilizar un modelo de valoración de opciones que explícitamente permita brincos en el precio, aunque es muy difícil estimar las entradas de estos modelos.

Caso cuando la varianza es desconocida y cambia a través del tiempo de vida de la opción.

El supuesto que sustenta los modelos de valoración de opciones es el de que la varianza es conocida y no cambia sobre el tiempo de duración de la opción. Éste pareciera muy lógico cuando se aplica a opciones a corto plazo que cotizan en un mercado organizados. Cuando la teoría de valoración de opciones se aplica a opciones que cotizan en mercados organizados a largo plazo existen problemas con este supuesto, pues es poco probable que la varianza se mantenga constante a lo largo de periodos tan extensos de tiempo, y de hecho puede ser mucho más difícil de estimar bajo estas condiciones.

Una vez más, existen versiones modificadas del modelo de valoración de opciones que permiten cambiar varianzas, aunque requieren que el proceso por el cual cambia la varianza sea modelado de manera muy explícita.

Caso del ejercicio de la opción es diferido en el tiempo.

Los modelos de valoración de opciones están basados en la premisa de que el ejercicio de una opción es instantáneo, este supuesto puede ser difícil de justificar con opciones que no se encuentran cotizando en mercados organizados.^{43 44}

1.3 Opciones Reales.⁴⁵

El primer cuestionamiento que surge al abordar este tema es el saber si puede adaptarse eficientemente el modelo de valoración de opciones financieras en las opciones que surgen de los proyectos de inversión de activos reales, de tal forma que puedan extraerse datos concisos que permita tomar decisiones incorporando más información que la que se obtiene por métodos tradicionales de flujos descontados de efectivo.

Se le atribuye la autoría del término “Opciones Reales” a Stewart C. Myers, profesor de Economía Financiera de la Escuela de Administración Sloan del *Massachusetts Institute of Technology*. En su trabajo *Determinants of Corporate Borrowing*⁴⁶ Myers afirma que los métodos FDE comúnmente aceptados para la evaluación financiera de los proyectos de inversión son sumamente limitados, y

⁴³ Ver Stephen Ross *et al.*, *op. cit.*, pp. 636-641

⁴⁴ Ver Frank Reilly y Keith Brown, *op. cit.*, pp. 974-985

⁴⁵ Ver John C. Hull, *op cit* , p.713-727

⁴⁶ Ver Stewart Myers, *Journal of Financial Economics*, Vol. 5, No. 2, (November 1977), pp. 147-175

MARCO TEÓRICO

propone aplicar la teoría de opciones financieras a los proyectos de inversión en activos reales.

Una razón para que este modelo funcione bien para aplicaciones de activos reales es que los pagos de las decisiones contingentes de inversión pueden ser comparados con cualquier situación, característica que es particularmente importante para el diseño proactivo de productos y contratos. Otra razón es que enfoca la naturaleza del riesgo implícito en activos reales. Las empresas saben que aunque algunos de los riesgos que enfrentan provienen de la naturaleza del mercado, otros vienen de fuentes particulares por producto o condiciones financieras específicas de la empresa. El enfoque de opciones reales extiende el modelo de valuación financiera de opciones incorporando los efectos del riesgo del mercado de precios y el riesgo particular de valuación de oportunidades estratégicas de inversión.

La valoración de opciones tiene varias aplicaciones pues es una teoría que puede evaluar cualquier tipo de decisión contingente. En el desarrollo de productos, por ejemplo, las diferentes elecciones de diseño originan diferentes oportunidades que pueden abordarse y que se vuelven diferentes decisiones contingentes. En las grandes (e irreversibles) inversiones, la teoría puede usarse para evaluar las modificaciones a los programas de construcción o intercambios entre los costos de construir opciones de abandonar, posponer, expandir o acelerar contra el valor adicional que cada una de ellas crea. El modelo puede utilizarse para comparar diferentes contratos de opciones con el fin de obtener los pagos finales que cada corporación requiera.

La valuación de opciones, tanto financieras como reales, puede ser poco precisa en la práctica debido a ciertas características de los propios activos y del mercado que pueden evitar que se cumpla la ley de un solo precio que afirma que dos activos que tienen los mismos pagos finales futuros deben tener el mismo valor actual. El modelo de valuación de opciones utiliza el supuesto de ausencia de arbitraje para asegurar de manera dinámica, que el valor de la opción iguale el valor del portafolio mientras evolucionan los precios accionarios. Las consecuencias de la imprecisión dependen directamente de los requerimientos financieros y de comercialización de la empresa y el tipo de industria en el que se desarrolla.

El modelo de valuación de opciones puede representar claramente y de forma visual la magnitud de la imprecisión en la valuación, ya que cada vez que el activo subyacente fluctúa en valor, la composición del portafolio de réplica se actualiza dinámicamente (el cambio en el valor de la opción se ajusta con precisión a través del cambio de valor en el portafolio de réplica).

Existen dos características básicas en los activos reales que provocan el error de réplica:

1. Los costos de replicar
2. La calidad de la réplica (qué tan cerca se mueve el portafolio del valor de la opción)

El seguimiento perfectamente dinámico requiere de actualizaciones frecuentes al portafolio. Cuando es muy costoso cambiar las posiciones del portafolio, puede ser óptimo el dejar que el valor del portafolio de réplica se mueva hacia el valor de la opción durante un período corto de tiempo. En las opciones reales, el portafolio de réplica puede incluir mercancías básicas, productos, servicios y otros activos reales que tienen tres características que dificultan el seguimiento dinámico:

- **Mermas al valor:** Los activos reales pueden generar salidas similares a los dividendos o requerir inyecciones de efectivo. La tasa de conveniencia, que es un retorno adicional, puede comenzarse a ganar al llevar un inventario de mercancías básicas que puede ser fácilmente surtido en el mercado. Solamente el tenedor del activo (y no de la opción) obtiene dicha tasa y los flujos del activo subyacente. Para los otros integrantes de la transacción, esto aparece como una “merma” en el valor del activo subyacente y se requiere de un ajuste al modelo de valuación de opciones debido a que el tenedor de la opción y el portafolio de réplica no obtienen flujos de las tasas de conveniencia.
- **Riesgo base:** Las acciones que se intercambian en el portafolio, a menudo están altamente correlacionadas al valor de la opción (aunque esta coincidencia no es perfecta). Se llama riesgo base al ajuste imperfecto que es causado por diferencias en la calidad del producto, localización o retrasos la entrega. Este riesgo surge cuando existen diferencias entre el activo estandarizado que se intercambia y el verdadero activo subyacente, causando que los valores del portafolio de réplica sean diferentes al valor de la opción. Estas diferencias pueden estar causadas por la calidad del producto, condiciones geográficas, planeación, etc. Las consecuencias de este tipo de riesgo dependen específicamente de la clase de opción y la empresa.
- **Riesgo privado:** Las opciones reales contienen riesgos que no se observan en otros activos de intercambio y que no están valorados en los mercados financieros. Por ejemplo, el riesgo de fallar al desarrollar una nueva tecnología se clasifica como un riesgo privado para una empresa de alta tecnología, o el riesgo de no encontrar una cantidad suficiente de petróleo en un prospecto de reserva petrolera es un riesgo particular de una empresa petrolera. El efecto del riesgo privado en el modelo de valuación de opciones puede ser cuantificado, pero no replicado en las acciones intercambiadas. Para entender mejor este concepto, puede pensarse que las decisiones personales son opciones que solamente involucran el riesgo privado: utilizar una sombrilla en un día nublado (la opción de tener refugio de la lluvia), la decisión de adquirir una extensión de cobertura para la póliza de seguro del auto (la opción de

MARCO TEÓRICO

limitar pérdidas si se tiene un accidente), etc. La información acerca de este riesgo se obtiene de la experiencia histórica o los datos actuariales y no está influenciada por los precios del mercado. Las decisiones de negocios siempre se ven afectadas por el precio de algunos activos de la economía y la aproximación de opciones reales extiende la disciplina de los mercados financieros a la valuación de opciones cuyo valor depende de una mezcla de riesgo privado y riesgo de precios de mercados.⁴⁷

1.3.1 Proceso de Aplicación de Opciones Reales.⁴⁸

Una oportunidad corporativa de inversión es como una opción *call* porque la corporación tiene el derecho, pero no la obligación de adquirir, por ejemplo, los activos operativos de un nuevo negocio. Si pudiera encontrarse una opción *call* lo suficientemente similar a la oportunidad de inversión, el valor de la opción proporcionaría información relevante sobre el valor de la oportunidad. Desafortunadamente muchas oportunidades de negocio son únicas, así que la posibilidad de encontrar una opción similar es muy baja y la única manera viable de lograrlo es construyendo la opción. Para hacerlo, es necesario establecer la correspondencia entre las características del proyecto y las cinco variables que determinan el valor de una opción *call* simple en un intercambio de acciones. Al relacionar estas características con la oportunidad de negocio, bajo la estructura de una opción *call*, se obtiene un modelo del proyecto que combina sus características particulares con la estructura de dicha opción. Se modela con un *call* Europeo, que es la más simple de todas las opciones porque puede ser ejercida solo en una fecha: su fecha de expiración y la opción que resulta de este modelo no es un sustituto perfecto para la oportunidad real, pero como se ha diseñado de tal forma que se parezca lo más posible, es *per se*, informativa.

Tabla 1: Similitud entre un *call* y una oportunidad de inversión

| OPORTUNIDAD DE INVERSIÓN | VARIABLE | OPCIÓN CALL |
|--|------------|--|
| Valor presente de los activos que serán adquiridos | S | Precio de venta del subyacente |
| Inversión inicial | K | Precio de ejercicio |
| Tiempo durante el cual se puede diferir la decisión de efectuar la inversión | t | Tiempo restante para la expiración de la opción. |
| Tasa libre de riesgo | r_f | Tasa libre de riesgo |
| Varianza del rendimiento del proyecto | σ^2 | Varianza del rendimiento del subyacente |

Fuente: *Project valuation using Real Options*⁴⁹

Algunos proyectos involucran un gasto grande para construir un activo productivo. Invertir para explotar una oportunidad de negocios es análogo a ejercer una opción en un intercambio de acciones. El monto de dinero invertido

⁴⁷ Ver Martha Amram y Nalin Kulatilaka, *Opciones Reales*, pp.77-87

⁴⁸ Ver Jonathan Mun, *Real Options Analysis Course*, pp. 39-56

⁴⁹ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *op. cit.*, pp.6-7

corresponde al precio de ejercicio de la opción (K). El valor presente del activo adquirido corresponde al precio de venta de las acciones (S). El tiempo en la cual la compañía puede diferir la decisión de inversión sin perder la oportunidad corresponde al tiempo de expiración de la opción (t). La incertidumbre sobre el valor futuro de los flujos de efectivo del proyecto, esto es, el riesgo del proyecto, corresponde a la desviación estándar de ganancias sobre el activo (σ). El valor del dinero en el tiempo, está dado en ambos casos por la tasa libre de riesgo (r_f).

Los métodos tradicionales de FDE califican las oportunidades al presentar los valores presentes netos. El valor presente neto (VPN) es la diferencia entre cuánto valen los activos requeridos para el iniciar el proyecto (su valor presente) y cuánto cuestan (la inversión que debe efectuarse).⁵⁰

Si el VPN es positivo, la empresa incrementará su propio valor al llevar a cabo la inversión. Cuando el VPN es negativo, es más recomendable que la empresa no invierta.

Cuando una decisión final sobre el proyecto no puede ser diferida por más tiempo el VPN y el valor de opción del proyecto son iguales; esto es, cuando la "opción" de la compañía ha alcanzado su fecha de expiración. En ese momento, se toma el que sea mayor de ambos:

$$\text{Valor de la opción} = \text{MAX}\{S - K \mid 0\}$$

(Ec. 1.20)

Se sabe que a partir de las correspondencias de la Tabla 1, S es el valor presente de los activos del proyecto y K es igual al gasto de capital requerido para la inversión. Para compararlos solamente es necesario observar que cuando el VPN es negativo los inversionistas no llevarán a cabo la inversión, así que el valor del proyecto es efectivamente cero (como en el valor de una opción), en vez de negativo (ya que todavía no se ha llevado a cabo la inversión y por lo tanto no se pierde nada). De esta forma, puede concluirse que ambos métodos recurren al mismo número y la misma decisión.

Esta coincidencia entre el VPN y el valor de las opciones tiene una gran utilidad práctica. Significa que la información de una corporación que se combina para el VPN convencional es relevante para la valoración de opciones. Cualquier cálculo que derive del VPN ya contiene la información necesaria para computar S y K , que son dos de las cinco variables en la valoración de opciones. De acuerdo a esto, los ejecutivos que quieren utilizar la valoración de opciones no necesitan desechar sus sistemas de valuación basados en FDE.

En el análisis de inversión tradicional, un proyecto o nueva inversión debería ser aceptado solamente si los rendimientos sobre el proyecto exceden el costo de

⁵⁰ Ver Punto 1.1.1.1.

MARCO TEÓRICO

capital; en el contexto de flujos de efectivo y tasas de descuento, esto se traduce en proyectos con valores presentes netos positivos. La limitante con este punto de vista, que analiza proyectos en la base de flujos esperados y tasas de descuento, es que falla en considerar completamente las múltiples opciones que usualmente están asociadas con algunas inversiones.^{51 52}

1.3.2 Tipos de Opciones Reales.

A continuación se presentan los tipos básicos de opciones reales que están implícitas en los proyectos de inversión. La primera, es la opción de posponer un proyecto; la segunda, es la opción de expandir un proyecto para cubrir nuevos productos o mercados en algún tiempo futuro; la tercera es la opción de contraer un proyecto; la cuarta es la opción de abandonar un proyecto si los flujos de efectivo no alcanzan las expectativas, y la quinta es un tipo de opción a la que podemos llamar “en” el proyecto. Finalmente también se presentan tipos avanzados de opciones reales.

1.3.2.1 Opción de Esperar.⁵³

Los proyectos son analizados comúnmente basándose en los flujos de efectivo esperados y las tasas de descuento al momento del análisis; el valor presente neto calculado bajo esas bases es una medida de su valor y aceptabilidad a ese tiempo. Los flujos de efectivo esperados y las tasas de descuento cambian a lo largo del tiempo y, de la misma forma, lo hace el valor presente neto. Así pues, un proyecto que tiene valor presente neto negativo el día de hoy puede tener valor presente neto positivo en el futuro. En un medio competitivo, en el que las empresas no tienen ventajas especiales sobre sus competidoras al tomar los proyectos, esto pudiera no parecer significativo. Pero en un medio en el que un proyecto puede tomarse solamente por una empresa (debido a las restricciones legales u otras barreras de entrada para competidores), los cambios en el valor del proyecto a través del tiempo le dan las características de una opción *call*.

En resumen, se supone que un proyecto requiere una inversión inicial de K y el valor presente esperado de los flujos de efectivo calculado al día de hoy es S . El valor presente neto del proyecto es la diferencia entre los dos:

Ahora, al suponer que la empresa tiene derechos exclusivos sobre el proyecto por los siguientes “ n ” años y que el valor presente de los flujos puede cambiar a través del tiempo, debido a cambios ya sea en los flujos de efectivo o la tasa de descuento. Así, el proyecto pudiera tener un valor presente neto negativo ahora, pero aún así ser un buen proyecto si la empresa espera. Al redefinir S como el valor presente de los flujos de efectivo, la regla de decisión de la empresa sobre este proyecto puede resumirse de la siguiente forma:

⁵¹ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *op. cit.*, pp.131-151

⁵² Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *op. cit.*, pp.53-61

⁵³ Ver Martha Amram y Nalin Kulatilaka, *op. cit.*, p. 30

$S > K \Rightarrow$ Tomar el proyecto pues tiene VPN positivo

(Ec. 1.21)

$S < K \Rightarrow$ No tomar el proyecto pues tiene VPN negativo

(Ec. 1.22)

Si la empresa no toma el proyecto, esto implica que no habrá flujos de efectivo adicionales, aunque se pierda lo que originalmente se invirtió en dicho proyecto.

Las entradas que se necesitan para aplicar la teoría de valoración de opciones para evaluar la opción de posponer son las mismas que se necesitan para cualquier opción. En este tipo de opción el equivalente de dividendos es el costo de posponer.

1.3.2.2 Opción de Expandir. ⁵⁴

En algunos casos las empresas inician proyectos únicamente porque al hacerlo se permiten acceso a otros proyectos o la entrada a otros mercados en el futuro. En tales casos puede argumentarse que los proyectos iniciales son opciones que permiten que la firma amplíe sus horizontes, y por lo tanto, debería estar dispuesta a pagar un precio por dichas opciones aceptando valores presentes netos negativos en el proyecto inicial debido a la probabilidad de valores presentes positivos elevados en proyectos futuros.

a. Consideraciones estratégicas / Opciones.

En algunas adquisiciones o inversiones, la empresa adquiriente supone que la transacción le dará futuras ventajas competitivas.

b. Investigación y desarrollo de mercados.

Las empresas que invierten considerables montos en investigación, desarrollo y pruebas de mercado a menudo encuentran dificultades al evaluar estos gastos pues los pagos finales siempre están en términos de proyectos futuros. Así mismo, existe una posibilidad real de que una vez que se ha gastado el dinero, los proyectos o productos pueden volverse no viables y en consecuencia, el gasto se maneja como costo. De hecho, puede argumentarse que el campo de investigación y desarrollo tiene las características de una opción *call*, pues el monto gastado en este rubro es el costo del *call* y los proyectos o productos que podrían surgir de la investigación representan los pagos finales de las opciones. Si estos productos son viables (esto es, el valor presente de los flujos excede la inversión necesaria), el pago final es la diferencia entre éstos, y si no, el proyecto no se acepta y tiene un pago final de cero.

⁵⁴ *Ibidem*, p.31

c. Proyectos e inversiones multifacéticos.

Cuando se habla de nuevas inversiones o entradas a un nuevo negocio las empresas en ocasiones tienen la opción de entrar a la industria por etapas. Al hacerlo, pueden reducir pérdidas potenciales y protegerse del riesgo al decidir en cada etapa, evaluando la demanda y decidiendo si se pasa o no a la siguiente etapa. En otras palabras, un proyecto estándar puede reclasificarse como una serie de opciones de expansión donde cada opción dependerá de su predecesora.

1.3.2.3 Opción de Contraer.⁵⁵

En contraposición a la opción de expansión, este tipo de opción considera la importancia que en el mundo de los negocios moderno se le dan a actividades como el *downsizing* y el *outsourcing*, que permiten a una organización adaptarse mejor a las necesidades de su entorno al poder concentrar sus recursos en la actividad principal de la organización. Las empresas pueden cubrirse a sí mismas a través de opciones estratégicas de contracción. La opción de contracción tiene las mismas características que una opción *put*, porque el valor de la opción se incrementa a medida que el valor del subyacente decrece.

1.3.2.4 Opción de Abandonar.⁵⁶

La opción final que se considerará es la de abandonar un proyecto cuando sus flujos no cumplen con las expectativas. Una forma de reflejar este valor es a través de árboles de decisión. Esta aproximación ha limitado la aplicación en la mayoría de análisis de inversión del mundo real, trabaja típicamente en proyectos multifacéticos y requiere entradas de probabilidad a cada fase del proyecto. La aproximación de valoración de opciones representa una forma más general de estimar y construir el valor de abandono en un valor de opción. Para ilustrar, supóngase que S es el valor remanente de un proyecto si este continúa hasta el final de su duración, y K es la liquidación o valor de abandono para el mismo proyecto en el mismo punto del tiempo. Si el proyecto tiene una vida de n años, el valor de continuar con el proyecto puede compararse al valor de liquidación o abandono; si el valor de continuar es mayor, entonces debe seguirse adelante y si el valor de abandono es alto, el tenedor de la opción de abandono podría considerar abandonar el proyecto:

El hecho de que la opción de abandono tenga valor representa una razón para que las empresas planeen considerando la flexibilidad operativa para cancelar o terminar proyectos si no cumplen con las expectativas. También indica que las empresas que se enfocan en generar más ganancias al ofrecer a sus clientes la

⁵⁵ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *op. cit.*, p. 116

⁵⁶ *Ibidem*, p. 102

opción de alejarse de compromisos, podría ser más pérdida que ganancia a lo largo del proceso.

a. Cláusulas de escape en los contratos.

La primera y más directa forma es construir flexibilidad operativa desde el contrato y entre las partes involucradas en el proyecto. Así, los contratos con acreedores y proveedores pueden circunscribirse en una base anual (en vez de una a largo plazo) y los empleados pueden contratarse en una base temporal (en vez de permanente). La planta física que se usa para el proyecto, puede rentarse por un plazo corto en vez de comprarse y la inversión financiera puede llevarse a cabo en fases en lugar de una sola exhibición. Aunque existe un costo de construir esta flexibilidad, las ganancias pueden ser mucho mayores, especialmente en negocios volátiles.

b. Incentivar al cliente.

En el otro lado de la transacción, el ofrecer opciones de abandono a los clientes y socios en *joint ventures* puede tener un impacto negativo en el valor. Como ejemplo, supóngase una empresa que vende sus productos en contratos multianuales ofrece a los clientes una opción de cancelar el contrato en cualquier tiempo. Mientras esto podría hacer más atractivas las negociaciones e incrementar las ventas, es probable enfrentar un costo sustancial. En un evento de recesión, las empresas que son incapaces de enfrentar sus obligaciones muy probablemente cancelen sus contratos cuando existe suficiente volatilidad en el ingreso. Cualquier beneficio obtenido de la venta inicial (obtenido de la oferta de inducción de cancelación por parte del vendedor) puede ser neutralizado por el costo de la opción que se dio a los consumidores. Al tener en claro que cualquier proyecto de inversión puede ser evaluado bajo la teoría de opciones reales, con la finalidad de disponer más información y considerar variables de comportamiento aleatorio (como la volatilidad de los ingresos), puede desarrollarse un caso práctico en el entorno de la realidad mexicana contemporánea con el fin de demostrar la factibilidad de la aplicación del modelo a cualquier esquema administrativo.

1.3.2.5 Opciones “en” Proyectos.⁵⁷

Las opciones “en” proyectos son una clasificación sobre un tipo de opciones reales introducidas por el Dr. Richard de Neufville y que hace referencia a opciones que son inherentes al diseño o funcionamiento del proyecto en sí, a diferencia de los otros tipos de opciones que responden a circunstancias externas al proyecto (como la demanda, la política fiscal, subsidios, etc.), las opciones “en” proyectos son la parte del proyecto sobre la cual los inversionistas tienen un control considerable. A las opciones “en” proyectos nos es posible

⁵⁷ Ver Tao Wang, *Real Options “in” projects and systems design*, p. 106

MARCO TEÓRICO

dividir las en otras clasificaciones como serían las opciones de flexibilidad y las opciones de aprendizaje.

1.3.2.5.1 Opciones de Flexibilidad.⁵⁸

Son aquellas opciones donde al inversionista se le presentan oportunidades “en” el proyecto para cambiar los insumos de un proceso, o el proceso en sí, también se puede considerar como una opción de flexibilidad la posibilidad de cambiar distintos aspectos del diseño del proyecto sin alterar su finalidad. Por ejemplo, una constructora que pretende construir un puente tiene múltiples opciones de flexibilidad tan solo en la selección del diseño arquitectónico del puente, además se le presentarán opciones de flexibilidad para seleccionar a los proveedores de sus materiales, así como la calidad de los mismos. Como vemos las opciones de flexibilidad se presentan a lo largo de la vida del proyecto en muy distintas formas y en su conjunto tienen un impacto significativo sobre el resultado final del mismo.

1.3.2.5.2 Opciones de Aprendizaje.⁵⁹

Este tipo de opciones se refieren a la adquisición de conocimiento que se va realizando conforme madura un proyecto. Las opciones de aprendizaje se presentan cuando los encargados de desarrollar el proyecto o las personas relacionadas a su ejecución adquieren información nueva que no poseían antes de la realización del proyecto y que les es de utilidad para concluir la inversión en forma satisfactoria. Tenemos por ejemplo el caso de un estudio de la industria cinematográfica americana que tiene tres películas para estrenar en temporada navideña y no tiene parámetros para definir a cual debe dedicar mayor presupuesto de publicidad. Por lo que decide estrenar las tres películas por anticipado en ciudades seleccionadas, la que sea mejor recibida por el público será la primera en estrenarse a nivel nacional y la que se llevará la mayor parte del presupuesto de publicidad, lo que significa que al término de la etapa de exhibición en ciudades seleccionadas la empresa habrá adquirido información estratégica que le permitirá tomar una decisión informada y por lo tanto con mayor certidumbre. A este proceso de adquirir información nueva lo llamamos opción de aprendizaje y en un esquema de valoración tradicional jamás hubiera sido considerado para la evaluación de la inversión.

1.3.2.6 Tipos Avanzados de Opciones Reales.⁶⁰

Así como en el caso de las opciones financieras existen opciones exóticas, en el caso de las opciones reales tenemos opciones avanzadas que derivan de los tipos básicos. Los tipos avanzados de opciones reales son:

⁵⁸ Ver Martha Amram y Nalin Kulatilaka, *op. cit.*, p. 31

⁵⁹ *Ibidem*, p. 32

⁶⁰ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *op. cit.*, pp. 145-192

- Opciones sobre Opciones: usualmente se presentan en proyectos desarrollados en etapas. La realización de cada etapa presenta opciones para llevar a cabo y el ejercicio de las opciones en una etapa traerán nuevas opciones en la siguiente etapa.
- Opciones en Paralelo: Son similares al caso de las opciones sobre opciones, con la diferencia de que éstas no se desarrollan por etapas sino en forma simultánea.
- Opciones Arcoíris: Son aquellas opciones que se presentan en proyectos con múltiples fuentes de incertidumbre que tienen un gran impacto sobre el desarrollo de éste. Para el cálculo de este tipo de opciones es necesario considerar distintos factores de volatilidad.
- Opciones con Volatilidad Cambiante: Son aquellas opciones que se presentan en proyectos donde el factor de volatilidad variará considerablemente a lo largo de la vida del proyecto.

1.3.3 Valoración de Opciones Reales.

Se utilizan esencialmente tres métodos para la valoración de opciones reales; los dos primeros son basados en los modelos usados para valorar opciones financieras, el tercero es el conocido como Simulación. Como se muestra en la valoración de opciones financieras, los distintos métodos siguen lógicas similares y si los cálculos se realizaron correctamente el valor de los tres debe ser aproximadamente el mismo.

1.3.3.1 Ecuaciones Diferenciales Parciales.⁶¹

Este método involucra el desarrollo de una ecuación matemática, la cual al ser solucionada nos da un valor aproximado al valor de la opción real. La ecuación diferencial parcial más conocida es la ecuación del modelo Black-Scholes, la cual se abordó con anterioridad en el punto 1.2.2.2 de esta investigación.

La ecuación diferencial parcial debe tener límites específicos, como lo son la duración de la opción, valores extremos que puede tomar la opción, etc., y en general condiciones que describan el cambio en el valor de la opción en relación con cambios mensurables en el mercado. En una ecuación de solución analítica de forma cerrada, como lo es la ecuación Black-Scholes, es posible obtener el valor de la opción con una sola ecuación. Cuando no es posible llegar a una solución analítica de forma cerrada es posible realizar aproximaciones empleando distintas técnicas matemáticas.

⁶¹ *Ibidem*, pp. 67-68

MARCO TEÓRICO

En términos generales se considera que el método de solución por ecuación diferencial parcial es el más elegante de todos los métodos pues una vez desarrollada la ecuación y recopilados los insumos de la misma es factible llegar a un valor de la opción real de manera sumamente sencilla. Sin embargo este método tiene la gran desventaja de ser el más difícil de entender y desarrollar por los cálculos matemáticos requeridos para llevarlo a cabo.

1.3.3.2 Enrejado.^{62 63}

El enrejado es similar a un árbol de decisión, éste considera la evolución de los valores de un activo subyacente a lo largo de la vida de una opción. Se llega a una solución al optimizar decisiones futuras en los distintos puntos de decisión futuros y trayéndolas en formas recursiva al punto de decisión actual.

El tipo de enrejado más conocido es el Modelo Binomial que fue analizado en el punto 1.2.2.1 de esta investigación, para resolver enrejados más complejos es posible seguir la misma metodología a la usada en el Modelo Binomial, pero por obvias razones el cómputo y los cálculos para llegar a la solución del mismo será más complejo. En términos generales el método del enrejado es visto como el más sencillo para calcular el valor de las opciones reales, aunque su cálculo será relativamente más laborioso a la larga que el método de Ecuaciones Diferenciales Parciales.

1.3.3.3 Simulación.⁶⁴

Este método consiste en estimar el valor de la opción a través de la simulación de miles de rutas de valores potenciales del activo subyacente a lo largo de la vida de la opción tomando en consideración ciertos límites dados por la volatilidad del valor del activo. Los insumos necesarios para llevar a cabo la simulación son:

- Valor actual del activo subyacente. (S_0)
- Volatilidad del valor del activo. (σ)
- Precio de Ejercicio. (K)
- Vida de la opción. (t)
- Tasa libre de riesgo correspondiente a la vida de la opción. (r_f)
- Incremental de pasos de tiempo a considerar a lo largo de la vida de la opción. (δ_t)

La vida de la opción se divide en pasos, para cada paso el valor del subyacente es calculado miles de veces, para el paso 0 el valor del subyacente será S_0 , pero en adelante para calcular el valor potencial del subyacente se utiliza la siguiente ecuación:

⁶² *Ibidem*, pp.70-74

⁶³ Ver Jonathan Mun, *op. cit.*, pp. 73-94

⁶⁴ Ver Prasad Kodukula y Chandra Papudesu, *op. cit.*, pp.68-69

$$S_t = S_{t-1} + S_{t-1}(r_f \delta_t + \sigma \varepsilon \sqrt{\delta_t})$$

(Ec. 1.23)

Donde “ ε ” es el valor simulado de una distribución normal con media 0 y varianza 1.

En caso de una opción *call* Europea simple el cálculo del valor de la misma a través de simulación es relativamente sencillo, en comparación con los cálculos más complejos para calcular opciones Americanas. Sin embargo en la actualidad a través de paquetes informáticos es posible hacer las simulaciones con relativa facilidad.

2. REVISIÓN DE LITERATURA.

Continuando con el curso de la investigación resulta oportuno analizar las aportaciones e investigaciones que se han realizado sobre el tema de opciones reales, para determinar no sólo qué tipo de investigaciones se han llevado a cabo para desarrollar el método, sino qué sentido va tomando el mismo y hacia dónde se orienta la investigación. Para presentar dicho análisis se atiende en primer instancia a las aportaciones para el desarrollo histórico del método como plataforma para posteriormente analizar las aportaciones que se han realizado para la valoración de las opciones reales, así como los insumos de información de mayor relevancia para llevar a cabo dicho análisis (el subyacente y la volatilidad). Se presentan también los casos en la literatura de opciones reales aplicados a proyectos agrícolas y de energía, por ser ramas relacionadas a esta investigación y finalmente se presenta un aporte sobre la categoría de la opciones reales “en” proyectos al ser una línea de investigación reciente sobre el método.

2.1. Desarrollo del Método de las Opciones Reales.

De acuerdo a Malkiel (2000) las opciones, ya sea como instrumentos independientes o como partes de un contrato, han sido utilizadas por el hombre desde la antigüedad, existe evidencia histórica que indica que contratos similares a las opciones se llevaban a cabo para comprar o vender toda clase de bienes. Los *puts* y los *refusals (calls)* comenzaron a ser negociados más formalmente en el Londres del s. XVIII durante el reinado de Guillermo III.

Sin embargo, es hasta el s. XX que el mercado de las opciones financieras comienza a vivir un verdadero auge; según Hull (1999), las opciones financieras fueron negociadas por vez primera en un intercambio organizado por la recién formada *Chicago Board Options Exchange* en 1973, como consecuencia de la publicación del modelo Black-Scholes para la valoración de opciones financieras de ese mismo año desarrollado por Fisher Black y Myron Scholes, con posteriores aportaciones de Robert Merton (Black y Scholes, 1973; Merton, 1973).

Es Stewart Myers (1977), catedrático del *Massachusetts Institute of Technology*, uno de los primeros en reconocer las limitaciones inherentes a los métodos de evaluación financiera por flujos descontados de efectivo (FDE) para la valoración financiera de los proyectos de inversión. Myers sugirió buscar la aplicación del método de valoración de opciones financieras para llevar a cabo la valoración de proyectos de inversión reales como alternativa a los métodos FDE, así también acuñando el término “Opciones Reales”.

Dixit y Pindyck (1994) remarcaron la importante característica de la irrevocabilidad de la mayoría de las decisiones de inversión, y la constante incertidumbre en el ambiente en el cual se toman estas decisiones. De tal forma, reconocieron el valor de la opción de esperar por mejor información (aunque

REVISIÓN DE LITERATURA

esta nunca será completa). Su investigación se centra en entender el comportamiento de las empresas para la toma de decisiones de inversión, y de desarrollar las aplicaciones del método de opciones reales para la dinámica industrial y la regulación gubernamental vigente.

Trigeorgis (1996) reunió conocimiento previamente disperso sobre opciones reales, en su libro repasa las técnicas de presupuesto de capital y detalló una aproximación basada en la valoración de opciones que proporciona medios de cuantificar la flexibilidad. También se ocupó de la interacción de las opciones, de la valoración de opciones sobre opciones y opciones simultáneas, que son comunes en los proyectos que implican opciones reales, y de la valoración del impacto de interacciones competitivas. La metodología en su investigación es teórica y ha ayudado a formar técnicas más prácticas para la valoración de las opciones reales.

Amram y Kulatilaka (1999) escribieron un libro introductorio sobre opciones reales que a través de los años ha ganado popularidad por la forma práctica y sencilla con la que explican distintos conceptos sobre el tema, incluyendo opciones financieras y aplicaciones de opciones reales. Dan a los lectores una idea de cómo las opciones reales pueden ser aplicadas extensamente, pero lamentablemente no proporciona una metodología práctica detallada para evaluar opciones reales.

El principio del siglo XXI ha visto un auge en la publicación de libros e investigaciones académicas sobre opciones reales enfocados en su aplicación. Copeland y Antikarov (2001) escribieron un libro polémico aunque influyente sobre opciones reales. Su principal aporte es conocido como "negación del activo de mercado" (MAD por sus siglas en inglés), o "el valor actual de los flujos de efectivo del proyecto sin la flexibilidad (es decir, el VPN tradicional) es la mejor estimación imparcial del valor comercial del proyecto cuando este es negociado. De acuerdo con MAD, establecieron un procedimiento para valorar las opciones reales que no son comúnmente negociadas en el mercado.

Howell *et al.* (2001) ofrecen un libro accesible para la introducción al tema de opciones reales dirigido a lectores con conocimiento técnico avanzado. El libro intenta cubrir el lado técnico en forma transparente para los estudiantes de posgrados en disciplinas económico-financieras y los practicantes avanzados.

Rogers (2002) describe un marco de trabajo y elabora en la aplicación de las opciones reales como producto de su experiencia ganada como consultor de PricewaterhouseCoopers. La primera mitad del libro reúne desarrollos en estrategia, opciones reales, administración de riesgos y teoría de juego para apoyar el proceso de toma de decisiones de los directivos de empresas. La segunda mitad del libro describe las herramientas y el marco matemático en una amplia gama de áreas necesarias para apoyar el uso de opciones reales para los analistas técnicos.

Boer (2002) desarrolla su trabajo enfocado a los lectores no matemáticos interesados en conocer el método de opciones reales. Él procura aproximar al lector de una manera no técnica a la teoría de las opciones reales sin el recurso de los métodos matemáticos. Su libro es básicamente expositivo y procura construir sobre la familiaridad de los lectores con las opciones financieras.

Aunque la teoría de las opciones se ha aplicado con éxito a muchas áreas el uso de opciones reales en la ingeniería ha sido lento, especialmente con respecto a la flexibilidad en los sistemas físicos dentro de sí mismos. Neufville (2002) sugirió distinguir entre las opciones reales "sobre proyectos" y "en proyectos". Las opciones reales "sobre proyectos" se refieren al proyecto pero no al diseño del sistema, por ejemplo, las opciones inherentes en hacer una oferta para abrir una mina. Las opciones reales "en proyectos" se refieren a los elementos del diseño del sistema y requieren la comprensión detallada del sistema, por ejemplo, opciones para el reacomodo de constelaciones de satélites de comunicación.

Mun (2003) proporciona una descripción cualitativa y cuantitativa de opciones reales y proporciona múltiples panoramas de casos de estudio y escenarios de la vida real. Él explica aplicaciones prácticas de opciones reales, reduce al mínimo la cobertura en la réplica de portafolios y se enfoca en la valoración neutral al riesgo.

Brach (2003) explora cómo aplicar técnicas para la valoración de opciones reales en forma regular desde la perspectiva de un practicante corporativo. La autora es un médico que ha trabajado como investigadora por años. Ella tiene un elevado conocimiento en cuidado médico e investigación farmacéutica, por lo que emplea su abundante experiencia para desarrollar muchos ejemplos interesantes de opciones reales relacionadas con el desarrollo farmacéutico de medicamentos.

A más de 20 años de desarrollo de la metodología de opciones reales se ha publicado una gran cantidad de artículos sobre este tema. Un buen centro de información de opciones reales ha sido desarrollado por Marco Dias, catedrático de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (<http://www.pucrio.br/marco.ind/main.html#contents>).

Borison (2003) ofrece una descripción excelente del enfoque de las opciones reales al proporcionar una crítica de los principales conceptos analíticos propuestos para el método, así como de su aplicabilidad y mecánica.

Schwartz y Trigeorgis (2004) elaboraron una recopilación de lecturas selectas sobre el tema donde tratan tópicos tales como razones que explican el problema de subinversión y el marco conceptual para analizar las inversiones productivas como opciones reales, la valoración, la cuantificación de distintos tipos de

REVISIÓN DE LITERATURA

opciones reales en forma separada y combinada, aspectos estratégicos de la inversión bajo incertidumbre, técnicas de análisis numérico, una variedad de aplicaciones incluyendo la valoración de recursos naturales, Investigación y Desarrollo, desarrollo de inmuebles, adquisiciones estratégicas, subsidios gubernamentales, plantas de energía y opciones de contaminación, manufactura flexible, operaciones multinacionales, así como experiencia empírica de renta de licencia para explotación de pozos petroleros, precios de tierra y operaciones discontinuas.

2.2 Métodos de Valoración.

La revisión de la literatura en esta sección se centra más en el uso de la metodología de la valoración, dejando un tanto de lado el desarrollo teórico expuesto en el punto anterior.

El arbitraje forzoso es una condición a cumplir que es parte fundamental de la valoración tradicional de las opciones. Sin embargo, hay otras maneras de valorar opciones que pueden ser utilizadas si el concepto del no-arbitraje es inaplicable.

Baxter y Rennie (1996) explican; si hay arbitraje éste hará cumplir un precio para las opciones. Este precio no depende ni del valor previsto ni de la distribución particular de los activos subyacentes. Hay tres categorías de los métodos de arbitraje forzoso: ecuación diferencial parcial (EDP) por ejemplo: la fórmula Black- Scholes, la programación dinámica con los árboles (Enrejado), y la Simulación.

2.2.1. Método de la Ecuación Diferencial Parcial

El método de EDP es estándar y utilizado extensamente en la discusión académica debido a la perspectiva matemática del método. McDonald y Siegel (1986) estudiaron el valor de esperar a invertir por EDPs. Siegel, Smith y Paddock (1987) valoraron el arrendamiento de licencias para la explotación de petróleo usando EDPs. Pindyck (1993) estableció EDPs para modelar la incertidumbre del costo de proyecto, y en lo que concierne a costo de entrada. Grenadier y Weiss (1997) estudiaron las opciones para la inversión en innovaciones tecnológicas.

En la literatura se encuentran muchos ejemplos sobre este método ya que en el ambiente académico es el más estudiado. Entre algunas investigaciones que demuestran el uso del método se puede señalar a Alessi (2002), quien en un corto trabajo expone el modelo de Kulatilaka (1988) para un Sistema de Manufactura Flexible (FMS por sus siglas en inglés) que se reinterpreta como una versión de opciones reales en la programación dinámica del análisis tradicional de Costo-Volumen-Utilidad. Los ejemplos numéricos replican los resultados alcanzados por Dixit y Pindyck (1994). Por otra parte se analiza una

versión distinta del ejemplo numérico de Kulatilaka (1988). Los resultados incluyen no solamente el valor de la planta flexible, descompuesto en su valor base y el valor de las opciones de flexibilidad (es decir opción del abandono, opción de elegir modelo de producción, opción de producción bajo pedido y la opción de esperar para invertir), pero también los límites del modelo (umbrales) son derivados no solamente para el periodo inicial, sino también para el resto de la vida del proyecto. En conclusión, este trabajo demuestra qué tan poderoso es el Modelo General de Valoración de Opciones Reales (GROPM) de Kulatilaka para alcanzar a través de simples métodos numéricos los resultados que otros modelos, por ejemplo Dixit y Pindyck (1994), consiguen con álgebra estocástica simbólica muy complicada.

Otra investigación que nos permite familiarizarnos con el método es Li (2002), donde se analizan los enfoques de opciones reales que se pueden emplear para valorar la flexibilidad en el transcurso de la toma de decisiones de inversiones en fases. Este trabajo se centra en los problemas de la inversión en dos etapas de las empresas. En primer lugar, basados en las ideas del análisis de la función de utilidad y de las opciones reales, se proponen los modelos estocásticos para describir la incertidumbre presente en tales problemas y se deriva una función del valor de la flexibilidad para la toma de decisiones. Finalmente se emplean técnicas numéricas para calcular las proporciones óptimas de financiamiento para un caso de estudio y también se analiza la influencia de las proporciones de la inversión sobre el valor de la flexibilidad.

Estos son tan sólo algunos ejemplos de la aplicación del método en la literatura, como ya se ha hecho mención es el método más estudiado y la literatura sobre este es basta, aunque debido a la necesidad de avanzados conocimientos matemáticos también es el método más complicado para los practicantes.

2.2.2. Método del Enrejado.

El método del enrejado comúnmente conocido por su modelo del árbol estudiado en forma binomial, aunque este puede ser trinomial o multinomial, se basa en una representación simple de la evolución del valor de un activo subyacente. Es un método poderoso para valorar opciones reales desarrollado por Cox, Ross, y Rubinstein (1979). Luenberger (1998) demostró ejemplos usando árboles binomiales para valorar una oportunidad de inversión real en una mina de oro. Copeland y Antikarov (2001) elaboraron una investigación que demuestra cómo utilizar árboles binomiales para valorar proyectos reales y probaron que este método es equivalente a la solución de EDP, además de ser fácil de utilizar sin perder la lógica del modelo de la EDP.

Los modelos alternativos del enrejado se pueden también utilizar para evaluar opciones reales, tales como el método trinomial usado por Tseng y Zhao (2003). Hay numerosos métodos basados en el enrejado tales como el de Copeland y de Antikarov que Borison (2003) discutió detalladamente.

REVISIÓN DE LITERATURA

Kodukula y Papudesu (2006) elaboran sobre la base establecida por Copeland y Antikarov en relación a la equivalencia de los métodos EDP y del Enrejado, centrando su investigación en este último y sugiriendo a los practicantes hacer uso del Enrejado al ser un método más fácil de entender que el EDP, además de brindar múltiples ejemplos de aplicaciones del método del Enrejado tanto para opciones reales básicas como avanzadas.

Algunos ejemplos en la literatura se encuentran en Gregor (2003) e Imai y Watanabe (2005). En Gregor se analiza el interesante ejemplo de la Marina de los EE.UU. y su necesidad de adquirir embarcaciones con capacidad de combate en superficie. Este nuevo tipo de embarcaciones deben corresponder a un diseño que permita hacer frente a la incertidumbre asociada con las constantemente cambiantes condiciones de cada misión, amenazas y avances tecnológicos. La flexibilidad en el diseño y administración le permitirá a estos sistemas maximizar su rendimiento bajo las condiciones cambiantes. Las opciones reales personifican dicha flexibilidad al permitir la valoración de los proyectos que son continuamente re-diseñados conforme se van resolviendo las condiciones de incertidumbre. Esta investigación busca identificar y analizar las opciones reales disponibles en el diseño y adquisición de embarcaciones navales, para alcanzar tal propósito hace uso del método del enrejado así logrando determinar el valor de las opciones reales, determinando el mejor tipo y la cantidad de flexibilidad para diseñar los sistemas navales en orden de maximizar del sistema a través del tiempo bajo las condiciones de incertidumbre.

En Imai y Watanabe se investiga una interacción entre la flexibilidad directiva y la competencia en una situación dinámica. El valor de la flexibilidad se puede asociar a una opción real mientras que la competencia se puede analizar usando la teoría de juegos. Se trabaja bajo el supuesto de un juego gradual con dos empresas bajo incertidumbre de la demanda. El modelo desarrollado es una extensión del juego de dos etapas de inversión de los mismos autores (2005), que caracterizan completamente las estrategias de equilibrio para las dos empresas en competencia por disminuir sus costos de inversión, demostrando que los valores del proyecto para ambas compañías se pueden considerar como ejemplo especial de las opciones reales avanzadas, y por lo tanto estos valores se pueden evaluar por el modelo extendido de la opción de conmutación, aplicando un enrejado binomial o trinomial al proceso subyacente de la demanda. Aunque el modelo del enrejado es discreto es un hecho conocido que el proceso trinomial puede converger eficientemente al proceso del tiempo continuo si los valores de parámetro del modelo del enrejado se eligen cuidadosamente y el número de períodos de negociación tiende al infinito. Por lo tanto el modelo de Imai y Watanabe puede también considerarse como una aproximación al modelo de tiempo continuo. Este trabajo analiza estrategias de equilibrio y valores del proyecto de las dos empresas en competencia bajo supuestos realistas.

2.2.3. Simulación.

Con el desarrollo de la informática, es posible generar programas para efectuar simulaciones muy complejas para valorar las opciones que son muy difíciles de valorar, ecuaciones de solución directa o acumulando árboles binomiales. En la simulación el arbitraje forzoso se puede cumplir o no.

En los años ochenta, Merck comenzó a utilizar la simulación para valorar sus opciones reales de Investigación y Desarrollo (Nichols, 1994). Tufano y Moel (2000) demostraron una manera elegante de utilizar el programa de software *Crystal Ball* para simular el valor de las opciones reales inherentes en un caso referente a una oferta por la mina de Antamina en Perú. Juan *et al.* (2002) sugirieron una metodología de simulación para calcular múltiples opciones Americanas que interactuaban entre sí en un problema sobre la inversión en un puerto.

En Cobb y Charnes (2003) se introduce un enfoque de simulación-optimización para valorar las opciones reales de inversión, basado en un modelo que contiene distintas variables de decisión y entradas estocásticas realistas. Usando este enfoque, el valor de un portafolio de proyectos de inversión reales es determinado maximizando los flujos descontados de efectivo promedio calculados por el modelo sobre muchas combinaciones de las variables de la decisión. Esto arroja una regla óptima de decisión que aumenta perceptiblemente el valor extraído de los proyectos de inversión en comparación a reglas arbitrarias de decisión.

En Alonso-Bonis, Azofra-Palenzuela y De la Fuente-Herrero (2005) se hace uso de la simulación Monte Carlo para valorar las opciones americanas complejas que dependen de procesos estocásticos no convencionales. El trabajo analiza las posibilidades para mejorar la flexibilidad de los modelos tradicionales de opciones reales mediante el uso de la simulación, combinando la simulación y la programación dinámica para valorar las opciones reales americanas contingentes en el valor de una variable de estado que se desarrolla según un proceso combinado Browniano-Poisson. Se estima la estrategia óptima de ejercicio usando dos modelos alternativos, que se basan en los algoritmos desarrollados para los derivados financieros, para posteriormente evaluar ambas propuestas empleando un ejemplo numérico. Los resultados destacan la necesidad de alcanzar una compensación entre la exactitud de las valoraciones y el esfuerzo de cómputo necesario para este tipo de oferta. También revelan la existencia de relaciones no monótonas y ocasionalmente contra intuitivas entre el valor de la opción de expansión, la volatilidad y la frecuencia de los saltos discontinuos, que se deben explicar por las características del proceso estocástico.

En Balmann y Musshoff (2002) se analiza que las aplicaciones del enfoque de opciones reales difícilmente consideran que los rendimientos de la inversión

REVISIÓN DE LITERATURA

pueden ser el resultado de mercados competitivos. Los autores atribuyen que la probable razón de este fenómeno se encuentra en Dixit y Pindyck (1994) de que los detonantes de la inversión para las empresas en mercados competitivos son iguales a los de las empresas con opciones exclusivas. Sin embargo en este estudio se demuestra que ese descubrimiento está restringido a los mercados en los cuales los activos tienen un ciclo de vida infinito. Si los activos están sujetos a la depreciación y a oportunidades subsecuentes de reinversión, la competencia conduce a detonantes de la inversión significativamente más bajos porque la depreciación contiene el declive potencial de los rendimientos tras los efectos negativos de la demanda. Los resultados son obtenidos por un enfoque de simulación en el cual las empresas derivan sus detonantes de inversión por un algoritmo genético.

En Olmos y Casasús (2002) se presenta un nuevo método de escenarios para el método Monte Carlo para aproximarse a los problemas con opciones reales de alta dimensionalidad. El método se basa en los escenarios de espacios construidos en cada fecha de ejercicio para poder modificarlos en función de la rentabilidad de cada escenario dependiendo de las opciones. Entonces los escenarios son relacionados para calcular el valor previsto de la continuación. La contribución principal del algoritmo es que permite valorar opciones reales de tipo americano mientras que se solucionan problemas en la decisión de la política óptima de inversión.

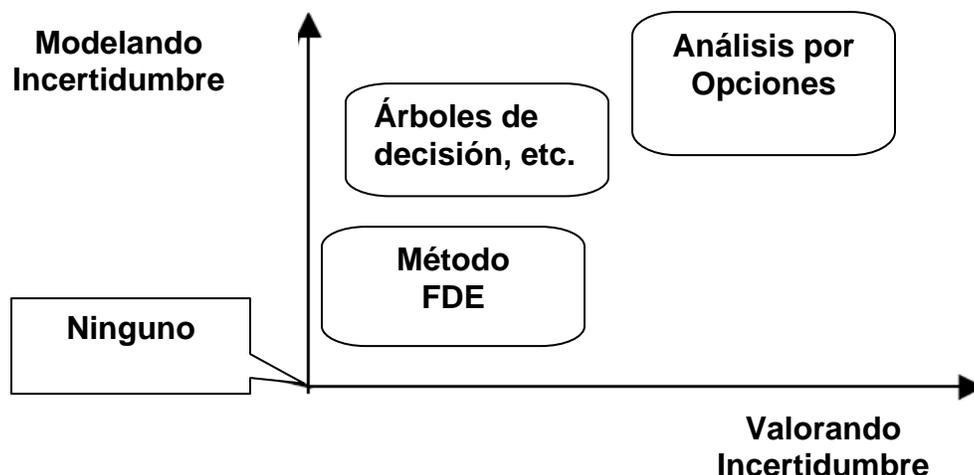
2.2.4. Modelos Híbridos.

La valoración híbrida de las opciones reales combina las mejores características del análisis del árbol de la decisión y del análisis de las opciones reales. Neely y de Neufville (2001) desarrollaron un modelo híbrido de valoración de opciones reales para los proyectos de desarrollo de producto de alto riesgo. Los métodos tradicionales de la valoración para el desarrollo de productos de alto riesgo fallan en reconocer el valor de la flexibilidad, mientras que el método de opciones reales encuentra dificultades para obtener los datos necesarios para llevar a cabo una valoración estándar por opciones reales. Su método híbrido analiza riesgos de mercado con el análisis de opciones reales y riesgos del proyecto con el análisis de árbol de decisión.

En la siguiente figura se muestra otra manera de categorizar diversos métodos en un espacio bidimensional. El análisis de las opciones es el mejor en términos de modelar la incertidumbre y de la valoración de la misma. Los árboles de decisión son mejores que los métodos de Flujos Descontados de Efectivo (FDE) en términos de modelado de incertidumbre, aunque los FDE y árboles de decisión son deficientes en la valuación de la incertidumbre. Borison (2003) describió y criticó los enfoques analíticos propuestos principalmente para aplicar en el caso de las opciones reales. Observó las fuerzas y las debilidades de cada uno de estos enfoques y en cada caso recomendó utilizarlos bajo diversas circunstancias. Propuso que el enfoque integrador (el modelo híbrido)

proporciona los fundamentos teóricos y empíricos más exactos y más constantes, al igual que lo hicieron de Neufville y Neely (2001).

Figura 6: Comparación de Métodos



Fuente: Elaboración propia con información de *Analysis of Real Options in Hydropower Construction Projects*⁶⁵

2.3 Principales problemas para valorar las opciones reales.

Existen varias características relevantes con respecto a la valoración de las opciones reales. Pero sin duda, las dos principales variables dentro de los modelos para valorar opciones reales que causan mayores dificultades a los practicantes son al identificar el subyacente y estimar la volatilidad.

2.3.1 El Subyacente.

Las opciones financieras se basan en activos subyacentes tales como acciones, índices, monedas extranjeras, instrumentos de deuda, *commodities*, y contratos de futuros que se negocian en mercados. A pesar del hecho de que las opciones reales no están negociadas en los mercados, Mason y Merton (1985), y Kasanen y Trigeorgis (1993) mantienen que las opciones reales se pueden valorar en forma semejante a las opciones financieras. La existencia de una lista negociada que tiene las mismas características del riesgo (es decir, se correlaciona perfectamente) pues un activo real no-negociado es suficiente para la valoración de las opciones reales.

Kulatilaka (1993) utilizó el precio relativo del aceite sobre el gas para valorar la flexibilidad de una caldera de vapor industrial de combustible dual. Luenberger (1998) demostró un ejemplo usando el precio de oro como activo subyacente para valorar una oportunidad de inversión real en una mina de oro. En forma

⁶⁵ Ver Tao Wang, *Analysis of real options in hydropower construction project*, 2003.

REVISIÓN DE LITERATURA

semejante, es posible utilizar costo de la energía como activo subyacente para valorar un proyecto de hidroelectricidad bajo el supuesto de un mercado de la energía completo. Sin embargo, en muchos casos, es complicado encontrar una lista de precios que se correlacionen perfectamente con los del proyecto, es decir encontrar mercado de activos subyacentes.

Copeland y Antikarov (2001) desarrollaron el supuesto de "negación del activo de mercado" y utilizaron el VPN de un proyecto relacionado como un activo subyacente para construir árboles de acontecimiento para valorar opciones reales. En lugar de buscar en mercados financieros, los autores recomiendan emplear el VPN en sí mismo, sin flexibilidad, como el activo subyacente. Sin embargo, éste método tiene como principal debilidad el que su implementación hace imposible identificar la estrategia óptima de inversión y dificulta establecer la condición de ejercicio, porque el VPN de un proyecto no es fácilmente observable en el mercado. Deja en el aire la interesante pregunta de ¿cómo encontrar un subyacente apropiado?

En Mehler-Bicher y Ahnefeld (2002) el objetivo de su investigación es aplicar y probar una variación del método de opciones reales en inversiones de capital social privado tomando a este mercado como subyacente. De acuerdo con el enfoque se discute el caso de un mercado ficticio de negocio a negocio (B2B) en la ronda de financiamiento de arranque a finales de 2000. Teniendo como propósito el definir exactamente y calcular los pasos individuales del enfoque de opciones reales para derivar una valoración exacta y correcta del mercado de B2B para cada ronda de financiamiento. Esta investigación hace tres contribuciones importantes en este contexto: sistematizar el uso de los modelos de opciones reales en el sector del capital social privado, demostrar la viabilidad de la teoría de opciones para determinar inversiones de capital social privado y demostrar una tendencia referente a la razón de costo-beneficio si la teoría de opciones se aplica en inversiones capital social privado.

Pawlina y Kort (2002) analizan el valor de la flexibilidad en la elección de la calidad como subyacente usando un marco dinámico de opciones reales. Las compañías deciden sobre la calidad de sus productos cuando se incorporan al mercado tras incurrir en un gasto. La flexibilidad en la elección de calidad induce inversiones tempranas, y el valor de la flexibilidad de la calidad aumenta con la incertidumbre de la demanda. Encuentran que una posibilidad de entrada competitiva duplica al valor relativo de la flexibilidad. Por otra parte, demostrando que la calidad flexible sirve como control disuasivo de entrada, mientras que puede todavía ser fijada en el nivel óptimo del monopolio. Además, se amplía la teoría de las opciones reales estratégicas de las cuales se sabe que la sincronización de la inversión del seguidor es irrelevante para la decisión del líder. La adición de un segundo control de calidad resulta en que el momento de inversión del líder es influenciado por la entrada del seguidor. También sostiene que introducir el segundo control variable conjuntamente con la interacción estratégica resulta en el valor de la opción del líder que disminuye bajo

incertidumbre. Finalmente, demuestran que el seguidor puede ser empujado fuera del mercado debido a la opción "agresiva" de la selección de calidad del líder en altos estados de la demanda.

2.3.2 La Volatilidad.

La volatilidad es una medida de incertidumbre, un dato de gran relevancia en la valoración de opciones. Estimar la volatilidad es una de las principales dificultades a la que se enfrenta el método de opciones reales, especialmente si no hay ningún subyacente que sea negociado en el mercado. Luehrman (1998) describió tres aproximaciones: una conjetura educada por la información emitida por la industria o el mercado en su totalidad, datos históricos tales como los registros de los retornos de inversión y la volatilidad implícita en opciones relevantes negociadas en el mercado, y la simulación del flujo de efectivo proyectado. Él ha sido de los primeros investigadores en presentar la técnica de las opciones reales a una audiencia con conocimientos técnicos menos avanzados y parece haber alcanzado un gran impacto entre los directores generales de varias empresas.

Copeland y Antikarov (2001) han sugerido estimar en primera instancia las características estocásticas de las variables que generan volatilidad usando la simulación Monte Carlo para estimarla. La estimación de la volatilidad es a menudo uno de los puntos más débiles de la valoración de opciones reales, puesto que la valoración es generalmente sensible a la volatilidad. La volatilidad tiene su origen en muchas fuentes de información, es prácticamente imposible estimarla para una valoración concreta de opciones reales simplemente debido a la carencia de datos. A veces, por lo tanto, las aproximaciones proporcionadas por un análisis de opciones reales son más importantes que un resultado cuantitativo específico.

Opciones compuestas y opciones paralelas.

Muchas de las opciones reales no son opciones simples bien definidas. Pueden ser compuestas o paralelas. Son a menudo opciones sobre opciones (opciones compuestas) y las interacciones entre las opciones son significativas. Por ejemplo, la oportunidad de llevar un producto nuevo a la producción en masa es una opción en la inversión de investigación y desarrollo, cuyo valor depende de la oportunidad de proceder con la investigación y desarrollo si el último es ejercido y acertado. La metodología para valorar opciones compuestas es muy importante para la aplicabilidad de la metodología de las opciones reales en el mundo real. Las opciones paralelas son diversas opciones construidas en el mismo proyecto donde obran recíprocamente esas opciones. No son necesariamente mutuamente excluyentes. Por ejemplo, varios usos posibles de una nueva tecnología o de varios mercados meta posibles de un producto nuevo. Oueslati (1999) describió tres opciones paralelas para el desarrollo de combustible celular con usos en automotores, energía fija y energía portable.

REVISIÓN DE LITERATURA

Geske (1979) desarrolló aproximaciones a la valoración de opciones compuestas. Trigeorgis (1993a y 1993b) se centró en la naturaleza de las interacciones de opciones reales. El valor combinado de una colección de opciones se diferencia generalmente de la suma de sus valores separados. El valor incremental de una opción adicional, en la presencia de otras opciones, es generalmente menor que su valor en aislamiento, y tiende a declinar menos ante la presencia de más opciones.

Matzuokos y Zacharias (2001) modelan en un contexto de teoría de juegos con intervención de la administración dirigida hacia el realce del valor en la presencia de los efectos generados por la incertidumbre y el derrame. Dos empresas hacen frente a oportunidades de inversión real y antes de tomar decisiones irreversibles de inversión tienen opciones para incrementar el valor de la inversión haciendo más Investigación y Desarrollo y/o adquiriendo más información. Debido a los derrames las empresas actúan estratégicamente optimizando su comportamiento condicionado a las acciones de sus contrapartes. Hacen frente a dos decisiones que se solucionan en forma interdependiente en un juego de dos etapas. La decisión de primera etapa es: ¿cuál es el nivel óptimo de coordinación entre ellos? La decisión de segunda etapa es: ¿cuál es el esfuerzo óptimo para un nivel dados los efectos del derrame y del costo de adquisición de la información? Para la solución se adopta una opción que valora el marco de trabajo que permite una maleabilidad analítica.

Lukach, Kort y Plasmans (2002) presentan un modelo, que describe la inversión estratégica en Investigación y Desarrollo (R&D, por sus siglas en inglés) de las firmas bajo incertidumbre tecnológica. Asumiendo dos empresas simétricas que toman decisiones estratégicas sobre la realización de dos etapas de R&D sujeta a la incertidumbre en el resultado de la primera etapa exploratoria.

El modelo concluye que el uso de opciones reales para evaluar las inversiones de R&D permite que la empresa emprenda proyectos de inversión más grandes cuando la incertidumbre es grande. También el uso de las opciones reales crea interacciones estratégicas más complejas entre los agentes competidores en un duopolio. Si la R&D es provechosa para ambos agentes, estos invertirán simétricamente y competirán más adelante en la producción. Pero la incertidumbre tecnológica en conjunto con la interacción estratégica entre los dos agentes puede conducir al resultado de que es provechoso que un agente invierta en la R&D solamente cuando no lo hace el otro agente.

2.4 Las opciones reales aplicadas a las ramas de la energía y agricultura.

El concepto de las opciones reales se ha aplicado con éxito en la industria de la energía. Siegel, Smith, y Paddock (1987) valoraron el arrendamiento de licencias para la explotación de yacimientos petroleros usando opciones reales contribuyendo con la evidencia empírica de que los valores de dichas licencias son mejores cuando se consideran las opciones reales que cuando únicamente se toman valores basados en métodos de FDE. Desde entonces, y a la fecha, la investigación sobre opciones reales en energía ha sido una línea interesante de investigación.

En Grenadier (1996) se desarrolla un marco de trabajo de equilibrio para los juegos de ejercicio de opciones estratégicas. Se centra en un ejemplo particular: el momento del desarrollo de propiedades inmobiliarias. Un análisis de las políticas de ejercicio de equilibrio de los desarrolladores proporciona una visión interna de las fuerzas que moldean el comportamiento del mercado. El modelo aísla los factores que hacen algunos mercados propensos a las explosiones de desarrollo concentrado. El modelo también proporciona una explicación de porqué algunos mercados pueden experimentar auges de construcción pese a enfrentar declives en la demanda y el valor de dichas propiedades. Mientras que tal comportamiento se considera a menudo como sobre construcción irracional, el modelo proporciona un fundamento racional para tales patrones de ejercicio.

Miltersen (1997) presentó métodos a la inversión del recurso natural del valor con tipos estocásticos de la producción y de interés de la conveniencia. Cortazar y Casasús (1997) sugirieron un modelo compuesto de la opción para evaluar la inversión gradual del recurso natural.

Cherian, Patel, y Khripko (2000) estudiaron la extracción óptima de recursos no renovables cuando los costos se acumulan. Goldberg y Read (2000) encontraron que una modificación simple al modelo Black- Scholes proporciona mejores estimaciones de los precios para las opciones de la electricidad. Su modificación combina la distribución lognormal con una distribución Point para describir la dinámica de la electricidad. Bodily y Del Buono (2002) examinaron diversos modelos para las dinámicas del precio de la electricidad, y propusieron un nuevo modelo proporcional de volatilidad de reversión a la media.

Dias (2002) dio una descripción comprensiva de opciones reales en la industria petrolera. Pindyck (1993) estudió el costo incierto de la inversión en plantas de energía atómica. Él derivó una regla de decisión para las inversiones irreversibles conforme a incertidumbre técnica y la incertidumbre de entrada. La regla es invertir si el costo previsto de terminar el proyecto está debajo de un número crítico, el monto requerido para cubrir con los costos de abandono del proyecto, el cual depende del tipo y grado de incertidumbre.

REVISIÓN DE LITERATURA

Koekebakker y Sodal (2002) desarrollaron un modelo de opciones reales basado en equilibrio de una unidad de producción de electricidad cuyos insumos son dados por un proceso estocástico de reversión a la media. Hlouskova *et al.* (2002) implementaron el modelo de opciones reales para el problema de compromiso unitario de una sola turbina en un mercado de libre competencia. La incertidumbre del precio fue capturada por un proceso de reversión a la media con saltos y variación de tiempos promedio para explicar la estacionalidad.

Rocha, Moreira, y David (2002) estudiaron la generación de energía termoeléctrica como un alternativa para ampliar la generación de electricidad en Brasil, pues es complementaria en muchos aspectos a las plantas hidroeléctricas que proveen de energía a la mayoría del Brasil en un precio muy bajos la mayor parte del tiempo, a su vez determinan la vulnerabilidad del sistema relacionada a las variaciones de los niveles de agua derivadas de los cambios por las estaciones del año. Su trabajo estudia la competitividad de la generación de termoelectricidad en el Brasil bajo la regulación actual, y determina bajo el enfoque de la teoría de las opciones reales para determinar cómo motivar la inversión privada en energía térmica. Wang (2003) aplicó VPN, VPN con simulación, y opciones binomiales que valoraban el modelo para estudiar un caso en el desarrollo de la cuenca del río Yalongjiang.

En Brambila (2003) se presenta un proyecto evaluado en forma tradicional con un VPN negativo y que, por lo tanto, se debe “rechazar”. Al estudiar ese mismo proyecto visto como una inversión, por ejemplo, financiado vía acciones y teniendo una opción de salida para el inversionista, su VPN puede volverse positivo. De lo anterior el autor deduce que el sector rural, para romper su “círculo de pobreza”, requiere más inversión que le permita integrarse en redes de valor y no tanto crédito subsidiado para avío. Para poder atraer inversión al sector se requiere promover la formación de más empresas rurales que coloquen papel-acciones en el mercado y que el inversionista tenga una “opción real” que le permita salir a un determinado tiempo y a un determinado precio. El autor propone dos tareas inmediatas; lograr que la banca coloque acciones de empresas rurales a cambio de una comisión, y formar, un “Fondo” que ofrezca las “opciones reales” de salida a los inversionistas. El autor sostiene que el papel del gobierno es impulsar al sector rural a que aproveche esta oportunidad de romper el “círculo de pobreza”, acelerando y desarrollando los instrumentos que lo permitan, como es la formación y financiamiento de las redes de valor, mediante la atracción de inversionistas con “opciones reales” de salida.

En Näsäkkälä y Fleten (2005) los autores analizan las inversiones en plantas eléctricas impulsadas por gas bajo precios estocásticos de la electricidad y de la gasolina. Un modelo simple pero realista de dos factores se utiliza para el procesamiento del precio, permitiendo el análisis del valor de la flexibilidad de funcionamiento, la oportunidad de abandonar los bienes de equipo, así como encontrar los umbrales para los costos de la energía para los cuales son óptimos iniciar la inversión. Su caso de estudio descrito, hace uso de datos verdaderos

que indican que cuando la decisión de construir es considerada, la opción de abandono no tiene valor significativo, mientras que la flexibilidad operativa y la opción de tiempo para construcción tienen un efecto significativo en el umbral de la inversión.

Tzouramani y Mattas (2004) realizan su investigación sobre la posibilidad de aplicar la metodología de las opciones reales en inversiones agrícolas. En su trabajo describen los retos que enfrentan los inversionistas en proyectos agrícolas en un ambiente de cada vez mayor incertidumbre con altas inversiones comprometidas. Para el desarrollo de esta investigación tomaron como ejemplo la aplicación del método de opciones reales en la construcción de invernaderos. El aporte de su estudio es que el enfoque de opciones reales puede ser probado como conducente en la determinación de proyectos con incertidumbre e irrevocabilidad y puede desarrollar una nueva manera de examinar decisiones de inversión agrícola.

Posteriormente los mismos Tzouramani y Mattas (2005) conducirían una nueva investigación basados en los resultados de su investigación anterior, pero en esta ocasión tomando como ejemplo el caso de las inversiones en agricultura orgánica en Grecia. En su estudio procuran examinar los efectos de la variabilidad del ingreso sobre la decisión de adoptar o no sistemas de producción amistosos al ambiente para evaluar los incentivos financieros orgánicos a los granjeros introduciendo la metodología de opciones reales. El procedimiento de opciones reales reveló que la inversión en sistemas de producción “amistosos” al ambiente debe ser pospuesta y la opción de la inversión debe ser mantenida viva hasta que los rendimientos esperados aumenten lo suficiente como para compensar el riesgo y la incertidumbre. Por lo tanto, proponen que los reguladores deben de reconsiderar los incentivos financieros si desean una adopción más rápida de los sistemas de producción sostenibles.

Turvey (2003) propone que el fenómeno observado en los mercados sobre los precios de la tierra, los cuales son negociados sistemáticamente a valores más altos que su valor fundamental de acuerdo a la medición por el Valor Presente de los flujos futuros de efectivo pudiendo ser esto ocasionado por las opciones reales que se presentan sobre la incertidumbre asociada a los flujos de efectivo. Esta investigación propone un modelo en el cual el vendedor tendrá una opción real para posponer la venta de la tierra, debido a que el valor de la tierra se mide como valor presente, el comprador no tiene una opción similar para posponer la compra. Se concluye que el valor de la opción del vendedor ofrece una explicación plausible sobre la diferencia entre los precios observados de las tierras cuando se considera el precio al que es negociado en relación al valor fundamental de la misma. La investigación utiliza el marco de trabajo de las opciones reales desarrollado por Dixit y Pindyck (1996). Se emplean los flujos de efectivo y la información de precios históricos de la tierra para Ontario, se demuestra cómo las opciones reales pueden conducir a un precio de tierra

REVISIÓN DE LITERATURA

mayor que lo establecido si se considera únicamente el valor presente de los flujos esperados de efectivo. Los resultados también sugieren la existencia de las burbujas especulativas sobre el precio de la tierra y demuestra como las opciones reales se pueden utilizar para detectar estas burbujas.

Gilroy y Lukas (2005) presentan un estudio donde se formaliza la opción estratégica de entrada en el mercado para una empresa multinacional individual, desde una perspectiva dinámica. Se discute que incorporando un tratamiento conveniente de la irrevocabilidad, incertidumbre y flexibilidad relacionadas con una decisión de inversión de las empresas multinacionales da diversas aproximaciones a la opción de inversión en adquisiciones de tierras como el modo preferido de entrada. En la mayoría de los casos, la estrategia inicial de entrada sirve como plataforma permitiendo que la empresa haga inversiones subsecuentes dependiendo las ventajas del país anfitrión así como de la capacidad e interés propio de la multinacional. Esto se logra considerando una estrategia de dos etapas de la expansión explícitamente. El proceso evolutivo del valor de la inversión directa extranjera incluye dos elementos estocásticos así como la sincronización que acciona la transición de la exportación a la inversión extranjera directa. Los resultados sugieren que esa incertidumbre y las oportunidades de inversión del futuro desempeñan un papel fundamental cuando viene al tránsito de la exportación a la primera fase de la inversión extranjera directa, así como tiene un impacto en la opción de la estrategia de entrada al mercado.

En Tauer (2006) se aplica el modelo de la opción real de Dixit entrada/salida para el caso de las decisiones de entrada/salida de los granjeros de la industria lechera en Nueva York. Para estructurar el costo de una granja lechera con 500 vacas se estableció un precio para la leche en la entrada por aproximadamente cada 50 litros (cwt) y se estimó el precio de leche de la salida para estructurar el costo de una granja de 50 vacas, estableciendo que el precio de la entrada debe ser más alto, y el precio de salida es también más alto. Si se replica este procedimiento considerando un número infinito de granjas representativas con precios de entrada y salida se logra establecer un rango de precios por cada cwt.

En Pardo y Rodríguez (2006) se estudian las fuertes inversiones iniciales que son necesarias para comenzar una actividad acuícola, dejando de manifiesto la necesidad y la oportunidad de la investigación, basado en la aplicación del método de Opciones Reales a la valoración de proyectos de inversión, considerando el valor de las opciones estratégicas incluidas en cada proyecto y que son ignoradas en los métodos tradicionales. En concreto se aplica a un proyecto acuícola de inversión de una plataforma de jaulas flotantes para el cultivo de dorada en mar abierto. Tras la elección del modelo de enrejado, la inversión fue valorada incorporando el valor de las opciones estratégicas de diferir la inversión o abandonarla según el desarrollo de los acontecimientos en un horizonte temporal de 10 años. Esta valoración permitió concluir que el

proyecto es altamente viable, pudiendo considerarse la opción de diferir sólo en el 9º año de análisis, si los años precedentes se presentan siempre desfavorables, siendo su probabilidad muy baja. La opción de abandono no tiene valor en este proyecto de inversión.

En Vedenov, Duffield y Wetzstein (2006) presentan un estudio sumamente interesante sobre los aumentos dramáticos en niveles y volatilidad de los precios de la gasolina observados en años recientes, tomando a éstos como detonantes para crear los incentivos de mercado que impulsen la adopción de combustibles alternativos caracterizados por su baja volatilidad de precio. Esta hipótesis es investigada aplicando el análisis de valoración por opciones reales para desarrollar los umbrales óptimos para cambiar de la gasolina convencional a los combustibles alternativos tales como las mezclas del etanol. El resultado principal de esta investigación es que dados los patrones de precio históricos de la gasolina y etanol convencionales, el cambiar a las mezclas del etanol es una decisión económicamente sana y que proporcionalmente esto no disminuye la eficacia del vehículo. El análisis de las sub-muestras de datos durante los períodos de una volatilidad mayor de los precios de la gasolina (guerra del Golfo y guerra contra el terrorismo) proporcionan incluso una apoyo mayor para el resultado de su investigación.

Iwai, Emerson y Walters (2008) presentan una investigación que responde a los temores de los granjeros de los Estados Unidos generados por la preocupación por escasez de mano de trabajo agrícola y los subsecuentes aumentos en los costos de producción que pueden presentarse como producto de las reformas de inmigración. La investigación señala que la respuesta a este tipo de crisis en el sector es la mecanización en gran escala. Tomando como ejemplo la cosecha de la caña de azúcar en Florida durante las décadas de 1970 y 80 sirve como ejemplo histórico de que las tecnologías se desarrollaron debido a los cambios en condiciones de mercado de trabajo locales.

2.5. Las opciones reales "sobre" y "en" proyectos.

Las opciones reales se pueden categorizar como los que están "sobre" o "en" los proyectos (de Neufville, 2002). Las opciones reales "sobre" proyectos son opciones que se toman para realizar el proyecto sin realizar consideraciones técnicas del mismo, dejando el aspecto tecnológico como una especie de caja negra. Por su parte las opciones reales "en" proyectos son opciones creadas cambiando el diseño real del sistema técnico. Por ejemplo, de Weck, *et. al.* (2004) evaluó las opciones reales "en" sistemas de comunicación basados en el uso de satélites y se determinó que su uso podría aumentar el valor de los sistemas de comunicaciones satelitales en el 25% o más. Estas opciones implican el combustible adicional en los satélites para alcanzar un diseño flexible que pueda ajustar su capacidad según la necesidad. Con el desarrollo de la teoría de las opciones, el alcance del uso de esta se está ampliando de las opciones financieras a las opciones reales "sobre" proyectos y ahora a las

REVISIÓN DE LITERATURA

opciones reales "en" proyectos. Las opciones reales "en" los proyectos amplían las opciones en los sistemas físicos, agregando flexibilidad sistemáticamente basada en conocimiento. Con el éxito de la teoría de las opciones y sus aportaciones dominantes en la valoración de incertidumbre se tienen perspectivas prometedoras para mejorar el diseño de los sistemas de ingeniería, la viabilidad o los beneficios económicos, y los requisitos de los reguladores. En general, las opciones reales "en" sistemas requieren una comprensión profunda de la tecnología, sin embargo tal conocimiento no se encuentra fácilmente disponible entre los analistas de opciones, ha habido hasta ahora pocos análisis de opciones reales "en" proyectos, a pesar de las oportunidades importantes disponibles en este campo. Por una parte, porque los datos disponibles para el análisis de las opciones reales "en" proyectos son de una calidad mucho menor que el de opciones financieras o incluso el de las opciones reales "sobre", las opciones reales "en" proyectos son diferentes y necesitan un marco apropiado de análisis, la teoría existente de las opciones tiene que adaptarse a las nuevas necesidades de opciones reales "en" proyectos. Existe escasa literatura relacionada a las opciones reales "en" proyectos, a continuación se presenta un breve análisis de la literatura disponible sobre opciones reales "en" proyectos.

Zhao y Tseng (2003) discutieron el valor de la flexibilidad en instalaciones de infraestructura en la industria de la construcción. Extender los cimientos de una edificación generará un costo por adelantado adicional, pero tiene un retorno en la posible extensión futura del edificio. Esta compensación se puede ver como opción en la cual una prima tenga que ser pagada primero y la opción se puede ejercer más adelante. Utilizaron como ejemplo la construcción de un estacionamiento público para ilustrar esta clase de problema, empleando para la valoración el enrejado trinomial y la programación dinámica estocástica para modelar la demanda y el proceso óptimo de la extensión. Un modelo con flexibilidad se compara con uno sin flexibilidad, y la diferencia del valor óptimo de los dos modelos es el valor de la flexibilidad. Este valor de la flexibilidad es significativo en el caso de analizado en su investigación.

Zhao, Sundararajan, y Tseng (2004) presentaron un modelo estocástico gradual para la toma de decisiones para la construcción de una carretera que incorporó opciones reales tanto en su etapa de desarrollo como en la operación. Se desarrolla un algoritmo para la simulación basado en la simulación Monte Carlo y la regresión por mínimos cuadrados. Ho y Liu (2003) presentaron un método cuantitativo basado en la teoría de valoración de opciones para evaluar grandes inversiones en tecnología emergente de arquitectura, ingeniería, o construcción. El marco de trabajo consideró riesgos de la inversión de la tecnología y opciones administrativas.

Leviakangas y Lahesmaa (2002) discutieron el uso de opciones reales en la evaluación de un sistema inteligente de transporte y señalaron las deficiencias del análisis costo/beneficio que puede desechar el valor de las opciones reales. Kumar (1995) presentó el método de las opciones reales para evaluar la

flexibilidad de expansión e ilustró su uso con un ejemplo en sistemas de fabricación flexibles. Ford, Lander, y Voyer (2002) propusieron un método de opciones reales para usar proactivamente la flexibilidad estratégica, para reconocer y capturar valores del proyecto ocultos en la incertidumbre dinámica.

La literatura existente sobre opciones reales "en" proyectos no proporciona un marco de aplicación general para las opciones reales "en" proyectos, sino sólo para proyectos o problemas específicos. No se estudian los problemas generales a los que se enfrentan las opciones reales "en" los proyectos, por ejemplo, el problema de la identificación de opciones reales "en" proyectos. Esta área necesita de mucho trabajo creativo e investigación pues hasta ahora el desarrollo de esta línea de investigación ha sido sumamente limitado.

3. BIOENERGÍA.

En este capítulo se exploran diversos conceptos relacionados con la bioenergía, su importancia y potencial, que resultan relevantes para la comprensión de capítulos subsecuentes sobre el proyecto de inversión a analizar.^{66 67}

3.1. La Biomasa como fuente de energía.

La biomasa, en su definición más amplia, es toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. La biomasa natural es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana. La biomasa residual es la que genera cualquier actividad humana, en los procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, tal como, basuras y aguas residuales. La biomasa producida es la cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible, en vez de producir alimentos, como la caña de azúcar en Brasil, es orientada a la producción de etanol para carburante.

La energía de la biomasa es aquella que se obtiene de la vegetación, cultivos acuáticos, residuos forestales y agrícolas, urbanos, desechos animales, etc. Genéricamente las fuentes de biomasa se pueden clasificar como primarias (recursos forestales) y secundarias (básicamente los residuos como aserrín, residuos de las hojas de árboles, los agrícolas, pajas rastrojos y los urbanos).

La biomasa, es decir, la materia vegetal utilizada como fuente de energía, se percibe tradicionalmente como una alternativa prometedora a las energías fósiles y nuclear, que son contaminantes. Desde el punto de vista energético, la biomasa se puede aprovechar de dos maneras; quemándola para producir calor o transformándola en combustible para su mejor transporte y almacenamiento.

La naturaleza de la biomasa es muy variada, ya que depende de la propia fuente, pudiendo ser animal o vegetal, pero generalmente se puede decir que se compone de hidratos de carbono, grasas y proteínas. Siendo la biomasa vegetal la que se compone mayoritariamente de hidratos de carbono y la animal de grasas y proteínas.

La utilización con fines energéticos de la biomasa requiere de su adecuación para utilizarla en los sistemas convencionales.

Estos procesos pueden ser:

- Físicos.- Son procesos que actúan físicamente sobre la biomasa y están asociados a las fases primarias de transformación, dentro de lo que puede

⁶⁶ Ver Omar Macera Cerutti, *et al*, Serie de estudios: *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*, SENER/BID/DGZT, México.

⁶⁷ Ver Omar Guillén Solís, *Energías Bioenergéticas, una perspectiva ingenieril*, Trillas, México.

BIOENERGÍA

denominarse fase de acondicionamiento, como, triturado, astillado, compactado e incluso secado.

- Químicos.- Son los procesos relacionados con la digestión química, generalmente mediante hidrólisis, pirolisis y gasificación.
- Biológicos.- Son los llevados a cabo por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, generalmente llamado fermentación. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.
- Termoquímicos.- Están basados en la transformación química de la biomasa, al someterla a altas temperaturas (300°C – 1,500°C). Cuando se calienta la biomasa se produce un proceso de secado y evaporación de sus componentes volátiles, seguido de reacciones de descomposición de sus moléculas, seguidas por reacciones en la que los productos resultantes de la primera fase reaccionan entre sí y con los componentes de la atmósfera en la que tenga lugar la reacción, de esta forma se consiguen los productos finales.

Según el control de las condiciones del proceso se consiguen productos finales diferentes, lo que da lugar a los tres procesos principales de la conversión termoquímica de la biomasa:

- Combustión: Se produce en una atmósfera oxidante, de aire u oxígeno, obteniendo cuando es completa, dióxido de carbono, agua y sales minerales (cenizas), obteniendo calor en forma de gases calientes.
- Gasificación: Es una combustión incompleta de la biomasa a una temperatura de entre 600°C a 1500°C en una atmósfera pobre de oxígeno, en la que la cantidad disponible de este compuesto está por debajo del punto estequiométrico, es decir, el mínimo necesario para que se produzca la reacción de combustión. En este caso se obtiene principalmente un gas combustible formado por monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano.
- Pirolisis: Es el proceso en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia total de oxígeno. En procesos lentos y temperaturas de 300°C a 500°C el producto obtenido es carbón vegetal, mientras que en procesos rápidos (segundos) y temperaturas entre 800°C a 1,200°C se obtienen mezclas de compuestos orgánicos de aspectos aceitosos y de bajo pH, denominados aceites de pirolisis.

Pudiéndose obtener combustibles sólidos (leña, astillas, carbón vegetal), líquidos (biocarburantes, aceites, aldehídos, alcoholes, cetonas, ácidos orgánicos) y gaseosos (biogás, hidrógeno).

Es así que entendemos a la bioenergía como la energía que se obtiene de la biomasa y se presenta en una gran variedad de formas. Puede obtenerse a partir de los biocombustibles sólidos como la leña, el carbón vegetal o los residuos agrícolas (que pueden quemarse directamente o gasificarse para producir calor o electricidad), los cultivos energéticos (como la caña de azúcar y plantas oleaginosas, de las que se extraen los combustibles líquido como el bioetanol y el biodiesel), los residuos como el estiércol (de los que pueden obtenerse combustibles gaseosos como el biogás).

La biomasa utilizada con fines energéticos constituye una fuente de energía renovable y limpia, plenamente establecida, con tecnologías maduras en la mayoría de sus distintas aplicaciones. De hecho se le considera uno de los pilares de la transición a las fuentes de energía renovables. A nivel internacional, la bioenergía representa 11% del consumo total de energía y 80 % del consumo de energías renovables. Se estima que para el año 2050 podría contribuir con 25% de la energía requerida a nivel mundial. Como fuente energética presenta numerosas ventajas desde la perspectiva socioeconómica y ambiental. En primer lugar, el aprovechamiento sustentable de la bioenergía permite crear sinergias importantes entre los sectores agrícola – forestal (en los que se realiza la producción de los combustibles), energético, industrial (particularmente en el contexto de las agroindustrias), ambiental y social.

Por otro lado, debido al suministro descentralizado de los combustibles derivados de la biomasa, se puede promover el desarrollo sustentable a través de la creación de fuentes de trabajo e inversiones en el medio rural. De hecho, la bioenergía genera de dos a cuatro veces más fuentes de trabajo por unidad de energía que los combustibles fósiles. Asimismo, el uso ampliado de bioenergía puede transferir importantes recursos económicos, y con ello ingresos, desde las áreas urbanas consumidoras hacia las áreas rurales productoras de estos energéticos.

Adicionalmente la producción sustentable de biomasa brinda numerosos servicios ambientales de tipo local y global, incluyendo el control de la erosión del suelo, la regulación del ciclo hidrológico y la protección de las áreas de hábitat de fauna silvestre. Si las plantaciones energéticas se establecen en tierras degradadas, es posible rehabilitarlas mejorando la calidad y fertilidad del suelo. Utilizada sustentablemente, la bioenergía contribuye a la mitigación del cambio climático, ya que no genera emisiones netas de CO₂. Asimismo la conversión de desechos orgánicos en combustibles, además de proporcionar energía, reduce los daños ambientales asociados a su inadecuada disposición (por ejemplo, la contaminación del aire y el agua, aumento de plagas y enfermedades, deterioro del paisaje y calidad de vida de las poblaciones humanas).

BIOENERGÍA

El uso de la bioenergía en gran escala requiere de grandes extensiones de tierra, lo cual puede significar una competencia con la tierra dedicada a la producción de alimentos. Sin embargo, bajo esquemas adecuados esta competencia puede reducirse a un mínimo. Es el caso de las plantaciones multipropósito (que permitan resolver varias necesidades), de las plantaciones con áreas degradadas (que ayudaría a restaurarlas) o del aprovechamiento preferencial de residuos agrícolas, pecuarios y forestales, los cuales no tienen uso como alimento o forraje.

Varias aplicaciones tecnológicas de la bioenergía son competitivas en el mercado. Pero en la mayoría de los casos se necesita un apoyo decidido del sector público para hacerlas efectivas con respecto a los combustibles fósiles, dado los precios actuales de estos últimos, el costo elevado de inversión inicial de las tecnologías energéticas y muy particularmente, las barreras institucionales para su desarrollo.

3.1.1 Contexto bioenergético.

El mundo depende de la biomasa para obtener cerca de 11% de su energía (IEA,1998). Se estima que 46 exajoules⁶⁸ (EJ) de la energía primaria global se derivan de la biomasa: 85% por uso tradicional (leña, estiércol para combustible doméstico) y 15% en uso industrial combustibles, proceso de energía de calor y energía combinados (CHP), y electricidad. En los países en vías de desarrollo la biomasa es, en muchas ocasiones, la fuente de energía más importante, pues llega a representar cerca de un 35% del total (WEC 1994). En los países pobres, la biomasa llega a cubrir 90% de la energía suministrada, generalmente en forma tradicional o no comercial.

Muchas de las tecnologías de uso de bioenergía se encuentran maduras y tienen gran difusión a nivel internacional. Algunos ejemplos ilustrativos son:

- Once millones de hogares se iluminan con biogás
- Más de 300 millones de hogares tienen estufas eficientes de leña.
- Existen 38,000 MW de capacidad instalada para generación de electricidad mediante la biomasa.
- Se consumen 30 mil millones de L/año de bioetanol.
- 180 millones de personas viven en países con normas para mezclar bioetanol con gasolina.

Actualmente a la bioenergía se le reconoce como una de las fuentes renovables de mayor potencial para facilitar la transición energética a los recursos renovables. Varios países han lanzado iniciativas específicas, con metas muy ambiciosas, para la promoción de bioenergía. Entre estas se cuentan las de: Brasil, Australia, China, La Unión europea, Canadá y Estados Unidos. En Brasil

⁶⁸ Unidad de energía equivalente a 10^{18} joules, el joule es equivalente a la unidad de trabajo requerida para movilizar un kilogramo.

por ejemplo, 10 millones de vehículos utilizan etanol producido con caña de azúcar como combustible único o como aditivo. Mientras que en China 272 millones de hogares rurales y pequeños establecimientos comerciales cuentan con estufas eficientes de leña.

3.1.2 Potencial a largo plazo: La transición hacia las fuentes renovables de energía.

Se estima que la participación en cuanto a producción de energía por biomasa, vaya en aumento en los próximos años hasta conformar el 25% del total mundial para el año 2050. Diversas causas determinan la preferencia de la bioenergía en lugar del petróleo o de cualquier otro combustible fósil. Por ejemplo, el desarrollo de las nuevas tecnologías para producir electricidad hace que sea cada vez más barato utilizar fuentes renovables en lugar de fuentes fósiles. Además, se ha demostrado que la biomasa como combustible es la única fuente de carbono neutral, esto quiere decir que las emisiones que se producen en su combustión se capturan nuevamente en la fotosíntesis de las plantas, por lo que genera emisiones netas de carbono y reduce los problemas de cambio climático y del efecto invernadero.

3.2 Energía limpia.

Los efectos dañinos causados por el uso de combustibles fósiles no son reversibles, sin embargo la sustitución de estos por el uso de biocombustibles, los cuales tienen una baja emisión de partículas contaminantes, evitaría la destrucción acelerada del planeta.

3.2.1 Biodiesel como ejemplo alternativo de un biocombustible.

El biodiesel es un combustible obtenido de fuentes renovables, de propiedades similares al diesel o petrodiesel obtenido de la refinación del petróleo, el biodiesel se obtiene de aceites vegetales o grasas animales. Está compuesto principalmente de ésteres de metilo y de ácidos grasos. En Europa se emplea principalmente aceite de colza, mientras que en Estados Unidos se emplea principalmente aceite de soya. No obstante, el biodiesel puede elaborarse a partir de una amplia variedad de materias primas y son más de 350 especies de plantas oleaginosas y miles de subespecies que incluyen aceite de maíz, semilla de algodón, aceite de ricino, aceite de palma, aceite de coco, jojoba, girasol. Entre otras fuentes que son factibles para la producción de biodiesel son el aceite usado para cocinar, este puede ser el sobrante de los restaurantes y las grasas animales.

El incremento en los precios internacionales del petróleo y la reflexión sobre lo limitado de este recurso, sobre todo con una visión a futuro, hace necesaria la búsqueda constante de alternativas en cuanto a energéticos. Asimismo, el desarrollo industrial y el crecimiento de la población ha impulsado la búsqueda

BIOENERGÍA

constante de combustibles amigables con el medio ambiente. En 1992 este esfuerzo cristalizó en el reconocimiento oficial por el Departamento de Energía de Estados Unidos de los llamados Combustibles Alternativos, dentro de los cuales destaca como una opción muy atractiva el biodiesel con una serie de cualidades que superan por mucho el desempeño del diesel tradicional.

Algunas de estas cualidades son: que proviene de una fuente renovable, es no tóxico, biodegradable, seguro de manejar y almacenar, es menos irritante, de aroma agradable, menos ruidoso y alarga la vida del motor.

Sus buenas cualidades representan una fuente importante de incentivos gubernamentales y fiscales, esto quiere decir que su economía de producción pueda ser competitiva con la del petrodiesel y el gas natural. Desde el punto de vista social se debe impulsar crecientemente su uso, ya que reduce estratégicamente la dependencia tecnológica dado que los métodos para producirlo no son complejos, genera gran cantidad de fuentes de trabajo y promueve el desarrollo agroindustrial

El biodiesel, tiene un poder calorífico ligeramente menor que el petrodiesel siendo de aproximadamente 16,000 BTU⁶⁹/lb comparado con 18,300 BTU/lb del petrodiesel, es decir, su poder calorífico es 14% menor; por su comparación en peso o bien 9% menor si la comparación se hace con base en unidad de volumen.

El poder calorífico se emplea para medir la cantidad de calor que se desarrolla durante la combustión, más específicamente el poder calorífico es la cantidad de calor producida por la combustión completa de un kilogramo de una sustancia, tal unidad se mide en cal/kg de combustible. En la cantidad de combustible que se quema el calor desprendido recibe el nombre de efecto térmico (poco usado).

Sabemos que el diesel es un subproducto obtenido de los derivados más pesados del petróleo. Se utiliza sólo en motores diesel lentos en los cuales el combustible dispone más tiempo para quemar. Su poder calorífico es de 11,000 cal / kg.

Otro combustible es el gas natural que se obtiene directamente de los yacimientos petrolíferos. Este gas es el encargado de empujar al petróleo a la superficie. Su uso es muy variado en los alrededores de los yacimientos y su poder calorífico es de 9,500 cal / m³.

Uno de los principales beneficios en el desempeño que ofrece el biodiesel se encuentra su número de cetano, que es de 46 a 62 dependiendo del aceite vegetal o grasa a partir del que se obtiene, esta propiedad es asociada a la operación para arrancar en clima frío, mientras que el petrodiesel estándar tiene 40 y el Diesel especial CARB tiene como especificación 50.

⁶⁹ Unidad térmica británica equivalente a 1,055 joules.

El índice de cetano es la medida de la calidad de ignición de un diesel y la capacidad antidetonante. En cuanto a las emisiones el biodiesel tanto en su modalidad mezclado con petrodiesel en proporción del 20% (B 20) o 100% Biodiesel (B 100) presenta importantes reducciones de todas las emisiones excepto por las emisiones de Óxido de Nitrógeno donde compite en desventaja con el petrodiesel, como se indica en la tabla

Tabla 2: Emisiones promedio del biodiesel comparadas con las del petrodiesel.

| TIPO DE EMISIÓN | B 100 | B 20 |
|---------------------------------------|-------|------|
| REGULADAS | | |
| Hidrocarburos Totales | -67% | -20% |
| Monóxido de carbono | -48% | -12% |
| Partículas | -47% | -12% |
| NOX | 10% | 2% |
| NO REGULADAS | | |
| Sulfatos | -100% | -20% |
| Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos | -100% | -20% |
| NHAP | -90% | -50% |
| Ozono potencial de HC especiales | -50% | -10% |

Fuente: *Biodiesel ejemplo notable de combustible alternativo*.⁷⁰

El punto de inflamación o *flashpoint* también es sustancialmente mejor en el biodiesel, que lo convierte en un combustible mucho más seguro de almacenar. El punto de inflamación del biodiesel es de 149°C comparado con el punto de inflamación del petrodiesel que es de 71°C. Es incluso más seguro de almacenar que el propio combustóleo que tiene un punto de inflamación de 116°C.

El beneficio se presenta ya que el punto de inflamación de un químico es la temperatura mínima a la cual un líquido desprende vapores inflamables al aire y estos vapores pueden incendiarse. Una sustancia con *flashpoint* de 38°C o menor se considera peligrosa; entre 38°C y 93°C, moderadamente inflamable; mayor a 93°C la inflamabilidad es baja (para un combustible).

⁷⁰ Jorge L. Aguilar González, *Biodiesel, ejemplo notable de combustible alternativo*, Energía a Debate, México.

Tabla 3. Comparación del flashpoint

| Combustible | Temperatura Flashpoint (°C) |
|-------------|-----------------------------|
| Biodiesel | 149 |
| Petrodiesel | 71 |
| Gas Natural | -220 |

Fuente: *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*

En cuanto a las propiedades lubricantes, el biodiesel es muy superior al petrodiesel, lo cual ha sido demostrado en pruebas que realizan los productores del petrodiesel, la más comúnmente empleada por los refinadores de petróleo de Estados Unidos es la prueba llamada "*High Frequency Reciprocating Rig*" o HFRR con base en la cual se ha estimado que la vida de los motores alimentados con biodiesel podría ser de hasta el doble de la que tendrían si fueran alimentados con petrodiesel. Se estima que las cualidades lubricantes del petrodiesel irán disminuyendo conforme los requisitos de contenido de azufre vayan siendo más estrictos, de tal forma que algunos refinadores de petróleo ya están agregando aditivos al diesel para mejorar sus propiedades de lubricación.

En adición a todas estas ventajas, el biodiesel puede emplearse en los motores a diesel convencionales sin requerir modificación alguna, lo que facilita grandemente su introducción al mercado ya sea al 100% (B100) o mezclado con el petrodiesel, siendo la proporción más frecuente al 20% en el llamado B20, que incluye 20% de biodiesel y 80% de petrodiesel.

Los derrames de este combustible en ríos y mares resultan mucho menos contaminantes ya que es fácilmente biodegradable, se degrada biológicamente el 85% en sólo cuatro semanas, debido a lo anterior el biodiesel es ideal para emplearse en motores de barcos y lanchas y transportes en parques nacionales, bosques y sobre todo en las grandes ciudades.

Tabla 4. Comparación de rendimiento típico de cosechas para producción de aceite.

| PLANTA | Kg. DE ACEITE/ HECTÁREA |
|-----------|----------------------------|
| Maíz | 145 |
| Algodón | 273 |
| Cáñamo | 305 |
| Soya | 375 |
| Linaza | 402 |
| Mostaza | 481 |
| Girasol | 800 |
| Cacahuate | 890 |
| Colza | 1,000 |
| Ricino | 1,188 |
| Jojoba | 1,528 |
| Coco | 2,260 |
| Palma | 5,000 |

Fuente: *Biodiesel ejemplo notable de combustible alternativo*.⁷¹

La tabla anterior muestra una lista de los aceites vegetales que son factibles de emplear como materia prima para la producción del biodiesel y los rendimientos en producción de aceite por hectárea, de tal forma que dependiendo del lugar de producción que se seleccione puede encontrarse el cultivo idóneo para el clima específico de la localidad, desde la jojoba para climas desérticos hasta el aceite de coco y palma para los climas tropicales.

3.2.2 Alternativas Tecnológicas.

Las tecnologías para la producción de biodiesel se basan en la extracción del aceite contenido en las semillas vegetales. Para obtener aceite a partir de las semillas son prensadas mecánicamente y el proceso se puede complementar mediante una extracción química que emplea solventes para aumentar el rendimiento.

Tabla 5. Tipo de recurso y tecnología para la obtención de biodiesel

| Materia Prima | Combustible (\$/ton) | Tecnología | Escala | Costo de inversión (US\$/MW) | Costo unitario (US\$/MW) | Costo producto (US\$/MW) |
|-------------------|----------------------|--|------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Aceite de Soya | 494 | Plantas basadas en aceite de soya | 287,865 MW | 6,000,000 | 21 | 57.4 |
| Aceite de Girasol | 525 | Planta semiindustrial basada en aceite de girasol | 5,200 MW | 290 | 56 | 52.3 |
| | | Planta industrial bajo costo basada en aceite de girasol | 34,700 MW | 1,450,000 | 42 | |
| | | Planta industrial basada en aceite de girasol | 34,700 MW | 5,510,000 | 159 | |

Fuente: *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*

3.3 Usos de la biomasa en México.

La forma de aprovechar la biomasa como energético puede ser a través de la combustión directa, como tradicionalmente se ha aprovechado en México en forma de leña y el bagazo de caña, o bien mediante la conversión de la biomasa en diferentes hidrocarburos a través de diferentes tipos de procesos.

La combustión directa que todos conocemos es el proceso por el que se aprovecha el poder calorífico de la biomasa en México, siguiendo métodos tradicionales para producir carbón. La pirolisis además del carbón puede dar

⁷¹ Jorge L. Aguilar González, *Biodiesel, ejemplo notable de combustible alternativo*, Energía a Debate, México.

BIOENERGÍA

lugar a líquidos como el alquitrán que es un combustible con cierto poder calorífico alto de unas 9,000 o 10,000 Kcal por litro y también da lugar a la producción de monóxido de carbono que es un gas que puede emplearse como combustible.

Por el otro lado se tienen procesos biológicos, los tradicionales, la producción de alcohol a partir de productos celulosos que, por ejemplo, nosotros conocemos tradicionalmente como la producción de alcohol a través de la fermentación de caña. Cuando el azúcar está disponible para otros fines, alimenticios entre ellos, podemos pensar en residuos, en celulosa, darles un tratamiento con ácido clorhídrico a alta temperatura, gasificarlos, llegar a la glucosa, fermentarlos y producir el alcohol.

El proceso de la fermentación anaeróbica puede ser empleado en muchos casos, por un lado el proceso produce fertilizantes o un abono orgánico. Más que un fertilizante es un acondicionador de suelos y en muchos casos se han hecho experimentos para emplearlo como un complemento alimenticio y por el otro tenemos un combustible que es el conocido como biogás. Hay una gran variedad de residuos que pueden aprovecharse: agrícolas, animales, algas que se generan en grandes cantidades en las costas, el lirio acuático por ejemplo que es una plaga en las presas de México y la basura que se está generando todos los días.

La Comisión Reguladora de Energía (CRE) ha otorgado poco más de 300 permisos a la fecha para autoabastecimiento en diversos ingenios azucareros del país que les permite utilizar el bagazo de caña como energético primario para generar electricidad. En algunos de ellos, es exclusivamente el bagazo de caña el utilizado como energético primario para generar electricidad; en otros casos participa conjuntamente con hidrocarburos (combustóleo y diesel). Las capacidades de generación son del orden de varios megawatts (MW) y varios miles de toneladas al año utilizadas por cada ingenio para generar su energía. Existe también un proyecto en Monterrey que genera electricidad a partir del biogás concentrado en un relleno sanitario en el orden de los 7 MW.

3.3.1 Agroenergética.

La agroenergética es una nueva faceta de la agricultura, en la que se pretende la producción de biomasa mediante cultivos específicos y la transformación de ésta en productos energéticos de fácil utilización en sustitución de los combustibles tradicionales.

Ante la posibilidad de producir biomasa para fines energéticos por el sector agrario, surge el concepto de agroenergética, que se puede definir como una nueva faceta de la agricultura en la que se pretende la producción de biomasa mediante cultivos específicos, y la transformación de esta en productos energéticos de fácil utilización en los sistemas convencionales, en sustitución de

los combustibles tradicionales. El desarrollo de esta actividad agrícola en un plazo más o menos breve depende principalmente de:

1. La identificación de especies vegetales adecuadas para producir biomasa en las tierras agrícolas disponibles,
2. La disponibilidad de tecnología necesaria para hacer competitiva la producción de biocombustible,
3. El interés de la sociedad por conservación y protección del medio ambiente, y
4. El establecimiento de políticas adecuadas para estimular al agricultor y al industrial a iniciar esta actividad.

Como los objetivos perseguidos en los cultivos energéticos son distintos a los perseguidos con los alimentarios es de esperarse que las especies seleccionables para este uso sean distintas a las empleadas como alimento. Las especies dedicadas a producir biomasa con fines energéticos pueden ser de tipo herbáceo o leñoso, y a veces pueden coincidir con especies utilizadas en cultivos agrícolas tradicionales o en aprovechamientos silvícolas clásicos. La principal condición que debe darse para el desarrollo de cultivos energéticos es la necesidad de que la producción sea económicamente rentable, para lo cual deben alcanzarse elevados rendimientos de biomasa con bajos costos de producción, recolección, almacenamiento y procesado para su transformación.

3.3.2 Nuevas Agroindustrias.

El desarrollo de cultivos energéticos no tiene sentido si a la par no se desarrolla la correspondiente industria agroenergética que utilice la biomasa producida como materia prima. Los sistemas agroenergéticos constituyen verdaderas agroindustrias en las que la producción y la transformación deben estar íntimamente relacionadas desde el punto de vista técnico, económico y geográfico, como en los aspectos contractuales que obliguen a los productores a suministrar la materia prima necesaria para el funcionamiento de la industria, así como esta a aceptar la producción al precio estipulado.

Una característica específica de las agroindustrias energéticas es la necesidad de que el centro de transformación se encuentre próximo a los lugares de producción, resulta irracional producir menos combustible en un día que lo que se consume en la sola transportación de las materias primas para su producción.

Entre las nuevas agroindustrias que podrían crearse a futuro con base en la producción de biomasa para fines energéticos, cabe mencionar:

BIOENERGÍA

- Bioaceites carburantes obtenidos de semillas oleaginosas para utilizarse en motores diesel en sustitución del combustible fósil convencional; ya sea directamente o tras un proceso de transformación adecuado (transesterificación). Los aceites vegetales utilizados directamente en motores sin pre-cámara de inyección no resultan adecuados, debido a la aparición de residuos carbonosos y por las dificultades del sistema de inyección, al ser mucho más viscoso que el diesel. Pero utilizados en motores de inyección indirecta o de pre-cámara, sí resultan eficaces. También pueden utilizarse los aceites sin modificar, mezclados en pequeñas proporciones con diesel, lo que no impide que el motor se deteriore con el tiempo, aunque puede funcionar sin problemas durante un período mucho mayor que si se utilizara aceite vegetal solo.
- Bioetanol carburante producido por fermentación de materias primas azucaradas o de materias amiláceas tras un proceso de hidrólisis previa. El etanol deshidratado puede utilizarse en mezclas de 5 al 15% con gasolina para incrementar el octanaje y eliminar el uso de aditivos con plomo.
- Biocombustibles sólidos para su empleo en calefacción doméstica o para usos industriales. La biomasa es idónea para este tipo de utilización, en particular la biomasa lignocelulósica, ya sea de origen herbáceo o leñoso. Los procesos de transformación pueden ir desde simples mecanismos de astillado, compactación o peletización, hasta la obtención de carbón vegetal.
- Agroelectricidad, que consiste en la producción de energía eléctrica a partir de biocombustibles producidos en las inmediaciones de una central. También en este caso la biomasa más adecuada resulta ser la de tipo lignocelulósico, por ser más barata y de precio competitivo contra los combustibles tradicionales que se utilizan para generación de electricidad (carbón y combustóleo).

Entre los obstáculos a vencer de los biocarburantes y biocombustibles en su penetración en el mercado energético, destaca la necesidad de tener un precio inferior a los carburantes y combustibles tradicionales.

3.3.3 Cultivos energéticos para México.

La biomasa que se produce en el país sin aprovechamiento para consumo humano como el bagazo del agave (producción de tequila), la cascarilla de café, de arroz, de trigo, lirio acuático, estiércol, y muchos otros, también puede emplearse como energético. Ejemplos de aprovechamiento actual son la leña y el bagazo de la caña de azúcar, sin embargo, las demás no se aprovechan. Algunos estados como Durango, Sonora, Sinaloa, Querétaro, Veracruz y Chiapas pueden contribuir con este recurso a disminuir el consumo de productos

petrolíferos. La ventaja estratégica y cuanto a la balanza de pagos del país, resulta al sustituir a los combustibles producidos a partir del petróleo; suponiendo la disminución de dependencia del manejo del costo del barril de petróleo en el concierto internacional, además de un ahorro de divisas.

México es importante productor de varios cultivos a nivel mundial; siendo en algunos casos el primero en ese mismo ámbito, como es el caso de la lima y limón, cebolla, aguacate y cártamo. Desafortunadamente, en México algunos de estos cultivos tiene bajo valor de mercado para fines alimentarios, por lo que se puede pensar en su utilización con fines energéticos, tal es el caso de la piña. Las opciones que pueden utilizarse para producir cultivos energéticos son las siguientes:

- Cultivos oleaginosos para obtención de biodiesel.- Puede utilizarse el girasol principalmente. Otros cultivos son cártamo, cardo, cacahuate y soya; y otros cultivos enfocados a la producción de aceites.
- Cultivos alcoholígenos.- La materia prima para obtención de bioetanol puede proceder de una biomasa de tipo azucarado (glucosa, fructosa o sacarosa), o de biomasa de tipo amiláceo (almidón o inulina). El etanol obtenido por destilación de excedentes de vinos y cuyo almacenamiento durante prolongados períodos de tiempo pueda representar un alto costo, podría resultar económico para estas aplicaciones. Entre los cultivos convencionales dedicados a este fin pudieran considerarse a la remolacha y los cereales.
- Cultivos productores de biomasa lignocelulósica.- Para utilizar biomasa con fines térmicos, se requiere de un tipo de biomasa de bajo costo, competitivo con carburantes de sustitución y con alto rendimiento por unidad de superficie. Podrían utilizarse los chopos, acacias, eucaliptos y robinia. Pueden plantarse estas especies con una alta densidad (unas 10,000 plantas/ha) y con turnos de duraciones de 4 a 6 años, aprovechando la capacidad de rebrote para continuar la plantación en años sucesivos. Cabe señalar que las especies leñosas tienen el inconveniente de ocupar el terreno por un cierto número de años; y al querer recuperar las tierras para fines agrícolas se requiere de fuertes inversiones.

Basado en la experiencia internacional, un programa de etanol como combustible puede ser ideado como parte de una transición hacia sistemas de transporte sustentables. No se espera que el etanol desplace completamente a la gasolina del mercado en ningún momento, por el contrario, el etanol puede alargar los recursos petrolíferos logrando una moderada cuota de mercado y ahorrando gasolina para el futuro.

3.4 Panorama Actual.

El 30 de octubre de 2007 se aprobó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México, esta ley busca que los biocombustibles sean una alternativa al petróleo, energético fósil cuyas reservas empiezan a agotarse en México y en el mundo, y cuyo precio aumenta a niveles sin precedente presionando a las economías de todo el orbe. Buscar la diversificación energética ya es un objetivo de muchos gobiernos y los biocombustibles ofrecen una atractiva opción de carburante líquido que también es amigable al medio ambiente y beneficia a la agricultura.

México también requiere de un marco legal para dar cumplimiento a sus compromisos en el protocolo de Kioto, respecto de sus emisiones de gases de efecto invernadero. Nuestro país es el primer productor de este tipo de emisiones en América Latina con aproximadamente 360 millones de toneladas de dióxido de carbono al año.

3.4.1 Desarrollo Mundial.

Mientras que el Senado mexicano analizaba la ley de bioenergéticos, también los congresos de Argentina y España promulgaron un nuevo marco legal para impulsar los bioenergéticos y el Fondo de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO) arrancó un programa de promoción a nivel mundial, sobre todo en las naciones en vías de desarrollo donde las alzas en el precio del petróleo pueden llegar a tener un efecto económico devastador.

Los biocombustibles están despertando un gran interés en naciones ricas y pobres como alternativa a la gasolina derivada del petróleo, o como complemento de ella. Brasil es, desde hace años, el líder mundial en la producción de bioetanol utilizado como carburante para vehículos automotores, Allí son cada vez más comunes los vehículos que usan un combustible "flexible" (flexfuel), que puede ser 85 por ciento etanol obtenido de los cultivos y 15 por ciento gasolina, mientras que otros vehículos usan mezclas de 25 por ciento de etanol y 75 por ciento gasolina y a partir de 2008 el uso de biodiesel es legalmente obligatorio para los camiones en ese país sudamericano.

La experiencia en este país indica que las variaciones en precios del bioetanol están sujetas a diversos factores que deben ser superados. Entre éstos se encuentran las cambiantes condiciones climáticas, la falta de producción en periodos entre zafras y aun los de tipo político y de corrupción en el mercado.

Estados Unidos no se queda muy atrás, ha incrementado en forma acelerada su producción de etanol a partir del maíz, la cual alcanzó 8 mil 500 millones de litros en el 2005. Se prevé que su producción podría incluso igualar o superar la de Brasil en poco tiempo. Desde hace un par de años es obligatorio usar etanol en

Estados Unidos como oxigenante de las gasolinas, en vez del metil-terbutil-éter (MTBE), sustancia química que ha contaminado cuerpos de agua en ese país.

Una mezcla de 7.7 por ciento de volumen de etanol en la gasolina cumple con los requerimientos de 2.7 por ciento de peso de oxígeno que ahora se establece en la normatividad norteamericana, si bien es común mezclarlo en una proporción de 10 por ciento, que proporciona un peso de oxígeno del 3.5 por ciento.

El crecimiento de la producción de bioetanol carburante en Estados Unidos se comenzó a dar con el objeto de aprovechar los excedentes de maíz, habiéndose establecido una política nacional de apoyo a la agroindustria, pensando, a la vez que esto ayudaría a no depender tanto del petróleo importado. Sin embargo, el abasto de etanol tiende a ser autosuficiente y la propuesta de importar etanol desde Brasil para complementar la producción nacional está enfrentando oposición entre los productores de maíz.

Mientras tanto, el biodiesel ya se expende en más de 1,000 estaciones de servicio de la Unión Americana. En España, se manejan mezclas de hasta 5 por ciento de etanol en la gasolina. En Suecia, se cuenta con autobuses que utilizan etanol al 95 por ciento con gasolina

Así como éstos podrían darse otros ejemplos, pero lo importante es conocer la flexibilidad que representa la utilización del etanol como carburante, con relación a las mezclas que pueden hacerse, conforme a la capacidad de producción de diferentes tipos de cultivos y a la oferta que se puede establecer en el mercado interno, siempre y cuando se establezcan políticas y normas claras de operación.

3.4.2 Oportunidades de desarrollo para México.

Los ingenios azucareros tienen la mejor oportunidad para producir etanol en México. La industria mexicana del azúcar da sustento, directa o indirectamente, a 12 millones de mexicanos y ocupa el séptimo lugar mundial por su volumen de producción y el tercer lugar en rendimientos de toneladas de caña por hectárea. Sin embargo, la rentabilidad y productividad de los ingenios ha sido baja y es un panorama que puede cambiar con el impulso que se le podría dar a la elaboración industrial de etanol para los automóviles del futuro.

Al producir biocombustibles, es primordial no establecer una competencia con la producción de alimentos, ya que debido a las condiciones en que se encuentra en la actualidad el campo, México ya no es autosuficiente en casi ningún tipo de producto agrícola, a excepción de la caña de azúcar.

En los ingenios mexicanos, se han tenido producciones en crecimiento, al grado de ser autosuficientes y aún llegar a tener excedentes que no se han podido

BIOENERGÍA

colocar en ningún lado debido a las condiciones que se establecen en el Tratado de Libre Comercio con América del Norte y a que la estructura actual de la industria azucarera sea de muy altos costos a escala internacional. El mercado internacional de excedentes mueve 8 millones de toneladas de azúcar a 250 dólares por tonelada, mientras que México y Estados Unidos tienen los precios más altos de entre 600 y 700 dólares por tonelada.

Para ello es importante, además de contar con una política nacional y con la normatividad correspondiente, el fijarse metas alcanzables, con flexibilidad en el incremento de las concentraciones en las mezclas con las gasolinas, conforme lo permita el mercado, asegurando la compra del etanol producido para ser utilizado como combustible.

El cultivo de la caña de azúcar participa con el 13.5 por ciento del valor de la producción agrícola nacional y representa el 0.5 por ciento del Producto Interno Bruto (PIB). A la vez, genera 440,000 empleos directos equivalente al 1 por ciento de la planta manufacturera nacional, dependiendo en forma directa 2.5 millones de mexicanos en quince Estados de la República Mexicana y 227 municipios, en donde vive el 13 por ciento de la población nacional que se ve beneficiada en su economía por la actividad que 58 plantas fabriles generan en las regiones productoras de caña de azúcar. Lo anterior se traduce en una producción promedio de 44 millones de toneladas de caña y 5 millones de toneladas de azúcar por ciclo azucarero.

En el caso del maíz, que es el cultivo más importante de México, pues de él depende el 55.7 por ciento de la población total agropecuaria, 3.1 millones de productores de maíz representan el 11.3 por ciento del PIB. En el 2004, el valor de su producción a precios de mercado alcanzó los 35.4 mil millones de pesos, sembrada en una superficie mayor a las 8.4 millones de hectáreas. El volumen de la producción es mayor a los 22 millones de toneladas anualmente.

Cabe mencionar que México también ha tenido algunas experiencias con la producción de biogás producido a partir de los desechos sólidos. Por ejemplo, existe un proyecto en Monterrey que genera 7 megawatts de electricidad a partir del biogás concentrado en un relleno sanitario, así como una granja en el estado de Hidalgo que produce energía eléctrica a partir del estiércol.

De acuerdo con la Ley de Bioenergéticos, la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Rural Sustentable tendrá el encargo de establecer los programas de carácter regional, estatal y municipal para el manejo adecuado de cultivos y plantaciones de caña de azúcar y maíz para la producción de etanol y de plantas oleaginosas para la producción de biodiesel.

Define la ley que la referida Comisión se integra por el Secretario de Energía y los directores generales de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), quienes se encargan de elaborar la estrategia

nacional para el desarrollo de bioenergéticos y promover la descentralización de programas, recursos y funciones, de conformidad con la Ley de Desarrollo y otras disposiciones legales aplicables. Este órgano de coordinación y concertación también tendrá a su cargo proponer las políticas, programas, proyectos e instrumentos tendientes al apoyo, fomento, productividad, regulación y control de la bioenergía.

Las transiciones energéticas tienden a ser lentas y de largo plazo, pero está claro que el alto precio del petróleo está creando un renovado interés en los bioenergéticos en todo el mundo. En México, su introducción es aún incipiente, por lo que se requiere la aprobación de la nueva ley para que los bioenergéticos reciban su primer impulso y puedan consolidarse.

3.4.3 Oportunidades de desarrollo del Etanol en México.

En México, las gasolinas son oxigenadas en un 6 por ciento con MTBE, el cual es importado en su mayor parte. Si se empieza a producir etanol en el país, se podría sustituir las importaciones de MTBE, permitiendo el ahorro de una cuantiosa cantidad de recursos (más de 100 millones de dólares al año) que actualmente se gasta en la importación de este producto.

De establecerse en la regulación que las gasolinas consumidas en la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey contengan un mínimo de 10 por ciento de componentes oxigenantes sustentados en etanol permitiría a México lograr que una proporción considerable del combustible provenga del etanol producido en el campo mexicano.

Los biocombustibles son una transición al futuro en materia energética pues constituyen un puente entre los hidrocarburos y los energéticos renovables del futuro como son el hidrógeno y las celdas de combustibles. Sin embargo, los procesos de incorporación de la producción, transporte, distribución y comercialización de biocombustibles son de muy largo plazo. La introducción de estos combustibles requiere de una estricta voluntad política, la concertación institucional entre los organismos de gobierno resulta vital, así como la participación y el compromiso del sector privado resultan fundamentales para el éxito de la adopción de los biocombustibles.

La producción de biocombustibles involucra una gran cantidad de mano de obra local, con diverso grado de preparación para cubrir necesidades agrícolas, energéticas, comerciales, tecnológicas, de control de calidad, etc. Es decir, que se fomenta la creación de mano de obra, situación que no ocurre con el petróleo y el gas natural, actividades extractivas, que son fuentes rentables que reciben grandes inversiones, pero que generan muy escaso empleo y cuando lo hacen, son empleos muy especializados.

BIOENERGÍA

La aplicación de cultivos energéticos en México destaca la posibilidad de poder cambiar el paradigma de producir ciertos cultivos, anteriormente con fines alimentarios, con bajo valor de mercado y reducidos márgenes de utilidad (y en muchos casos nulos, llegando hasta las pérdidas), a producirlos con fines energéticos, trayendo el desplazamiento de combustibles fósiles por los biocombustibles producidos, reduciendo emisiones contaminantes y efectos adversos al entorno, y principalmente beneficiando a la población que anteriormente los producía, con nuevos empleos, desarrollo socioeconómico y posibilidades de mejorar su condición de vida. Se percibe una serie de ventajas con respecto a la utilización de ciertos cultivos como fuente de energía para México.

Sin embargo cabe resaltar que en estudios preliminares de la Secretaría de Energía para la conversión a etanol han sido considerados como insumos: caña de azúcar, maíz, yuca, sorgo y remolacha azucarera, con las tecnologías maduras existentes.

El análisis económico por método FDE ha mostrado que con los insumos valorados a precio de costo actuales y tres precios de venta de etanol, representativos del mercado reciente de etanol combustible, el resultado económico neto sería poco rentable, con resultados realmente positivos solamente para la caña de azúcar y el maíz. Destacando que el costo de la materia prima es el elemento más importante de los costos de producción.

Sin embargo es innegable que la producción de bionergéticos como el etanol traería aparejado beneficios tales como:

- Permitir la continuidad de la actividad del sector agrícola, evitando abandono de superficies productivas y manteniendo la actividad en los sectores industriales relacionados directamente con producción agrícola, fertilizantes, maquinaria agrícola o producción de semillas.
- Crear puestos de trabajo en el sector agrícola y en el de transformación.
- La utilización de cultivos energéticos tiene un menor requerimiento de insumos de producción, por lo que el impacto ambiental es menor.
- Toman en cuenta a los cultivos perennes protegiendo al suelo de la erosión; eliminando el laboreo excesivo y pérdida de suelo fértil.
- Permiten una reducción de CO₂, ya que éste ha sido previamente fijado por las plantas mediante la fotosíntesis antes de su combustión.
- Mitigan de la emisión de óxidos de azufre (SOX) al sustituir la combustión de hidrocarburos; evitando lluvias ácidas, entre otros efectos contaminantes.
- Reducen el consumo de petrolíferos, los cuales se pueden destinar a la generación de otros productos con mayor valor de mercado y posicionamiento estratégico en el mismo.

4. EL PROYECTO DE INVERSIÓN.

PROYECTO DE INVERSIÓN

El proyecto de inversión planteado en este capítulo se basa en el caso desarrollado como modelo por la Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C. para la generación de bioetanol a partir de maíz. Cabe destacar que la finalidad principal de este capítulo no es el planteamiento del plan de negocio para la producción y comercialización de bioetanol, sino sentar las bases para la evaluación financiera del proyecto.

4.1 Planteamiento del proyecto.

Actualmente las estrategias comerciales en la industria de los biocarburantes del sector privado y estatal, a partir de materias primas como el maíz, están dirigidas a los siguientes aspectos:

- a) Protección al medio ambiente: el bioetanol es un carburante renovable, biodegradable y favorable al medioambiente, que reduce las emisiones contaminantes.
- b) Reducción de la dependencia energética del exterior: el uso de los biocarburantes en el transporte como sustitutos de las gasolinas o los gasóleos, reduce la dependencia de las importaciones de crudo y puede mitigar el riesgo de incremento en los precios de estos.
- c) Beneficios para la economía: el crecimiento esperado en la industria de los biocarburantes supone un gran beneficio para la economía, especialmente en ámbitos rurales, mediante nuevas inversiones en zonas agrícolas, actividad de construcción, incremento de necesidades de productos agrarios y creación de puestos de trabajo.

En México el desarrollo de combustibles alternos al petróleo es incipiente a pesar que dicha industria tiene más de 25 años realizando investigaciones en el sector y siendo Brasil el país de referencia en el desarrollo de estas tecnologías. Las industrias que han mostrado interés y desarrollado investigación en relación a la producción de etanol han sido la industria del azúcar y del maíz, para uso como carburante asociado a las gasolinas convencionales mediante convenios con la Secretaria de Economía, la Secretaria de Energía y PEMEX.

Con base en la información proporcionada por la Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal A.C., se plantea el siguiente proyecto para la construcción y operación de una planta productora y comercializadora de bioetanol. La planta tendrá un proceso de molienda húmeda del grano y los productos que producirá son el etanol (biocombustible) para el mercado nacional y/o internacional, aislados proteínicos (industria alimenticia y sector pecuario), fibra alimentaria o salvadillo (industria alimenticia y sector pecuario), aceite refinado de maíz (mercados de consumo) y vinaza (sector pecuario).

Una vez operando la planta productora y comercializadora de bioetanol a partir de maíz, se obtendrá una producción de 60,000 L/día (21,600,000 L/año) de

este producto, 5 toneladas (t) de aceite, 11 t de fibra, 51 t de proteína y 18 t de vinaza; con esta producción se espera un ingreso aproximado anual promedio de 200 mdp durante los primeros cinco años de operaciones.

En cuanto los principales desafíos para una producción competitiva de etanol en México, se tiene en primer lugar la voluntad política de los gobiernos. La experiencia empírica ha demostrado que en la producción, comercialización y uso del etanol es conveniente que el Estado implemente políticas que incentiven la inversión privada en este ramo de actividad.

Un segundo desafío para la producción de etanol carburante requiere de grandes inversiones en plantas industriales de procesamiento y los inversionistas necesitan cierta seguridad en cuanto a abastecimiento de materia prima y venta del etanol producido.

Estas limitantes pueden ser superadas en el mediano plazo, se necesitan emprender acciones afirmativas que facilitan la inversión privada en este ramo de actividad. Del mismo modo, el gobierno de México tiene que promover un marco legal que proporcione incentivos atractivos tanto para los productores de maíz y sorgo, como para los inversionistas que desean invertir en plantas de procesamiento.

4.2 Análisis FODA del proyecto.

El análisis FODA permite resaltar las fortalezas y las debilidades diferenciales internas al compararlo de manera objetiva y realista con las oportunidades y amenazas claves del entorno.

Tabla 6. Análisis FODA del proyecto.

| ANÁLISIS INTERNO | |
|---|---|
| FORTALEZAS | DEBILIDADES |
| Fuente energética renovable. | Dependencia tecnológica. |
| Mercado nacional e internacional no satisfecho. | Falta de desarrollo de mercado interno para el consumo del etanol. |
| Condiciones climáticas para su producción. | Falta de mano de obra especializada en la producción y manejo del etanol. |
| Disponibilidad de tecnología de producción y centros de investigación. | Poco nivel organizativo entre productores de maíz y sorgo. |
| Apoyo gubernamental para el establecimiento de plantas productoras de etanol. | Falta de cultura del uso de biocombustibles entre la población. |
| Crecimiento constante anual en la demanda del etanol como biocombustible. | |
| Experiencias exitosas y probadas en el uso y desarrollo tecnológico del etanol. | |

PROYECTO DE INVERSIÓN

| ANÁLISIS EXTERNO | |
|---|---|
| OPORTUNIDADES | AMENAZAS |
| <p>Generación de empleo.</p> <p>Facilidad en la comercialización del etanol en el mercado nacional y de exportación.</p> <p>Transferencia de tecnología a fin de incrementar los niveles productivos de los granos de donde se extrae el etanol.</p> <p>Impulsar el desarrollo rural así como mejorar el ingreso y nivel de vida de los productores agrícolas.</p> <p>Disminuir la dependencia hacia los hidrocarburos e importación de productos químicos catalizadores de la gasolina.</p> <p>Desarrollo de nuevas áreas de negocio entres los actores del sector agroindustrial.</p> <p>Disminución de los niveles de emisión de contaminantes del parque vehicular.</p> | <p>Generar una competencia entre la suficiencia agroalimentaria y la producción de granos destinados a la producción de biocombustibles.</p> <p>Falta de inversión en infraestructura.</p> <p>Cambios en la política gubernamental federal y estatal en la transición de nuevas administraciones.</p> <p>Falta de investigación y asesoría técnica especializada en la producción, distribución, manejo y uso del etanol.</p> |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Actualmente la producción de bioetanol en el mundo se ha convertido en una necesidad debido a la problemática que ocasiona al medio ambiente la producción de combustibles a base de petróleo. En el análisis FODA para este proyecto, se puede ver que se tienen grandes oportunidades así como fortalezas para llevar a cabo planes de desarrollo que involucren la producción de este biocombustible, con lo cual se mejorará la calidad de vida de los productores y se generarán más empleos, logrando así un avance económico favorable para nuestro país. Sin embargo, la falta de investigación en este rubro puede ocasionar que no se cuente con personal altamente capacitado para la producción y manejo del mismo, además del poco conocimiento por parte del mercado nacional hacia este producto, lo que podría generar poco interés por parte de los consumidores finales.

Se tienen muchas oportunidades para que la producción de bioetanol sea un desarrollo tecnológico de impacto no sólo en nuestro país, sino en todo el mundo y además hay grandes expectativas para que se incursione en el mercado internacional debido a que las zonas de producción de maíz presentan ambientes climáticos adecuados para un óptimo desarrollo de esta materia prima, agregando que se estima que la demanda del mercado tenderá a crecer en años venideros.

4.3 Requisitos del mercado y sus clientes.

Derivado de la situación actual del petróleo, compañías privadas y gobiernos, están dirigiendo sus políticas de negocios e inversión hacia los biocombustibles, para ello será necesario implementar estrategias a fin de satisfacer los requerimientos del mercado y clientes potenciales, dichas estrategias son:

- a) Mejora de rendimientos en el proceso de producción actual del etanol en México.
- b) Desarrollo y comercialización de tecnologías de conversión del etanol competitivas.
- c) Programas de demostración para nuevos usos del bioetanol.
- d) Legislación favorable para el desarrollo de los biocarburantes durante un período suficiente de tiempo: marco legal adecuado para el uso del bioetanol en mezclas y ayudas e incentivos a la construcción.
- e) Producción para consumo interno, mercado doméstico, no basado en exportaciones.

4.3.1 Identificación de oportunidades.

Una gran ventaja que tiene México, con respecto a otros países en que ya se ha incursionado en la producción de bioetanol carburante, es que puede aprender de las experiencias, tanto positivas como negativas. Además, la producción de biocombustibles puede ayudar a arraigar a la gente a su lugar de origen mediante la creación de fuentes de empleo, evitando su emigración hacia las grandes ciudades y a Estados Unidos.

Con el uso del etanol carburante, se tendrá un aumento del octanaje, y por ende de la calidad y la eficiencia del combustible. Del mismo modo, con el reemplazo del plomo y el MTBE, en la mezcla de la gasolina convencional se puede esperar una gran disminución de los efectos contaminantes. En la actualidad, el cuidado del medio ambiente es un tema muy importante en la agenda nacional y mundial.

Existen preocupaciones reales sobre los daños ambientales causados por el uso del petróleo. El etanol es un combustible renovable, por lo tanto, se puede esperar que con el tiempo se aumente la producción sin afectar al medio ambiente, siendo el mayor beneficio la reactivación del agro, para poder producir suficiente etanol carburante, será necesario consolidar y aumentar las plantaciones de granos y caña, lo que ayudará a aumentar la oferta de empleo en el campo y la transferencia de nuevas tecnologías de producción.

Además, al reducir su dependencia del petróleo, el país mejorará su balance comercial reteniendo divisas que se destinan para la importación de combustible. Otro beneficio importante del uso del etanol carburante es la reducción del dióxido de carbono emitido por la flota vehicular. Con esto, se puede esperar un impacto positivo sobre el medio ambiente, y en consecuencia en la salud de las personas que habitan las ciudades. Los efectos positivos sobre el medio ambiente se deben a que el etanol carburante:

- Es un compuesto biodegradable.
- Su combustión produce un efecto oxigenante.
- Reduce la emisión de gases tóxicos de los vehículos tradicionales.
- Reduce el efecto invernadero.

PROYECTO DE INVERSIÓN

Todos estos beneficios anteriormente analizados sugieren que la producción y procesamiento del etanol carburante representen una gran oportunidad de negocio tanto para los productores como para el país en general.

4.3.2 Estrategia.

La satisfacción de la producción nacional, la generación de empleos, transferencia de nuevas tecnologías, la disminución de los niveles de contaminantes en la emisión de los motores de combustión interna y la generación de riqueza, se consideran líneas estratégicas en la producción de etanol.

Además, es de considerarse el incremento constante de los precios del petróleo y sus derivados como la gasolina, mientras que el etanol ha ido tomando fuerza en los últimos cinco años dadas sus ventajas competitivas como:

- Es un recurso renovable, lo que facilita la dependencia reducida de las importaciones de petróleo.
- Comparado con los combustibles convencionales, tiene el potencial de producir menos emisiones de contaminantes, en especial emisiones de ciclos de vida de gases de efecto de invernadero.

Considerando las ventajas competitivas señaladas resulta trascendental la implementación de proyectos para la obtención de etanol en estados estratégicos donde la producción de maíz y sorgo ocupan lugares primordiales en la economía estatal.

Para ello será conveniente realizar y estrechar contactos comerciales y de mercado del etanol a fin de mantener una actividad permanente y dinámica de conocimiento e información de los mercados del consumo del etanol. Las siguientes acciones coadyuvan a lograr un buen posicionamiento:

- Establecer un sistema de información de la cadena de etanol, incorporando inteligencia de mercados internos y externos.
- Familiarizarse con los sistemas de mercadeo en cada uno de los estados y países meta seleccionados.
- En caso de exportar, contactar las dependencias oficiales del país importador para obtener información directa.
- Elegir un consumidor idóneo en el mercado objetivo, para establecer alianzas que garanticen el incremento sostenido de las ventas del etanol.
- Acceso a esquemas de financiamiento y crédito oportuno y con tasa preferencial, dada la relevancia de esta industria en el desarrollo del país.

La producción de etanol a partir de los granos de maíz representa una oportunidad de desarrollo tecnológico y comercial derivado de la situación del

petróleo y de la capacidad productiva de granos y su situación geográfica estratégica de algunos estados del país, así como de las ventajas económicas y ambientales mencionadas anteriormente.

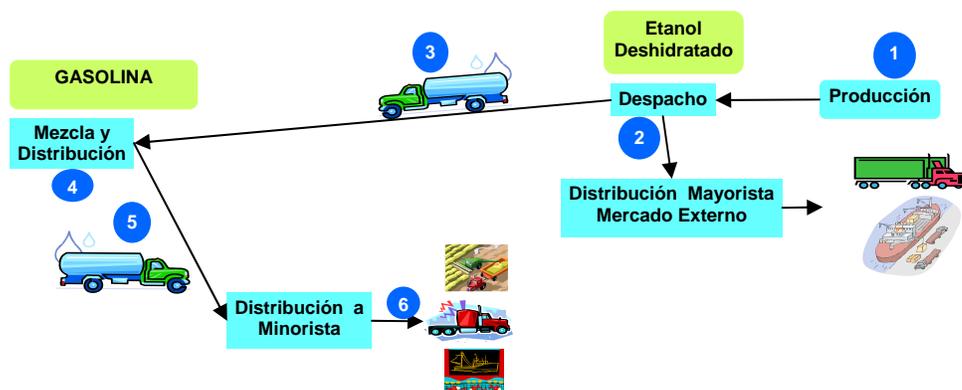
Además resultaría conveniente desarrollar convenios tecnológicos y comerciales con los centros de investigación nacional y extranjeros, países como Brasil y Estados Unidos, líderes mundiales en la producción de bioetanol. Asimismo, desarrollar políticas de gobierno para la promoción, difusión, ejecución y comercialización de proyectos con tecnologías alternativas como es el caso de los biocombustibles.

Cabe mencionar, que el éxito de esta industria va a depender de la disposición del gobierno en la implementación de estas tecnologías y de los incentivos fiscales.

Los procesos de incorporación de la producción, transportación, distribución y comercialización de biocombustibles, dentro de las matrices energéticas de los diferentes países, son de mediano a largo plazo. El tratar de acelerar la penetración, sin una adecuada planificación y marco regulatorio bien fiscalizado, puede resultar en una estrategia *boomerang* sobre las políticas energéticas que se están tomando.

El proceso de distribución inicia a partir de la cosecha del producto, mismo que es llevado al centro de procesamiento industrial de donde se obtienen los diferentes productos derivados del maíz como son la vinaza, proteínas y el etanol, este último será almacenado y posteriormente distribuido a los puntos de venta minoristas tal como se muestra en la Figura 7.

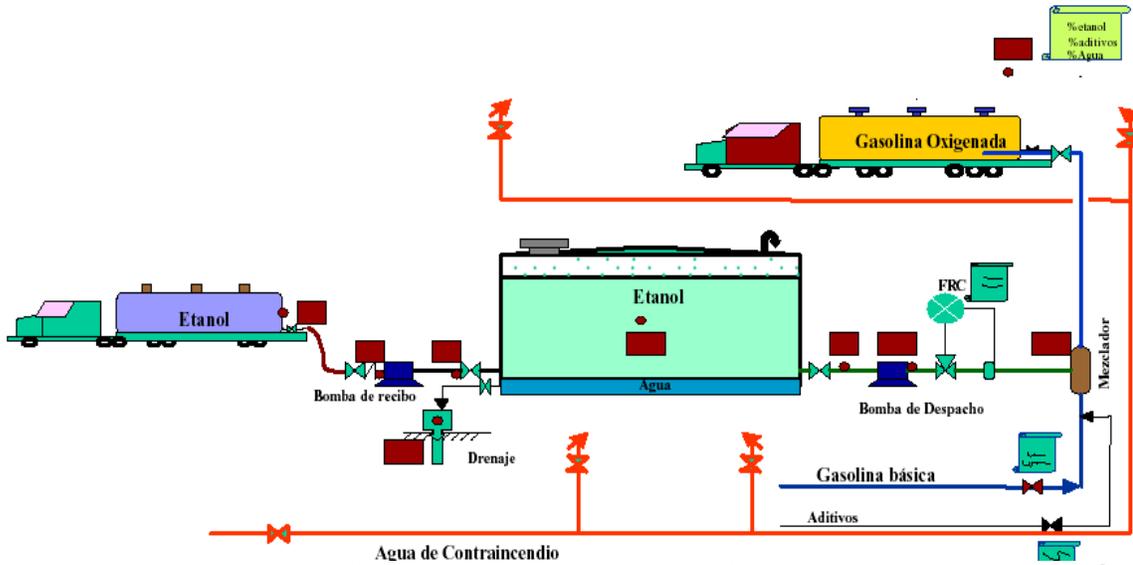
Figura 7. Modelo de distribución y destino del etanol



Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

La Figura 8, presenta un modelo operativo de un punto de venta minorista, desde que se recibe el etanol de planta hasta su mezcla con gasolina.

Figura 8. Diagrama operativo de una estación de etanol



Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Respecto al transporte y almacenaje del etanol, su propensión a absorber agua ha sido motivo de preocupación al igual que la corrosión. Generalmente no se necesita de almacenamiento especial y de equipamiento de abastecimiento en las instalaciones de llenado de etanol, pues el etanol seco es compatible con el acero. Sólo ciertos estanques de fibra de vidrio y algunos revestimientos del estanque pueden no ser compatibles. Las actuales distribuciones del combustible y sistemas de almacenamiento no son a prueba de agua, y el agua tiene propensión a acarrear impurezas en ella.

El etanol no será degradado de forma importante por pequeñas porciones de agua limpia, aunque la adición de ésta diluye su valor como un combustible. En parte, por esta razón, se espera que el uso primario del etanol en el sector del transporte sea como un aditivo de combustible para los combustibles convencionales. Los dispensadores de combustible deben tener elastómeros adecuados para el etanol y no deben usarse componentes de aluminio corriente. Es importante señalar que en todo este proceso productivo como es la cadena del etanol, deberá apearse a las distintas normas y marco jurídico, a fin de garantizar la calidad del producto, el manejo, seguridad e higiene de todo el personal que intervenga en él.

4.3.3 Cultivo del maíz.

a) Preparación del terreno

La preparación del terreno es el paso previo a la siembra. Se recomienda efectuar una labor de arado al terreno para que el terreno quede suelto y sea capaz de tener ciertas capacidades de captación de agua sin encharcamientos. Se pretende que el terreno quede esponjoso sobre todo la capa superficial donde se va a producir la siembra. También se efectúan labores con arado de vertedera con una profundidad de labor de 30 a 40 cm.

b) Siembra

Antes de efectuar la siembra se seleccionan aquellas semillas resistentes a enfermedades, virosis y plagas. Se efectúa la siembra cuando la temperatura del suelo alcance un valor de 12°C. Se siembra a una profundidad de 5 cm. La siembra se puede realizar a golpes, en llano o a surcos. La separación de las líneas de 0.8 a 1m y la separación entre los golpes de 20 a 25 cm.

c) Fertilización

El maíz necesita para su desarrollo unas ciertas cantidades de elementos minerales. Las carencias en la planta se manifiestan cuando algún nutriente mineral está en defecto o exceso.

Se recomienda un abonado de suelo rico en fósforo (P) y potasio (K) en cantidades de 0.3 kg de P en 100 kg de abonado. También un aporte de nitrógeno (N) en mayor cantidad sobre todo en época de crecimiento vegetativo.

El abonado se efectúa normalmente según las características de la zona de plantación, por lo que no se sigue un abonado riguroso en todas las zonas por igual. No obstante se aplica un abonado muy flojo en la primera época de desarrollo de la planta hasta que la planta tenga un número de hojas de 6 a 8. A partir de esta cantidad de hojas se recomienda un abonado de:

N: 82% (abonado nitrogenado).

P₂O₅: 70% (abonado fosforado).

K₂O: 92% (abonado en potasa).

Durante la formación del grano de la mazorca los abonados deben de ser mínimos. Se deben realizar para el cultivo de maíz un abonado de fondo en cantidades de 825 kg/ha durante las labores de cultivo.

Los abonados de cobertera son aquellos que se realizan cuando aparecen las primeras hojas de la planta y los más utilizados son:

Nitrato amónico de calcio. 500 kg/ha

PROYECTO DE INVERSIÓN

Urea. 295 kg/ha

Solución nitrogenada. 525 kg/ha.

Es importante realizar un abonado ajustándose a las necesidades presentadas por la planta de una forma controlada e inteligente

- Nitrógeno (N). La cantidad de nitrógeno a aplicar depende de las necesidades de producción que se deseen alcanzar así como el tipo de textura del suelo. La cantidad aplicada va desde 20 a 30 kg de N/ ha.
- Fósforo (P). Sus dosis dependen igualmente del tipo de suelo presente ya sea rojo, amarillo o suelos negros. El fósforo da vigor a las raíces.
- Potasio (K). Debe aplicarse en una cantidad superior a 80-100ppm en caso de suelos arenosos y para suelos arcillosos las dosis son más elevadas de 135-160ppm.

Otros elementos: boro (B), magnesio (Mg), azufre (S), Molibdeno (Mo) y cinc (Zn). Son nutrientes que pueden a parecer en forma deficiente o en exceso en la planta.

d) Herbicidas

Cuando transcurren 3 a 4 semanas de la emergencia de la planta aparecen las primeras hierbas de forma espontánea que compiten con el cultivo absorción de agua y nutrientes minerales. Por ello, es conveniente su eliminación por medio de herbicidas.

e) Aclareo

Es una labor de cultivo que se realiza cuando la planta ha alcanzado un tamaño próximo de 25 a 30cm y consiste en ir dejando una sola planta por golpe y se van eliminando las restantes. Otras labores de cultivo son las de romper la costra endurecida del terreno para que las raíces adventicias (superficiales) se desarrollen.

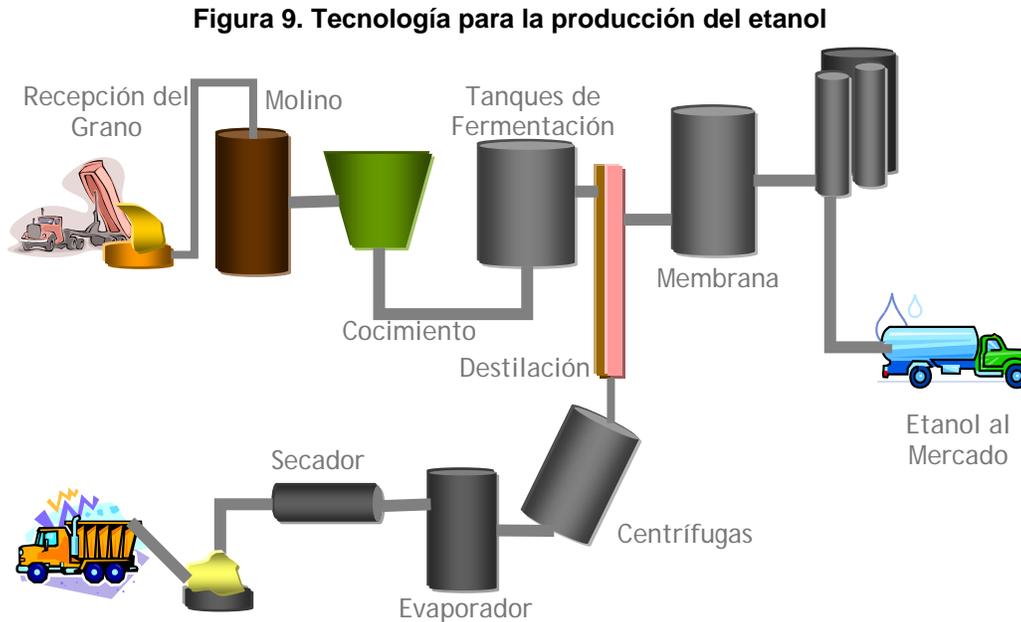
f) Cosecha

Para la cosecha de las mazorcas de maíz se aconseja que no exista humedad en las mismas. La recolección se produce de forma mecanizada para la obtención de una cosecha limpia, sin pérdidas de grano y fácil. La cosecha es mecánica, regularmente utilizando una combinada.

Para la conservación del grano del maíz se requiere un contenido en humedad del 35 al 45%. Para grano de maíz destinado al ganado éste debe tener un cierto contenido en humedad y se conserva en contenedores, previamente enfriando y secando el grano.

4.3.3.1 Producción de etanol.

El etanol es el alcohol etílico producido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales (maíz, sorgo, caña de azúcar, remolacha o biomasa) combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. Dependiendo de su fuente de obtención, su producción implica fundamentalmente el proceso de separación de las azúcares, y la fermentación y destilación de las mismas.



Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Al obtener los azúcares, a partir de un proceso de fermentación o destilación se obtiene el etanol hidratado. Para llegar al etanol carburante, se hace un proceso de deshidratación. Y el alcohol deshidratado está listo para ser mezclado con la gasolina, se pueden hacer mezclas del 5% hasta 25% según las normas de uso de cada país.

La obtención del etanol carburante sufre un largo proceso de transformación, por eso cuando una empresa desea incursionar en este negocio necesita de grandes inversiones en planta de procesamiento. Además se necesita disponer de fuentes seguras de abastecimiento de materia prima y procurar asegurar la venta del producto. Pues no basta con producir con alta calidad y eficiencia, se tiene que vender lo producido.

4.3.4 Competencia.

Los biocombustibles representan una alternativa y competencia al petróleo, el energético fósil más importante para la producción de combustibles en el mundo. La diversificación energética es un objetivo de muchos gobiernos en la actualidad y los biocombustibles ofrecen una atractiva opción a las gasolinas derivadas del petróleo.

En México, los bioenergéticos tienen potencial para contribuir al desarrollo social en regiones donde la energía convencional es económicamente inviable, sobre todo en zonas rurales apartadas y/o en las que producen maíz y sorgo con altos niveles productivos. También podrán ayudar a lograr la autosuficiencia energética, ahora que Petróleos Mexicanos (PEMEX) importa 30% de las gasolinas con que abastece el mercado. La preocupación mundial sobre el agotamiento de los mantos de fácil y barata extracción tampoco es ajena a México, donde se prevé la fuerte declinación de Cantarell en los próximos años.

4.3.5 Recursos necesarios.

4.3.5.1 Tecnología.

El bioetanol es un alcohol etílico producido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales como maíz y sorgo. Como carburante renovable, es usado en automoción en forma de mezcla directa o previa transformación química y reduce los efectos contaminantes.

4.3.5.2 Conocimiento y experiencia.

Países como Brasil y Estados Unidos han probado ser líderes no sólo en la producción de etanol a partir de caña de azúcar, maíz, granos y otros vegetales, sino también en la investigación e innovación para el uso de la agro-energía como una alternativa al petróleo crudo, así también como en el dominio de la tecnología de biocombustibles. Razón por la cual, será estratégico en la producción de etanol en México capacitar al personal directamente involucrado, en países o instituciones que cuentan con experiencia comprobada en dicho proceso, así como establecer relaciones comerciales y transferencia de tecnología.

4.3.5.3 Materiales.

Tabla 7. Materia prima necesaria para la producción de bioetanol a partir de maíz.

| Materia prima | Unidad | Cantidad | Precio Unitarios | Total = 131,925,000 |
|------------------|-----------|----------|------------------|---------------------|
| Maíz | Toneladas | 50,000 | 2,500.00 | 125,000,000 |
| Desnaturalizante | Toneladas | 2,500 | 1,900.00 | 4,750,000 |
| Enzimas | Toneladas | 1,000 | 1,500.00 | 1,500,000 |
| Levaduras | Toneladas | 500 | 1,350.00 | 675,000 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Tabla 8. Materiales necesarios para la producción de bioetanol a partir de maíz.

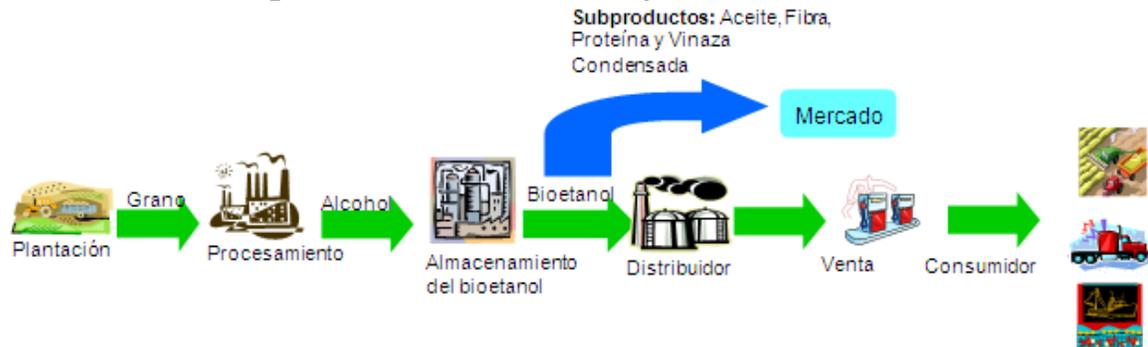
| Materiales | Unidad | Cantidad | Precio Unitarios | Total= 115,050 |
|-------------------------|--------|----------|------------------|----------------|
| Cubre bocas desechables | Piezas | 720 | 0.75 | 540 |
| Guantes de látex | Piezas | 360 | 11.00 | 3,960 |
| Guantes de carnaza | Piezas | 240 | 50.00 | 12,000 |
| Batas | Piezas | 60 | 80.00 | 4,800 |
| Botas látex | Piezas | 60 | 120.00 | 7,200 |
| Botas industrial | Piezas | 60 | 350.00 | 21,000 |
| Franela | m | 240 | 5.00 | 1,200 |
| Detergente industrial | Kg. | 600 | 80.00 | 48,000 |
| Escobas | Piezas | 60 | 20.00 | 1,200 |
| Cepillos industriales | Piezas | 60 | 15.00 | 900 |
| Equipo contra incendio | Piezas | 4 | 750.00 | 3,000 |
| Cascos | Piezas | 30 | 100.00 | 3,000 |
| Lentes industriales | Piezas | 30 | 75.00 | 2,250 |
| Uniforme | Piezas | 30 | 200.00 | 6,000 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

4.4 Proceso de distribución (comercialización).

El proceso de comercialización del etanol abarca desde la siembra del producto, hasta su comercialización incluyendo la fase de transformación, cabe mencionar que este proceso es nuevo en México y con el tiempo y las experiencias dentro y fuera del país es como se irá perfeccionando.

Figura 10. Modelo de la cadena productiva del etanol



Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

4.5 Origen del producto.

La oferta de bioetanol está estrechamente vinculada al aprovisionamiento de granos como materia prima, y por lo tanto, al de la producción de maíz en las diferentes regiones. El proyecto contempla los estados con alto potencial en la producción de maíz como Chiapas, Estado de México, Jalisco, Michoacán, Sinaloa y Veracruz. Los estados antes mencionados en su conjunto producen 13.5 millones de toneladas de maíz

4.6 Difusión y promoción.

En la actualidad, el bioetanol y el biodiesel son los actores de mayor relevancia mundial dentro de los biocombustibles.

El etanol, cuya producción lideran Brasil y Estados Unidos, es producido principalmente a base de maíz, sorgo y caña de azúcar. El biodiesel, en cambio, se obtiene, en su mayor parte, de cultivos oleaginosos como colza, soya y girasol.

Aprovechando los factores de éxito en países productores de etanol, tanto de las empresas agro-exportadoras, como de las recomendaciones formuladas por los compradores internacionales, a continuación se establecen algunos criterios para su difusión y promoción:

- a) *Fomentar la asociación de los productores a lo largo de la cadena agro-productiva y las economías de escala en la producción de etanol.*

La mejor manera de obtener una oferta competitiva para el mercado interno, de calidad estandarizada y con volúmenes significativos, es lograr la asociación entre productores que permitan superar sus principales restricciones y aprovechar el potencial que tiene el país frente a otros países competidores en el mercado interno e internacional. Esto permitirá además incursionar en:

- La tecnificación de los procesos productivos.
- Invertir en la gestión de la calidad y del ambiente.
- Invertir en la gestión de la información e infraestructura tecnológica.
- Desarrollar los recursos humanos, la capacitación y el entrenamiento. Especialmente de productores, técnicos y administrativos a nivel de empresas, buscando implementar una lógica empresarial y el aprovechamiento de oportunidades de mercados.

b) Diseñar e implementar una estrategia de mercadeo y ventas del etanol.

Apropiarse del proceso de comercialización y exportación eliminando gradualmente la intermediación externa de estos procesos, con el objetivo de obtener mayor participación en la cadena de valor e incrementar las exportaciones a los mercados externos.

- Ofertar servicios de post venta. Ello implica la implementación de planes de seguimiento y atención a clientes para garantizar la sostenibilidad del abasto del etanol.
- Identificar necesidades de mercado. Se trata de mercados dinámicos y en constante expansión e innovación, por lo que debe darse seguimiento y ahondar permanentemente en estos y otros mercados.
- Segmentar los mercados y seleccionarlos.
- Mantener constancia y cercanía con los clientes del etanol. Constante comunicación con los clientes redundará en oportunidades permanentes.
- Responder oportunamente, con pertinencia y despacho ágil del etanol. Acción altamente aconsejable para mantener una cartera sólida de compradores.

c) Mercados organizados y formales del etanol.

Acción esencial para garantizar el desarrollo sostenible para el consumo interno y externo con mayor valor agregado. Se trata de fomentar las relaciones comerciales y sobre bases predecibles y formales. En particular:

- Fomentar un mercado organizado para el etanol, aglutinando actores que permitan ir construyendo *clusters* o conglomerados para la exportación.
- Fortalecer la capacitación de los agentes públicos y privados, preferentemente a nivel de *clusters* y aglomerados en los aspectos centrales de los procesos de agro exportación.
- Desarrollar infraestructura esencial para el consumo interno y agro exportación del etanol.
- Diversificar la oferta exportable y consolidar la oferta actual.
- Ofertar permanentemente etanol.

PROYECTO DE INVERSIÓN

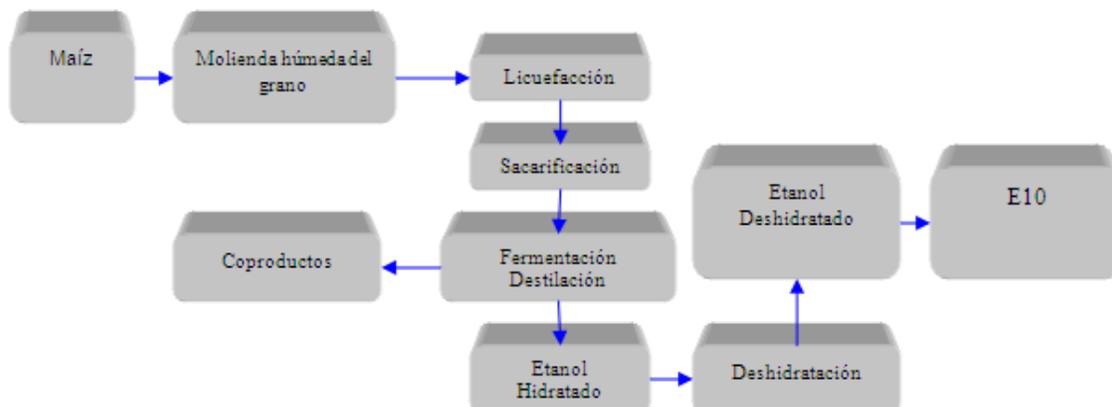
d) Observancia de las regulaciones de los mercados de destino del etanol.

Son cada vez más exigente los mercados de destino en cuanto al cumplimiento estricto de las normas y regulaciones internacionales. Particularmente en las siguientes acciones:

- Entender cómo opera la regulación de las autoridades en el mercado de destino.
- Cumplir con los estándares aplicados en los mercados internos e internacionales de cada país.
- Usar empaques, etiquetas e información para el consumo interno y, para el mercado externo usar los adecuados a los requerimientos de cada país.

4.7 Proceso de producción.

Figura 11. Esquema del proceso de producción del etanol.



Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Para el caso del maíz, el diagrama de la Figura 11, esquematiza el proceso de producción del etanol. Al obtener los azúcares, a partir de un proceso de fermentación o destilación, se obtiene el etanol hidratado. Para llegar al etanol carburante se hace un proceso de deshidratación. Y el alcohol deshidratado está listo para ser mezclado con la gasolina, se puede hacer mezclas del 5% hasta el 25% según las normas de uso de cada país. Los residuos que se derivan de la fermentación y destilación, se denominan coproducidos, los cuales son utilizadas como alimento proteínico para el ganado.

Recepción de la materia prima.- El producto se transporta a la planta en embalajes adecuados que eviten su deterioro y ayuden en el manejo del producto. El material se pesa al llegar a la planta para efectos de control de inventarios. Se efectúa una inspección visual de su calidad e inmediatamente se pasa al almacén respectivo.

Pesado y selección.- Aquí se inicia propiamente el proceso productivo, ya que el pesado se refiere a la cantidad que se procesará en un lote de producción. Es importante considerar las mermas propias del proceso al pesar la cantidad inicial de materia prima para el lote.

Molienda.- El maíz o el sorgo son convertidos en polvo fino.

Licuefacción.- El polvo se mezclará entonces con agua y alfa-amilasa, y es calentado para licuar el almidón formado. Las temperaturas altas reducen el nivel de bacterias presentes en la mezcla.

Sacarificación.- La mezcla anterior se enfría y se le agrega una enzima secundaria (gluco-amilase) para convertir los almidones en azúcares fermentables.

Cocimiento.- La harina obtenida es mezclada con las vinazas claras recirculadas para obtener una pasta. Esta pasta es sometida a un proceso denominado cocción donde los gránulos de almidón son hidrolizados por la acción conjunta del vapor, la presión y posterior proceso en un tanque para compensar la presión.

Fermentación.- Se agrega levadura para fermentar los azúcares y obtener el etanol y dióxido de carbono. En un proceso de fermentación continua, la mezcla se queda en el fermentador por espacio de 48 horas antes de iniciar el proceso de destilación. Posteriormente este mosto es llevado a los fermentadores donde se produce el proceso de sacarificación y fermentación simultáneas mediante la adición de enzimas y levaduras. En este proceso, las cadenas de oligosacáridos existentes terminan por romperse y liberar los monómeros de glucosa. A la vez que esta glucosa se va liberando, las levaduras la van convirtiendo a etanol.

Destilación.- El mosto fermentado que puede tener una concentración de etanol alrededor del 10% es enviado a destilación, donde es concentrado, purificado y deshidratado. La masa fermentada, ahora llamada "la cerveza", contendrá sobre 10% de alcohol, así como todos los sólidos no-fermentables del maíz y las células de levadura. La masa se bombeará entonces al sistema de destilación de multi-columna donde al alcohol se le quitarán los sólidos y el agua. El alcohol dejará el tope de la columna de destilación con una pureza del 96%, y el residuo será transferido de la base de la columna a otros procesos para obtener co-productos.

Deshidratación.- El alcohol del tope de la columna pasará entonces a través de un sistema de deshidratación donde el agua restante será eliminada. La mayoría de las plantas de etanol utilizan un tamiz molecular para capturar el último residuo de agua en el etanol. El producto del alcohol en esta fase se llama etanol anhidrido (puro, sin agua).

PROYECTO DE INVERSIÓN

Desnaturalización.- El etanol que se usará para combustible se desnaturaliza con una cantidad pequeña (2-5%) de algún producto, como gasolina, para hacerlo no consumible por el ser humano.

Co-productos:

Centrifugado: Las vinazas que se obtienen por el fondo de la primera columna de destilación contienen agua, y la fracción del cereal que no era almidón, es decir, proteínas, grasas, fibra y algún azúcar residual, son centrifugadas para obtener una torta y el líquido es llevado a un evaporador donde se concentra su contenido en sólidos disueltos.

Evaporador: La mezcla de la torta con el jarabe procedente del evaporador es nuevamente mezclada y pasa al secadero donde con gases calientes, la humedad es eliminada. Este producto denominado DDGS (*Distillers Dried Grain and Solubles*) es posteriormente peletizado. El DDGS tiene un alto contenido en proteínas y es utilizado primariamente en alimentación animal.

Secador: Hay dos co-productos principales creados en la producción de etanol: dióxido de carbono y grano de los destiladores. El dióxido de carbono se emite en grandes cantidades durante la fermentación y muchas plantas del etanol recolectan ese dióxido de carbono, lo limpian de cualquier alcohol residual, lo comprimen y lo venden para carbonatar bebidas o fabricación de hielo seco. Los granos de destiladores, húmedo y seco, son altos en proteína y otros nutrientes y son valorados ingredientes en la fabricación de alimentos para animales. Algunas plantas de etanol también fabrican un "jarabe" que contiene algunos de los sólidos que puede ser vendido, además del grano del destilador. La producción de etanol es un proceso donde todo es aprovechado lo que agrega valor al maíz.

4.8 Maquinaria y equipo.

Tabla 9. Maquinaria y equipo requerido para la producción de bioetanol a partir de maíz.

| Concepto | Unidad | Cantidad | Costo Unitario | Total=126,623,500 |
|---|--------|----------|----------------|-------------------|
| Planta de etanol | Lote | 1 | 45,000,000.00 | 45,000,000 |
| Laboratorio y equipo | Lote | 1 | 10,000,000.00 | 10,000,000 |
| Sistema eléctrico de baja y alta tensión | Lote | 1 | 4,500,000.00 | 4,500,000 |
| Estibas | Pieza | 40 | 1,200.00 | 48,000 |
| Patín manual | Pieza | 3 | 3,500.00 | 10,500 |
| Patín eléctrico | Pieza | 1 | 15,000.00 | 15,000 |
| Planta de servicios | Lote | 1 | 12,000,000.00 | 12,000,000 |
| Recepción y conservación de materia prima | Lote | 1 | 20,000,000.00 | 20,000,000 |
| Herramienta para mantenimiento | Lote | 1 | 50,000.00 | 50,000 |
| Planta de molienda de materia prima | Lote | 1 | 35,000,000.00 | 35,000,000 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

4.9 Insumos, mano de obra y servicios auxiliares.

Tabla 10. Insumos requeridos para la producción de bioetanol a partir de maíz.

| Insumos | Unidad | Cantidad | Costo Unitario | Total= 131,925,000 |
|------------------------------------|-----------|----------|----------------|--------------------|
| Materia prima anual (maíz o sorgo) | Toneladas | 50,000 | 2,500.00 | 125,000,000 |
| Desnaturalizante | Toneladas | 2,500 | 1,900.00 | 4,750,000 |
| Enzimas | Toneladas | 1,000 | 1,500.00 | 1,500,000 |
| Levaduras | Toneladas | 500 | 1,350.00 | 675,000 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Tabla 11. Mano de obra requerida para la producción de bioetanol a partir de maíz.

| Mano de obra | Unidad | Cantidad | Total = 4,163,400 |
|--------------|----------|----------|-------------------|
| Gerencia | Empleado | 15 | 1,044,900 |
| Producción | Empleado | 7 | 2,373,300 |
| Ventas | Empleado | 5 | 745,200 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Tabla 12. Equipo de transporte.

| Equipo de transporte | Unidad | Cantidad | Costo Unitario | Total= 3,126,310 |
|--|--------|----------|----------------|------------------|
| Tractocamión | Unidad | 1 | 1,500,000.00 | 1,500,000 |
| Montacargas Mitsubishi FD 115 | Unidad | 2 | 277,500.00 | 555,000 |
| Torton Kodiak chasis cabina clase 8, diesel con caja granelara | Unidad | 2 | 442,330.00 | 884,660 |
| Camioneta Chevrolet Silverado 2500 | Unidad | 1 | 186,650.00 | 186,650 |

Tabla 13. Energéticos.

| Combustibles y energía eléctrica | Unidad | Cantidad | Costo | Total= 896,980 |
|----------------------------------|--------|----------|-------|----------------|
| Combustóleo | Litros | 36,500 | 5.00 | 182,500 |
| Gasolina | Litros | 18,250 | 6.60 | 120,450 |
| Diesel | Litros | 54,750 | 5.80 | 317,550 |
| Energía eléctrica | Kw | 288,000 | 0.96 | 276,480 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

4.10 Obra civil e infraestructura.

Para la instalación de una planta productora de etanol con una capacidad diaria de 60,000 L, se requiere como infraestructura un terreno con superficie de 5,000 m², la cual va a estar distribuida estratégicamente en la operación del etanol.

PROYECTO DE INVERSIÓN

Tabla 14. Terreno.

| Concepto | Unidad | Cantidad | Costo Unitario | Total |
|----------|----------------|----------|----------------|---------|
| Terreno | m ² | 5,000 | 100.00 | 500,000 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Tabla 15. Infraestructura.

| Construcciones y edificaciones | Unidad | Cantidad | Costo Unitario | Total= 5,430,000 |
|--------------------------------|----------------|----------|----------------|------------------|
| Nave industrial | m ² | 1,000 | 1,850.00 | 1,850,000 |
| Caseta de vigilancia | m ² | 200 | 2,200.00 | 440,000 |
| Baños y comedor | m ² | 200 | 2,200.00 | 440,000 |
| Patio de maniobras y accesos | m ² | 2,500 | 700.00 | 1,750,000 |
| Oficinas | m ² | 250 | 3,000.00 | 750,000 |
| Obras complementarias | Lote | 1 | 200,000.00 | 200,000 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

4.11 Organización Administrativa.

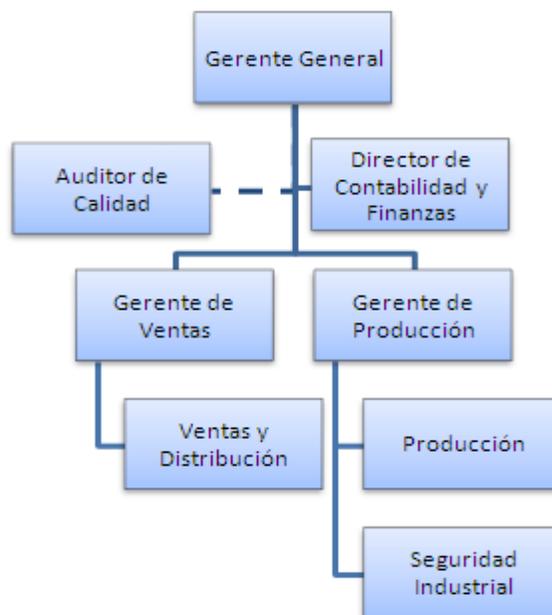
4.11.1 Procedencia de la mano de obra.

La procedencia e intensidad de la mano de obra a utilizar en los procesos automatizados, y semiautomatizados, en las operaciones en la producción del etanol será del país y de la región, mismos que serán continuamente capacitados a fin de mejorar la calidad del proceso. Ya para mano de obra altamente especializada se recomienda contratar personal de países donde han desarrollado estas tecnologías como es el caso de Brasil y Estados Unidos.

4.11.2 Organigrama de la empresa.

La figura 12, describe la estructura de la empresa productora de etanol así como la cantidad de personal requerido por cada área.

Figura 12. Organigrama de una planta productora de etanol (hasta tercer nivel)



Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

4.11.3 División de trabajo y salarios.

La división de trabajo y salarios se presentan en las tablas 16 a la 18 y se especifican los turnos requeridos por área a fin de lograr el objetivo de producir 60,000 L de etanol por día.

Tabla 16. Mano de Obra Producción.

| Costo de mano de obra directa | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------|
| Plaza | Plaza/turno | Turnos/día | Sueldo mensual | Sueldo anual | Prestaciones | Sueldo Total Anual |
| Obrero | 7 | 2 | 4,500 | 54,000 | 35% | 1,020,600 |
| Mantenimiento | 2 | 1 | 4,500 | 54,000 | 35% | 145,800 |
| Almacenista | 2 | 1 | 5,000 | 60,000 | 35% | 162,000 |
| | | | | | Total | 1,328,400 |
| Mano de obra indirecta | | | | | | |
| Plaza | Plaza/turno | Turnos/día | Sueldo mensual | Sueldo anual | Prestaciones | Sueldo Total Anual |
| Gerente de producción | 1 | 1 | 23,000 | 276,000 | 35% | 372,600 |
| Jefe de producción | 1 | 1 | 18,000 | 216,000 | 35% | 291,600 |
| Jefe de seguridad industrial | 1 | 1 | 18,000 | 216,000 | 35% | 291,600 |
| Secretaria | 1 | 1 | 5,500 | 66,000 | 35% | 89,100 |
| | | | | | Total | 1,044,900 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

PROYECTO DE INVERSIÓN

Tabla 17. Mano de Obra Administración.

| Plaza | Plaza/turno | Turnos/día | Sueldo mensual | Sueldo anual | Prestaciones | Sueldo Total Anual |
|-------------------------|-------------|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------|
| Gerente general | 1 | 1 | 28,000 | 336,000 | 35% | 453,600 |
| Secretaria | 1 | 1 | 5,500 | 66,000 | 35% | 89,100 |
| Contabilidad y finanzas | 1 | 1 | 17,000 | 204,000 | 35% | 275,400 |
| Asistente de limpieza | 2 | 1 | 3,500 | 42,000 | 35% | 113,400 |
| Vigilante | 2 | 1 | 3,500 | 42,000 | 35% | 113,400 |
| | | | | | Total | 1,044,900 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Tabla 18. Mano de Obra Ventas.

| Plaza | Plaza/turno | Turnos/día | Sueldo mensual | Sueldo anual | Prestaciones | Sueldo Total Anual |
|-------------------|-------------|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------|
| Gerente de ventas | 1 | 1 | 23,000 | 276,000 | 35% | 372,600 |
| Chóferes | 2 | 1 | 5,500 | 66,000 | 35% | 178,200 |
| Repartidores | 2 | 2 | 3,000 | 36,000 | 35% | 194,400 |
| | | | | | Total | 745,200 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

4.12 Riesgos y rendimientos.

A fin de garantizar una producción anual de 21.6 millones de L de etanol, será necesario certificar una producción anual como materia prima de 50,000 toneladas de maíz. Cantidad que se cumple para los estados de Chiapas, Estado de México, Jalisco, Michoacán, Sinaloa y Veracruz en los que se podría llevar a cabo el presente proyecto.

4.12.1 Abastecimiento.

Para ello, la compra de maíz se realizará a través de contratos de cobertura con las diferentes asociaciones y/o núcleos agrarios de los estados antes mencionados, con alto potencial en la producción de maíz.

4.12.2 Inversión y Financiamiento.

De los \$163,045,153 que se requiere de inversión, \$100,000,000 provienen de un financiamiento del gobierno federal a través del programa de Secretaría de Economía para el desarrollo de energías renovables y \$10,000,000 de financiamiento de banca comercial como agente financiero de la Financiera Rural, se espera liquidar estos préstamos en 10 anualidades iguales, pagando la primera anualidad al final del primer año, por el cual se pagará un interés de 15% anual.

Tabla 19. Inversión requerida.

| | CONCEPTO | INVERSIÓN |
|------|---|--------------------|
| A) | TOTAL INFRAESTRUCTURA | 135,836,410 |
| I. | Terreno | 500,000 |
| II. | Construcciones y edificaciones | 5,430,000 |
| III. | Maquinaria y equipo | 126,623,500 |
| IV. | Equipo de transporte | 3,126,310 |
| V. | Mobiliario y equipo de computó | 101,600 |
| VI. | Software | 55,000 |
| B) | INSUMOS Y SUMINISTROS | 27,208,743 |
| I. | Capital de trabajo | 16,238,428 |
| II. | Planeación e integración | 4,088,592 |
| III. | Ingeniería del proyecto | 3,905,994 |
| IV. | Supervisión | 2,044,296 |
| V. | Administración del proyecto | 681,432 |
| VI | Capacitación y asistencia técnica | 250,000 |
| | TOTAL DE INFRAESTRUCTURA Y SUMINISTROS | 163,045,153 |

Fuente: Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria e Industrial, A.C.

Se diseña un esquema de inversión para la planta productora de etanol en el que se requiere una inversión inicial por \$53,045,153, mismos que serán aportados por los socios, mientras que el resto de los recursos requeridos se recibirán a través préstamos otorgados por Secretaría de Economía y la Financiera Rural, que se irán amortizando periódicamente.

5. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE INVERSIÓN.

Para realizar la evaluación financiera del proyecto de inversión se empleó la siguiente proyección de flujos netos de efectivo (FNE).

Tabla 20. Flujos de Efectivo.

| Año | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Ingreso | 164,478,602 | 190,722,549 | 220,546,939 | 255,943,980 | 302,385,578 | 347,075,841 | 399,904,926 | 459,890,665 | 528,874,265 | 601,205,404 |
| Costos de producción | 148,226,813 | 170,460,836 | 196,029,961 | 225,434,455 | 259,249,623 | 298,137,067 | 342,857,627 | 394,286,271 | 453,429,211 | 521,443,593 |
| Costos de administración | 1,164,900 | 1,339,635 | 1,540,580 | 1,771,667 | 2,037,417 | 2,343,030 | 2,694,484 | 3,098,657 | 3,563,456 | 4,097,974 |
| Costos de ventas | 1,095,200 | 1,259,480 | 1,448,402 | 1,665,662 | 1,915,512 | 2,202,838 | 2,533,264 | 2,913,254 | 3,350,242 | 3,852,778 |
| Utilidad antes de impuestos (UAI) | 13,991,689 | 17,662,598 | 21,527,996 | 27,072,196 | 39,183,026 | 44,392,906 | 51,819,551 | 59,592,483 | 68,531,356 | 71,811,059 |
| Impuestos | 10,529,420 | 12,108,833 | 13,925,158 | 16,013,932 | 18,416,022 | 21,178,425 | 24,355,189 | 28,008,467 | 32,209,737 | 37,041,197 |
| Utilidad después de impuestos | 3,462,269 | 5,553,765 | 7,602,838 | 11,058,264 | 20,767,004 | 23,214,481 | 27,464,362 | 31,584,016 | 36,321,619 | 34,769,862 |
| Depreciación | 12,116,483 | 12,116,483 | 12,116,483 | 12,116,483 | 12,103,733 | 11,478,471 | 11,478,471 | 11,478,471 | 11,478,471 | 11,478,471 |
| Pago de capital | 2,117,078 | 2,836,884 | 3,801,425 | 5,093,910 | 6,825,839 | 9,146,624 | 12,256,476 | 16,423,678 | 22,007,729 | 29,490,357 |
| FNE | 13,461,674 | 14,833,364 | 15,917,896 | 18,080,837 | 26,044,898 | 25,546,328 | 26,686,357 | 26,638,809 | 25,792,361 | 16,757,976 |

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se realiza la evaluación financiera del proyecto de inversión bajo el enfoque tradicional considerando los siguientes valores:

| | |
|-------------------------------|------------------|
| Inversión Inicial | \$ 53,245,153.00 |
| Valor de Salvamento | \$ 35,039,700.00 |
| Tasa de descuento | 15.00% |
| Horizonte de inversión | 10 años |

Tabla 21. Flujos de Efectivo a lo largo de la vida del proyecto.

ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE EFECTIVO

| Año | Flujos de efectivo |
|-----|--------------------|
| 0 | -\$ 53,245,153.00 |
| 1 | \$ 13,461,674.19 |
| 2 | \$ 14,833,364.31 |
| 3 | \$ 15,917,896.00 |
| 4 | \$ 18,080,837.00 |
| 5 | \$ 26,044,898.00 |
| 6 | \$ 25,546,327.52 |
| 7 | \$ 26,686,357.00 |
| 8 | \$ 26,638,809.00 |
| 9 | \$ 25,792,361.00 |
| 10 | \$ 51,797,676.00 |

Fuente: Elaboración propia

5.1 Métodos que no consideran el valor del dinero en el tiempo.

En esta sección se evalúa el proyecto de inversión bajo criterios que no consideran el valor del dinero en el tiempo.

5.1.1 Periodo de Recuperación.

Tabla 22. Periodo de recuperación.

| PERIODO DE RECUPERACIÓN | | |
|-------------------------|--------------------|-------------------|
| Año | Flujos de efectivo | Monto por cubrir |
| 0 | -\$ 53,245,153.00 | -\$ 53,245,153.00 |
| 1 | \$ 13,461,674.19 | -\$ 39,783,478.81 |
| 2 | \$ 14,833,364.31 | -\$ 24,950,114.50 |
| 3 | \$ 15,917,896.00 | -\$ 9,032,218.50 |
| 4 | \$ 18,080,837.00 | \$ 9,048,618.50 |
| 5 | \$ 26,044,898.00 | \$ 35,093,516.50 |
| 6 | \$ 25,546,327.52 | \$ 60,639,844.02 |
| 7 | \$ 26,686,357.00 | \$ 87,326,201.02 |
| 8 | \$ 26,638,809.00 | \$ 113,965,010.02 |
| 9 | \$ 25,792,361.00 | \$ 139,757,371.02 |
| 10 | \$ 51,797,676.00 | \$ 191,555,047.02 |

Fuente: Elaboración propia

Bajo este criterio la aceptabilidad de la inversión depende de establecer ciertos estándares que responden a necesidades específicas al inversionista. En este caso el Periodo de Recuperación del proyecto es de cuatro años, se estima que toda vez que el monto requerido para implementar este proyecto es considerable, cuatro años es un periodo aceptable para comenzar a obtener utilidades por arriba de la inversión inicial.

5.1.2 Tasa Simple de Rendimiento.

Tabla 23. Evolución de la Tasa simple de rendimiento.

| TASA SIMPLE DE RENDIMIENTO | |
|----------------------------|----------|
| TSR1= | 25.2824% |
| TSR2= | 27.8586% |
| TSR3= | 29.8955% |
| TSR4= | 33.9577% |
| TSR5= | 48.9151% |
| TSR6= | 47.9787% |
| TSR7= | 50.1198% |
| TSR8= | 50.0305% |
| TSR9= | 48.4408% |
| TSR10= | 97.2815% |

TSR Promedio
45.98%

Fuente: Elaboración propia

Bajo este criterio, una inversión es aceptable en la medida que su tasa simple de rendimiento sea superior a una determinada tasa de corte y el *ranking* entre varias oportunidades de inversión que se le asigne sobre la base de sus tasas de rendimiento.

En este caso no existen oportunidades de inversión explícitas con las que se pueda comparar a esta inversión, sin embargo se le puede comparar a oportunidades de inversión en los mercados financieros establecidos y determinar si es una inversión atractiva en el sentido de su rentabilidad.

5.1.3 Tasa Promedio de Rendimiento.

Tabla 24. Evolución de la Tasa promedio de rendimiento.

| TASA PROMEDIO DE RENDIMIENTO | |
|------------------------------|-----------|
| TPR1= | 50.5649% |
| TPR2= | 55.7172% |
| TPR3= | 59.7910% |
| TPR4= | 67.9154% |
| TPR5= | 97.8301% |
| TPR6= | 95.9574% |
| TPR7= | 100.2396% |
| TPR8= | 100.0610% |
| TPR9= | 96.8815% |
| TPR10= | 194.5630% |
| TPR Promedio | |
| 91.95% | |

Fuente: Elaboración propia

Este criterio es similar al criterio de la tasa simple de rendimiento, ya que una inversión es aceptable en la medida que su tasa promedio de rendimiento sea superior a una determinada tasa de corte y el *ranking* entre varias inversiones se asigna sobre la base de sus tasas de rendimiento. La diferencia con el método de la Tasa Simple de Rendimiento radica en el cálculo de ambos, pero la decisión tiende a converger en el mismo sentido.

5. 2 Métodos que consideran el valor del dinero en el tiempo.

En esta sección se evalúa el proyecto de inversión bajo criterios que consideran el valor del dinero en el tiempo.

5.2.1 Valor Presente Neto.

Tabla 25. Cálculo del VPN.

| VALOR PRESENTE NETO | | |
|---------------------|--------------------|-------------------------|
| Año | Flujos de efectivo | Valor Presente |
| 0 | -\$ 53,245,153.00 | -\$ 53,245,153.00 |
| 1 | \$ 13,461,674.19 | \$ 11,705,803.64 |
| 2 | \$ 14,833,364.31 | \$ 11,216,154.49 |
| 3 | \$ 15,917,896.00 | \$ 10,466,275.01 |
| 4 | \$ 18,080,837.00 | \$ 10,337,777.24 |
| 5 | \$ 26,044,898.00 | \$ 12,948,917.36 |
| 6 | \$ 25,546,327.52 | \$ 11,044,382.36 |
| 7 | \$ 26,686,357.00 | \$ 10,032,390.06 |
| 8 | \$ 26,638,809.00 | \$ 8,708,273.92 |
| 9 | \$ 25,792,361.00 | \$ 7,331,798.75 |
| 10 | \$ 51,797,676.00 | \$ 12,803,593.32 |
| | VPN | \$ 53,350,213.14 |

Fuente: Elaboración propia

El criterio de aceptación o rechazo de la inversión se establece en función del monto del valor presente neto. Sin embargo se considera como una regla general que se debe aceptar toda inversión cuyo VPN sea mayor a cero. Bajo este enfoque se aceptaría el proyecto al tener un VPN positivo.

5.2.2 Tasa Interna de Rendimiento.

Tabla 26. Cálculo de la TIR.

| TASA INTERNA DE RENDIMIENTO | | |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|
| Año | Flujos de efectivo | Valor Presente |
| 0 | -\$ 53,245,153.00 | -\$ 53,245,153.00 |
| 1 | \$ 13,461,674.19 | \$ 10,121,650.75 |
| 2 | \$ 14,833,364.31 | \$ 8,385,794.37 |
| 3 | \$ 15,917,896.00 | \$ 6,766,163.39 |
| 4 | \$ 18,080,837.00 | \$ 5,778,666.38 |
| 5 | \$ 26,044,898.00 | \$ 6,258,698.41 |
| 6 | \$ 25,546,327.52 | \$ 4,615,748.24 |
| 7 | \$ 26,686,357.00 | \$ 3,625,393.91 |
| 8 | \$ 26,638,809.00 | \$ 2,721,027.84 |
| 9 | \$ 25,792,361.00 | \$ 1,980,895.45 |
| 10 | \$ 51,797,676.00 | \$ 2,991,114.25 |
| | TIR | VPN |
| | 33.00% | \$ 0.00 |

Fuente: Elaboración propia

La importancia de obtener la tasa que iguale la inversión inicial con la corriente de flujos actualizados radica en que dicha tasa es la tasa máxima de rendimiento requerida (o costo de capital) que la empresa puede aceptar para financiar el proyecto sin perder dinero. Se estima que el CCPP del proyecto será de aproximadamente 15.00%, cifra inferior al 33.00% máximo estimado por la TIR, por lo que de conformidad al criterio se aceptaría la inversión.

5.2.3 Relación Beneficio/Costo.

Tabla 27. Cálculo de la B/C.

| BENEFICIO / COSTO | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| Año | Flujos de efectivo | Valor Presente |
| 0 | -\$ 53,245,153.00 | -\$ 53,245,153.00 |
| 1 | \$ 13,461,674.19 | \$ 11,705,803.64 |
| 2 | \$ 14,833,364.31 | \$ 11,216,154.49 |
| 3 | \$ 15,917,896.00 | \$ 10,466,275.01 |
| 4 | \$ 18,080,837.00 | \$ 10,337,777.24 |
| 5 | \$ 26,044,898.00 | \$ 12,948,917.36 |
| 6 | \$ 25,546,327.52 | \$ 11,044,382.36 |
| 7 | \$ 26,686,357.00 | \$ 10,032,390.06 |
| 8 | \$ 26,638,809.00 | \$ 8,708,273.92 |
| 9 | \$ 25,792,361.00 | \$ 7,331,798.75 |
| 10 | \$ 51,797,676.00 | \$ 12,803,593.32 |
| | B/C= | 100.20% |

Fuente: Elaboración propia

Una inversión es aceptable, bajo este criterio, cuando la relación sea mayor a 100%. La clasificación de conveniencia de las inversiones, se establecerá según el valor del cociente, cuando éste rebase el 100%. Bajo este criterio el proyecto se encuentra ligeramente por arriba del 100% requerido para que se apruebe la inversión, por lo que atendiendo al criterio el proyecto se aprobaría.

5.2.4 Índice de Rendimiento.

Tabla 28. Cálculo del IR.

| INDICE DE RENDIMIENTO | | |
|-----------------------|--------------------|-------------------|
| Año | Flujos de efectivo | Valor Presente |
| 0 | -\$ 53,245,153.00 | -\$ 53,245,153.00 |
| 1 | \$ 13,461,674.19 | \$ 11,705,803.64 |
| 2 | \$ 14,833,364.31 | \$ 11,216,154.49 |
| 3 | \$ 15,917,896.00 | \$ 10,466,275.01 |
| 4 | \$ 18,080,837.00 | \$ 10,337,777.24 |
| 5 | \$ 26,044,898.00 | \$ 12,948,917.36 |
| 6 | \$ 25,546,327.52 | \$ 11,044,382.36 |
| 7 | \$ 26,686,357.00 | \$ 10,032,390.06 |
| 8 | \$ 26,638,809.00 | \$ 8,708,273.92 |
| 9 | \$ 25,792,361.00 | \$ 7,331,798.75 |
| 10 | \$ 51,797,676.00 | \$ 12,803,593.32 |
| | IR= | 200.20% |

Fuente: Elaboración propia

EVALUACIÓN FINANCIERA

El criterio del Índice de Rendimiento guarda semejanzas con el criterio Beneficio/Costo con la salvedad que en el Índice de Rendimiento los proyectos deben rebasar el 200% para ser aceptados. Atendiendo el criterio el proyecto se aceptaría toda vez que su valor es apenas superior al 200% requerido.

5.2.5 Tasa Interna de Rendimiento Modificada.

Tabla 29. Cálculo de la TIRM.

| TASA INTERNA DE RENDIMIENTO MODIFICADA | | |
|--|--------------------|-------------------|
| Año | Flujos de efectivo | Valor Futuro |
| 0 | -\$ 53,245,153.00 | -\$ 53,245,153.00 |
| 1 | \$ 13,461,674.19 | \$ 23,727,148.33 |
| 2 | \$ 14,833,364.31 | \$ 24,549,153.73 |
| 3 | \$ 15,917,896.00 | \$ 24,736,196.22 |
| 4 | \$ 18,080,837.00 | \$ 26,382,514.02 |
| 5 | \$ 26,044,898.00 | \$ 35,683,767.40 |
| 6 | \$ 25,546,327.52 | \$ 32,864,490.74 |
| 7 | \$ 26,686,357.00 | \$ 32,235,774.93 |
| 8 | \$ 26,638,809.00 | \$ 30,214,403.14 |
| 9 | \$ 25,792,361.00 | \$ 27,468,864.47 |
| 10 | \$ 51,797,676.00 | \$ 51,797,676.00 |
| | TIRM= | 19.25% |
| | | \$ 309,659,988.97 |
| | | \$ 53,245,153.00 |

Fuente: Elaboración propia

El criterio de TIR Modificada implica la oportunidad de reinvertir los flujos de efectivo a una misma tasa diferente a la tasa de rendimiento requerida, mientras que el criterio de VPN supone que estos flujos se reinvierten a la tasa de rendimiento requerida. Estos problemas tienen origen en el desconocimiento de una estimación razonable para la tasa de reinversión. Sin embargo, hay ocasiones que ésta puede conocerse o estimarse como una tasa equivalente a una tasa libre de riesgo.

Cuando puede conocerse la tasa de reinversión, debe calcularse el valor terminal de los flujos de fondos, capitalizando los flujos intermedios hasta el final de la vida útil de la inversión a la tasa de reinversión a considerar. La tasa de rentabilidad terminal será la tasa que iguale el valor presente de los flujos de efectivo reinvertidos con la inversión inicial. Bajo este criterio, la TIRM (19.25%) es superior a la tasa de rendimiento requerida estimada para este proyecto (15.00%), por lo que el proyecto sería aprobado.

Como se observa el proyecto planteado bajo este escenario estático sería aprobado bajo los criterios convencionales, sin embargo estos criterios no están considerando el riesgo inherente a una inversión de esta magnitud para llevar a cabo la comercialización de un producto sobre el cual existen pocos antecedentes en el mercado nacional, sin duda, ante este escenario la principal fuente de incertidumbre será el futuro comportamiento de los precios del etanol y cómo incide éste en la evaluación financiera del proyecto. Es por esto que resulta pertinente efectuar la

evaluación financiera del proyecto de inversión bajo el enfoque de las opciones reales, ya que este nos permite identificar el valor de la flexibilidad que existe dentro del proyecto ante diversos escenarios de inversión, así como identificar momentos en que resulta conveniente ejercer una opción real planteando estrategias y facilitando la toma de decisiones de manera tal que se maximice el valor del proyecto.

5.3 Evaluación por Opciones Reales.

Al analizar el proyecto por el enfoque de las opciones reales podemos valorar la flexibilidad inherente en el mismo. Para realizar este análisis el primer paso consiste en identificar los insumos con los que se alimentará el modelo de valoración de opciones, para realizar esto es necesario analizar las características propias del proyecto. Se conoce que el precio de ejercicio (K) del modelo es equivalente a la inversión inicial requerida para arrancar el proyecto, el precio del subyacente (S) el día de hoy es equivalente al valor presente de los flujos netos de efectivo que se esperan recibir del proyecto, la volatilidad estimada del proyecto está dada en función a la varianza del precio del etanol al ser esta la principal fuente de incertidumbre⁷², la tasa libre de riesgo es la tasa de CETES estimada para la vida del proyecto de inversión⁷³, y la vigencia de la opción será de diez años.

5.3.1 Opción real de entrada.

Una vez identificados los insumos el siguiente paso es determinar la o las opciones a analizar, comenzaremos el análisis de las opciones reales relevantes para el proyecto de inversión tomando el caso de la opción real de entrada. La opción real de entrada es la opción que nos permite determinar un valor asociado a la flexibilidad inherente al proyecto antes de efectuar inversión alguna y por lo tanto resulta una importante fuente de información para determinar si es prudente efectuar la inversión o no.

Para determinar el valor de la opción real se toman los insumos:

S: \$ 106, 595,366.14

K: \$ 53, 245,153.00

T: 10 años

σ : 26.97%

r: 6.5%

Adicionalmente es necesario calcular cuatro valores adicionales requeridos para efectuar la valoración de la opción empleando el modelo binomial, el primero es la granularidad que consiste en el número de veces en el año en los que se estará estimando el valor del proyecto de inversión, si únicamente se estima el valor del proyecto una vez al año la granularidad será de uno, si se estima semestralmente la granularidad es de dos, si el valor se estima mensualmente la granularidad será de doce, etc. Otro valor a considerar son los coeficientes de ascenso y de descenso

⁷² Ver Anexo II.

⁷³ Ver Anexo I.

EVALUACIÓN FINANCIERA

requeridos para realizar la estimación del valor del proyecto en los diferentes nodos; el coeficiente de ascenso (u) se calcula como la función exponencial del producto de la volatilidad y la raíz cuadrada de la granularidad; el coeficiente de descenso (d) es el valor inverso al coeficiente de ascenso y finalmente se calcula una probabilidad de neutralidad al riesgo (p), calculada como la función exponencial del producto de la tasa libre de riesgo y la raíz cuadrada de la granularidad. A este resultado se le sustrae el valor del coeficiente de descenso y este valor se divide entre la diferencia del coeficiente de ascenso y descenso.

$$u = e^{\sigma\sqrt{\delta}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$d = \frac{1}{u} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$p = \frac{e^{r\sqrt{\delta}} - d}{u - d} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

$$\text{Nodo} = e^{-r\sqrt{\delta}}((p * \text{Nodo } u) + ((1 - p) * \text{Nodo } d)) \quad (\text{Ec. 5.4})$$

En el proyecto el valor de los coeficientes de ascenso, descenso y la probabilidad neutral al riesgo son los siguientes:

$$u = 1.3095$$

$$d = 0.7636$$

$$p = 0.5560$$

El procedimiento para construir el árbol binomial consiste en multiplicar el valor presente del proyecto por los coeficientes de ascenso y de descenso para obtener el valor estimado del proyecto en un escenario optimista (al multiplicar el valor presente de los flujos por el coeficiente de ascenso) y un escenario pesimista (al multiplicar el valor presente de los flujos por el coeficiente de descenso). Para el caso del proyecto el mapa de los nodos a calcular se observa en la figura 13.

El resultado es el árbol binomial que nos será de utilidad para la valoración de varias opciones reales del proyecto de inversión observado en la figura 14 para posteriormente realizar el análisis recursivo.

Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción de efectuar la inversión o esperar un escenario más propicio para llevarla a cabo; lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre estas dos alternativas.

El siguiente paso consiste en analizar el árbol en forma recursiva, esto es para construir el árbol recursivo del la figura 15, por lo que es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año diez, el valor de estos nodos se le sustrae el valor de la inversión inicial, el resultado de esta diferencia deberá ser positivo, si el valor del nodo es negativo se substituye por cero estimándose que no se efectuará la inversión.

Se inicia la construcción del árbol por el nodo Su^{10} (ver figura 13) al cual se le sustrae la inversión inicial y nos arroja un valor positivo, se continua con los demás nodos del mismo año, encontrándose que los últimos cuatro nodos tienen un valor negativo toda vez que se les ha restado la inversión inicial, por lo que se asume no se llevará a cabo la inversión en el proyecto y en su lugar se considera el valor de salvamento como el valor del nodo.

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado del valor de los nodos en el año diez por la probabilidad de neutralidad al riesgo La forma general se observa en la ecuación 5.4, dicha ecuación aplicada para el nodo Su^9 es:

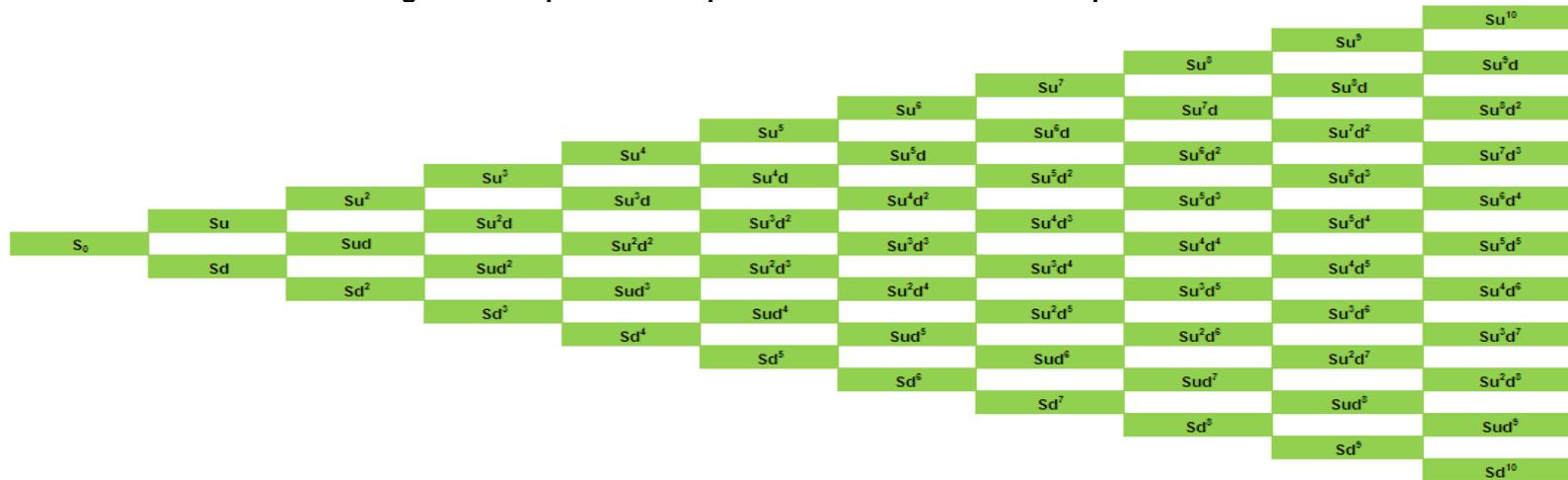
$$Su^9 = (pSu^{10} + (1 - p)Su^9d)e^{-r\delta t} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Resolviendo para la ecuación 5.5 se obtiene:

$$Su^9 = ((0.5560 * 1,528,059,659.39) + (.4440 * 868,816,878.80)) * \exp(-.065 * 1)$$

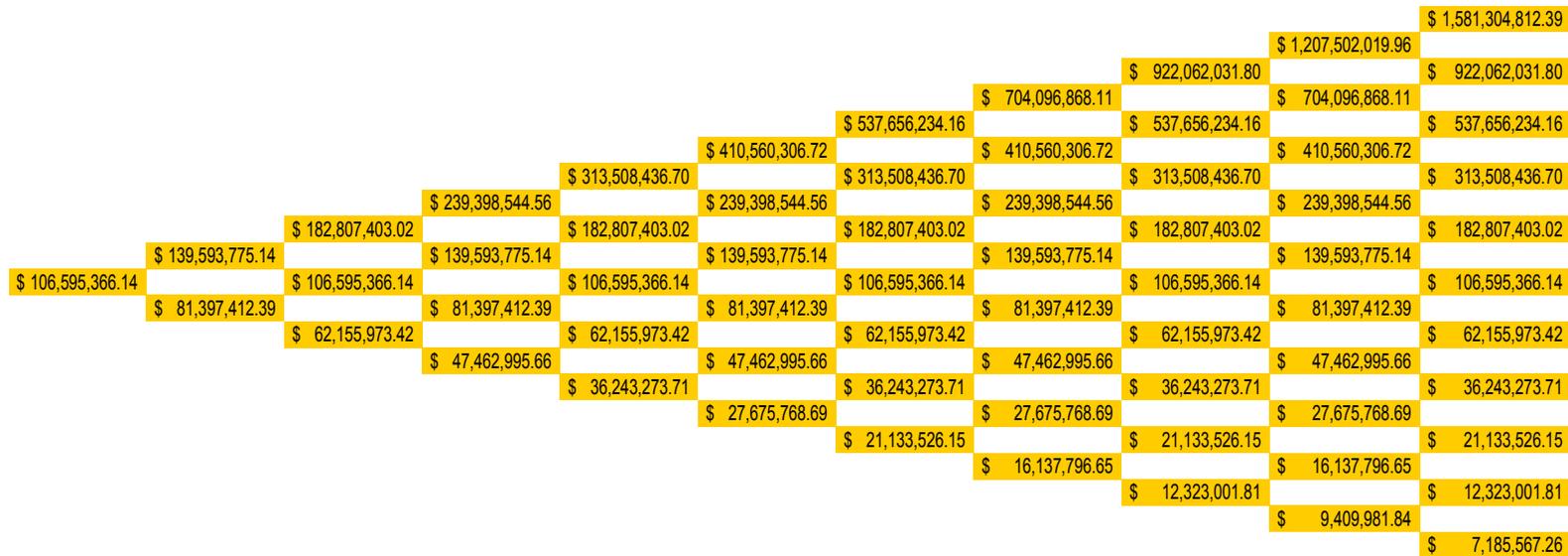
$$Su^9 = 1,157,607,719.50$$

Figura 13. Mapa de nodos para un árbol binomial de diez periodos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Variaciones del VP de los flujos del proyecto para diez años.



Fuente: Elaboración propia

EVALUACIÓN FINANCIERA

El valor del nodo Su^9 es positivo, por lo que se mantiene, sin embargo al continuar el análisis habrá nodos que arrojen valores negativos, en estos casos se considera que no se ejercerá la opción de entrada y el valor del nodo se volverá cero. Este análisis se realiza para todos los nodos restantes hasta llegar a S_0 .

Al concluir el análisis recursivo se obtiene que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 es de \$79,860,779.93, valor que representa el valor de la opción real de entrada al proyecto.

5.3.2 Opción de Abandono.

La opción de abandono se encuentra presente en prácticamente todos los proyectos de inversión. Esta opción es particularmente valiosa cuando el VPN del proyecto es pequeño y existe una gran probabilidad de incurrir en pérdidas. Con el paso del tiempo y conforme se vayan despejando las dudas sobre el posible resultado del proyecto haciéndose evidente que de continuar la inversión se tendrán pérdidas significativas, es posible abandonar el proyecto, así se consigue minimizar las pérdidas al vender los activos del proyecto. En este caso la decisión de abandonar el proyecto estará determinada por el valor presente de los flujos del proyecto, ya que si estos se llegaran a encontrar por debajo del valor de salvamento la decisión lógica sería abandonarlo.

Los insumos a considerar para valuar esta opción son:

S: \$ 106, 595,366.14

K: \$ 53, 245,153.00

T: 10 años

σ : 26.97%

r: 6.5%

δ_t : 1 al año.

Salvamento: \$ 35, 039,700.00

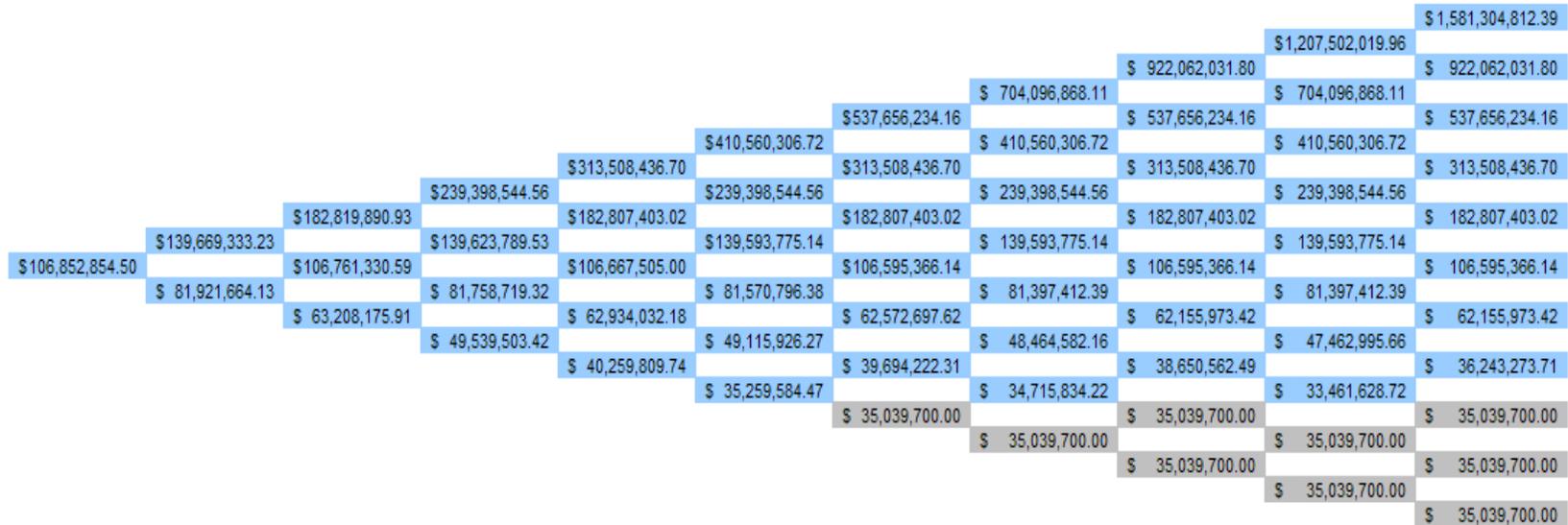
u= 1.3095

d= 0.7636

p= 0.5560

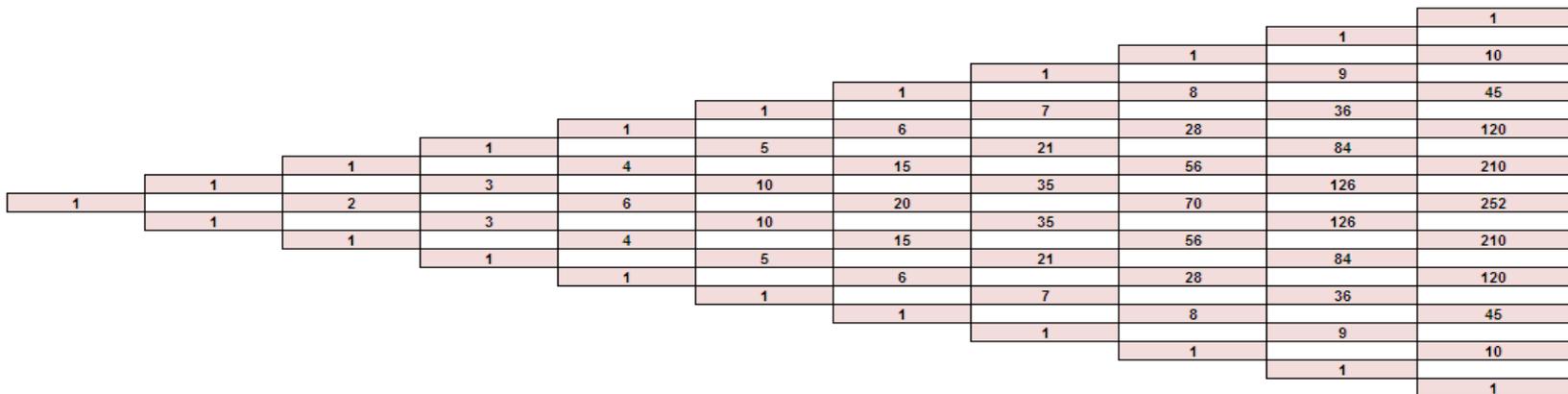
Se utiliza el árbol binomial de la figura 14 para posteriormente realizar el análisis recursivo bajo el supuesto de abandono. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción de continuar con la inversión o abandonarla por su valor de salvamento, lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre estas dos alternativas.

Figura 16. Valoración de la opción real de abandono.



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Árbol recursivo visto como triángulo de Pascal.



Fuente: Elaboración propia

EVALUACIÓN FINANCIERA

Al igual que con la opción real de entrada, para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 10, el valor de estos nodos deberá ser superior al valor de salvamento (\$35,039,700.00) de lo contrario el proyecto será abandonado, si el valor del nodo es inferior al valor de salvamento, entonces se substituye por el valor de salvamento estimándose que el proyecto ha sido abandonado. Se inicia la construcción del árbol por el nodo Su^{10} el cual tiene un valor superior al valor de salvamento, se continúa con los demás nodos del mismo año, encontrándose que los últimos tres nodos tienen un valor inferior al valor de salvamento, por lo que se asume se abandonaría el proyecto y en su lugar se considera el valor de salvamento como el valor del nodo.

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado del valor de los nodos en el año diez por la probabilidad de neutralidad al riesgo, para esto nuevamente se recurre la ecuación 5.4.

Como se mencionó anteriormente, al nodo Su^9 se aplica la ecuación 5.5, de la cual al resolver para esta opción se obtiene:

$$Su^9 = ((0.5560 * 1,581,304,812.39) + (.4440 * 922,062,031.80)) * \exp(-.065 * 1)$$
$$Su^9 = 1,207,502,019.86$$

El valor de este nodo es superior al valor de salvamento, por lo que se mantiene, sin embargo al continuar el análisis habrá nodos que arrojen valores inferiores al valor de salvamento, en estos casos se considera que se ejercerá la opción de abandonar y el valor del nodo se volverá el valor de salvamento. Este análisis se realiza para todos los nodos restantes hasta llegar a S_0 .

Al concluir el análisis recursivo se obtiene que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 es de \$106,852,854.50, este valor presente de los flujos es superior a los \$106,595,366.14 que originalmente se estimaban, lo cual nos indica que al considerar la opción de abandonar el proyecto el valor del proyecto se incrementa en \$257,488.36, mismos que representan el valor de la opción real de abandono.

Adicionalmente al valor de la opción real de abandono, el análisis de esta opción real bajo el enfoque binomial nos permite estimar una probabilidad de éxito del proyecto al considerar la variedad de rutas que se sigue para llegar a cada nodo, esto se hace comparando el árbol recursivo con un triángulo de Pascal⁷⁴, el cual nos indica en cada nodo el número de rutas que se sigue para llegar a ese punto.

Al llegar al año 10 el valor del proyecto pudo haber seguido 1024 distintas trayectorias, esto es la sumatoria de los valores de los nodos que componen el año diez en el triángulo de Pascal. Al considerarse el número de rutas que componen los tres nodos finales (aquellos en los que se considera el proyecto será abandonado), se observa

⁷⁴ Ver Figura 17

que la opción de abandono podría presentarse en 56 de las 1024 rutas, esto es el proyecto tiene un 5.47% de probabilidad de ser abandonado, desde otra perspectiva también es posible decir que el proyecto tiene un 94.53% de probabilidad de éxito.

5.3.3 Opción de Esperar.

La opción de esperar, también conocida como opción de diferir, se encuentra presente en prácticamente todo proyecto. Una organización puede determinar no invertir en un proyecto pues demuestra un VPN negativo o marginalmente pequeño, pero tiene una elevada incertidumbre que al resolverse elevará el VPN. Un VPN elevado se deriva de un elevado nivel de ingresos, los cuales juegan un papel fundamental en el análisis de opciones reales, cuando existen condiciones económicas que permiten obtener ingresos elevados la decisión será la de llevar a cabo la inversión. Estas características hacen de la opción de esperar una opción de tipo *call*. La capacidad de diferir la inversión es particularmente valiosa en proyectos donde los inversionistas son propietarios de tecnología, patentes, derechos de exclusividad, o están protegidos por cualquier tipo de barrera de entrada a un mercado, de tal manera que los inversionistas no pierden ingresos frente a la competencia mientras esperan a que las condiciones para la inversión sean las apropiadas.

Suponiendo el caso en que se tiene una patente y se decide esperar para invertir en el desarrollo y venta de los productos derivados de la patente debido a que las condiciones económicas actuales no son las adecuadas para llevar a cabo el proyecto, el inversionista no pierde dinero directamente frente a la competencia, pero sí pierde dinero cuando consideramos que la patente tiene un plazo de vigencia tras el cual expira, por lo que cada año que se retrasa la inversión es un año perdido de exclusividad derivada de la patente. Este efecto es conocido como *leakage* y es equivalente al pago de dividendos en los activos financieros en el sentido que disminuyen el valor total del activo.

En el caso de estudio para valorar la opción real de esperar es importante considerar que se le otorga a la empresa que lleva a cabo el proyecto el derecho de explotación de varios ejidos por un periodo de 10 años, por lo que cada año que se retrase la inversión en el proyecto existe un *leakage* del 10%. Los insumos a considerar para valorar esta opción son:

S: \$ 106, 595,366.14

K: \$ 53, 245,153.00

T: 10 años

σ : 26.97%

r: 6.5%

δ_t : 1 al año.

u= 1.3095

d= 0.7636

p= 0.3699

leakage: 10%

EVALUACIÓN FINANCIERA

Se emplea el árbol binomial de la figura 14 para posteriormente realizar el análisis recursivo bajo el supuesto de esperar. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción de continuar con el proyecto bajo las condiciones planteadas o esperar para realizar la inversión, ganando tiempo para resolver la incertidumbre asociada al proyecto.

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 10. En el caso de esta opción real a todos los nodos de este año se les sustraerá la inversión inicial del proyecto, los nodos que quedan con valores negativos se vuelven cero, pues se considera que en ese caso no se efectúa la inversión, con lo que no se incurre en pérdidas ni ganancias.

Una diferencia fundamental en la valoración de esta opción real en relación a otras radica en el cálculo de su probabilidad de neutralidad al riesgo de manera tal que se considere el efecto de *leakage*, para el caso de esta opción la probabilidad de neutralidad al riesgo se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$p = \frac{e^{((r - \text{leakage}) \times \theta_t)} - d}{u - d}$$

(Ec. 5.6)

El siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado del valor de los nodos en el año diez por la probabilidad de neutralidad al riesgo empleando la ecuación 5.4.

Resolviendo para Su^9 con la ecuación 5.5 se obtiene:

$$Su^9 = ((0.3699 * 1,528,059,659.39) + (.6601 * 868,816,878.80)) * \exp(-.065 * 1)$$
$$Su^9 = 1,042,698,709.56$$

El cálculo de los nodos correspondientes a todos los años restantes se realiza de la misma manera hasta concluir el análisis recursivo obteniendo que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 es de \$17,579,029.99 mismos que representan el valor de la opción real de esperar.

5.3.4 Opción de Elegir.

La opción de elegir es una opción compuesta por múltiples opciones combinadas como una sola. Un tipo de opción de elegir se da al combinar las opciones de abandono, expansión y contracción como una sola. La razón por la que se le conoce como opción de elegir es porque el inversionista puede elegir entre continuar con el proyecto con sus características planteadas originalmente o ejercer cualquiera de las opciones para expandir, contraer o abandonar el proyecto.

EVALUACIÓN FINANCIERA

Se le puede considerar un tipo de opción real única en el sentido que dependiendo de la opción a ejercer puede ser considerada un *put* (abandono y contracción) o un *call* (expansión). Para calcular el valor de la opción de elegir aplicada al caso de estudio se consideraron los insumos empleados con anterioridad para valuar las opciones de expansión, contracción y abandono en forma individual, estos son:

S: \$ 106, 595,366.14

K: \$ 53, 245,153.00

T: 10 años

σ : 26.97%

r: 6.5%

δ_t : 1 al año.

u= 1.3095

d= 0.7636

p= 0.5560

Ahorros derivados de la contracción: \$ 40, 000,000.00

Contracción: 30%

Salvamento: \$ 35, 039,700.00

Costo de Expansión: \$20, 000,000.00

Factor de Expansión: 33%

Se emplea el árbol binomial de la figura 14 para posteriormente realizar el análisis recursivo bajo el supuesto de elección. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción de continuar con el proyecto bajo las condiciones planteadas o efectuar la decisión de elegir entre contraer, expandir o abandonar el proyecto consiguiendo los beneficios de ejercer la opción. Lógicamente el inversionista seleccionará el valor que le permita maximizar el valor del proyecto frente a cualquiera de las alternativas planteadas.

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 10, el valor de estos nodos deberá ser comparado con el valor del nodo bajo el supuesto de ejercicio de la opción, si el valor del nodo bajo el supuesto de ejercicio de la opción es superior al valor del nodo original, entonces se substituye el valor del nodo original por el valor del nodo bajo el supuesto de ejercicio de la opción, una particularidad de esta opción real radica que al momento de definir si se ejerce la opción de elegir es necesario evaluar cual de las tres opciones maximiza el valor del proyecto, por lo cual cada nodo debe ser valuado bajo los supuestos de expansión, contracción y abandono, de manera tal que el valor del nodo estará dado en función de:

$$\text{Valor nodo} = \text{MAX} \{V. \text{Original} \mid V. \text{Abandono} \mid V. \text{Expansión} \mid V. \text{Contracción}\}$$

(Ec. 5.7)

Donde:

$$V.Abandono = Valor de Salvamento \quad (Ec. 5.8)$$

$$V.Expansión = ((1 + Fact.Exp.) V.Original) - Costo de Expansión \quad (Ec. 5.9)$$

$$V.Contracción = ((1 - Fact.Contracc.) V.Original) - Ahorro de Contracc. \quad (Ec. 5.10)$$

Se inicia la construcción del árbol por el nodo Su^{10} el cual tiene un valor original de \$1,581,304,812.39 un valor bajo supuesto de expansión de \$2,083,135,400.47. Al ser comparado con los valores del nodo bajo el supuesto de abandono y contracción resulta claro que el valor máximo del nodo se alcanza bajo el supuesto de expansión por lo cual se considera que el valor del proyecto se maximiza al efectuarse la expansión en este nodo y se substituye el valor original por el valor bajo el supuesto de expansión. Se continúa con los demás nodos del mismo año, encontrándose que en los primeros seis nodos se maximiza el valor del proyecto al efectuarse la expansión, por lo que se asume que en dichos casos se ejercería la opción de expansión. En el caso de los nodos restantes para el mismo año el valor se maximiza al ejercer la opción de contracción, para el caso de estudio el valor de la opción de abandono dentro de la opción de elegir no resultó significativo.

Una vez analizados los nodos finales, el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado del valor de los nodos en el año diez por la probabilidad de neutralidad al riesgo, al igual que en ocasiones anteriores se emplea la ecuación 5.4.

Resolviendo para Su^9 con la ecuación 5.5 se obtiene:

$$Su^9 = ((0.5560 * 1,581,304,812.39) + (.4440 * 922,062,031.80)) * \exp(-.065 * 1)$$

$$Su^9 = 1,207,502,019.86$$

El cálculo de los nodos correspondientes a todos los años restantes se realiza de la misma manera hasta concluir el análisis recursivo llegando a S_0 . Finalmente se calcula que el valor presente de los flujos del proyecto en S_0 es de \$134,987,643.16, éste valor presente de los flujos es superior a los \$106,595,366.14 que originalmente se estimaban, lo cual nos indica que al considerar la opción de elegir el valor del proyecto se incrementa en \$28,392,277.02, mismos que representan el valor de la opción real de elegir. El valor de la opción real de elegir siempre es superior al valor individual de las opciones que la conforman, aunque dicho valor no representa tampoco la sumatoria de las opciones que le conforman, ya que las opciones tienen características mutuamente excluyentes.

5.3.5 Opción de Expansión.

La opción de expansión se presenta particularmente en proyectos donde existe un mercado insatisfecho de grandes dimensiones, ante lo cual de manera lógica el

EVALUACIÓN FINANCIERA

tamaño del mismo tenderá a crecer particularmente si se atraviesa por un ciclo de crecimiento económico. El valor de la opción real de expansión radica en la flexibilidad que le otorga a la organización que en determinado momento puede aprovechar la oportunidad de expandirse y generar flujos de efectivo adicionales a los originalmente proyectados, es así que el monto de inversión requerido para efectuar la expansión se convierte en un precio de ejercicio, la opción será ejercida siempre que su rendimiento esperado sea superior al precio de ejercicio, convirtiéndose en una opción *call*. Para el caso de estudio se considera que el costo relativo a efectuar una expansión de las instalaciones para aumentar los ingresos en un 33% es de \$20, 000,000.00. Los insumos a considerar para valuar esta opción son:

S: \$ 106, 595,366.14

K: \$ 53, 245,153.00

T: 10 años

σ : 26.97%

r: 6.5%

δ_t : 1 al año.

u= 1.3095

d= 0.7636

p= 0.5560

Costo de Expansión: \$20, 000,000.00

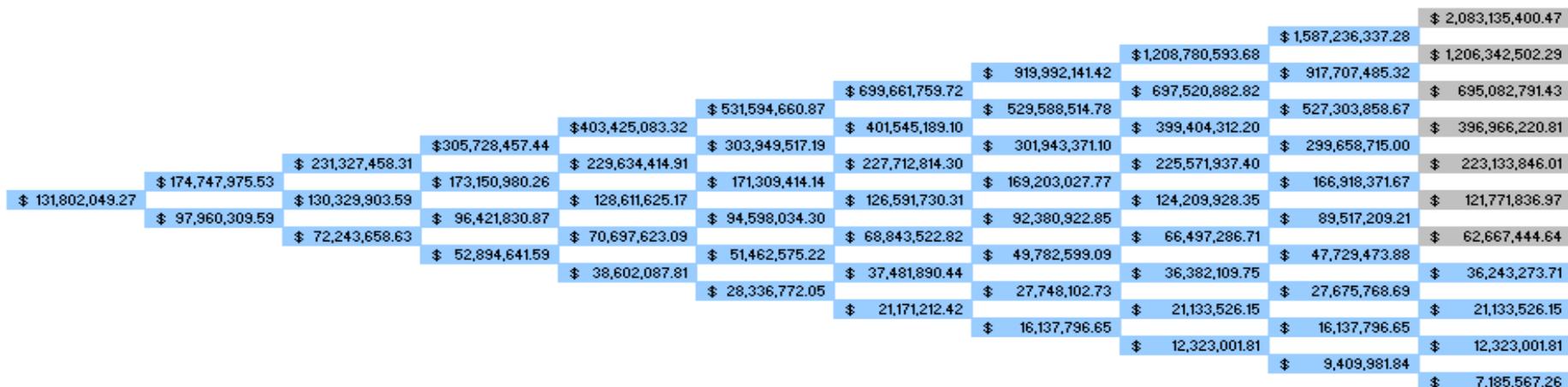
Factor de Expansión: 33%

Se emplea el árbol binomial de la figura 14 para posteriormente realizar el análisis recursivo bajo el supuesto de expansión. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción de continuar con el proyecto bajo las condiciones planteadas o efectuar la expansión obteniendo los ingresos adicionales pero también incurriendo en los costos derivados de ejercer la opción. Lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre ambas alternativas.

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 10, el valor de estos nodos deberá ser comparado con el valor del nodo bajo el supuesto de expansión, si el valor del nodo bajo el supuesto de expansión es superior al valor del nodo original, entonces se substituye el valor del nodo original por el valor del nodo bajo el supuesto de expansión estimándose que en ese punto el inversionista preferirá ejercer la opción de expansión pues esta maximiza el valor del proyecto en ese punto. El valor del nodo bajo el supuesto de expansión se calcula empleando la ecuación 5.9.

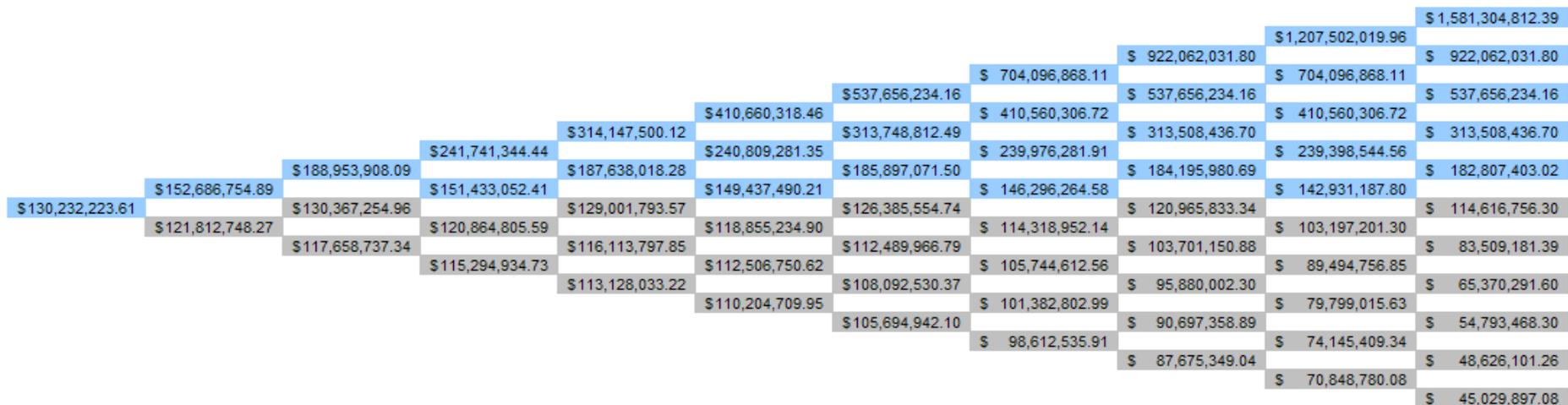
Se inicia la construcción del árbol por el nodo Su^{10} el cual tiene un valor original de \$1,581,304,812.39 y un valor bajo supuesto de expansión de \$2,083,135,400.47 por lo cual se considera que el valor del proyecto se maximiza al efectuarse la expansión en este nodo y se substituye el valor original por el valor bajo el supuesto de expansión, se continua con los demás nodos del mismo año, encontrándose que en los primeros siete nodos se maximiza el valor del proyecto al efectuarse la expansión, por lo que se asume que en dichos casos se ejercería la opción de expansión.

Figura 20. Valoración de la opción real de expansión.



Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Valoración de la opción real de contracción.



Fuente: Elaboración propia

EVALUACIÓN FINANCIERA

Una vez analizados los nodos finales, el siguiente paso consiste en determinar el valor de los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando la ecuación 5.4.

Se resuelve para Su^9 con la ecuación 5.5:

$$Su^9 = ((0.5560 * 2,083,135,400.47) + (.4440 * \$1,206,342,502.29)) * \exp(-.065 * 1)$$
$$Su^9 = \$1,587,236,337.28$$

El cálculo de los nodos correspondientes a todos los años restantes se realiza de la misma manera hasta concluir el análisis recursivo, del cual se obtiene que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 es de \$131,802,049.27, éste valor presente de los flujos es superior a los \$106, 595,366.14 que originalmente se estimaban, lo cual nos indica que al considerar la opción de expansión del proyecto el valor del proyecto se incrementa en \$25,206,683.13, mismos que representan el valor de la opción real de expansión.

5.3.6 Opción de Contracción.

Esta opción tiene un valor significativo para aquellas organizaciones que pueden experimentar un proceso de *downsizing* sujeto a los cambios en el entorno económico que pueden llevar a la entidad a buscar reducir sus operaciones para mantenerse competitiva. Las organizaciones pueden prever estos cambios de entorno y desarrollar opciones estratégicas de contracción de manera tal que cuando las condiciones para llevar a cabo la contracción se presenten, éstas no afecten de manera significativa a la organización. La opción de contracción tiene características similares a una opción *put* pues el valor de la opción se incrementa a medida que el valor del subyacente decrece. En el caso de estudio se estima que el efectuar una contracción estratégica de las operaciones se tendría un ahorro por \$40, 000,000.00 cuando se lleve a cabo una contracción del 30% de las operaciones. Los insumos a considerar para valuar esta opción son:

S: \$ 106, 595,366.14

K: \$ 53, 245,153.00

T: 10 años

σ : 26.97%

r: 6.5%

δ_t : 1 al año.

u= 1.3095

d= 0.7636

p= 0.5560

Ahorros derivados de la contracción: \$ 40, 000,000.00

Factor de Contracción: 30%

Se emplea el árbol binomial de la figura 14 para posteriormente realizar el análisis recursivo bajo el supuesto de contracción. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción de continuar con el proyecto bajo las condiciones planteadas o efectuar la contracción consiguiendo ahorros derivados de disminuir los costos de operación al ejercer la opción, lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre ambas alternativas.

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 10. El valor de estos nodos deberá ser comparado con el valor del nodo bajo el supuesto de contracción, si el valor del nodo bajo el supuesto de contracción es superior al valor del nodo original, entonces se substituye el valor del nodo original por el valor del nodo bajo el supuesto de contracción estimándose que en ese punto el inversionista preferirá ejercer la opción de contracción pues ésta maximiza el valor del proyecto en ese punto. El valor del nodo bajo el supuesto de contracción se calcula conforme a la ecuación 5.10.

Al igual que con las opciones reales anteriores se inicia la construcción del árbol por el nodo Su^{10} el cual tiene un valor original de \$1,581,304,812.39 y un valor bajo supuesto de contracción de \$1,146,913,368.67 por lo cual se considera que el valor del proyecto no se maximiza al efectuarse la contracción en este nodo y se mantiene el valor original al no ejercerse la opción. Se continúa con los demás nodos del mismo año encontrándose que a partir del nodo Su^{5d^5} el ejercer la opción de contracción maximiza el valor del proyecto, en el caso particular del nodo Su^{5d^5} el valor original del nodo era de \$106,595,366.14 y un valor bajo supuesto de contracción de \$114,616,756.30 con lo que se considera que el valor del proyecto se maximiza al efectuarse la expansión por lo que se substituye el valor original del nodo por el valor del nodo bajo el supuesto de contracción al ejercerse la opción, la opción de contracción maximiza el valor del proyecto desde el nodo Su^{5d^5} hasta el nodo Sd^{10} .

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando la ecuación 5.4.

Se resuelve para Su^9 con la ecuación 5.5:

$$Su^9 = ((0.5560 * 1,581,304,812.39) + (.4440 * 922,062,031.80)) * \exp(-.065 * 1)$$

$$Su^9 = 1,207,502,019.86$$

El cálculo de los nodos correspondientes a todos los años restantes se realiza de la misma manera hasta concluir el análisis recursivo obteniendo que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 es de \$130,232,223.61, éste valor presente de los flujos es superior a los \$106,595,366.14 que originalmente se estimaban, lo cual nos indica que al considerar la opción de contracción del proyecto el valor del proyecto se incrementa en \$23,636,857.47, mismos que representan el valor de la opción real de contracción.

5.3.7 Opciones Barrera.

Una opción barrera es un tipo de opción donde la decisión de ejercerla no depende únicamente del precio de ejercicio y el precio del subyacente en el mercado, adicionalmente depende de un precio predefinido denominado como “barrera”. Este tipo de opción puede ser visto tanto como un *call* o como un *put*, cuando hablamos de una opción barrera *call* nos referimos a una opción que será ejercida por un inversionista racional únicamente cuando el precio del subyacente sea superior al precio barrera preestablecido, comprendiendo de antemano que el precio barrera en este caso siempre será superior al precio de ejercicio. De manera análoga la opción barrera *put* será ejercida por un inversionista racional únicamente cuando el precio del subyacente sea inferior al precio barrera preestablecido, toda vez que este precio para una opción barrera *put* es inferior al precio de ejercicio.

5.3.7.1 Opción Barrera *put*.

Las opciones barrera *put* pueden ser aplicadas al caso de opciones reales que se considera guardan un comportamiento parecido a un *put*, como es el caso de las opciones reales de abandono y contracción, la característica particular de estas opciones radica en que el valor de la opción aumenta a medida que el valor del subyacente disminuye. Una opción barrera *put* aplicada al caso de estudio sería similar a una opción de abandono clásica con la particularidad de que en esta opción el proyecto no será abandonado cuando su valor caiga por debajo del valor de salvamento, sino cuando su valor caiga por debajo de un precio barrera preestablecido que será inferior al valor de salvamento y bajo el cual el proyecto será abandonado en forma definitiva. En este caso el precio barrera preestablecido será de \$ 30 000,000.00, los insumos a considerar para valuar esta opción son:

S: \$ 106, 595,366.14

K: \$ 53, 245,153.00

T: 10 años

σ : 26.97%

r: 6.5%

δ_t : 1 al año.

u= 1.3095

d= 0.7636

p= 0.5560

Precio Barrera: \$ 30, 000,000.00

Salvamento: \$ 35, 039,700.00

Se utiliza el árbol binomial figura 14 para posteriormente realizar el análisis recursivo bajo el supuesto de abandono con barrera. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción de continuar con la inversión o abandonarla por su precio barrera, lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre estas dos alternativas.

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 10. El valor de estos nodos deberá ser superior al precio barrera de lo contrario el proyecto será abandonado, si el valor del nodo es inferior al precio barrera, entonces se substituye por el valor de salvamento estimándose que el proyecto ha sido abandonado. Se inicia la construcción del árbol por el nodo Su^{10} el cual tiene un valor superior al valor de salvamento, se continúa con los demás nodos del mismo año, encontrándose que los últimos tres nodos tienen un valor inferior al precio barrera, por lo que se asume se abandonaría el proyecto y en su lugar se considera el valor de salvamento como el valor del nodo.

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando la ecuación 5.4.

Se resuelve para Su^9 con la ecuación 5.5:

$$Su^9 = ((0.5560 * 1,581,304,812.39) + (.4440 * 922,062,031.80)) * \exp(-.065 * 1)$$
$$Su^9 = 1,207,502,019.86$$

El valor de este nodo es superior al precio barrera, por lo que se mantiene el valor original. Este análisis se realiza para todos los nodos restantes hasta llegar a S_0 . En este caso ningún nodo intermedio tuvo un valor inferior al precio barrera.

Al concluir el análisis recursivo se obtiene que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 es de \$106,796,3457.00, éste valor presente de los flujos es superior a los \$106,595,366.14 originalmente estimados, lo cual nos indica que al considerar la opción de abandonar el proyecto, el valor del proyecto se incrementa en \$201,090.86, mismos que representan el valor de la opción real de barrera-abandono.

5.3.7.2 Opción Barrera *call*.

Las opciones barrera *call* pueden ser aplicadas al caso de las opciones reales que se considera guardan un comportamiento parecido a un *call*, como es el caso de las opciones de entrada y expansión, la característica particular de estas opciones radica en que el valor de la opción aumenta a medida que el valor del subyacente disminuye.

Una opción barrera *call* aplicada al caso de estudio sería similar a una opción de entrada clásica con la particularidad de que en esta opción no se invertirá en el proyecto cuando su valor tenga una diferencia positiva entre el valor del proyecto al vencimiento y el precio de ejercicio, sino cuando su valor se encuentre por arriba de un precio barrera preestablecido que será superior al precio de ejercicio y por encima del cual se llevará a cabo la inversión, en este caso el precio barrera preestablecido será de \$ 150,000,000.00. Los insumos a considerar para valorar esta opción son:

S: \$ 106, 595,366.14
 K: \$ 53, 245,153.00
 T: 10 años
 σ : 26.97%
 r: 6.5%
 δ_t : 1 al año.
 u= 1.3095
 d= 0.7636
 p= 0.5560
 Precio Barrera: \$ 150, 000,000.00

Se utiliza el árbol binomial de la figura 14 para posteriormente realizar el análisis recursivo bajo el supuesto de entrada con barrera. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción entre realizar la inversión o esperar al siguiente periodo, lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre estas dos alternativas.

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 10, en el caso de esta opción real a todos los nodos de este año se les sustraerá la inversión inicial del proyecto. Los nodos que quedan con valores negativos se vuelven cero, pues se considera que en ese caso no se efectúa la inversión, con lo que no se incurre en pérdidas ni ganancias.

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado empleando la ecuación 5.4.

Al resolver para Su^9 con la ecuación 5.5 se obtiene:

$$Su^9 = ((0.5560 * 1, 528, 059,659.39) + (.4440 * 868, 816,878.80)) * \exp(-.065 * 1)$$

$$Su^9 = 1, 157, 607,719.50$$

El cálculo de los nodos correspondientes a todos los años restantes se realiza de la misma manera hasta concluir el análisis recursivo obteniendo que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 es de \$56,403,349.66, mismos que representan el valor de la opción real de barrera-entrada.

5.3.8 Opciones reales “en” el proyecto.

Las opciones “en” proyectos hace referencia a opciones que son inherentes al diseño o funcionamiento del proyecto en sí, a diferencia de los otros tipos de opciones que responden a circunstancias externas al proyecto (como la demanda, la política fiscal, subsidios, etc.). Las opciones “en” proyectos son la parte del proyecto sobre la cual los inversionistas tienen un control considerable. A las opciones “en” proyectos nos es posible dividir las en otras clasificaciones como serían: las opciones de flexibilidad y las opciones de aprendizaje.

EVALUACIÓN FINANCIERA

Las opciones de flexibilidad son aquellas opciones donde al inversionista se le presentan oportunidades “en” el proyecto para cambiar los insumos de un proceso, o el proceso en sí, también se puede considerar como una opción de flexibilidad la posibilidad de cambiar distintos aspectos del diseño del proyecto sin alterar su finalidad.

Las opciones de aprendizaje se refieren a la adquisición de conocimiento que se va consiguiendo conforme madura un proyecto, éstas se presentan cuando los encargados de desarrollar el proyecto o las personas relacionadas a su ejecución adquieren información nueva que no poseían antes de la realización del proyecto y que les es de utilidad para concluir la inversión en forma satisfactoria.

En el caso de estudio se puede plantear la existencia de una opción real “en” el proyecto cuando se plantea que en el transcurso de la vida del mismo es posible cambiar el diseño actual de las instalaciones por un diseño que resulte más funcional y que permita un mayor aprovechamiento de los espacios aumentando la capacidad de generar ingresos de la organización en un 25%.

S: \$ 106, 595,366.14

K: \$ 53, 245,153.00

T: 10 años

σ : 26.97%

r: 6.5%

δ_t : 1 al año.

u= 1.3095

d= 0.7636

p= 0.5560

Incremento en ingresos por cambio de diseño: 25%

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 10. Al valor de estos nodos finales se le incrementará un 25% derivado de los ingresos adicionales proyectados por el cambio de diseño.

$V_{\text{Cambio Diseño}} = V_{\text{Original}} (1 + \text{Factor de Incremento en ingresos})$

(Ec. 5.11)

EVALUACIÓN FINANCIERA

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año nueve, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando la ecuación 5.4.

Se resuelve para Su^9 con la ecuación 5.5:

$$Su^9 = ((0.5560 * 1,976,631,015.49) + (.4440 * 1,152,577,539.75)) * \exp(-.065 * 1)$$
$$Su^9 = 1,509,377,524.95$$

El cálculo de los nodos correspondientes a todos los años restantes se realiza de la misma manera hasta concluir el análisis recursivo, se obtiene que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 es de \$133,244,207.68, éste valor presente de los flujos es superior a los \$106, 595,366.14 que originalmente se estimaban, lo cual nos indica que al considerar la opción de expansión del proyecto el valor del proyecto se incrementa en \$26,648,841.54, mismos que representan el valor de la opción real “en” el proyecto.

5.3.9 Opciones Compuestas.

La gran mayoría de los proyectos de inversión son proyectos que requieren del desarrollo de múltiples etapas donde los inversionistas pueden optar por expandir, contraer, mantener o abandonar el proyecto toda vez que se consigue nueva información que disipa incertidumbre sobre el mismo. Este tipo de proyectos presentan opciones que se generan como producto del desarrollo de una etapa previa o cuyo valor se ve afectado por el desarrollo paralelo de otra etapa; este tipo de opciones se conocen como opciones compuestas.

Una opción compuesta puede ser tanto secuencial como paralela, también conocidas como simultáneas. Cuando es necesario ejercer una opción para que se genere otra estamos hablando de una opción secuencial, mientras que cuando se tienen dos opciones sobre el mismo proyecto que pueden ser ejercidas en cualquier momento de la vida del mismo se habla de una opción paralela. Los cálculos para la valoración de ambos casos de opciones compuestas son parecidos pero existen diferencias que se presentan en sus respectivas aplicaciones.

5.3.9.1 Opción Secuencial.

La opción secuencial aplicada a nuestro caso de estudio se puede presentar cuando se decida llevar a cabo un nuevo proyecto de inversión como podría ser el caso de la construcción de una segunda planta de mayores dimensiones y tecnología de punta para la producción de biodiesel. En este caso se parte del supuesto de que existe una primer etapa que consiste en la adquisición de terrenos y realizar trámites administrativos para llevar a cabo la construcción, misma que la que tendría un costo de \$8,125,000.00 y una duración de un año para concluirla. Adicionalmente existe una segunda etapa que consiste en el diseño, ingeniería y construcción de la planta hasta

la obra negra, la etapa tiene un costo de \$21,666,666.67 tomando tres años para su conclusión. Finalmente se tiene una tercer etapa que consiste en la conclusión de la construcción de la planta con un costo estimado de \$57,000,000.00 y cinco años para su conclusión.

El precio de ejercicio se derivada del valor presente de los flujos de efectivo del proyecto, mismo que se estima en \$ 65, 000,000.00 toda vez que por lo menos en sus primeros cinco años de operación la segunda planta funcionará paralelamente a la primer planta. Tomando en consideración la información proporcionada se sabe que los insumos a considerar para la valoración de la opción son los siguientes:

- S: \$ 65, 000,000.00
- K_1 : \$8, 125,000.00
- K_2 : \$21,666,666.67
- K_3 : \$57,000,000.00
- T_1 : 1 año
- T_2 : 2 años
- T_3 : 2 años
- σ : 26.97%
- r : 6.5%
- δ_i : 1 al año.
- $u= 1.3095$
- $d= 0.7636$
- $p= 0.5560$

Se construye el árbol binomial del proyecto empleando los coeficientes de ascenso y de descenso por la sumatoria de los periodos individuales de vida de cada etapa del proyecto.

Figura 25. Variaciones del VP de los flujos del proyecto para cinco años.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente el árbol anterior es analizado en forma recursiva bajo el supuesto de entrada. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción entre realizar la inversión necesaria para llevar a cabo la etapa o esperar al siguiente periodo, lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre estas dos alternativas.

Figura 26. Valoración de la opción sobre la primera etapa.

| | | | | | |
|------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | | | \$ 137,759,145.67 | \$ 193,352,533.17 |
| | | | \$ 95,929,628.47 | \$ 58,059,928.93 | \$ 88,981,068.03 |
| | \$ 65,101,679.68 | | \$ 36,345,414.03 | \$ 14,651,580.80 | \$ 28,121,855.79 |
| \$ 43,118,251.13 | \$ 22,112,116.97 | | \$ 7,633,522.54 | \$ - | \$ - |
| \$ 27,946,485.72 | \$ 13,175,211.58 | \$ 3,977,090.74 | \$ - | \$ - | \$ - |
| | | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - |
| | | | \$ - | \$ - | \$ - |

Fuente: Elaboración propia

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año 5, en el caso de esta opción real a todos los nodos de este año se les sustraerá la inversión inicial de la correspondiente etapa del proyecto, los nodos que quedan con valores negativos se vuelven cero, pues se considera que en ese caso no se efectúa la inversión, con lo que no se incurre en pérdidas o ganancias.

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año cuatro, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado del valor de los nodos en el año cinco por la probabilidad de neutralidad al riesgo de acuerdo a la ecuación 5.4, esto es:

$$Su^4 = (pSu^5 + (1 - p)Su^4d)e^{-r\delta t} \tag{Ec. 5.12}$$

Se resuelve Su^4 :

$$Su^4 = ((0.5560 * 193,352,533.17) + (.4440 * 88,981,068.03)) * \exp(-.065 * 1)$$

$$Su^4 = 137,759,145.67$$

El cálculo de los nodos correspondientes a todos los años restantes se realiza de la misma manera hasta concluir el análisis recursivo obteniendo el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 , en este punto se toman los valores en el árbol recursivo del año cero al tres, mismos que se emplean para construir el árbol recursivo de la segunda etapa, a este nuevo árbol se le vuelve a sustraer a los valores en el último periodo de tiempo (el año tres) la inversión inicial de la etapa, los nodos que quedan con valores negativos se vuelven cero, pues se considera que en ese caso no se efectúa la inversión, con lo que no se incurre en pérdidas ni ganancias.

Figura 27. Valoración de la opción sobre la segunda etapa.

| | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | \$ 74,262,961.80 |
| | | \$ 44,798,551.31 | |
| | \$ 26,522,118.65 | | \$ 14,678,747.36 |
| \$ 15,475,905.32 | | \$ 7,647,676.41 | |
| | \$ 3,984,464.95 | | \$ - |
| | | \$ - | |
| | | | \$ - |

Fuente: Elaboración propia

Se lleva a cabo el cálculo del valor de los nodos intermedios hasta el año cero empleando el procedimiento anteriormente descrito para obtener el valor de los nodos hasta el año cero. Se toma los valores de los años cero y uno de este nuevo árbol recursivo con lo que se valorará la primer etapa y se obtendrá el valor de la opción real secuencial.

Figura 28. Valoración de la opción real compuesta.

| | |
|-----------------|------------------|
| | \$ 18,397,118.65 |
| \$ 9,584,960.27 | |
| | \$ - |

Fuente: Elaboración propia

A los nodos del año uno se les sustrajo el precio de ejercicio la primer etapa, aquellos valores inferiores al cero se substituyeron por cero, finalmente el valor pendiente por calcular se obtuvo empleando un promedio ponderado del valor de los nodos en el año uno por la probabilidad de neutralidad al riesgo como se hizo en las etapas anteriores (empleando la ecuación 5.4). Esto lleva a calcular que el valor de la opción real secuencial es de \$9, 584,960.27.

5.3.9.2 Opción Paralela.

Como se ha hecho mención con anterioridad este tipo de opción permite valorar dos opciones que se presentan simultáneamente de forma independiente, de tal manera que el ejercicio o no ejercicio de una no afecta a la otra.

Una opción paralela aplicada al caso de estudio se da cuando se opta por adquirir en forma simultánea un nuevo terreno para la posible edificación de nuevas instalaciones con un costo de \$8,700,000.00, y la renovación de maquinaria para ampliar la capacidad dentro de las instalaciones actuales con un costo de \$23,000,000.00. En caso de ejercerse la opción paralela se estima que el valor presente de los flujos de efectivo derivados de la misma alcanzan los \$40,000,000.00. Las opciones son independientes pues la adquisición de terrenos para construir nuevas instalaciones en un futuro no se relaciona con la renovación de maquinaria para operar en las

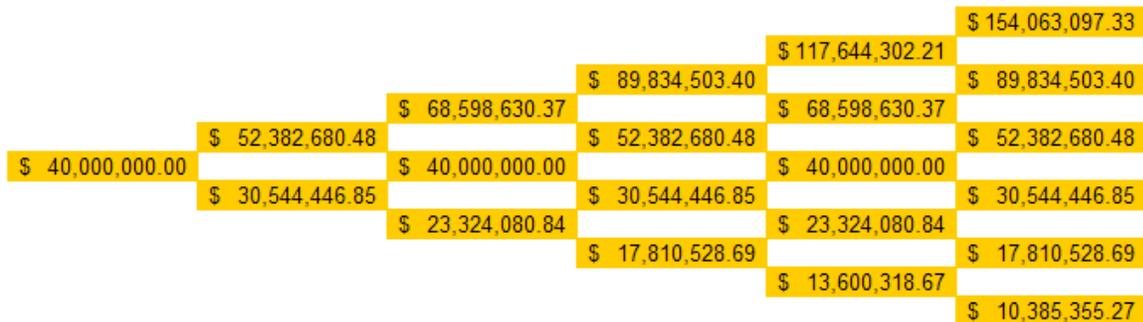
EVALUACIÓN FINANCIERA

instalaciones actuales, no conviene ejercer la opción de renovación de maquinaria en menos de cinco años pues la maquinaria actual cubre las necesidades actuales de producción en forma eficiente, sin embargo dentro de cinco años resulta conveniente realizar la renovación de parte de la maquinaria dado el desgaste natural de la misma y el desarrollo de maquinaria de última generación que ayudaría a eficientar la producción. Por otro lado la opción de adquisición de terrenos se puede ejercer prácticamente en cualquier punto dentro de los próximos cinco años, de esta manera se toma el plazo vida más largo entre las dos opciones para determinar el plazo de vida de la opción paralela. Tomando en consideración la información proporcionada se sabe que los insumos a emplear son los siguientes:

S: \$40,000,000.00
 K_1 : \$8,700,000.00
 K_2 : \$23,000,000.00
 T: 5 años
 σ : 26.97%
 r : 6.50%
 δ_t : 1 al año
 $u = 1.309567012$
 $d = 0.763611171$
 $p = 0.555993416$

Se construye el árbol binomial del proyecto empleando los coeficientes de ascenso y de descenso para el periodo de vida de la opción paralela.

Figura 29. Variaciones del VP de los flujos del proyecto a cinco años.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente el árbol anterior es analizado en forma recursiva bajo el supuesto de ejercicio de la opción que no se puede ejercer antes de cinco años, es decir la opción de renovar maquinaria. Cada nodo en el último año del árbol recursivo representa una opción entre realizar la inversión necesaria para ejercer la opción o no ejercerla, lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre estas dos alternativas.

Figura 30. Valoración de la opción paralela que no puede ejercerse anticipadamente.

| | | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | | | | \$ 131,063,097.33 |
| | | | \$ 96,091,750.55 | \$ 66,834,503.40 |
| | | \$ 49,673,433.23 | \$ 47,046,078.71 | \$ 29,382,680.48 |
| | \$ 34,804,006.11 | \$ 32,186,485.57 | \$ 18,447,448.34 | \$ 7,544,446.85 |
| \$ 23,944,263.53 | \$ 13,967,222.27 | \$ 11,246,597.97 | \$ 3,930,682.01 | \$ - |
| | \$ 6,711,572.18 | \$ 2,047,898.46 | \$ - | \$ - |
| | | \$ - | \$ - | \$ - |

Fuente: Elaboración propia

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año cinco. En el caso de esta opción real a todos los nodos de este año se les sustrae la inversión requerida para renovar la maquinaria, los nodos que quedan con valores negativos se vuelven cero, pues se considera que en ese caso no se efectúa la inversión, con lo que no se incurre en pérdidas ni ganancias.

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año cuatro, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado del valor de los nodos en el año cinco por la probabilidad de neutralidad al riesgo, de acuerdo a la ecuación 5.4.

Se resuelve para Su^4 con la ecuación 5.12:

$$Su^4 = ((0.5560 * 131,063,097.33) + (.4440 * 66,834,503.40)) * \exp(-.065 * 1)$$

$$Su^4 = 96,091,750.55$$

El cálculo de los nodos correspondientes a todos los años restantes se realiza de la misma manera hasta concluir el análisis recursivo obteniendo que el valor presente de los flujos que nos arroja el proyecto en S_0 , en este punto se toma este árbol binomial para realizar el análisis recursivo de la opción paralela de adquisición de terrenos, en este caso a los nodos del quinto año se les vuelve a sustraer la inversión requerida para ejercer la opción, los nodos que quedan con valores negativos se vuelven cero, pues se considera que en ese caso no se efectúa la inversión, con lo que no se incurre en pérdidas ni ganancias. Se efectúa el mismo procedimiento que se siguió en el paso anterior para obtener el valor del resto de los nodos hasta S_0 , con lo que se llega al valor de \$18,671,824.79, mismos que representan el valor de la opción real paralela.

Figura 31. Valoración de la opción paralela.

| | | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | | | | \$ 122,363,097.33 |
| | | | \$ 87,939,263.62 | \$ 58,134,503.40 |
| | | \$ 42,597,999.95 | \$ 38,893,591.78 | \$ 20,682,680.48 |
| | \$ 28,530,017.67 | \$ 24,747,092.38 | \$ 10,775,745.62 | \$ - |
| \$ 18,671,824.79 | \$ 9,151,450.63 | \$ 5,614,199.46 | \$ - | \$ - |
| | \$ 2,925,016.67 | \$ - | \$ - | \$ - |
| | | \$ - | \$ - | \$ - |
| | | | \$ - | \$ - |

Fuente: Elaboración propia

5.3.10 Opción Arcoíris.

Un factor fundamental en el análisis de las opciones reales es la volatilidad, pues esta representa la incertidumbre asociada con el valor del proyecto de inversión. Normalmente esta volatilidad se considera como un solo factor proveniente de la principal fuente de incertidumbre en el proyecto, sin embargo en varios proyectos de inversión las fuentes de incertidumbre pueden ser muchas y en algunos casos es importante considerar el impacto de más de una sola fuente de incertidumbre en el análisis financiero de nuestro proyecto. Cuando se presenta es necesario emplear en nuestro análisis más de un factor de volatilidad, a las opciones que requieren el uso de más de un factor de volatilidad se les conoce como opciones arcoíris. La valoración de este tipo de opciones es similar a la de las opciones con un solo factor de volatilidad, sin embargo el cálculo no se puede realizar con árboles binomiales, en su lugar es necesario emplear árboles polinomiales.

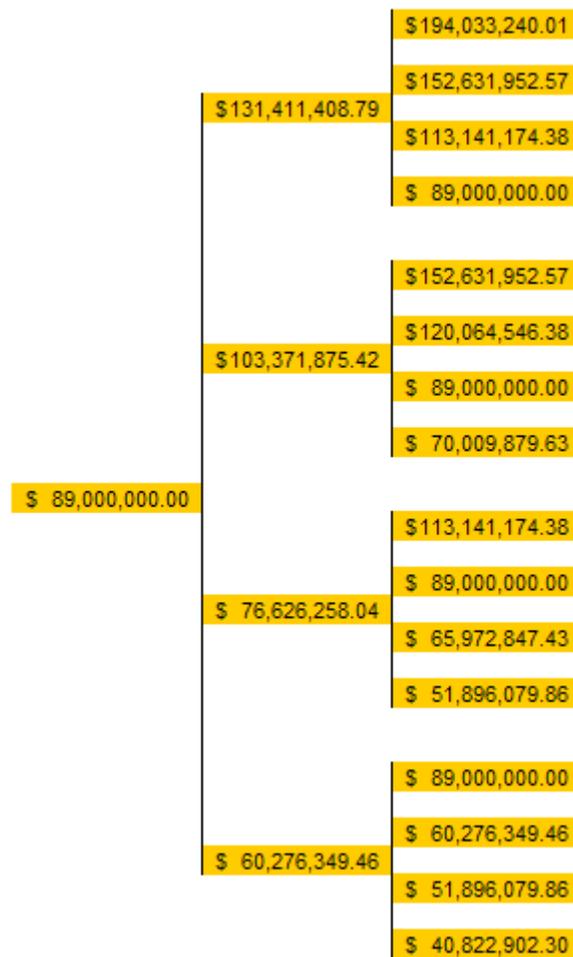
Para el caso de estudio una opción arcoíris se puede presentar al considerar el escenario en que se presenta la oportunidad de invertir en una planta que produce un aditivo derivado del etanol para oxigenar la gasolina. La inversión inicial requerida para llevar a cabo el proyecto sería de \$105, 000,000.00, el valor presente de los flujos estimados que se derivan del proyecto es de \$89, 000,000.00, el plazo de vida de la opción es de dos años, el valor del proyecto se ve afectado por dos fuentes significativas de incertidumbre, la volatilidad del precio del etanol (26.97%) y la volatilidad del precio de la gasolina (12%). Los insumos a considerar para valuar esta opción son:

- S: \$89, 000,000.00
- K: \$105, 000,000.00
- T: 2 años
- σ_1 : 26.97%
- σ_2 : 12.00%
- r: 6.50%

δ_t : 1 al año
 $u_1 = 1.3095$
 $d_1 = 0.7636$
 $p_1 = 0.5559$
 $u_2 = 1.1274$
 $d_2 = 0.8869$
 $p_2 = 0.7491$

Se construye el árbol tetranomial del proyecto empleando ambos coeficientes de ascenso y ambos coeficientes de descenso por los dos años de vida de la opción.

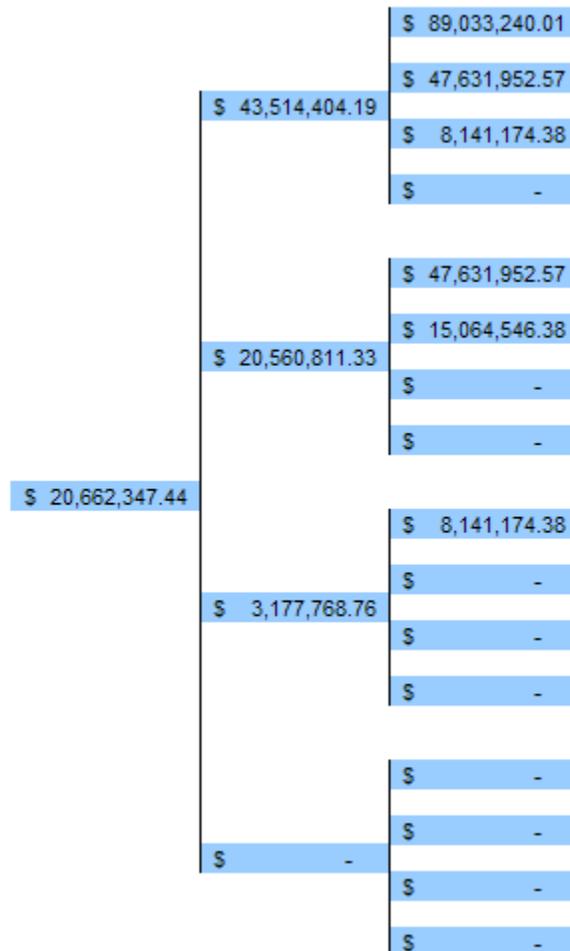
Figura 32. Árbol tetranomial con variaciones de VP de los flujos del proyecto.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente el árbol anterior es analizado en forma recursiva bajo el supuesto de entrada. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción entre realizar la inversión necesaria para llevar a cabo la etapa o esperar al siguiente periodo, lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre estas dos alternativas.

Figura 33. Valoración de la opción real arcoiris.



Fuente: Elaboración propia

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año dos, en el caso de esta opción real a todos los nodos de este año se les sustrae la inversión inicial del proyecto. Los nodos que quedan con valores negativos se vuelven cero, pues se considera que en ese caso no se efectúa la inversión, con lo que no se incurre en pérdidas ni ganancias.

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al primer año, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado de los cuatro nodos que de derecha a izquierda le dan origen al nodo intermedio empleando la probabilidad neutral al riesgo, esto es:

$$S_{u_1 u_2} = [p_1 p_2 (S_{u_1 u_2 u_1 u_2}) + p_1 (1 - p_2) (S_{u_1 u_2 u_1 d_2}) + (1 - p_1) p_2 (S_{u_1 u_2 d_1 u_2}) + (1 - p_1) (1 - p_2) (S_{u_1 u_2 d_1 d_2})] e^{-r \Delta t}$$

(Ec. 5.13)

Se resuelve:

$$Su_1u_2 = [0.5559 \cdot 0.7491 \cdot (89,033,240.01) + 0.5559 \cdot (1 - 0.7491) \cdot (47,631,952.57) + (1 - 0.5559) \cdot p_2 \cdot (8,141,174.38) + (1 - 0.5559) \cdot (1 - 0.7491) \cdot (0)] \exp(-0.065 \cdot 1)$$

$$Su_1u_2 = 43,514,404.19$$

Este procedimiento se lleva a cabo hasta llegar a S_0 en cuyo caso nos arroja que el valor de la opción arcoíris es de \$20,662,347.44. Considerando que el valor presente de los flujos de efectivo es de \$89,000,000.00 y la inversión inicial requerida es de \$105,000,000.00, el VPN del proyecto es de -\$16,000,000.00; sin embargo al considerar el valor de la opción real arcoíris el valor del proyecto se eleva a \$4,662,347.44.

5.3.11 Opción con Volatilidad Cambiante.

En la gran mayoría de los análisis de opciones reales se asume que los ingresos derivados del proyecto mantendrán una volatilidad relativamente constante a lo largo de la vida del mismo, por lo que se considera un único factor de volatilidad para toda la vida del proyecto. Sin embargo si se puede estimar un cambio drástico en la volatilidad a lo largo de la vida del proyecto es posible modelar este cambio modificando el modelo binomial.

Para el caso de estudio se puede considerar el supuesto de recibir un subsidio por parte del gobierno federal a partir del tercer año de vida del proyecto como producto de un plan de estímulo para las empresas que producen bioenergéticos, sin embargo para recibir dicho subsidio es necesario realizar una serie de modificaciones a la planta con un costo de \$45,000,000.00, que traerán ingresos adicionales derivados del proyecto por un monto de \$55,000,000.00. La volatilidad hasta el primer año será de 26.97% y a partir del tercer año esta disminuye a 18% como producto de la certidumbre que arroja sobre los flujos futuros de efectivo el recibir un subsidio gubernamental, la organización tiene cuatro años para decidir si realiza las modificaciones necesarias para recibir el subsidio o continúa con el proyecto en las condiciones originales. Los insumos a considerar para valorar esta opción son:

S: \$55,000,000.00

K: \$45,000,000.00

T: 4 años

σ_1 : 26.97%

σ_2 : 18.00%

r: 6.50%

δ_i : 1 al año

$u_1 = 1.3095$

EVALUACIÓN FINANCIERA

$$d_1 = 0.7636$$

$$p_1 = 0.5559$$

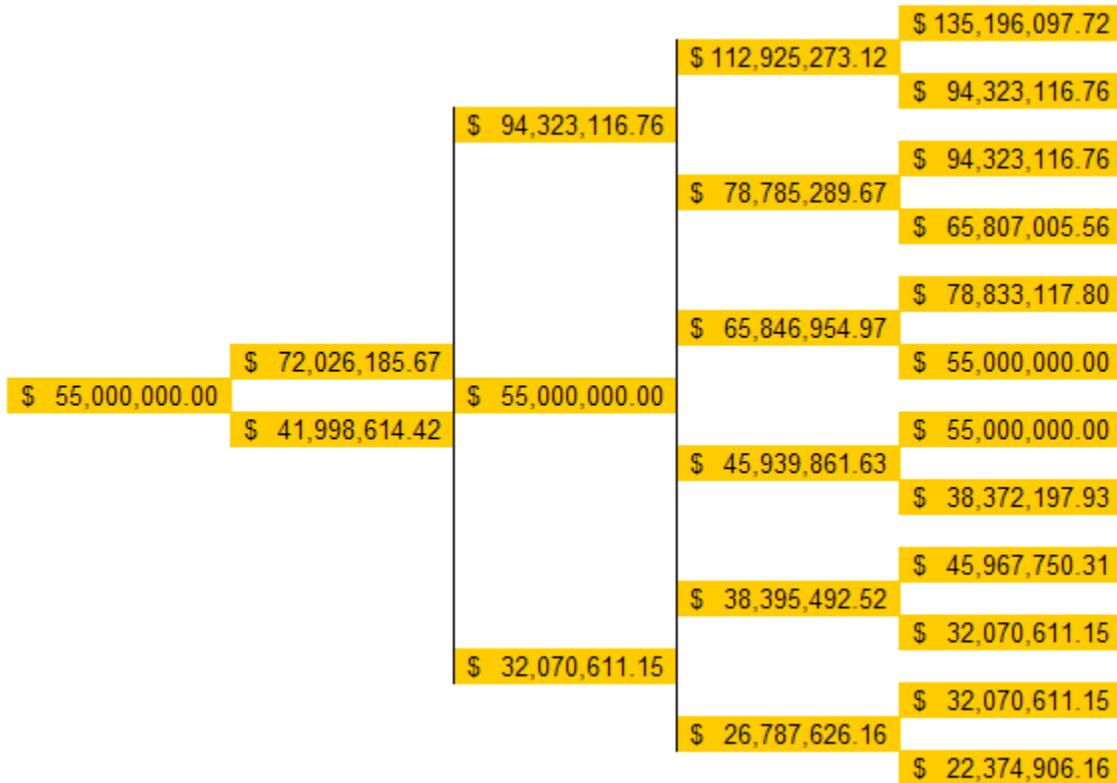
$$u_2 = 1.1972$$

$$d_2 = 0.8352$$

$$p_2 = 0.6406$$

Se construye el árbol binomial del proyecto empleando los coeficientes de ascenso y de descenso relacionados a la primera etapa de volatilidad hasta el año dos, sin embargo a partir del año tres y hasta la expiración de la opción se emplean los coeficientes de ascenso y descenso relacionados a la segunda volatilidad.

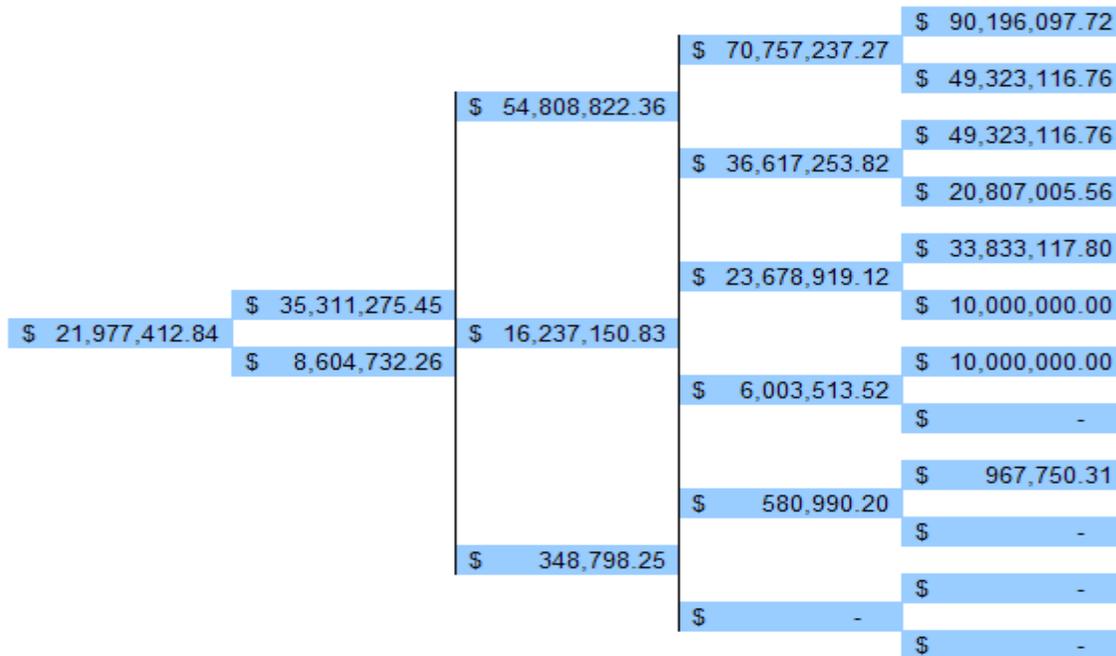
Figura 34. Variaciones de VP de los flujos del proyecto considerando volatilidad cambiante.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente el árbol anterior es analizado en forma recursiva bajo el supuesto de espera. Cada nodo en el árbol recursivo representa una opción entre realizar la inversión necesaria para llevar a cabo las remodelaciones requeridas para recibir el subsidio o esperar al siguiente periodo, lógicamente el inversionista seleccionará el valor máximo que se le presenta entre estas dos alternativas.

Figura 35. Valoración de la opción real con volatilidad cambiante.



Fuente: Elaboración propia

Para construir el árbol recursivo es necesario comenzar con los nodos que representan el último periodo de tiempo, es decir al año cuatro. En el caso de esta opción real a todos los nodos de este año se les sustrae la inversión inicial del proyecto, los nodos que quedan con valores negativos se vuelven cero, pues se considera que en ese caso no se efectúa la inversión, con lo que no se incurre en pérdidas ni ganancias.

Una vez analizados los nodos finales el siguiente paso es calcular los nodos correspondientes al año tres, para lo cual se calcula el valor de los nodos empleando un promedio ponderado del valor de los nodos en el año cuatro por la probabilidad de neutralidad al riesgo, esto es:

$$Su_1^2 u_2 = [p_2(Su_1^2 u_2^u) + (1 - p_2)(Su_1^2 u_2^d)] e^{-r\Delta t} \tag{Ec. 5.14}$$

Al resolver 5.14 se obtiene:

$$S u_1^2 u_2^u = ((0.6406 * 90,196,097.72) + ((1 - 0.6406) * 49,323,116.76)) * \exp(-0.065 * 1)$$

$$S u_1^2 u_2^d = 70,757,237.27$$

Este procedimiento se lleva a cabo hasta llegar a S_0 en cuyo caso nos arroja que el valor de la opción con volatilidad cambiante es de \$21,977,412.84. Considerando que el valor presente de los flujos de efectivo es de \$55,000,000.00 y la inversión inicial requerida es de \$45,000,000.00, el VPN del proyecto es de \$10,000,000.00; sin embargo al considerar el valor de la opción real con volatilidad cambiante el valor del proyecto se eleva a \$31,977,412.84.

6. VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA.

El objetivo de este capítulo es presentar un método híbrido en desarrollo propuesto por Collan, Mezei y Fullér⁷⁵ para la valoración de las opciones reales basado en la lógica difusa, con la finalidad de resaltar los hallazgos relevantes sobre la similitudes y diferencias observadas en forma práctica para la valoración de las opciones reales de entrada, abandono, expansión y contracción. En primera instancia se presentan conceptos básicos sobre lógica difusa requeridos para la comprensión del método que se presenta posteriormente.

6.1 Lógica difusa.⁷⁶

Uno de los factores más importantes en la supervivencia del Homo Sapiens en el proceso evolutivo es su capacidad innata para el ejercicio de análisis y control basado en la Lógica Difusa. Para entender cómo se manifiesta esta capacidad en la vida diaria imagine el siguiente escenario:

Suponga que va manejando por la típica avenida de una gran ciudad, esta consiste en seis carriles, tres de ellos se dirigen al mismo sentido y los otros tres se dirigen al sentido opuesto, existen por lo menos quinientos metros de separación entre cada semáforo, el límite de velocidad está fijado en 80 Km/h. Por lo general debido al tráfico se conduce por debajo del límite de 80 Km/h y se estima que la velocidad más segura para viajar es la velocidad a la que se mueve el tráfico. ¿Cómo es que usted logra definir la instrucción específica y precisa para que su cuerpo conduzca el vehículo a la misma velocidad a la que se mueve el tráfico? Esto es difícil, sin embargo es el tipo de cosas hacen los seres humanos cada día de manera rutinaria y casi siempre con resultados exitosos.

Habrán algunos conductores que rebasen el límite de 80 Km/h y algunos otros conductores que vayan por debajo de la velocidad promedio del tráfico. Sin embargo, la mayoría de los conductores buscará conducir a la misma velocidad a la que se mueve el tráfico. Esto se logra mediante el ejercicio de la Lógica Difusa, toda vez que el organismo recibe un gran número de insumos difusos de alguna manera consigue la evaluación de todos los insumos en el cerebro humano y los resume, pondera y promedia para generar una decisión que resulta óptima para ese escenario en particular. Los insumos evaluados pueden incluir varias imágenes y consideraciones tales como; ¿Cuántos vehículos hay delante del mío?, ¿a qué velocidad van?, ¿alguno va más lento que la mayoría?, ¿hay vehículos obstruyendo carriles?, ¿existe tráfico tratando de incorporarse a la avenida proveniente de calles aledañas?, ¿qué se ve en el espejo retrovisor? Incluso con toda esta información, y más por evaluar, la mayoría de los conductores en el tráfico lograrán ir muy bien juntos a una velocidad relativamente uniforme.

⁷⁵ Ver Mikael Collan, Josef Mezei y Robert Fullér, *Fuzzy pay-off method for real option valuation*, J. of Applied Mathematics and Decision Science, 2009.

⁷⁶ Ver Hung Nguyen y Elbert Walker, *First course in fuzzy logic*, Chapman & Hall/CRC Press.

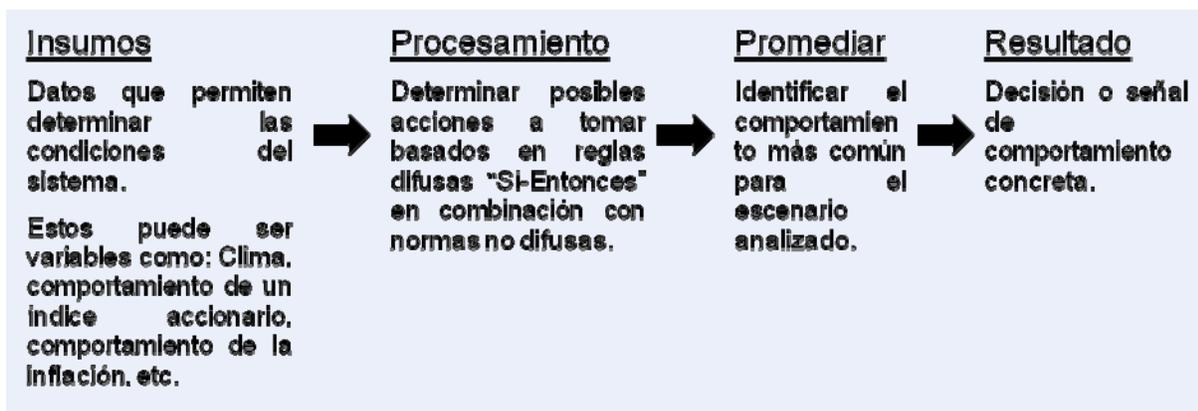
VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

Los seres humanos tienen la capacidad de asumir y evaluar todo tipo de información del mundo físico con el que están en contacto y mentalmente analizar, ponderar y resumir todos los insumos en un curso óptimo de acción. Sin embargo, no toda la información que el ser humano toma del medio ambiente es precisa, por ejemplo, como se evalúa el comportamiento de un vehículo que entra al tráfico por una calle aledaña, el conductor de dicho vehículo puede optar por una serie de cursos de acción, sin embargo, con base en la experiencia otros conductores pueden evaluar la probabilidad de que el vehículo intente incorporarse al tráfico por delante de ellos. Estos datos reciben el nombre de insumos difusos. Algunos de estos insumos son razonablemente precisos y por lo tanto no difusos, como la lectura del velocímetro, sin embargo, el tratamiento que se le da a la información no es muy preciso ni definible, este proceso se conoce como proceso difuso.

El análisis de la Lógica Difusa es, por tanto:

1. Recepción de uno, o un gran número, de insumos sujetos a evaluación de las condiciones existentes en algún sistema que queremos analizar o controlar.
2. Procesamiento de todos esos insumos de acuerdo con reglas de comportamiento humano de tipo "Sí-Entonces".
3. Promediar y ponderar los resultados derivados de todas las normas individuales en una decisión o una señal de salida única que se manifiesta como una acción o una instrucción dirigida a un sistema controlado para que este lleve a cabo una actividad.
4. Al final del proceso la decisión o señal de salida es un resultado preciso que se ha tomado en base a información difusa.

Figura 36. Proceso difuso.



Fuente: Elaboración propia con información de *First course on fuzzy logic*⁷⁷.

⁷⁷ Ver Hung Nguyen y Elbert Walker, *op cit.*

6.2 Percepción Difusa.

La percepción difusa es la evaluación de una condición física que no se mide con precisión, pero se le asigna un valor intuitivo. Este puede servir como base para el procesamiento y análisis en un sistema de lógica difusa. Las medidas son los datos no difusos, son insumos de entrada para el método de la lógica difusa. Ejemplos: la temperatura medida por un transductor de temperatura, velocidad del motor, los datos económicos, los datos de los mercados financieros, etc. Una vez consideradas las medidas los seres humanos con sus percepciones y reglas difusas toman el relevo en el procesamiento de la información. Las percepciones humanas y las reglas difusas se ponen en ciclo iterativo en la lógica difusa basada en el sistema que estamos analizando.

6.3 Conjuntos Borrosos.⁷⁸

El término Conjuntos Borrosos hace referencia a una expresión matemática en el análisis de la lógica multivariada. Un conjunto borroso puede entenderse entonces como un objeto con los elementos, o miembros, que pueden pertenecer al mismo en diferentes grados. Ejemplos de conjuntos borrosos son: la velocidad del motor, la presión de la caldera, la temperatura del agua en la regadera, etc. La velocidad de motor alta, la presión de la caldera baja y la regadera de agua caliente son sub-conjuntos de los conjuntos borrosos. Dentro de cada uno de los sub-conjuntos borrosos es posible realizar la asignación de un grado de pertenencia que va de cero a uno.

Al aplicar el control de la lógica difusa con las normas de origen humano en el proceso, hay que tener una forma de asignar un valor numérico a las evaluaciones intuitivas de los seres humanos de los conjuntos borrosos. Tenemos que traducir la vaguedad del pensamiento humano a números que puedan ser comprendidos fácilmente por otros humanos y por computadoras, esto se logra mediante la asignación de valores que vayan de cero a uno indicando el grado de pertenencia del miembro al subconjunto borroso. En la creación de un sistema de control de la temperatura ambiente, por ejemplo, se podría asignar un miembro de "1.0" en la sub-conjunto de "justo" cuando la temperatura es de 26° C. Luego, si la temperatura desciende a 21° C, podríamos asignarle al miembro del sub-conjunto "justo" el valor "0.8".

6.4 Aplicación de la lógica difusa.

Esta característica de la lógica difusa de considerar los grados de pertenencia de un miembro a un conjunto es similar al sentido común humano y permite aplicarse, a partir de bases razonables, a la solución de problemas basándose en la experiencia que ha tenido anteriormente un operador humano.

Considere el siguiente ejemplo de la conversión de la experiencia humana para su uso en un sistema automatizado: En Italia, se inició un proyecto para automatizar una

⁷⁸ Ver Vilem Novak, *Fuzzy sets and their applications*, Bristol and Philadelphia.

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

planta de cemento, con el tiempo la fabricación de cemento se ha vuelto una labor mucho más compleja de lo que uno podría imaginar, por lo que se tenía la impresión que la intervención de humanos en el proceso era absolutamente necesaria, en un primer intento de automatización no se obtuvieron los resultados esperados, toda vez que los ingenieros encargados de la automatización limitaron a las computadoras a órdenes de tipo booleano. Finalmente, para conseguir el objetivo se busco traducir el comportamiento de un operador humano en millones de normas de lógica difusa "Sí-Entonces" basadas en la experiencia humana, con lo que se logró la automatización de la planta.

Los objetos de análisis de la lógica difusa pueden incluir: el control físico, como la velocidad de la máquina, o explotación de una planta de cemento, las decisiones financieras y económicas, condiciones fisiológicas, las condiciones de seguridad, las condiciones de mejora de la producción y mucho más.

La Lógica Difusa emergió como un desarrollo de la teoría de los conjuntos borrosos propuesta por Lotfi Zadeh⁷⁹, al identificar que en un conjunto borroso de proposiciones a los elementos se les podía dar un grado de veracidad pudiendo tomar valores desde lo "Absolutamente Verdadero" hasta lo "Absolutamente Falso", siendo la principal característica de estos conjuntos el hecho de que los miembros pueden tomar valores intermedios, con lo que se puede tener un sub-conjunto de proposiciones verdaderas, donde habrá proposiciones con mayor grado de veracidad que otras, sin que ninguna de ellas sea falsa.

La Lógica Difusa ha tomado dos vertientes principales (Zadeh, 1994) entre las que es necesario distinguir. La lógica difusa en su sentido más amplio, su forma más antigua y conocida, así como la de mayor aplicación, pero que no busca resolver preguntas profundas planteadas en la lógica clásica, esta sirve principalmente como aparato para el control borroso, el análisis de la vaguedad del lenguaje natural y varios otros dominios de aplicación que provee de soluciones a las técnicas de informática moderna, es decir, los métodos de cómputo tolerante a la imprecisión y vaguedad para dar respuestas rápidas, sencillas y eficientes a los problemas planteados por los usuarios de sistemas automatizados.

La otra vertiente es la de la lógica difusa en su sentido estricto, que busca su desarrollo como lógica simbólica comparativa de la verdad, moldeada plenamente en el espíritu de la lógica clásica (sintaxis, semántica, axiomatización, deducción basada en la conservación de la verdad, integridad, etc.). Se trata de una rama de la lógica multivariada basada en el paradigma de la inferencia en la vaguedad. Esta lógica difusa es una disciplina relativamente joven, sirviendo de base para el desarrollo de la lógica difusa en su sentido más amplio y de interés para el desarrollo e investigación de lógica independiente, pues potencialmente los desarrollos futuros de esta rama de la lógica son ilimitados.

⁷⁹ Ver Lotfi A. Zadeh, *Fuzzy Sets*, Information and Control, 8, pp. 338-353

6.4.1 Aplicación en la valoración de opciones.

Los números difusos desarrollados por Zadeh han sido poco a poco adoptados en el desarrollo de modelos de valoración de opciones, toda vez que los precios del subyacente mantienen un comportamiento estocástico en el tiempo, las ganancias esperadas para determinar el valor del contrato se convierten en una entrada borrosa. En la literatura existen numerosos ejemplos de cómo se han aplicado los números borrosos a modelos de valoración de opciones financieras, como en Muzzioli y Torricelli (2000), Yoshida (2003) y Zmeskal (2001).

De igual forma los números borrosos también se han aplicado a la valoración de opciones reales, por ejemplo, en Carlsson y Fullér (2003), Collan y Majlender (2003), así como en Carlsson y Majlender (2005). Más recientemente, hay una serie de documentos que presentan la aplicación de modelos para la valoración de opciones reales empleando lógica difusa en casos prácticos, por ejemplo, Chen, Lin y Yu (2007), Tolga y Kahraman (2008), Datar y Mathews (2007).

A continuación se presenta el método de valoración de opciones reales empleando números borrosos desarrollado por Collan, Mezei y Fullér (2009), que se basa en la literatura previa sobre la valoración de opciones reales, especialmente los resultados presentados en Datar y Matthews (2007), la presentación del método será ilustrada con su aplicación al caso de estudio, lo cual permitirá realizar un análisis comparativo entre el método del enrejado empleado para la valoración de opciones reales y el método propuesto por Collan-Mezei-Fullér para la valoración difusa de las opciones reales.

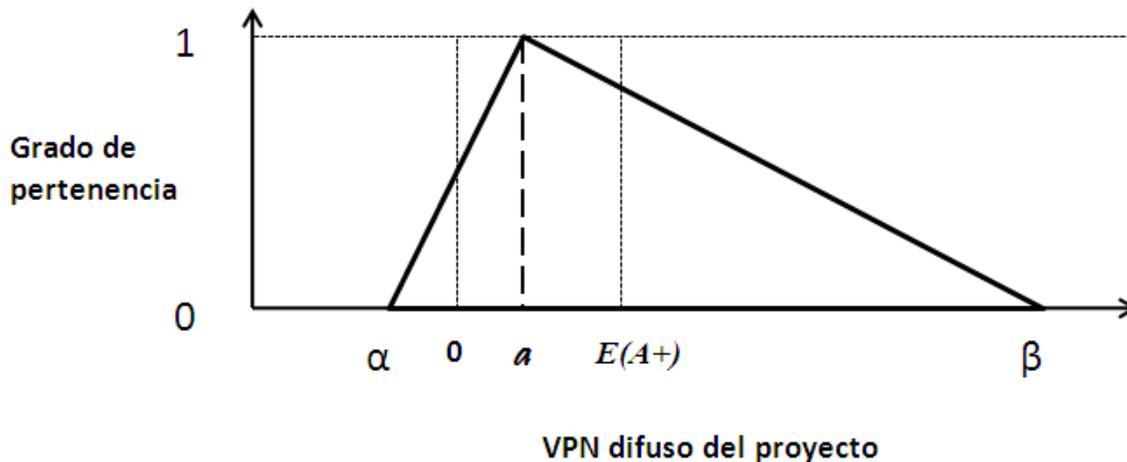
6.4.2 Método Collan-Mezei-Fullér de valoración de opciones reales empleando números borrosos.

Los trabajos recientes de Datar y Mathews (2007), así como Mathews y Solomon (2007) presentan avances relevantes en la aplicación de un método basado en la teoría de la probabilidad para el cálculo del valor de las opciones reales, se ha demostrado que el método y los resultados obtenidos a través del mismo son matemáticamente equivalentes a los resultados obtenidos empleando la fórmula Black-Scholes. El método desarrollado requiere generar la simulación de distribuciones de probabilidad para el VPN de los resultados futuros del proyecto. El método implica que: el valor de la opción real puede ser entendida simplemente como el beneficio neto promedio del proyecto debidamente actualizado al año cero, la fecha inicial de la investigación y desarrollo o el punto donde se decide efectuar la inversión o no. La distribución de probabilidad de resultados del proyecto se emplea para generar una distribución de ganancias, donde los resultados negativos (sujeto a terminación del proyecto) se truncan en un solo bloque, y donde la probabilidad de un valor promedio ponderado de la distribución de ganancias resultante es el valor de la opción real, este método requiere emplear simulaciones para determinar las ganancias probables a lo largo de la vida del proyecto. Collan, Mezei y Fullér (2009) mantienen este enfoque, pero emplean números borrosos en la representación de la distribución esperada de los costos y los ingresos del proyecto, y por lo tanto también de VPN del proyecto, esto significa que el

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

cálculo del valor de la opción real empleando un VPN difuso es directo, ya que la distribución de los resultados probables se puede equiparar al área de un número borroso, donde la media difusa del número borroso es el valor de la opción real siempre y cuando el área del número borroso no contenga valores negativos, en caso contrario se pondera la media difusa por la razón de área positiva en el número borroso (eliminando los valores negativos en cuyo caso no se efectuaría la inversión).

Figura 37. Representación de un número borroso.



Fuente: Elaboración propia con información de Collan-Mezei-Fullér.⁸⁰

La figura 37 representa un número borroso compuesto por los puntos a , α y β que describen tres resultados potenciales del proyecto, con una media para el área positiva del número en $E(A+)$.

Para calcular el valor de la opción real (ROV) se emplea la siguiente ecuación:

$$ROV = \frac{\int_0^{\infty} A(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} A(x) dx} \times E(A+)$$

(Ec. 6.1)

Donde A representa el VPN difuso, $E(A+)$ denota el valor medio difuso del área positiva del número borroso, $\int_{-\infty}^{\infty} A(x) dx$ permite calcular el área bajo la totalidad del número borroso y $\int_0^{\infty} A(x) dx$ permite calcular el área positiva del número borroso.

Como se aprecia fácilmente, cuando la totalidad del número borroso es superior a cero entonces el valor de la opción real es la media difusa del número borroso, y cuando la totalidad del número borroso es inferior a cero, el valor de la opción real será de cero. De manera tal que este modelo considera que el valor de la opción real es la

⁸⁰ Ver Mikael Collan, Josef Mezei y Robert Fullér, *op cit.*

probabilidad promedio ponderada de la distribución de resultados positivos del proyecto, es decir la media difusa de un número borroso ponderada por el porcentaje de área positiva que le conforma.

6.4.3 Calcular el valor de la opción real empleando el método Collan-Mezei-Fullér.

La forma de los números borrosos es variable, sin embargo algunos de los más utilizados son los triangulares y los trapezoidales, los cuales son fáciles de entender y se pueden definir empleando tres o cuatro puntos. El método de Collan-Mezei-Fullér por el momento se enfoca en números borrosos triangulares.

Es necesario calcular el área positiva del número borroso así como la media difusa de un número borroso $A = (a, \alpha, \beta)$ en donde $a - \alpha < 0 < a$. Se considera una variable z , donde $0 \leq z \leq \alpha$, representa la distancia de un punto de corte de $a - \alpha$ en el cual podemos separar al número borroso triangular en dos partes, la variable z tomará el valor de $\alpha - a$ para enfocar el análisis en la parte positiva del número borroso. De esta forma nos es posible determinar la función de pertenencia del área positiva de un número borroso triangular truncado en $a - \alpha + z$, donde $0 \leq z \leq \alpha$, y calcular el valor esperado del número borroso triangular con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 E(A|z) &= I_1 + I_2 \\
 &= \int_0^{z_1} \gamma(a - \alpha + z + \alpha + (1 - \gamma)\beta) d\gamma \\
 &+ \int_{z_1}^1 \gamma(a - (1 - \gamma)\alpha + \alpha + (1 - \gamma)\beta) d\gamma
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 6.2}$$

Donde:

$$z_1 = \frac{z}{\alpha}
 \tag{Ec. 6.3}$$

Y se calculan las integrales:

$$I_1 = (2\alpha - \alpha + z + \beta) \frac{z^2}{2\alpha^2} - \beta \frac{z^3}{3\alpha^3}
 \tag{Ec. 6.4}$$

$$I_2 = (2\alpha + \beta - \alpha) \left(\frac{1}{2} - \frac{z^2}{2\alpha^2} \right) - \beta (\beta - \alpha) \left(\frac{1}{3} - \frac{z^3}{3\alpha^3} \right)
 \tag{Ec. 6.5}$$

De tal manera que se obtiene:

$$I_1 + I_2 = (2\alpha - \alpha + z + \beta) \times \frac{z^2}{2\alpha^2} - \beta \times \frac{z^3}{3\alpha^3} + (2\alpha + \beta - \alpha) \times \left(\frac{1}{2} - \frac{z^2}{2\alpha^2}\right) - (\beta - \alpha) \times \left(\frac{1}{3} - \frac{z^3}{3\alpha^3}\right) \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Lo que se simplifica a:

$$= \frac{z^3}{2\alpha^2} + \frac{2\alpha - \alpha + \beta}{2} + \frac{\alpha - \beta}{3} - \alpha \times \frac{z^3}{3\alpha^3} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

Obteniendo:

$$E(A|z) = \frac{z^3}{6\alpha^2} + \alpha + \frac{\beta - \alpha}{6} \quad (\text{Ec. 6.8})$$

Lo que puede ser expresado como:

$$E(A+) = \frac{(\alpha - \alpha)^3}{6\alpha^2} + \alpha + \frac{\beta - \alpha}{6} \quad (\text{Ec. 6.9})$$

La última expresión representa el valor esperado de un número borroso triangular. Para derivar el valor de la opción real con esta fórmula es necesario determinar en primer instancia si z es un valor positivo, en caso de ser un valor positivo se emplea la fórmula tal cual se derive, en caso que sea negativo no se emplea el primer término de la ecuación. Posteriormente se determina la razón entre el área positiva y el área total del número borroso, y se multiplica por el valor medio difuso de la parte positiva del número borroso, arrojando como producto el valor de la opción real.

6.4.4 El método de Collan-Mezzi-Fuller aplicado.

El método desarrollado por Collan, Mezei y Fullér consiste en asociar los flujos de efectivo estimados para un proyecto de inversión a números borrosos, esto es posible al generar escenarios de flujos de efectivo estimados, descontarlos a valor presente y calcular el valor presente neto difuso del proyecto para los distintos escenarios.

El conjunto de resultados de los valores presentes netos difusos para cada escenario puede ser fácilmente relacionado a un número borroso y el cálculo del valor de la

opción real se vuelve bastante directo toda vez que ya se han derivado las ecuaciones necesarias para calcular su valor.

La ejecución del método se puede realizar en seis pasos que se describen a continuación:

A. Generar distintos escenarios de costos e ingresos del proyecto.

Para el encargado de realizar la evaluación financiera de un proyecto de inversión este debe ser un paso muy fácil de llevar a cabo pues es una costumbre proyectar cuando menos tres posibles escenarios de resultados probables del proyecto.

B. Descontar los costos y los ingresos a valor presente.

En este paso los costos se descuentan a valor presente empleando una tasa libre de riesgo, mientras que los ingresos se descuentan empleando el costo de capital promedio ponderado.

C. Acumular el valor presente de los costos y los ingresos para cada escenario.

Una vez descontados los costos y los ingresos para cada escenario es necesario acumular el valor presente de cada escenario tanto de costos como de ingresos.

D. Calcular valor presente neto difuso por escenario.

Para calcular el valor presente neto difuso se emplean los escenarios del paso anterior y se sustrae al escenario de ingresos altos el escenario de costos más bajos, al escenario de ingresos esperados el de costos esperados y al escenario de ingresos bajos el de costos más altos.

E. Relacionar el valor presente neto difuso de cada escenario con un número borroso.

Cada valor presente neto difuso puede ser visto como un punto de un número borroso.

F. Calcular el valor de la opción real.

Finalmente se calcula el valor de la opción real, entendiendo esta como el valor de la media difusa de los resultados positivos del número borroso.

Para facilitar la comprensión del método se llevará a cabo la aplicación del mismo al proyecto para la producción de etanol estudiado con anterioridad para determinar el valor de las opciones reales de entrada, abandono, contracción y expansión, manteniendo los supuestos y consideraciones bajo los que se ha venido trabajando,

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

una particularidad de este método es que requerirá de un insumo nuevo, el Costo de Capital Promedio Ponderado, éste se supuso en un 15%.⁸¹

6.5 Opción real de Entrada empleando el modelo de Collan-Mezei-Fullér.

Para calcular el valor de la opción real de entrada en este modelo se contemplan prácticamente los mismos insumos que en el modelo binomial; una inversión inicial de \$53,245,153, tasa libre de riesgo de 6.5%, una vida útil de diez años y se emplean los flujos de efectivo como base para las proyecciones posteriores.

A. Generar distintos escenarios de costos e ingresos del proyecto.

Tabla 30. Escenarios de costos opción real de entrada.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alto | 53,245,153.00 | 3,024,397.00 | 3,546,105.49 | 3,801,425.08 | 5,093,909.61 | 8,532,298.60 | 13,066,605.86 | 17,509,251.86 | 14,890,968.91 | 17,153,898.34 | 19,986,223.77 |
| Esperado | 53,245,153.00 | 2,117,077.90 | 2,836,884.39 | 3,801,425.08 | 5,093,909.61 | 6,825,838.88 | 9,146,624.10 | 10,256,476.30 | 10,423,678.24 | 10,007,728.84 | 10,490,356.64 |
| Bajo | 53,245,153.00 | 1,209,758.80 | 1,418,442.20 | 1,520,570.03 | 2,037,563.84 | 3,412,919.44 | 5,226,642.34 | 7,003,700.74 | 4,169,471.30 | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Escenarios de ingresos opción real de entrada.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alto | - | 29,980,169.80 | 28,142,250.78 | 35,438,642.16 | 36,349,493.22 | 65,741,473.76 | 79,385,903.24 | 87,885,666.60 | 96,124,974.48 | 95,600,179.68 | 122,576,065.28 |
| Esperado | - | 14,990,084.90 | 15,571,125.39 | 19,719,321.08 | 22,174,746.61 | 36,870,736.88 | 44,692,951.62 | 44,942,833.30 | 46,062,487.24 | 49,800,089.84 | 75,288,032.64 |
| Bajo | - | 8,994,050.94 | 8,142,675.23 | 9,631,592.65 | 8,139,797.29 | 16,296,589.50 | 17,754,361.30 | 25,154,266.64 | 24,449,989.79 | 28,240,071.87 | 55,030,426.11 |

Fuente: Elaboración propia

El primer paso del método de Collan-Mezei-Fullér consiste en proyectar tres escenarios de costos (alto, esperado y bajo), y tres escenarios de ingresos (alto, esperado y bajo). Cabe destacar que los escenarios de costos contemplan exclusivamente los costos asociados directamente con implementar el proyecto y no con la operación del mismo, mientras que los ingresos son flujos netos de efectivo a los que les han sido descontados los costos para la operación del proyecto, mas no así los costos de implementación del proyecto.

B. Descontar los costos y los ingresos a valor presente.

Tabla 32. Escenarios de costos a valor presente opción real de entrada.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VP Alto | 53,245,153.00 | 2,839,809.39 | 3,126,456.82 | 3,147,006.30 | 3,959,613.56 | 6,227,561.24 | 8,954,990.81 | 11,267,312.39 | 8,997,587.83 | 9,732,319.59 | 10,647,181.75 |
| VP Esperado | 53,245,153.00 | 1,987,866.57 | 2,501,165.46 | 3,147,006.30 | 3,959,613.56 | 4,982,048.99 | 6,268,493.57 | 6,600,106.24 | 6,298,311.48 | 5,677,917.26 | 5,588,486.10 |
| VP Bajo | 53,245,153.00 | 1,135,923.76 | 1,250,582.73 | 1,258,802.52 | 1,583,845.43 | 2,491,024.50 | 3,581,996.32 | 4,506,924.95 | 2,519,324.59 | - | - |

Fuente: Elaboración propia

⁸¹ Ver detalle en Anexo III.

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

Tabla 33. Escenarios de ingresos a valor presente opción real de entrada.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VP Alto | - | 26,069,712.87 | 21,279,584.71 | 23,301,482.48 | 20,782,940.72 | 32,685,131.30 | 34,320,716.70 | 33,039,477.35 | 31,423,424.67 | 27,175,537.67 | 30,298,928.67 |
| VP Esperado | - | 13,034,856.43 | 11,774,007.86 | 12,965,773.70 | 12,678,483.34 | 18,331,272.59 | 19,321,996.33 | 16,895,675.72 | 15,057,908.79 | 14,156,293.66 | 18,610,050.22 |
| VP Bajo | - | 7,820,913.86 | 6,157,032.31 | 6,332,928.51 | 4,653,955.52 | 8,102,285.17 | 7,675,700.34 | 9,456,420.54 | 7,992,745.03 | 8,027,590.95 | 13,602,679.71 |

Fuente: Elaboración propia

El segundo paso implica descontar a valor presente los costos e ingresos en cada uno de los escenarios proyectados. Este paso consiste en usar una tasa de descuento, en el caso de los costos se emplea la tasa libre de riesgo (6.5%), toda vez que se estima que es una tasa representativa del cambio en el valor de los costos en el tiempo. Para los ingresos se emplea la tasa de costo de capital promedio ponderado (15%), siendo ésta la tasa mínima requerida para cumplir con las obligaciones adquiridas por la empresa con sus fuentes de financiamiento.

C. Acumular el valor presente de los costos y los ingresos para cada escenario.

Tabla 34. Escenarios de costos acumulados opción real de entrada.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| ΣVP Alto | 53,245,153.00 | 56,084,962.39 | 59,211,419.21 | 62,358,425.51 | 66,318,039.07 | 72,545,600.31 | 81,500,591.12 | 92,767,903.51 | 101,765,491.34 | 111,497,810.94 | 122,144,992.69 |
| ΣVP Esperado | 53,245,153.00 | 55,233,019.57 | 57,734,185.03 | 60,881,191.33 | 64,840,804.89 | 69,822,853.88 | 76,091,347.45 | 82,691,453.69 | 88,989,765.18 | 94,667,682.44 | 100,256,168.54 |
| ΣVP Bajo | 53,245,153.00 | 54,381,076.76 | 55,631,659.48 | 56,890,462.00 | 58,474,307.43 | 60,965,331.93 | 64,547,328.25 | 69,054,253.20 | 71,573,577.80 | 71,573,577.80 | 71,573,577.80 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. Escenarios de ingresos acumulados opción real de entrada.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| ΣVP Alto | - | 26,069,712.87 | 47,349,297.58 | 70,650,780.06 | 91,433,720.78 | 124,118,852.08 | 158,439,568.77 | 191,479,046.13 | 222,902,470.80 | 250,078,008.46 | 280,376,937.14 |
| ΣVP Esperado | - | 13,034,856.43 | 24,808,864.29 | 37,774,637.99 | 50,453,121.34 | 68,784,393.93 | 88,106,390.26 | 105,002,065.97 | 120,059,974.76 | 134,216,268.42 | 152,826,318.64 |
| ΣVP Bajo | - | 7,820,913.86 | 13,977,946.17 | 20,310,874.68 | 24,964,830.20 | 33,067,115.37 | 40,742,815.70 | 50,199,236.25 | 58,191,981.28 | 66,219,572.23 | 79,822,251.93 |

Fuente: Elaboración propia

Para aplicar el tercer paso es necesario realizar la suma de los valores por cada escenario (alto, esperado y bajo) acumulándolos desde el año cero hasta el año diez, de tal forma que en el año diez se tiene la sumatoria de todos los costos ó ingresos a valor presente contemplados para ese escenario.

D. Calcular valor presente neto difuso por escenario.

Tabla 36. VPND por escenario opción real de entrada.

| | VALOR PRESENTE NETO DIFUSO | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| VPND Alto | - 53,245,153.00 | - 28,311,363.89 | - 8,282,361.90 | 13,760,318.05 | 32,959,413.35 | 63,153,520.15 | 93,892,240.52 | 122,424,792.92 | 151,328,893.00 | 178,504,430.67 | 208,803,359.34 |
| VPND Esperado | - 53,245,153.00 | - 42,198,163.14 | - 32,925,320.74 | - 23,106,553.34 | - 14,387,683.55 | - 1,038,459.96 | 12,015,042.80 | 22,310,612.28 | 31,070,209.58 | 39,548,585.98 | 52,570,150.10 |
| VPND Bajo | - 53,245,153.00 | - 48,264,048.53 | - 45,233,473.04 | - 42,047,550.83 | - 41,353,208.87 | - 39,478,484.94 | - 40,757,775.42 | - 42,568,667.26 | - 43,573,510.06 | - 45,278,238.71 | - 42,322,740.76 |

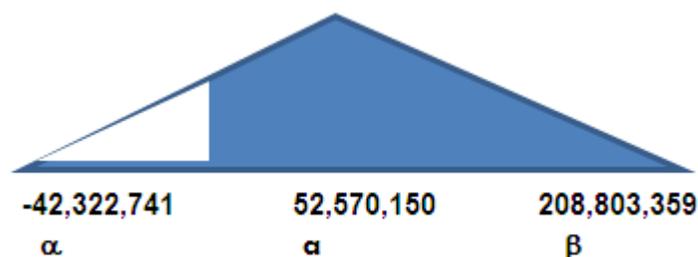
Fuente: Elaboración propia

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

En el cuarto paso se requiere obtener el valor medio difuso en tres escenarios (alto, esperado y bajo). El escenario con valor presente neto difuso alto se obtiene de restar el escenario de costos bajos acumulados al escenario de ingresos altos acumulados (ambos calculados el paso anterior), el escenario con valor presente neto difuso bajo se obtiene de la diferencia del escenario de costos altos acumulados y el escenario de ingresos bajos acumulados. Finalmente el valor presente neto difuso esperado se obtiene de la diferencia del escenario de costos acumulados esperado y el escenario de ingresos acumulados esperado.

E. Relacionar el valor presente neto difuso de cada escenario con un número borroso.

Figura 38. Relación de VPND opción de entrada y un número borroso.



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la relación entre los valores presentes netos difusos obtenidos y un número borroso, el valor presente neto difuso alto toma el valor de β , el valor presente neto difuso esperado toma el valor de α y el valor presente neto difuso bajo toma el valor de α .

F. Calcular el valor de la opción real.

Considerando la ecuación 6.1, el valor de la opción real está dado por la razón del área positiva del número borroso entre el área total del mismo. Para calcular el área positiva simplemente consideramos el valor de β , siempre y cuando el número tenga área negativa, en este caso es igual a 208,803,359, posteriormente se calcula el área total que se obtiene de la diferencia $\beta - \alpha$, que en este caso es igual a 251,126,100. La razón entre las dos áreas nos arroja un resultado de 83.15% de área positiva dentro del área total de número borroso.

Posteriormente se calcula la media difusa, toda vez que el valor de z es negativo, se emplean únicamente el segundo y tercer elementos de la ecuación para determinar la media de la parte positiva del número borroso, esto equivale a:

$$E(A+) = \alpha + \frac{\beta - \alpha}{2} = 52,570,150 + 41,854,350 = 94,424,500$$

Finalmente se pondera la media difusa de la parte positiva del número borroso por el porcentaje de área positiva y se obtiene que el valor de la opción real de entrada

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

calculado por el método de Collan-Mezei-Fullér es de \$78,510,966.48, valor aproximado a los \$79,860,779.93 calculados empleando el modelo binomial.

6.6 Opción real de Abandono empleando el modelo de Collan-Mezei-Fullér.

El valor de la opción real de abandono se calcula de manera similar al de la opción real de entrada con la salvedad que en la proyección de los escenarios de costos e ingresos es necesario contemplar la conclusión anticipada del proyecto, por lo que no es posible emplear los mismos escenarios que se utilizaron para la opción real anterior y es necesario realizar la proyección de escenarios apropiados.

A. Generar distintos escenarios de costos e ingresos del proyecto.

Tabla 37. Escenarios de costos opción real de abandono.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alto | 53,245,153.00 | 11,024,397.00 | 14,546,105.49 | 18,801,425.08 | 19,093,909.61 | 23,532,298.60 | - | - | - | - | - |
| Esperado | 53,245,153.00 | 2,117,077.90 | 2,836,884.39 | 3,801,425.08 | 5,093,909.61 | 6,825,838.88 | 9,146,624.10 | 12,256,476.30 | - | - | - |
| Bajo | 53,245,153.00 | 1,909,758.80 | 2,418,442.20 | 3,520,570.03 | 4,037,563.84 | 4,462,919.44 | 6,226,642.34 | 7,003,700.74 | 10,423,678.24 | 12,007,728.84 | 13,490,356.64 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Escenarios de ingresos opción real de abandono.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alto | - | 16,036,357.38 | 15,880,735.49 | 17,834,489.92 | 11,825,725.58 | 15,739,295.74 | 15,928,033.72 | 23,443,962.52 | 27,585,039.23 | 31,355,891.05 | 63,248,497.23 |
| Esperado | - | 14,990,084.90 | 13,771,125.39 | 15,719,321.08 | 10,574,746.61 | 12,870,736.88 | 14,692,951.62 | 55,039,700.00 | - | - | - |
| Bajo | - | 8,414,542.95 | 7,552,294.20 | 9,853,795.97 | 5,450,290.23 | 38,039,700.00 | - | - | - | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Se proyectan tres escenarios de costos (alto, esperado y bajo), y tres escenarios de ingresos (alto, esperado y bajo). En estas proyecciones particulares se contempla la conclusión anticipada del proyecto en dos de los tres escenarios. En un escenario de costos y uno de ingresos se contempla concluir el proyecto de manera anticipada en el año cinco, en otro escenario de costos y otro de ingresos se contempla concluir el proyecto en el año siete y finalmente en un escenario tanto de costos como de ingresos se contempla que el proyecto concluya en el año diez.

B. Descontar los costos y los ingresos a valor presente.

Tabla 39. Escenarios de costos a valor presente opción real de abandono.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VP Alto | 53,245,153.00 | 10,351,546.48 | 12,824,708.93 | 15,564,742.68 | 14,842,136.84 | 17,175,773.79 | - | - | - | - | - |
| VP Esperado | 53,245,153.00 | 1,987,866.57 | 2,501,165.46 | 3,147,006.30 | 3,959,613.56 | 4,982,048.99 | 6,268,493.57 | 7,887,118.67 | - | - | - |
| VP Bajo | 53,245,153.00 | 1,793,200.75 | 2,132,242.01 | 2,914,500.70 | 3,138,491.61 | 3,257,399.37 | 4,267,330.44 | 4,506,924.95 | 6,298,311.48 | 6,812,623.72 | 7,186,664.21 |

Fuente: Elaboración propia

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

Tabla 40. Escenarios de ingresos a valor presente opción real de abandono.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VP Alto | - | 13,944,658.59 | 12,008,117.57 | 11,726,466.62 | 6,761,396.98 | 7,825,211.67 | 6,886,128.53 | 8,813,453.87 | 9,017,598.26 | 8,913,301.22 | 15,634,061.20 |
| VP Esperado | - | 13,034,856.43 | 10,412,949.26 | 10,335,708.77 | 6,046,145.70 | 6,399,030.94 | 6,352,168.45 | 20,691,461.90 | - | - | - |
| VP Bajo | - | 7,316,993.87 | 5,710,619.43 | 6,479,030.80 | 3,116,221.13 | 18,912,453.86 | - | - | - | - | - |

Fuente: Elaboración propia

El segundo paso se desarrolla igual que con la opción real de entrada descontando a valor presente los costos e ingresos en cada uno de los escenarios proyectados empleando las mismas tasas de descuento.

C. Acumular el valor presente de los costos y los ingresos para cada escenario.

Tabla 41. Escenarios de costos acumulados opción real de abandono.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 | |
| ΣVP Alto | 53,245,153.00 | 63,596,699.48 | 76,421,408.41 | 91,986,151.09 | 106,828,287.92 | 124,004,061.71 | 124,004,061.71 | 124,004,061.71 | 124,004,061.71 | 124,004,061.71 | 124,004,061.71 | |
| ΣVP Esperado | 53,245,153.00 | 55,233,019.57 | 57,734,185.03 | 60,881,191.33 | 64,840,804.89 | 69,822,853.88 | 76,091,347.45 | 83,978,466.12 | 83,978,466.12 | 83,978,466.12 | 83,978,466.12 | |
| ΣVP Bajo | 53,245,153.00 | 55,038,353.75 | 57,170,595.76 | 60,085,096.47 | 63,223,588.07 | 66,480,987.45 | 70,748,317.89 | 75,255,242.84 | 81,553,554.33 | 88,366,178.04 | 95,552,842.25 | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Escenarios de ingresos acumulados opción real de abandono.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| ΣVP Alto | - | 13,944,658.59 | 25,952,776.16 | 37,679,242.78 | 44,440,639.76 | 52,265,851.44 | 59,151,979.96 | 67,965,433.84 | 76,983,032.09 | 85,896,333.31 | 101,530,394.51 |
| ΣVP Esperado | - | 13,034,856.43 | 23,447,805.69 | 33,783,514.46 | 39,829,660.16 | 46,228,691.10 | 52,580,859.55 | 73,272,321.45 | 73,272,321.45 | 73,272,321.45 | 73,272,321.45 |
| ΣVP Bajo | - | 7,316,993.87 | 13,027,613.30 | 19,506,644.10 | 22,622,865.23 | 41,535,319.09 | 41,535,319.09 | 41,535,319.09 | 41,535,319.09 | 41,535,319.09 | 41,535,319.09 |

Fuente: Elaboración propia

El tercer paso que implica realizar la suma de los valores por cada escenario (alto, esperado y bajo) acumulándolos desde el año cero hasta el año diez, se realiza de manera similar a como se realizó con la opción real anterior.

D. Calcular valor presente neto difuso por escenario.

Tabla 43. VPND por escenario opción real de abandono.

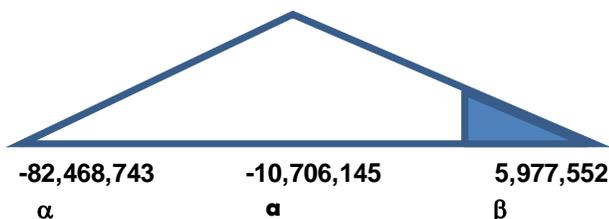
| | VALOR PRESENTE NETO DIFUSO | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|--|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 | |
| VPND Alto | - 53,245,153.00 - | 41,093,695.16 - | 31,217,819.60 - | 22,405,853.69 - | 18,782,948.31 - | 14,215,136.01 - | 11,596,337.93 - | 7,289,809.01 - | 4,570,522.24 - | 2,469,844.73 - | 5,977,552.26 | |
| VPND Esperado | - 53,245,153.00 - | 42,198,163.14 - | 34,286,379.34 - | 27,097,676.87 - | 25,011,144.73 - | 23,594,162.78 - | 23,510,487.90 - | 10,706,144.67 - | 10,706,144.67 - | 10,706,144.67 - | 10,706,144.67 | |
| VPND Bajo | - 53,245,153.00 - | 56,279,705.61 - | 63,393,795.11 - | 72,479,506.99 - | 84,205,422.69 - | 82,468,742.62 - | 82,468,742.62 - | 82,468,742.62 - | 82,468,742.62 - | 82,468,742.62 - | 82,468,742.62 | |

Fuente: Elaboración propia

El cuarto paso consiste en obtener el valor medio difuso en tres escenarios (alto, esperado y bajo), de manera similar a como se realiza con la opción real de entrada.

E. Relacionar el valor presente neto difuso de cada escenario con un número borroso.

Figura 39. Relación de VPND opción de abandono y un número borroso.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 39 se observa la relación entre los valores presentes netos difusos obtenidos y un número borroso. El valor presente neto difuso alto toma el valor de β , el valor presente neto difuso esperado toma el valor de α y el valor presente neto difuso bajo toma el valor de α .

F. Calcular el valor de la opción real.

El valor de la opción real está dado por la razón del área positiva del número borroso entre el área total del mismo. Para calcular el área positiva simplemente consideramos el valor de β , siempre y cuando el número tenga área negativa, en este caso es igual a 5,977,552, posteriormente se calcula el área total que se obtiene de la diferencia $\beta - \alpha$, que en este caso es igual a 88,446,295. La razón entre las dos áreas nos arroja un resultado de 6.76% de área positiva dentro del área total de número borroso.

Posteriormente se calcula la media difusa, toda vez que el valor de z es negativo, se emplean únicamente el segundo y tercer elementos de la ecuación para determinar la media de la parte positiva del número borroso, esto equivale a:

$$E(A+) = \alpha + \frac{\beta - \alpha}{6} = -10,706,145 + 14,741,049 = 4,034,904$$

Finalmente se pondera la media difusa de la parte positiva del número borroso por el porcentaje de área positiva y se obtiene que el valor de la opción real de abandono calculado por el método de Collan-Mezei-Fullér es de \$272,694.89, valor aproximado a los \$257,488.36 calculados empleando el modelo binomial. Es importante resaltar que las condiciones de abandono descritas en el método de Collan-Mezei-Fullér buscan deliberadamente en promedio ser semejantes a las descritas en el modelo binomial.

6.7 Opción real de Contracción empleando el modelo de Collan-Mezei-Fullér.

El cálculo del valor de la opción real de contracción se realiza de manera similar al de las opciones reales anteriores, sin embargo y al igual que con la opción real de abandono, la principal diferencia radica en la proyección de escenarios de costos e ingresos, ya que en el caso de la opción de contracción se debe contemplar ahorros en

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

costos derivados de la contracción tanto para implementar el proyecto como en la operación del mismo por lo que existe un impacto tanto en escenarios de costos como de ingresos, adicionalmente es necesario considerar la disminución en los ingresos derivados de una menor capacidad de la planta. A continuación se proyectan los escenarios respectivos.

A. Generar distintos escenarios de costos e ingresos del proyecto.

Tabla 44. Escenarios de costos opción real de contracción.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alto | 53,245,153.00 | 3,024,397.00 | 3,546,105.49 | 4,801,425.08 | 8,093,909.61 | 10,532,298.60 | 15,066,605.86 | 17,509,251.86 | 17,890,968.91 | 17,153,898.34 | 19,986,223.77 |
| Esperado | 53,245,153.00 | 6,117,077.90 | 7,836,884.39 | 8,801,425.08 | 8,093,909.61 | 8,825,838.88 | 6,402,636.87 | 8,579,533.41 | 7,296,574.77 | 8,405,410.19 | 7,343,249.65 |
| Bajo | 53,245,153.00 | 3,209,758.80 | 3,418,442.20 | 3,520,570.03 | 3,426,294.69 | 2,389,043.61 | 3,658,649.64 | 4,902,590.52 | 2,918,629.91 | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Escenarios de ingresos opción real de contracción.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alto | - | 16,036,357.38 | 18,880,735.49 | 20,634,489.92 | 13,625,725.58 | 35,739,295.74 | 47,928,033.72 | 53,443,962.52 | 59,585,039.23 | 74,355,891.05 | 125,288,197.23 |
| Esperado | - | 12,990,084.90 | 13,571,125.39 | 17,719,321.08 | 10,174,746.61 | 32,870,736.88 | 24,285,066.13 | 27,259,983.31 | 30,143,741.07 | 33,460,062.89 | 91,901,622.85 |
| Bajo | - | 6,414,542.95 | 7,552,294.20 | 9,853,795.97 | 3,815,203.16 | 12,807,002.81 | 13,419,849.44 | 14,964,309.51 | 16,403,810.98 | 18,019,649.49 | 51,040,695.22 |

Fuente: Elaboración propia

Al igual que con las opciones anteriores se proyectan tres escenarios de costos (alto, esperado y bajo), y tres escenarios de ingresos (alto, esperado y bajo), pero a diferencia de proyecciones anteriores se contempla la contracción de la planta. En los escenarios de costos se contempla un escenario sin contracción (costos altos), un escenario con ahorros derivados de la contracción de 20% (costo esperado) y un escenario con ahorros de hasta en un 50% (costos bajos). De manera similar se proyectan los escenarios de ingresos, pero adicionalmente a los ahorros en costos operativos que afectan el flujo neto de efectivo, cabe señalar que se presenta una disminución en los ingresos por una capacidad menor de producción.

B. Descontar los costos y los ingresos a valor presente.

Tabla 46. Escenarios de costos a valor presente opción real de contracción.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VP Alto | 53,245,153.00 | 2,839,809.39 | 3,126,456.82 | 3,974,855.39 | 6,291,582.84 | 7,687,322.91 | 10,325,659.05 | 11,267,312.39 | 10,810,281.40 | 9,732,319.59 | 10,647,181.75 |
| VP Esperado | 53,245,153.00 | 5,743,735.12 | 6,909,461.87 | 7,286,251.76 | 6,291,582.84 | 6,441,810.66 | 4,387,945.50 | 5,520,983.07 | 4,408,818.04 | 4,768,836.60 | 3,911,940.27 |
| VP Bajo | 53,245,153.00 | 3,013,858.03 | 3,013,901.29 | 2,914,500.70 | 2,663,337.98 | 1,743,717.15 | 2,507,397.43 | 3,154,847.47 | 1,763,527.22 | - | - |

Fuente: Elaboración propia

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

Tabla 47. Escenarios de ingresos a valor presente opción real de contracción.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VP Alto | - | 13,944,658.59 | 14,276,548.57 | 13,567,512.07 | 7,790,552.83 | 17,768,746.38 | 20,720,611.60 | 20,091,565.07 | 19,478,455.02 | 21,136,584.94 | 30,969,326.21 |
| VP Esperado | - | 11,295,726.00 | 10,261,720.52 | 11,650,741.24 | 5,817,444.40 | 16,342,565.65 | 10,499,104.26 | 10,248,037.43 | 9,854,042.43 | 9,511,438.18 | 22,716,675.64 |
| VP Bajo | - | 5,577,863.43 | 5,710,619.43 | 6,479,030.80 | 2,181,354.79 | 6,367,343.85 | 5,801,771.25 | 5,625,638.22 | 5,362,434.91 | 5,122,309.03 | 12,616,479.25 |

Fuente: Elaboración propia

El segundo paso se desarrolla igual que con las opciones anteriores, descontando a valor presente los costos e ingresos en cada uno de los escenarios proyectados empleando las tasas de descuento respectivas.

C. Acumular el valor presente de los costos y los ingresos para cada escenario.

Tabla 48. Escenarios de costos acumulados opción real de contracción.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| ΣVP Alto | 53,245,153.00 | 56,084,962.39 | 59,211,419.21 | 63,186,274.60 | 69,477,857.44 | 77,165,180.35 | 87,490,839.40 | 98,758,151.79 | 109,568,433.18 | 119,300,752.78 | 129,947,934.53 |
| ΣVP Esperado | 53,245,153.00 | 58,988,888.12 | 65,898,349.99 | 73,184,601.75 | 79,476,184.58 | 85,917,995.25 | 90,305,940.74 | 95,826,923.81 | 100,235,741.85 | 105,004,578.45 | 108,916,518.73 |
| ΣVP Bajo | 53,245,153.00 | 56,259,011.03 | 59,272,912.32 | 62,187,413.03 | 64,850,751.00 | 66,594,468.15 | 69,101,865.58 | 72,256,713.05 | 74,020,240.26 | 74,020,240.26 | 74,020,240.26 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49. Escenarios de ingresos acumulados opción real de contracción.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| ΣVP Alto | - | 13,944,658.59 | 28,221,207.16 | 41,788,719.23 | 49,579,272.06 | 67,348,018.44 | 88,068,630.03 | 108,160,195.10 | 127,638,650.12 | 148,775,235.06 | 179,744,561.27 |
| ΣVP Esperado | - | 11,295,726.00 | 21,557,446.52 | 33,208,187.76 | 39,025,632.16 | 55,368,197.81 | 65,867,302.06 | 76,115,339.50 | 85,969,381.92 | 95,480,820.11 | 118,197,495.74 |
| ΣVP Bajo | - | 5,577,863.43 | 11,288,482.86 | 17,767,513.66 | 19,948,868.46 | 26,316,212.30 | 32,117,983.55 | 37,743,621.77 | 43,106,056.68 | 48,228,365.71 | 60,844,844.95 |

Fuente: Elaboración propia

El tercer paso, que implica realizar la sumatoria de los valores por cada escenario (alto, esperado y bajo) acumulándolos desde el año cero hasta el año diez, se realiza de manera similar a como se realizó con las opciones reales anteriores.

D. Calcular valor presente neto difuso por escenario.

Tabla 50. VPND por escenario opción real de contracción.

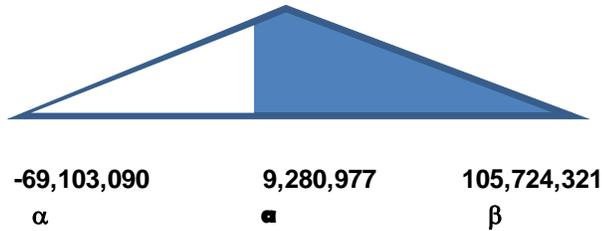
| | VALOR PRESENTE NETO DIFUSO | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| VPND Alto | - 53,245,153.00 | - 42,314,352.44 | - 31,051,705.16 | - 20,398,693.79 | - 15,271,478.95 | 753,550.28 | 18,966,764.45 | 35,903,482.06 | 53,618,409.86 | 74,754,994.80 | 105,724,321.01 |
| VPND Esperado | - 53,245,153.00 | - 47,693,162.12 | - 44,340,903.47 | - 39,976,413.99 | - 40,450,552.43 | - 30,549,797.44 | - 24,438,638.68 | - 19,711,584.32 | - 14,266,359.93 | - 9,523,758.35 | 9,280,977.02 |
| VPND Bajo | - 53,245,153.00 | - 50,507,098.95 | - 47,922,936.35 | - 45,418,760.94 | - 49,528,988.98 | - 50,848,968.05 | - 55,372,855.85 | - 61,014,530.02 | - 66,462,376.50 | - 71,072,387.07 | - 69,103,089.58 |

Fuente: Elaboración propia

El cuarto paso consiste en obtener el valor medio difuso en tres escenarios (alto, esperado y bajo), de manera similar a como se realizó con las opciones reales anteriores.

E. Relacionar el valor presente neto difuso de cada escenario con un número borroso.

Figura 40. Relación de VPND de opción de contracción y un número borroso.



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la relación entre los valores presentes netos difusos obtenidos y un número borroso: el valor presente neto difuso alto toma el valor de β , el valor presente neto difuso esperado toma el valor de α y el valor presente neto difuso bajo toma el valor de α .

F. Calcular el valor de la opción real.

El valor de la opción real está dado por la razón del área positiva del número borroso entre el área total del mismo. Para calcular el área positiva simplemente consideramos el valor de β , siempre y cuando el número tenga área negativa, en este caso es igual a 105,724,552, posteriormente se calcula el área total que se obtiene de la diferencia $\beta - \alpha$, que en este caso es igual a 174,827,411. La razón entre las dos áreas nos arroja un resultado de 60.47% de área positiva dentro del área total de número borroso.

Posteriormente se calcula la media difusa, toda vez que el valor de z es negativo, se emplean únicamente el segundo y tercer elementos de la ecuación para determinar la media de la parte positiva del número borroso, esto equivale a:

$$E(A+) = \alpha + \frac{\beta - \alpha}{6} = 9,280,977 + 29,137,902 = 38,418,879$$

Finalmente se pondera la media difusa de la parte positiva del numero borroso por el porcentaje de área positiva y se obtiene que el valor de la opción real de contracción calculado por el método de Collan-Mezei-Fullér es de \$23,233,255.35, valor que se aproxima a los \$23,636,857.47 calculados empleando el modelo binomial. Cabe aclarar que en este caso se buscaron deliberadamente factores de contracción que en los diversos escenarios tuvieran en promedio un efecto similar a la contracción descrita en el modelo binomial, toda vez que el método de Collan-Mezei-Fullér permite considerar distintos escenarios de contracción en forma simultánea, por lo que el resultado de este método y el modelo binomial no necesariamente coincidirán dependiendo de los supuestos de las proyecciones.

6.8 Opción real de Expansión empleando el modelo de Collan-Mezei-Fullér.

El cálculo del valor de la opción real de expansión se realiza de manera similar al de las opciones reales anteriores, sin embargo y al igual que con las opciones reales previamente analizadas, la principal diferencia radica en la proyección de escenarios de costos e ingresos, ya que en el caso de la opción de expansión se debe contemplar incrementos en costos derivados de la expansión tanto para implementar el proyecto como en la operación del mismo, adicionalmente es necesario considerar el aumento en los ingresos derivados de una mayor capacidad de la planta por lo que existe un impacto tanto en escenarios de costos como de ingresos, a continuación se proyectan los escenarios respectivos.

A. Generar distintos escenarios de costos e ingresos del proyecto.

Tabla 51. Escenarios de costos opción real de expansión.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alto | 53,245,153.00 | 8,324,397.00 | 9,546,105.49 | 10,301,425.08 | 25,093,909.61 | 28,532,298.60 | 33,066,605.86 | 37,509,251.86 | 34,890,968.91 | 37,153,898.34 | 34,986,223.77 |
| Esperado | 53,245,153.00 | 5,117,077.90 | 5,836,884.39 | 6,801,425.08 | 7,093,909.61 | 8,825,838.88 | 29,146,624.10 | 32,256,476.30 | 30,423,678.24 | 32,007,728.84 | 30,490,356.64 |
| Bajo | 53,245,153.00 | 3,024,397.00 | 3,546,105.49 | 3,801,425.08 | 5,093,909.61 | 8,532,298.60 | 13,066,605.86 | 17,509,251.86 | 14,890,968.91 | 17,153,898.34 | 19,986,223.77 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52. Escenarios de ingresos opción real de expansión.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alto | - | 29,980,169.80 | 28,142,250.78 | 35,438,642.16 | 36,349,493.22 | 75,741,473.76 | 88,385,903.24 | 97,885,666.60 | 100,124,974.48 | 103,600,179.68 | 142,576,065.28 |
| Esperado | - | 14,990,084.90 | 15,571,125.39 | 18,719,321.08 | 22,174,746.61 | 36,870,736.88 | 48,141,625.65 | 53,793,968.29 | 57,273,108.03 | 63,574,119.49 | 80,613,083.41 |
| Bajo | - | 8,414,542.95 | 9,552,294.20 | 10,853,795.97 | 8,139,797.29 | 16,296,589.50 | 17,754,361.30 | 25,154,266.64 | 24,449,989.79 | 28,240,071.87 | 55,030,426.11 |

Fuente: Elaboración propia

Al igual que con las opciones anteriores se proyectan tres escenarios de costos (alto, esperado y bajo), y tres escenarios de ingresos (alto, esperado y bajo), pero a diferencia de proyecciones anteriores, en los escenarios de costos se contempla un escenario sin expansión (costos bajos), y dos escenarios con aumento en costos asociados a la expansión, de manera similar se proyectan los escenarios de ingresos estimando en los escenarios donde se presenta la expansión incrementos asociados a la mayor capacidad de producción, pero también efectos asociados al respectivo incremento en costos operativos.

B. Descontar los costos y los ingresos a valor presente.

Tabla 53. Escenarios de costos a valor presente opción real de expansión.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VP Alto | 53,245,153.00 | 7,816,335.21 | 8,416,412.52 | 8,528,025.40 | 19,506,075.38 | 20,825,177.97 | 22,661,673.19 | 24,137,436.68 | 21,082,211.58 | 21,079,384.15 | 18,638,072.29 |
| VP Esperado | 53,245,153.00 | 4,804,767.98 | 5,146,143.30 | 5,630,553.58 | 5,514,259.74 | 6,441,810.66 | 19,975,175.94 | 20,757,242.97 | 18,382,935.24 | 18,159,688.27 | 16,243,006.81 |
| VP Bajo | 53,245,153.00 | 2,839,809.39 | 3,126,456.82 | 3,147,006.30 | 3,959,613.56 | 6,227,561.24 | 8,954,990.81 | 11,267,312.39 | 8,997,587.83 | 9,732,319.59 | 10,647,181.75 |

Fuente: Elaboración propia

VALORACIÓN DE OPCIONES REALES CON LÓGICA DIFUSA

Tabla 54. Escenarios de ingresos a valor presente opción real de expansión.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VP Alto | - | 26,069,712.87 | 21,279,584.71 | 23,301,482.48 | 20,782,940.72 | 37,656,898.65 | 38,211,665.06 | 36,798,847.75 | 32,731,031.76 | 29,449,636.96 | 35,242,622.80 |
| VP Esperado | - | 13,034,856.43 | 11,774,007.86 | 12,308,257.47 | 12,678,483.34 | 18,331,272.59 | 20,812,953.28 | 20,223,145.20 | 18,722,680.61 | 18,071,732.55 | 19,926,321.33 |
| VP Bajo | - | 7,316,993.87 | 7,222,906.76 | 7,136,547.03 | 4,653,955.52 | 8,102,285.17 | 7,675,700.34 | 9,456,420.54 | 7,992,745.03 | 8,027,590.95 | 13,602,679.71 |

Fuente: Elaboración propia

El segundo paso se desarrolla igual que con las opciones reales anteriores, descontando a valor presente los costos e ingresos en cada uno de los escenarios proyectados empleando las tasas de descuento respectivas.

C. Acumular el valor presente de los costos y los ingresos para cada escenario.

Tabla 55. Escenarios de costos acumulados opción real de expansión.

| | COSTOS DE INVERSIÓN | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| ΣVP Alto | 53,245,153.00 | 61,061,488.21 | 69,477,900.73 | 78,005,926.13 | 97,512,001.51 | 118,337,179.48 | 140,998,852.66 | 165,136,289.35 | 186,218,500.93 | 207,297,885.08 | 225,935,957.37 |
| ΣVP Esperado | 53,245,153.00 | 58,049,920.98 | 63,196,064.29 | 68,826,617.86 | 74,340,877.61 | 80,782,688.27 | 100,757,864.21 | 121,515,107.18 | 139,898,042.42 | 158,057,730.69 | 174,300,737.50 |
| ΣVP Bajo | 53,245,153.00 | 56,084,962.39 | 59,211,419.21 | 62,358,425.51 | 66,318,039.07 | 72,545,600.31 | 81,500,591.12 | 92,767,903.51 | 101,765,491.34 | 111,497,810.94 | 122,144,992.69 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56. Escenarios de ingresos acumulados opción real de expansión.

| | INGRESOS DERIVADOS DEL PROYECTO | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| ΣVP Alto | - | 26,069,712.87 | 47,349,297.58 | 70,650,780.06 | 91,433,720.78 | 129,090,619.43 | 167,302,284.49 | 204,101,132.24 | 236,832,164.01 | 266,281,800.97 | 301,524,423.77 |
| ΣVP Esperado | - | 13,034,856.43 | 24,808,864.29 | 37,117,121.76 | 49,795,605.11 | 68,126,877.70 | 88,939,830.98 | 109,162,976.18 | 127,885,656.79 | 145,957,389.34 | 165,883,710.67 |
| ΣVP Bajo | - | 7,316,993.87 | 14,539,900.63 | 21,676,447.67 | 26,330,403.18 | 34,432,688.35 | 42,108,388.69 | 51,564,809.23 | 59,557,554.26 | 67,585,145.21 | 81,187,824.91 |

Fuente: Elaboración propia

El tercer paso, que implica realizar la sumatoria de los valores por cada escenario (alto, esperado y bajo) acumulándolos desde el año cero hasta el año diez, se realiza de manera similar a como se realizó con las opciones reales anteriores.

D. Calcular valor presente neto difuso por escenario.

Tabla 57. VPND por escenario opción real de expansión.

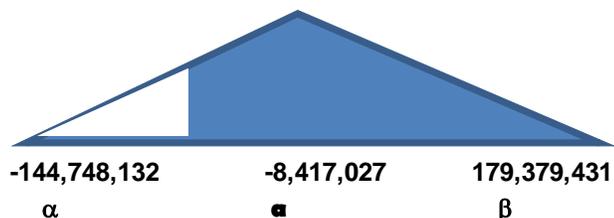
| | VALOR PRESENTE NETO DIFUSO | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | 0-1 | 0-2 | 0-3 | 0-4 | 0-5 | 0-6 | 0-7 | 0-8 | 0-9 | 0-10 |
| VPND Alto | - 53,245,153.00 - | 30,015,249.52 | - 11,862,121.63 | 8,292,354.55 | 25,115,681.71 | 56,545,019.12 | 85,801,693.37 | 111,333,228.73 | 135,066,672.66 | 154,783,990.03 | 179,379,431.07 |
| VPND Esperado | - 53,245,153.00 - | 45,015,064.55 | - 38,387,200.00 | - 31,709,496.10 | - 24,545,272.50 | - 12,655,810.58 | - 11,818,033.24 | - 12,352,131.00 | - 12,012,385.63 | - 12,100,341.35 | - 8,417,026.83 |
| VPND Bajo | - 53,245,153.00 - | 53,744,494.34 | - 54,938,000.10 | - 56,329,478.46 | - 71,181,598.32 | - 83,904,491.13 | - 98,890,463.98 | - 113,571,480.12 | - 126,660,946.67 | - 139,712,739.87 | - 144,748,132.46 |

Fuente: Elaboración propia

El cuarto paso consiste en obtener el valor medio difuso en tres escenarios (alto, esperado y bajo), de manera similar a como se realizó con las opciones reales anteriores.

E. Relacionar el valor presente neto difuso de cada escenario con un número borroso.

Figura 41. Relación de VPND opción de expansión y un número borroso.



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa la relación entre los valores presentes netos difusos obtenidos y un número borroso. El valor presente neto difuso alto toma el valor de β , el valor presente neto difuso esperado toma el valor de α y el valor presente neto difuso bajo toma el valor de α .

F. Calcular el valor de la opción real.

El valor de la opción real está dado por la razón del área positiva del número borroso entre el área total del mismo. Para calcular el área positiva simplemente consideramos el valor de β , siempre y cuando el número tenga área negativa, en este caso es igual a 179,379,431, posteriormente se calcula el área total que se obtiene de la diferencia $\beta - \alpha$, que en este caso es igual a 324,127,564. La razón entre las dos áreas nos arroja un resultado de 55.34% de área positiva dentro del área total del número borroso.

Posteriormente se calcula la media difusa, toda vez que el valor de z es negativo, se emplean únicamente el segundo y tercer elementos de la ecuación para determinar la media de la parte positiva del número borroso, esto equivale a:

$$E(A+) = \alpha + \frac{\beta - \alpha}{6} = -8,417,027 + 54,021,261 = 45,604,234$$

Finalmente se pondera la media difusa de la parte positiva del número borroso por el porcentaje de área positiva y se obtiene que el valor de la opción real de expansión calculado por el método de Collan-Mezei-Fullér es de \$25,238,401.25, valor que se aproxima a los \$25,206,683.13 calculados empleando el modelo binomial, cabe aclarar que, al igual que con opciones anteriores, se buscaron factores de expansión que en los diversos escenarios tuvieran en promedio un efecto similar a la expansión descrita en el modelo binomial.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La investigación desarrollada permite establecer que la aplicación de la metodología de valuación de las opciones reales implícitas en los proyectos de inversión para la producción de etanol en México hace posible asignar un valor a las alternativas que este enfoque nos presenta, permitiendo detectar oportunidades de rentabilidad en dichos proyectos que los métodos convencionales de evaluación no consideran, de tal manera que se valida la hipótesis planteada.

En el transcurso de la investigación se presentó y aplicó el enfoque de valoración de opciones reales logrando demostrar que éstas capturan el valor inherente a las opciones presentes en los proyectos de inversión, particularmente en el capítulo cinco al realizar la evaluación financiera del proyecto de inversión para la generación de etanol en México empleando el enfoque de opciones reales. Como se observa en los resultados, en cada una de las opciones se logró capturar un valor adicional que el inversionista únicamente reconocería de realizar la evaluación financiera del proyecto de inversión a través del enfoque de las opciones reales. Si el inversionista únicamente decide emplear los métodos convencionales de evaluación financiera estaría subvalorando el proyecto de inversión y por lo tanto correría el riesgo de rechazar proyectos rentables por las opciones que incorporan.

Es importante señalar que cuando el valor de la opción real es bajo, es síntoma de que el potencial de ese proyecto también es bajo, pues mientras más certeza existe en relación al proyecto, el potencial de que éste otorgue ganancias mayores a las proyectadas es menor. Por el contrario si el valor de la opción real es alto el potencial de crecimiento del proyecto también lo es, pues la incertidumbre y el riesgo que van asociados al proyecto generan que la posibilidad de obtener ganancias superiores a las esperadas se incremente.

En relación a las opciones reales analizadas, se destaca que el caso de la opción real de entrada presentada en este trabajo es un caso especial de la opción real de esperar, solamente se puede ejercer antes de llevar a cabo la inversión inicial para el desarrollo de un proyecto totalmente nuevo. El valor de esta opción tiende a capturar el valor de otras opciones presentes dentro del proyecto, por lo que podría ser vista como una medida aproximada del valor de la flexibilidad del proyecto. No obstante que en la literatura no se suele aislar esta opción real, en este trabajo se buscó destacar a esta opción en forma individual por la conveniencia que representa para el inversionista al momento de tomar la decisión de aceptar o rechazar, pues tan sólo con conocer el valor de esta opción podría darse una idea del potencial adicional del proyecto.

También fue presentado el ejemplo de una opción real “en” proyecto que fueron concebidas y desarrolladas originalmente por el catedrático de MIT Richard de Neufville, este tipo de opción que tradicionalmente se consideraba como parte de un conjunto de opciones de elección debe ser valorada en forma independiente, pues a diferencia de las opciones de elección estándar que dependen de variables exógenas este tipo de opción depende exclusivamente de variables endógenas y su capacidad

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

para realzar el valor de un proyecto es relativamente nuevo y susceptible de ser estudiado a mayor profundidad en investigaciones posteriores.

Para la evaluación del caso de estudio se desarrollaron y presentaron distintos casos de las opciones reales avanzadas como las opciones compuestas, las opciones arcoíris y las opciones con volatilidad cambiante. Este tipo de opciones pueden parecer inusuales, sin embargo como se observa en los ejemplos desarrollados, se pueden presentar fácilmente en el transcurso de la evaluación de cualquier proyecto de inversión.

Los resultados obtenidos en la valoración de opciones reales a través del modelo binomial comparados al modelo de Collan, Mezei y Fullér sugieren que existe cierta equivalencia entre ambos, aunque es importante destacar que se requiere que las proyecciones de costos e ingresos guarden un comportamiento similar al que guardaría el modelo binomial. Para un análisis posterior resulta interesante realizar un análisis comparativo entre los resultados del modelo empleando árboles trinomiales y el modelo de Collan, Mezei y Fullér.

El método desarrollado por Collan, Mezei y Fullér que emplea lógica difusa para asociar las proyecciones de costos e ingresos en un proyecto de inversión para la valoración de opciones reales puede ser un camino interesante en el desarrollo de nuevas metodologías que permitan no sólo valorar las opciones reales, sino facilitar su adopción por los practicantes, al relacionar las actividades tradicionales para la valoración de un proyecto de inversión con la técnica requerida para valuar opciones reales. Es ahí donde radica la importancia que tiene profundizar en la investigación del método de Collan, Mezei y Fullér, así como en otros métodos similares que directamente permitan facilitar la transición de las técnicas convencionales para la valoración de proyectos de inversión a las técnicas para la valoración de las opciones reales.

Con relación al caso de estudio se destaca que debido a la poca experiencia que se tiene en el medio nacional en este tipo de proyectos se recomienda trabajar bajo el supuesto que la principal fuente de volatilidad en el proyecto es el precio del etanol, sin embargo, y toda vez que no se manejan precios oficiales de un mercado organizado de etanol mexicano, se puede emplear como valores próximos el precio oficial del etanol en los EE.UU.

Si bien la finalidad de esta investigación no es fomentar la inversión privada ni del Estado en energías renovables, sí cabe destacar que la evaluación financiera de este tipo de proyectos analizados bajo un enfoque convencional nos podría llevar a concluir erróneamente que la inversión en energías renovables es poco rentable y que éste rendimiento no corresponde al nivel de riesgo e incertidumbre de éste tipo de proyectos. El análisis desarrollado en esta investigación nos muestra cómo el método de las opciones reales provee de elementos susceptibles de análisis estratégico a los encargados de tomar la decisión de inversión, facilitando el proceso de generación de escenarios para proyectar con mayor facilidad las condiciones en las que se realiza el

valor del proyecto y resulta conveniente invertir. Por lo que la decisión de invertir se sustenta en un análisis más robusto que el previsto originalmente en la evaluación financiera convencional y se podría justificar la inversión en proyectos para la generación de energías renovables que hoy en día son rechazados al ser evaluados empleando un enfoque convencional.

El modelo binomial empleado para la valuación de las opciones reales en el caso de estudio puede ser replicado fácilmente por los practicantes interesados en hacerlo, si bien es cierto que se requiere tener la confianza de que se trabaja con los insumos adecuados para que este sea válido, esta confianza proviene de la experiencia del propio practicante, a medida que el practicante se familiarice con el modelo y desarrolle la sensibilidad necesaria para seleccionar los insumos le será posible valorar con mayor precisión el valor de la opcionalidad inherente al proyecto.

Si se desea adentrar en las aplicaciones prácticas del enfoque de las opciones reales es recomendable comenzar por sensibilizar a los encargados de realizar el proyecto, así como aquellos encargados de decidir sobre la aceptación o rechazo del mismo sobre las ventajas del método en relación a los criterios convencionales para la evaluación financiera, destacando que estos también resultan de utilidad, pero que forman parte integral de un proceso de evaluación mucho más robusto que debe considerar los aspectos positivos que el riesgo y la incertidumbre añaden a un proyecto de inversión y no únicamente los aspectos negativos.

En el caso de las personas u organizaciones que realizan esta actividad de manera rutinaria es importante que se considere que, independientemente el proyecto a analizar y el modelo que se decida emplear para hacerlo, la calidad de los insumos es fundamental. Es necesario construir bases de datos históricas que sean de utilidad, no sólo para evaluar financieramente el proyecto de inversión, sino en términos más generales para estimar la sensibilidad del proyecto a las condiciones cambiantes del entorno y realizar un análisis retrospectivo sobre las decisiones tomadas y sus efectos.

Finalmente, a manera de conclusión general, se desea destacar que las opciones reales son una herramienta poderosa para capturar el valor de la flexibilidad y la incertidumbre en los proyectos de inversión, la adopción que se vaya logrando de éstas en el futuro dependerá fundamentalmente de entender que éstas forman parte complementaria que permiten analizar aspectos que el día de hoy no se cubren a través de los métodos convencionales de evaluación financiera. Adicionalmente es necesario continuar la investigación sobre el enfoque de valoración de opciones reales en dos sentidos: el primero para desarrollar métodos de valoración que capturen adecuadamente el valor de la opción y el segundo, que va muy ligado con el anterior, en el sentido de que estos métodos preferiblemente deben funcionar en forma armónica con los procedimientos para la evaluación financiera de los proyectos de inversión empleados en la actualidad.

BIBLIOGRAFÍA.

- ABERDEIN, D. A. "Incorporating risk into power station investment decisions in South Africa," Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA., 1994
- AGUILAR-GONZÁLEZ, J.L. "Biodiesel, ejemplo notable de combustible alternativo", *Energía a Debate*, México, 2004.
- AMRAM, M. y N. KULATILAKA, "Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World". Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts, 1999.
- BESLEY S.y E. BRIGHAM, "Fundamentos de Administración Financiera", McGraw-Hill, 2001.
- BIERMAN, H. J. y S. SMIDT, "The Capital Budgeting Decision", Macmillan Publishing Co. Inc., Nueva York, 1988.
- BJERKSUND, P. y S. EKERN, "Managing Investment Opportunities Under Price Uncertainty", *Financial Management*, otoño, pp. 65-83., 1990.
- BLACK, F. y M. SCHOLES, "The Pricing of Options and Corporate Liabilities", *J. of Political Economy*, 81(3), pp. 637-654, 1973.
- BODILY, S y M. DEL BUONO, "Risk and Reward at the speed of Light: A New Electricity Price Model," *Energy Power Risk Management*, Septiembre, pp. 66 –71, 2002.
- CARLSSON, C y P. MAJLENDER., "On Fuzzy Real Option Valuation.", Novena conferencia anual sobre opciones reales, Paris, Francia, 2005.
- CARLSSON, C. y R. FULLÉR, "A Fuzzy Approach to Real Option Valuation.", *Fuzzy Sets and Systems*, 139 pp. 297-312, 2003.
- CHEN, T., J. ZHANG, S. LIN y B. YU, "Fuzzy Real Option Analysis for IT Investment in Nuclear Power Station". Conferencia Internacional en Ciencias de la Computación 2007.
- CHERIAN, J. A., J. PATEL y I. KHRIPKO, "Optimal extraction of nonrenewable resources when costs cumulate, in Project Flexibility, Agency, and Competition: New Developments in the Theory and Application of Real Options", Oxford University Press, pp. 224-253, 2000.
- COLLAN, M., CARLSSON, C y P. MAJLENDER, "Fuzzy Black and Scholes Real Option Pricing", *Journal of Decision Systems*, 12 pp. 391-416, 2003.
- COLLAN, M., R. FULLÉR, y J. MEZEI, "Fuzzy Pay-Off Method for Real Option Valuation", *Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences*, 2009.
- COPELAND, T.E. y V. ANTIKAROV, "Real Options - A Practitioner's Guide", TEXERE, Nueva York, NY, 2001.
- COPELAND T. E. y P.T. KEENAN, "How much is flexibility worth?" *The McKinsey Quarterly*, 2, pp. 38 – 49, 1998.
- COPELAND, T.E. y P.T. KEENAN, "Making Real Options Real," *The McKinsey Quarterly*, 3, pp. 128 – 141, 1998.
- COX, J., S. ROSS, y M. RUBINSTEIN, "Option Pricing: A Simplified Approach," *Journal of Financial Economics*, 7, pp. 263 – 384, 1979.
- DATAR, V. y S. MATHEWS, "A Practical Method for Valuing Real Options: The Boeing Approach". *Journal of Applied Corporate Finance*, 19 pp.95-104, 2007.

- DE NEUFVILLE, R. y A. ODoni, "Airport Systems Planning, Design, and Management", McGraw-Hill, New York, NY, 2003.
- DE NEUFVILLE, R., S. SCHOLTES, y T. WANG, "Valuing Real Options by Spreadsheet: Parking Garage Case Example," *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, 2005.
- DENG, S., "Valuation of Investment and the Opportunity to Invest in Power Generation Assets with Spikes in Power Prices", *Managerial Finance*, 31 (6), pp. 95-115, 2005.
- DIXIT, A. "Investment and Hysteresis", *Journal of Economic Perspectives*, 6(1), pp. 107-132, 1992.
- DIXIT, A. y R. PINDYCK, "The options Approach to Capital Investment", *Harvard Business Review*, Mayo –Junio, pp. 105-115, 1995
- DIXIT, A. y R. PINDYCK, "Investment under Uncertainty United States of America", Princeton University Press, 1994.
- GILROY, B.M. y E. LUKAS, "The Choice between Greenfield Investment and Cross-Border Acquisition: A Real Option Approach", *Quarterly Review of Economics and Finance*, Vol. 46, No. 3, pp. 447-465, 2006.
- GITTINGER, J.P. "Economic analysis of agricultural projects United States of America", Banco Mundial, 1972.
- GOLDBERG, R y J. READ, "Dealing with a Price-Spike World," *Energy and Power Risk Management*, Mayo, pp. 39 – 41, 2000.
- GRENADIER, S., "The Strategic Exercise of Options: Development Cascades and Overbuilding in Real Estate Markets", *Journal of Finance* 51, no. 5 pp. 1653-1679, 1996.
- GUILLÉN-SOLIS, O., "Energías renovables: una perspectiva ingenieril", Trillas, México, 2004.
- HLOUSKOVA, J., M. JECKLE y S. KOSSMEIER, "Real Options Models and Electricity Portfolio Management", Sexta Conferencia anual sobre opciones reales, Paphos, Chipre, 2002.
- HULL, J.C., "Options, Futures, and Other Derivatives", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ., 1999.
- INGERSOLL, J.E. y S.A. ROSS, "Waiting to Invest: Investment and Uncertainty", *Journal of Business*, Enero pp. 1-30, 1992.
- IWAI, N., R.D. EMERSON y L.M WALTERS, "Labor Cost and Technology Adoption: Real Options Approach for the Case of Sugarcane Mechanization in Florida," Conferencia Anual de la Asociación Económica del Sur, Dallas, Texas, 2008.
- JUAN, C., F. OLMOS, J. PEREZ y T. CASASUS, "Optimal Investment Management of Harbor Infrastructure – An Options Viewpoint," 6a Conferencia Anual sobre Opciones Reales, Paphos, Chipre, 2002.
- KODUKULA, P. y C. PAPADUDESU, "Project valuation using real options.", J.Ross Publishing, 2006.
- KOEKEBAKKER, S. y S. SODAL, "The value of an Operating Electricity Production Unit", Sexta Conferencia anual sobre opciones reales, Paphos, Chipre, 2002.
- KULATILAKA, N., "The Value of Flexibility: The Case of a Dual-Fuel Industrial Steam Boiler," *Financial Management*, Otoño, pp. 271 – 280, 1993.
- LAPASSADE, G. "La bioenergía", Gedisa, Barcelona, 1978.

BIBLIOGRAFÍA

- LUEHRMAN, T. (1998) "Investment Opportunities as Real Options: Getting started on the Numbers", Harvard Business Review, Julio-Agosto, pp.51-67, 1998.
- MASERA-CERUTTI, O., *et al*, "Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México", Secretaría de Energía/ Banco Interamericano de Desarrollo/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, México,2004-2006.
- MATHEWS, S. y J. Salmon, "Business Engineering: A Practical Approach to Valuing High-Risk, High-Return Projects Using Real Options", P. Gray Editores, 2007.
- MERTON, R., "Theory of Rational Option Pricing.", Bell J. of Economics and Management Science, Primavera, 1973, pp.141-183.
- MORALES CASTRO, J.A. y A. *MORALES CASTRO*, "*Proyectos de Inversión en la Práctica Formulación y Evaluación*", Editorial Gasca, México, 2003.
- MUN, J., "Real Options Analysis Course", Wiley Finance, 2003.
- MUZZIOLI, S. y C. Torricelli, "A model for pricing an option with a fuzzy payoff". Fuzzy Economics Review, 6, 2000.
- MYERS, S.C., "Determinants of Corporate Borrowing", Journal of Financial Economics, Vol. 5, No. 2, Noviembre, pp. 147-175, 1977.
- MYERS, S.C., "Finance Theory and Financial Strategy", Midland Corporate Finance Journal, Primavera, pp. 6-13, 1987.
- NÄSÄKKÄLÄ, E. y S. Fleten, "Flexibility and Technology Choice in Gas Fired Power Plant Investments", Review of Financial Economics, Vol. 14, No. 3-4, pp. 371-393, 2005.
- NGUYEN, H.T. y E. Walker, "*First course in fuzzy logic*",Chapman & Hall/CRC Press, 2a edición, 1999.
- NOVAK, V., "*Fuzzy sets and their applications*", Bristol and Philadelphia: Adam Hilger, 1989.
- OPTIONS CLEARING CORPORATION, "Characteristics and risks of standardized options" OCC Press, Mayo 2009.
- PADDOCK, J., D. SIEGEL y J. SMITH. " Option Valuation of Claims on Real Assets: The Case of Offshore Petroleum Leases Quarterly", Journal of Economics, Agosto pp. 479-508. 1987
- PASCALÉ, R., "Decisiones financieras", Ediciones Macchi, 3ra. Edición, Buenos Aires 1998.
- PINDYCK, R.S., "Investment of Uncertain Cost", Journal of Financial Economics, Agosto, 34, pp. 53-76, 1993.
- REILLY, F. y K. BROWN, "Investment Analysis and Portfolio Management", Prentice Hall, 2005.
- ROCHA, K., A. MOREIRA y P. DAVID, "Investment in Thermopower Generation: A Real Option Approach for the New Brazilian Electrical Power Regulation", Sexta Conferencia annual sobre opciones reales, Paphos, Chipre, 2002.
- ROSS, S., R. WESTERFIELD, J. JAFFE y G. ROBERTS, "Corporate Finance", McGraw-Hill Ryerson, 3a Edición, Canadá, 2003.
- SIEGEL, D.R., J. SMITH, y J.L. PADDOCK, "Valuing Offshore Oil Properties with Option Pricing Models", Midland Corporate Finance Journal, Primavera, pp. 22-30, 1987.

- SCHWARTZ, E.S. y L. TRIGEORGIS, "Real Options and Investment under Uncertainty", MIT Press, Cambridge, MA, 2001.
- TAUER, L., 2006. "When to Get In and Out of Dairy Farming: A Real Option Analysis," Conferencia Annual de la Asociación de Agricultura y Economía Aplicada 2006.
- TOLGA, C. y C. KAHRAMAN, "Fuzzy Multiattribute Evaluation of R&D Projects Using a Real Options Valuation Model". International Journal of Intelligent Systems, 23 pp. 1153-1176, 2008.
- TRIGEORGIS, L. y S.P. MASON, "Valuing Managerial Flexibility," Midland Corporate Finance Journal, Primavera, pp. 202 – 224, 1987.
- TRIGEORGIS, L. "The Nature of Options Interactions and the Valuation of Investments with Multiple Options," Journal of Financial and Quantitative Analysis, Primavera, pp. 1 – 20, 1993.
- TRIGEORGIS, L. "Real Options and Interactions with Financial Flexibility," Financial Management, Otoño, pp. 202 – 224, 1993.
- TRIGEORGIS, L. "Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation", MIT Press, Cambridge, MA. 1996
- TUFANO, P., y A. MOEL, "Bidding for the Antamina Mine – Valuation and Incentives in a Real Option Context," Project Flexibility, Agency, and Competition, pp. 128 – 150. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido, 2000.
- TZOURAMANI, I. y K. MATTAS, "Employing real options methodology in agricultural investments: the case of greenhouse construction," Applied Economics Letters, Taylor and Francis Journals, vol. 11(6), pp. 355-359, Mayo, 2004
- VEDENOV, D., J.A. DUFFIELD y M.E. WETZSTEIN, "Entry of Alternative Fuels in a Volatile U.S. Gasoline Market." Journal of Agricultural and Resource Economics 31pp. 1–13, 2006.
- WANG, T. "Analysis of Real Options in Hydropower Construction Projects – A Case Study in China," Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA., 2003.
- YOSHIDA, Y., "The valuation of European options in uncertain environment". European Journal of Operational Research, 145 pp. 221-229, 2003.
- ZADEH, L.A., "*Fuzzy logic technology and applications*", IEEE Publications, 1994.
- ZADEH, L. A., "Fuzzy Sets". Information and Control, 8 pp. 338-353, 1965.
- ZMESKAL, Z., "Application of the fuzzy-stochastic methodology to appraising the firm value as a European call option. European Journal of Operational Research, 135 pp. 303-310, 2001.

BIBLIOGRAFÍA

Sitios relevantes de consulta sobre opciones reales en Internet:

- Sitio del profesor Marco Días de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro:

<http://www.puc-rio.br/marco.ind/>

- Sitio del Real Options Group, dirigido por el profesor Lenos Trigeorgis:

www.realoptions.org

- Sitio del profesor Robert Pindyck:

<http://web.mit.edu/rpindyck/www/>

- Sitio de la firma de consultoría dirigida por el Dr. Jonathan Mun:

www.realoptionsvaluation.com

ANEXO I. Determinación de la tasa libre de riesgo.

La finalidad de este anexo es presentar el método empleado para seleccionar la tasa libre de riesgo bajo la cual se valoraron las opciones reales en el transcurso de esta investigación. Estimar la tasa libre de riesgo no debe representar dificultad para el practicante, sin embargo debe considerar que la tasa libre de riesgo apropiada para valorar las opciones reales es aquella que se empata en su vencimiento con el periodo de vida del proyecto. Es decir, la tasa libre de riesgo a emplear debe ser aquella que en el mercado el Gobierno Federal está dispuesto a pagar para hacerse de recursos a través de un instrumento con el mismo periodo de vida que el proyecto.

El enfoque para determinar la tasa libre de riesgo en esta investigación consistió en emplear los valores de la curva Nominal Libre de Riesgo del día 9 de julio de 2009 del Proveedor de Precios Valuación Operativa y Referencias de Mercado, S.A. de C.V. (VALMER). La curva está compuesta por la tasa de CETES para todo plazo desde un día hasta quince años. Atendiendo al criterio mencionado en el párrafo anterior, el valor apropiado de tasa libre de riesgo a emplear para cálculos subsecuentes corresponde al de la tasa nominal libre de riesgo de 3,640, sin embargo es necesario realizar algunas precisiones antes de proceder.

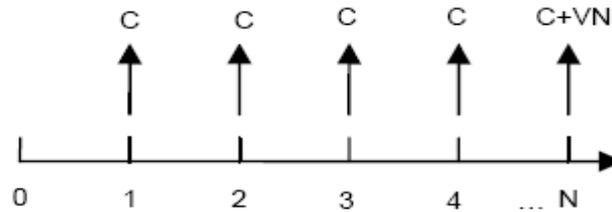
La primera precisión a considerar consiste en la metodología empleada por VALMER para determinar la tasa libre de riesgo en diferentes periodos. Como es sabido, en el mercado mexicano el plazo mayor de los bonos cupón cero es de un año y resulta necesario extender la estructura temporal de tasas a plazos mayores. Para ello, VALMER utiliza el método *Bootstrapping* que consiste en estimar de manera recursiva niveles de tasas cero a partir de la información de las tasas de rendimiento al vencimiento (*Yield to Maturity* o tasas *yield*) de las que se tiene información a largo plazo.

El concepto teórico principal de este método, es que resulta equivalente la valuación del bono con la tasa *yield* de mercado que con la tasa cero obtenida por este modelo.

El *Bootstrapping* involucra la valuación a mercado de una serie de bonos que pagan una tasa cupón fija. Estos bonos se negocian con tasas *Yield to Maturity*, es decir, son tasas de interés que tienen un plazo de composición igual al plazo de pago de cupón. Los bonos cupón cero tienen tasas de interés simples, por lo que no son comparables con las tasas de rendimiento de los bonos cuponados, que son tasas de interés compuestas.

Supongamos que tenemos un bono con la estructura que se representa en la siguiente figura:

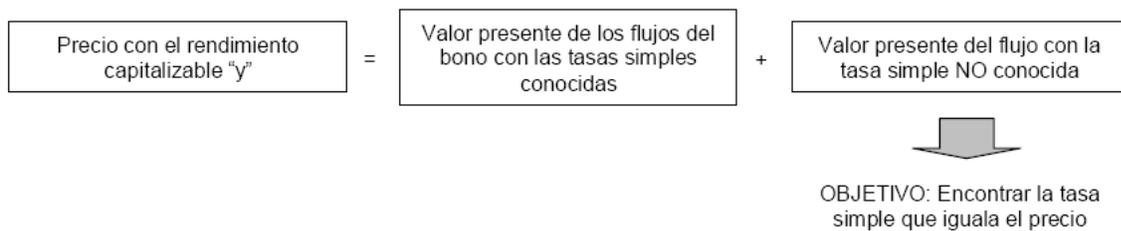
ANEXO I



Fuente: VALMER

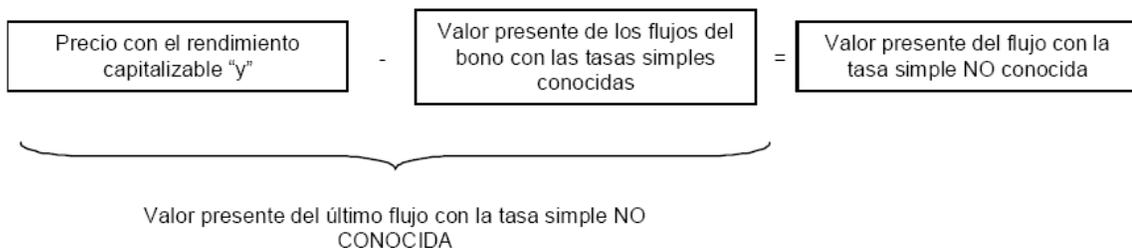
Supongamos también que este bono tiene un rendimiento “ y ”, el cual es una tasa de interés capitalizable cada cierto número de días (Plazo), con la que es posible calcular un precio P_y .

Por otro lado, supongamos que se cuentan con las tasas de interés simples hasta el periodo $N-1$, provenientes de las observaciones de los precios de los bonos cupón cero, con estas tasas es posible calcular un “precio parcial” del bono, es decir, el valor presente de los flujos hasta el periodo $N-1$ calculados con las tasas simples, dejando como incógnita el valor presente del último flujo en el tiempo N . Lo anterior es expresado en la siguiente figura:



Fuente: VALMER

Sin embargo, se conoce el valor del último flujo y el tiempo en que se realizará este flujo, por lo cual la incógnita sólo es la tasa de interés simple que iguala el precio del bono calculado con la tasa de interés compuesta “ y ” y con las tasas de interés simples conocidas. Para determinar la última tasa simple, se realizan las operaciones algebraicas necesarias para encontrar dicha tasa. La expresión anterior cambia a la siguiente:



Fuente: VALMER

Para expresar matemáticamente la metodología descrita anteriormente es necesario utilizar la siguiente notación:

P_Y : Precio del bono

N : Número total de flujos

i : Índice que hace referencia al número de flujos. Toma valores de 1 a N

y : Tasa de rendimiento anualizada (*yield*)

p : Periodo de cupón, es decir, el número de días entre un flujo y otro

VN : Valor Nominal

TC : Tasa Cupón

El flujo de efectivo f_i , es calculado de la siguiente forma:

$$f_i = VN \left(\frac{pTC}{360} \right)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N - 1$$

$$f_N = VN \left(\frac{pTC}{360} \right) + VN$$

De esta manera, el precio del bono está dado por:

$$P_Y = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{\left(1 + y \frac{p}{360}\right)^i}$$

El precio P_S , es el precio calculado con las tasas de interés simple. En este caso para cada flujo de efectivo i se tiene una tasa simple (cupón cero) r_i .

$$P_S = \frac{f_1}{\left(1 + r_1 \frac{p}{360}\right)} + \frac{f_2}{\left(1 + r_2 \frac{2p}{360}\right)} + \dots + \frac{f_N}{\left(1 + r_N \frac{Np}{360}\right)}$$

Como se mencionó anteriormente, se supone que conocemos la información hasta el periodo $N-1$, por lo que sólo se tiene la incógnita r_N .

Debido a que $P_Y = P_S$, es posible igualar la siguiente expresión:

$$P_Y = \frac{f_1}{\left(1 + r_1 \frac{p}{360}\right)} + \frac{f_2}{\left(1 + r_2 \frac{2p}{360}\right)} + \dots + \frac{f_N}{\left(1 + r_N \frac{Np}{360}\right)}$$

Despejando el último flujo del lado derecho se obtiene:

ANEXO I

$$\frac{f_N}{\left(1 + r_N \frac{Np}{360}\right)} = P_Y - \frac{f_1}{\left(1 + r_1 \frac{p}{360}\right)} - \frac{f_2}{\left(1 + r_2 \frac{2p}{360}\right)} - \dots - \frac{f_{N-1}}{\left(1 + r_{N-1} \frac{(N-1)p}{360}\right)}$$

La expresión a la derecha del signo “=” la denominaremos “A”, ante lo cual la expresión anterior se reduce a:

$$\frac{f_N}{\left(1 + r_N \frac{Np}{360}\right)} = A$$

Y despejando r_N se obtiene:

$$r_N = \left[\left(\frac{f_N}{A} \right) - 1 \right] \frac{360}{Np}$$

Con el procedimiento anterior, la información de tasas de interés simples fue extendida hasta r_N . Este procedimiento puede ser aplicado de manera iterativa para encontrar tasas de interés simples con mayor plazo, evidentemente el límite de información depende del bono con mayor vencimiento. Para el caso en donde se desconozcan más de una de las tasas simples de los últimos flujos, simplemente se harán depender linealmente entre ellas para poder enfocarnos en encontrar la última de ellas, es decir, la de mayor plazo.

A continuación se presenta un ejemplo para la generación de un nodo en la curva nominal libre de riesgo en donde se utilizan los CETES para construir la curva en el corto plazo (hasta un año), y en el largo plazo los bonos de tasa fija nominal conocidos como Bonos M:

Supongamos que las tasas observadas de los CETES son las siguientes:

| Días por Vencer (Plazo) | Tasa |
|-------------------------|-----------|
| 182 | 7.888068% |
| 364 | 8.197406% |

Fuente: VALMER

Por lo que tenemos:

$p = 182$ días

$r_1 = 0.07888068$

$r_2 = 0.08197406$

$r_3 =$ tasa simple que se desea calcular con el proceso

$N = 3$

Los Bonos utilizados para aplicar el modelo de *Bootstrapping* son los Bonos M. Supongamos que existe en el mercado un bono con las siguientes características:

| Días por vencer | Tasa cupón | Precio | Rendimiento |
|-----------------|------------|-----------|-------------|
| 546 | 9.50% | 99.312339 | 10.00% |

Este bono tiene tres flujos, en 182 y 364 pagará cupones de 4.082778 y en 546 días pagará 104.082778, es decir cupón más valor nominal. Por lo que tenemos:

$$f_1=f_2= 4.082778$$

$$f_3= 104.082778$$

Para el caso de N=3, es decir, dos tasas cero conocidas se tiene:

$$A = P_Y - \frac{f_1}{\left(1 + r_1 \frac{p}{360}\right)} - \frac{f_2}{\left(1 + r_2 \frac{2p}{360}\right)}$$

$$r_B = \left[\left(\frac{f_B}{A} \right) - 1 \right] \frac{360}{3p}$$

Al substituir tenemos:

$$A = 99.3123394 - \frac{4.802778}{\left(1 + 0.07888068 \frac{182}{360}\right)} - \frac{4.802778}{\left(1 + 0.08197406 \frac{364}{360}\right)}$$

$$= 90.258575$$

$$r_3 = \left[\left(\frac{104.802778}{90.258575} \right) - 1 \right] \frac{360}{546} = 0.10624568$$

Por lo tanto la tasa simple de un plazo de 546 días es de 10.624568%, así se agrega un nodo a la curva original.

Es común en la aplicación del *Bootstrapping* no se cuente con las observaciones precisas de las tasas para realizar la valuación del bono, o bien, que el bono con vencimientos más cercanos tenga más de un periodo de cupón entre la última observación de los bonos cupón cero y el vencimiento del bono. Para tales casos se supone una interpolación lineal de las tasas cupón cero empleando los plazos y los niveles de tasas cero, entre la última conocida cupón cero y el vencimiento del bono.

ANEXO I

Una vez precisada la metodología empleada por VALMER para la generación de la curva Nominal Libre de Riesgo se establece que para el caso de estudio el valor del nodo de 3,640 días de la curva nominal libre de riesgo el día 9 de julio de 2009 es de 6.717855%. Es aquí donde resulta pertinente realizar la segunda precisión sobre la tasa libre de riesgo empleada para valuar las opciones reales en esta investigación. Se establece que tanto el modelo Black and Scholes como el modelo binomial emplean tasas de descuento continuas, mientras que la tasa observada en la curva Nominal Libre de Riesgo al igual que el resto de las tasas spot son tasas discretas, por lo cual es necesario transformar la tasa de discreta a continua, esto se hace con la siguiente ecuación:

$$r_c = \ln(1 + r_d)$$

Donde r_c es la tasa en tiempo continuo y r_d es la tasa observada en tiempo discreto, al aplicar la ecuación anterior a la tasa del nodo de 3,640 días obtenemos:

$$r_c = \ln(1 + 0.06717855)$$
$$r_c = 6.501830\%$$

Con lo que llegamos a la tasa empleada para la valoración de las opciones reales en el transcurso de la investigación, al obtener una tasa libre de riesgo de 6.50% que se emplea en los diversos modelos expuestos en el trabajo.

ANEXO II. Estimación de la volatilidad.

La volatilidad es uno de los insumos más importantes en la valoración de las opciones, tanto reales como financieras. El objetivo de este anexo es presentar el enfoque empleado para la estimación de la volatilidad en esta investigación.

En un sentido general dentro del esquema de valoración de opciones la volatilidad puede ser vista como la medida de la variabilidad del valor total de un activo determinado en el transcurso de su vida. Representa la incertidumbre asociada con la ganancia (o pérdida) que se puede experimentar de un activo.

Estimar el factor de volatilidad (σ) es, probablemente, el más grande problema al que se enfrentará un practicante al usar los modelos para la valoración de opciones reales. La volatilidad de las opciones financieras, por ejemplo sobre acciones, se estima sin mayores dificultades ya que se tiene acceso con relativa facilidad a la información histórica del valor de una acción en el mercado. Este tipo de información suele ser extraña en la valoración de opciones reales, por lo que se emplean diversos enfoques para tratar de estimar el valor del factor de volatilidad. Algunos de estos enfoques son: Método de Rendimiento Logarítmico de Flujos de Efectivo, Simulaciones Monte Carlo, Enfoque de Proxy de Proyecto, Enfoque de Proxy de Mercado y Enfoque de Supuesto de la Gerencia. A continuación se presentan los diferentes enfoques en forma general y posteriormente se especifica el enfoque empleado para la investigación.

Método de Rendimiento Logarítmico de Flujos de Efectivo.

Este método provee de un factor de volatilidad que se basa en la variabilidad de los mismos flujos de efectivo estimados que se emplean para calcular el valor presente del proyecto; por lo tanto será representativo de la volatilidad del proyecto. Los pasos para su aplicación consisten en:

- Pronóstico de los flujos de efectivo durante la fase productiva del proyecto en intervalos regulares (p.e. flujos de efectivo anuales).
- Calcular los rendimientos relativos a cada intervalo de tiempo comenzando por el segundo periodo al dividir el flujo de efectivo del periodo entre el flujo de efectivo del periodo anterior obteniendo un rendimiento relativo.
- Obtener el logaritmo natural de cada rendimiento relativo.
- Calcular la desviación estándar.

Este método nos presenta algunas ventajas entre las que se destaca la simplicidad del mismo, su validez matemática, y su consistencia con la variabilidad de los flujos de efectivo que fueron empleados para realizar la valuación tradicional del proyecto. Entre sus desventajas se tiene que al tener un flujo de efectivo negativo (pérdida), el rendimiento relativo será negativo, valor para el cual no existe un logaritmo natural produciendo resultados errados y más

ANEXO II

aún, al emplear modelos matemáticos que consideran series de tiempo y/o una tasa constante de crecimiento para pronosticar los flujos de efectivo se puede llegar a conclusiones erróneas sobre el factor de volatilidad, por lo que es recomendable emplear este método bajo reserva y con cautela.

Simulaciones Monte Carlo.

En una simulación Monte Carlo se simulan múltiples perfiles de flujo de efectivo para la vida del proyecto de inversión, y a cada perfil se le calcula un factor de volatilidad que contribuye al valor presente de los flujos de efectivo del proyecto. En este método el proceso se inicia con el practicante obteniendo insumos para realizar pronósticos válidos de flujos de efectivo, para después conducir una cantidad importante de simulaciones y calcula el factor de volatilidad asociado a cada simulación. Los insumos requeridos se obtienen con base en información histórica accesible o bajo supuestos de la gerencia. Si bien múltiples insumos pueden tener un impacto en el valor de un proyecto de inversión solamente algunos de estos insumos tienen un impacto significativo, por lo que el practicante debe discernir a través de pruebas de sensibilidad los insumos que resultan relevantes para determinar el valor del proyecto.

La principal ventaja de este método radica en que permite determinar la distribución del factor de volatilidad, que puede emplearse en otro tipo de análisis, como pruebas de sensibilidad. Como desventaja principal se tiene la cantidad de tiempo y esfuerzo que se requieren para obtener un solo insumo.

Enfoque de Proxy de Proyecto.

Este es un enfoque indirecto para estimar el factor de volatilidad del proyecto. Emplea como valores aproximados (Proxy) a los valores históricos de proyectos similares. Para considerar que un proyecto es Proxy de otro deben considerarse un mercado objetivo similar, así como flujos de efectivo parecidos (en el caso del proyecto Proxy los flujos serán históricos mientras que en el proyecto a evaluar son estimados). Esto implica emplear el factor de volatilidad de un proyecto en marcha o concluido en el cual se considera ya información que refleja la realidad del mercado. Este método tiene la ventaja de ser fácil de emplear siempre y cuando se cuente con la información necesaria, así como que ya se esté incorporando información real. Sin embargo la principal desventaja del método radica precisamente en la dificultad de obtener esta información, en particular si se trata de un proyecto innovador o si el practicante no ha participado en proyectos similares en el pasado.

Enfoque de Proxy de Mercado.

Este enfoque tiene cierto parecido con el enfoque anterior, con la salvedad de que en vez de emplear información de un proyecto similar, se emplea información histórica de una variable que tiene relevancia en el valor del

proyecto. Por ejemplo en el caso de una termoeléctrica el valor de los flujos de efectivo futuros dependerá en gran medida del precio de la energía eléctrica, por ende el factor de volatilidad se puede estimar empleando como Proxy el precio histórico de la energía eléctrica. Cuando se trata de un proyecto de una empresa que es negociada públicamente en el mercado de valores se puede emplear como Proxy la cotización histórica de su acción. Este enfoque al igual que el anterior tiene su principal fortaleza en la simplicidad del mismo siempre y cuando se cuente con la información necesaria. Pero también se debe considerar la desventaja que la información del Proxy de Mercado no sea verdaderamente representativa de la volatilidad del proyecto, por ejemplo en el caso de emplear la volatilidad de la cotización de la acción de una empresa como factor de volatilidad de un proyecto es importante considerar que el precio de la acción en un mercado organizado se ve influenciado por una gran variedad de factores que no necesariamente tienen un impacto similar en un proyecto de inversión aunque sea de la misma compañía.

Enfoque de Supuesto de la Gerencia.

En este enfoque la gerencia puede estimar dos o tres escenarios (optimista, esperado y pesimista) de flujos esperados a lo largo de la vida del proyecto. Asumiendo un comportamiento lognormal en la distribución de los flujos de efectivo se puede estimar el factor de volatilidad del proyecto empleando dos de los tres escenarios en cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{\ln\left(\frac{\text{Optimista}}{\text{Esperado}}\right)}{2\sqrt{t}}$$

$$\sigma = \frac{\ln\left(\frac{\text{Esperado}}{\text{Pesimista}}\right)}{2\sqrt{t}}$$

$$\sigma = \frac{\ln\left(\frac{\text{Optimista}}{\text{Pesimista}}\right)}{4\sqrt{t}}$$

Para estimar el factor de volatilidad en esta investigación se empleó el enfoque de Proxy de Mercado. Se optó por dicho enfoque al considerar que la información relevante para estimar el factor de volatilidad bajo otros enfoques requería de experiencia previa con proyectos similares o una mayor sensibilidad por parte del practicante para determinar los flujos estimados de efectivo, mientras que en el caso de Proxy de Mercado se requería de información histórica de una fuente importante de volatilidad, lo que se estimó más práctico.

ANEXO II

Como Proxy de Mercado para el proyecto se toma el precio mensual del etanol, el cual se obtuvo como una serie histórica de enero de 1982 a junio de 2009 en dólares americanos, estos precios son representativos del precio del producto en los Estados Unidos de América, y se estiman aproximados a los precios en México ya que no se cuentan con estadísticas oficiales sobre el precio del etanol en nuestro país.

| Precio del Etanol (USD/galon) | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AÑO | ENE | FEB | MARZ | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1982 | \$1.75 | \$1.70 | \$1.66 | \$1.70 | \$1.70 | \$1.70 | \$1.70 | \$1.70 | \$1.70 | \$1.69 | \$1.72 | \$1.75 |
| 1983 | \$1.69 | \$1.68 | \$1.64 | \$1.70 | \$1.70 | \$1.70 | \$1.70 | \$1.73 | \$1.80 | \$1.65 | \$1.65 | \$1.54 |
| 1984 | \$1.54 | \$1.54 | \$1.54 | \$1.54 | \$1.54 | \$1.54 | \$1.54 | \$1.54 | \$1.58 | \$1.58 | \$1.56 | \$1.57 |
| 1985 | \$1.57 | \$1.58 | \$1.57 | \$1.68 | \$1.62 | \$1.62 | \$1.61 | \$1.58 | \$1.59 | \$1.60 | \$1.60 | \$1.55 |
| 1986 | \$1.52 | \$1.35 | \$1.27 | \$1.22 | \$1.14 | \$1.04 | \$0.95 | \$1.05 | \$0.96 | \$0.84 | \$0.77 | \$0.75 |
| 1987 | \$0.89 | \$1.01 | \$1.13 | \$1.17 | \$1.36 | \$1.40 | \$1.43 | \$1.43 | \$1.28 | \$1.20 | \$1.12 | \$1.04 |
| 1988 | \$1.05 | \$1.08 | \$1.09 | \$1.14 | \$1.14 | \$1.14 | \$1.23 | \$1.17 | \$1.13 | \$1.16 | \$1.15 | \$1.13 |
| 1989 | \$1.15 | \$1.13 | \$1.23 | \$1.40 | \$1.38 | \$1.36 | \$1.31 | \$1.17 | \$1.25 | \$1.24 | \$1.09 | \$1.05 |
| 1990 | \$1.26 | \$1.23 | \$1.21 | \$1.26 | \$1.29 | \$1.29 | \$1.26 | \$1.52 | \$1.56 | \$1.55 | \$1.50 | \$1.30 |
| 1991 | \$1.30 | \$1.23 | \$1.25 | \$1.28 | \$1.33 | \$1.27 | \$1.24 | \$1.28 | \$1.21 | \$1.24 | \$1.33 | \$1.28 |
| 1992 | \$1.22 | \$1.24 | \$1.29 | \$1.32 | \$1.37 | \$1.41 | \$1.35 | \$1.36 | \$1.41 | \$1.38 | \$1.33 | \$1.26 |
| 1993 | \$1.14 | \$1.23 | \$1.20 | \$1.21 | \$1.19 | \$1.14 | \$1.09 | \$1.12 | \$1.12 | \$1.16 | \$1.11 | \$1.16 |
| 1994 | \$1.13 | \$1.16 | \$1.13 | \$1.12 | \$1.12 | \$1.19 | \$1.25 | \$1.32 | \$1.26 | \$1.21 | \$1.22 | \$1.18 |
| 1995 | \$1.25 | \$1.27 | \$1.19 | \$1.16 | \$1.12 | \$1.08 | \$1.08 | \$1.10 | \$1.11 | \$1.11 | \$1.12 | \$1.16 |
| 1996 | \$1.22 | \$1.23 | \$1.23 | \$1.30 | \$1.37 | \$1.38 | \$1.40 | \$1.54 | \$1.56 | \$1.51 | \$1.30 | \$1.16 |
| 1997 | \$1.13 | \$1.13 | \$1.13 | \$1.14 | \$1.16 | \$1.08 | \$1.09 | \$1.15 | \$1.19 | \$1.19 | \$1.19 | \$1.18 |
| 1998 | \$1.16 | \$1.14 | \$1.04 | \$0.96 | \$0.95 | \$1.01 | \$1.06 | \$1.10 | \$1.12 | \$1.10 | \$1.06 | \$0.94 |
| 1999 | \$0.94 | \$0.95 | \$1.01 | \$0.96 | \$0.95 | \$0.90 | \$0.95 | \$0.95 | \$0.96 | \$0.98 | \$1.09 | \$1.13 |
| 2000 | \$1.10 | \$1.14 | \$1.14 | \$1.19 | \$1.25 | \$1.35 | \$1.33 | \$1.33 | \$1.48 | \$1.49 | \$1.66 | \$1.72 |
| 2001 | \$1.77 | \$1.70 | \$1.51 | \$1.46 | \$1.76 | \$1.63 | \$1.41 | \$1.49 | \$1.53 | \$1.36 | \$1.14 | \$0.97 |
| 2002 | \$0.94 | \$0.94 | \$1.12 | \$1.05 | \$0.95 | \$1.03 | \$1.16 | \$1.35 | \$1.28 | \$1.20 | \$1.25 | \$1.21 |
| 2003 | \$1.15 | \$1.30 | \$1.44 | \$1.25 | \$1.12 | \$1.27 | \$1.28 | \$1.27 | \$1.38 | \$1.38 | \$1.65 | \$1.72 |
| 2004 | \$1.40 | \$1.37 | \$1.69 | \$1.80 | \$1.73 | \$1.86 | \$1.68 | \$1.58 | \$1.56 | \$1.87 | \$1.97 | \$1.80 |
| 2005 | \$1.72 | \$1.56 | \$1.31 | \$1.20 | \$1.20 | \$1.42 | \$1.78 | \$2.07 | \$2.74 | \$2.47 | \$2.09 | \$1.99 |
| 2006 | \$2.13 | \$2.52 | \$2.42 | \$2.45 | \$3.04 | \$3.58 | \$3.14 | \$2.72 | \$2.33 | \$1.89 | \$2.25 | \$2.43 |
| 2007 | \$2.26 | \$2.12 | \$2.31 | \$2.37 | \$2.46 | \$2.43 | \$2.51 | \$2.43 | \$1.93 | \$1.79 | \$2.08 | \$2.24 |
| 2008 | \$2.29 | \$2.31 | \$2.46 | \$2.59 | \$2.73 | \$2.72 | \$2.90 | \$2.75 | \$2.68 | \$2.51 | \$2.10 | \$1.61 |
| 2009 | \$1.67 | \$1.67 | \$1.62 | \$1.62 | \$1.70 | \$1.81 | | | | | | |

Fuente: www.neo.ne.gov

Estos datos se analizan en forma cronológica en intervalos de tiempo mensuales, obteniendo un rendimiento relativo por cada intervalo analizado, posteriormente se calcula la desviación estándar a partir de los rendimientos relativos para lo cual es posible emplear el método de la regresión cruzada. La desviación estándar obtenida es de 7.785469% y estará expresada para un intervalo de tiempo mensual. Para emplearla en los modelos de valoración de opciones es necesario anualizarla, esto se hace aplicando el insumo conocido a la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\text{Anual}} = \sigma_{\text{Mensual}} \sqrt{12}$$

Al resolver tenemos que el factor de volatilidad a emplear en la valoración de las opciones reales es de 26.97%.

ANEXO III. Costo de Capital Promedio Ponderado.

El objetivo de este anexo es presentar el concepto del Costo de Capital Promedio Ponderado (CCPP o WACC por sus siglas en inglés), mencionado en el capítulo 6. En la investigación se trabaja empleando un CCPP estimado de 15%, en este anexo se ejemplifica cómo es posible obtener el CCPP del proyecto.

El costo de capital representa el costo en el que se deberá incurrir para financiar las actividades de una organización, lo cual se realiza normalmente a través de una combinación de dos fuentes básicas: a través de recursos provenientes de fuentes externas a la organización (deuda) y recursos provenientes de los accionistas (capital). Dado que la deuda y el capital tienen diferentes costos, es necesario calcular un promedio ponderado. El CCPP de los diferentes componentes de las fuentes de financiamiento se calcula con la siguiente ecuación:

$$CCPP = W_d C_d (1 + t) + W_p C_p + W_c C_c$$

Donde W representa los pesos respectivos de cada fuente; C es el costo correspondiente a cada fuente, ya sea deuda (d), acciones preferentes (p) o acciones comunes (c) y t la tasa de impuesto efectiva para la institución.

Para ejemplificar el cálculo del CCPP debemos considerar que se tienen dos fuentes principales de financiamiento para el proyecto; la deuda que se asumirá con fuentes externas y los accionistas que en este caso solamente se tienen accionistas comunes.

El primer paso consiste en determinar los pesos de cada una de las fuentes. Al ya conocerse los montos a invertir por parte de los accionistas (53.2 mdp) y a obtener en financiamiento (110 mdp) se procede simplemente a obtener el porcentaje que cada uno represente del financiamiento total, en este caso se tiene:

W_d : 67.38%

W_c : 32.62%

El siguiente paso consiste en determinar los costos por cada una de las fuentes. Determinar el costo de la deuda suele ser una labor sencilla para el practicante ya que se conoce el interés que se deberá pagar por el financiamiento recibido al contratar la deuda. Este costo se reduce una vez ponderado por el denominado "escudo fiscal", de tal manera que el cálculo del costo de deuda después de impuestos es:

$$C_d \text{ Después de impuestos} = C_d (1 - t)$$

ANEXO III

El otro costo a calcular es el costo de las acciones comunes. Calcular este costo puede resultar el paso más complicado para el practicante toda vez que no existe un enfoque estandarizado para calcularlo con exactitud. Por el contrario, existen tres enfoques para estimar el costo de las acciones, estos enfoques son el CAPM, el Modelo Gordon y la Prima de Riesgo, a continuación se hace una breve relación de los tres.

Modelo de Valoración de Activos de Capital (CAPM).

Desarrollado de manera independiente por Jack Treynor, Jan Mossin, John Lintner y William F. Sharpe en la década de los sesenta. Considera que existe solamente un factor de riesgo que afecta el rendimiento que se debe esperar de un activo de capital o portafolio de inversión, este factor sería el riesgo sistémico. El modelo nos permite estimar el rendimiento esperado de un activo financiero o portafolio con base en una tasa libre de riesgo, el rendimiento conocido del mercado donde cotiza el activo o portafolio y la medida representativa de la sensibilidad al riesgo sistémico (denominada coeficiente Beta). Aplicado al CCPP el rendimiento obtenido a través del CAPM se convierte en el Costo de las acciones y se calcula de la siguiente manera:

$$C_c = r_f + \beta (r_M - r_f)$$

Donde

C_c : Costo de las acciones comunes.

r_f : Tasa libre de riesgo.

r_M : Tasa de rendimiento del mercado.

β : Coeficiente Beta.

Este enfoque es de utilidad particularmente para las entidades cuyas acciones cotizan en mercados organizados, sin embargo difícilmente será de utilidad para las empresas que no son públicas.

Modelo Gordon.

El modelo fue desarrollado por Myron J. Gordon a finales de la década de los cincuenta, el objetivo de este modelo consiste en determinar el precio futuro estimado para una acción. El modelo Gordon se aplica al cálculo del CCPP al despejar la tasa de rendimiento esperada del modelo para convertirla en incógnita, lo que implica que la tasa de rendimiento represente el costo de las acciones comunes y se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_c = \left(\frac{D}{P} \right) + g$$

Donde

C_c : Costo de las acciones comunes.

D: Dividendo que paga la acción.

P: Precio de la acción

g : Tasa de crecimiento de los dividendos.

El modelo es una alternativa al CAPM que resulta de utilidad para empresas que no cotizan en mercados organizados ya que parte de datos observables como el dividendo que paga la acción y el precio de la misma, sin embargo el modelo no puede ser aplicado a empresas que no pagan dividendos.

Enfoque de prima de riesgo.

Finalmente el enfoque de la prima de riesgo considera que el Costo de las acciones comunes se puede estimar como la diferencia que existe entre el rendimiento que ofrece el mercado (o la industria a la que pertenece la empresa) y la tasa libre de riesgo como una remuneración adicional a una tasa base observada en el mercado, y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$C_c = r + (\bar{r}_M - r_f)$$

Donde

C_c : Costo de las acciones comunes.

r_f : Tasa libre de riesgo.

\bar{r}_M : Tasa de rendimiento del mercado.

r: Tasa fijada como base que se puede tomar como referencia (p.e. TIIE).

Este enfoque puede ser considerado el de mayor deficiencia al ser poco representativo de las características propias de la organización, pero resulta útil cuando no es posible calcular el costo de las acciones comunes a partir de los modelos anteriores.

Adicionalmente se considera que en México la Norma de Información Financiera (NIF) A-6 "Reconocimiento y Valuación" precisa en su Apéndice A que, de manera adicional a la metodología planteada en este anexo, el costo de las acciones comunes debe ser remunerador para los accionistas en los niveles que se manejan dentro de la industria a la que pertenece el proyecto con un planteamiento similar a la del enfoque de la prima de riesgo. Adicionalmente se debe calcular la tasa real tanto del costo de las acciones como del costo de deuda empleando la siguiente ecuación:

$$TR = \frac{(TN - TI)}{(1 + TI)}$$

ANEXO III

Donde:

TR: Tasa de costo de acciones (o deuda) real.

TN: Tasa de costo de acciones (o deuda) nominal.

TI: Tasa esperada de inflación.

Las tasas de costos de acciones y deuda reales pueden emplearse para calcular la tasa del costo de capital promedio ponderado. Adicionalmente se establece que esta tasa permite considerar los diversos riesgos asociados al proyecto.

Para los fines del caso práctico se trabaja bajo los siguientes supuestos: la tasa del costo de deuda antes de impuestos expresada en términos nominales es de 27.87%, la una tasa nominal del costo de acciones comunes es de 19.65%, y la tasa de inflación anual es de 3.96%.

Se procede a realiza el cálculo del CCPP empleando la siguiente ecuación:

$$CCPP = W_d \frac{(C_d - TI)}{(1 + TI)} (1 - t) + W_e \frac{(C_e - TI)}{(1 + TI)}$$

$$CCPP = 67.38\% * \frac{(27.87\% - 3.96\%)}{(1 + 3.96\%)} * (1 - 35\%) + 32.62\% * \frac{(19.65\% - 3.96\%)}{(1 + 3.96\%)}$$

- 15.00%

Considerando lo anterior, el CCPP para el ejercicio se puede suponer en un 15.00%, mismo que puede ser aplicado en el enfoque de valoración de opciones reales por el método Collan-Mezzei-Fullér así como puede ser visto a un valor Proxy de riesgo privado relacionado a los costos de inversión del proyecto de inversión.