CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS, A.C.

DECISIONES DE INVERSIÓN EN EL SECTOR ENERGÉTICO: UNA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE OPCIONES REALES Y MODELO E-GARCH

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN ECONOMÍA

PRESENTA

GERMÁN RIVERA MORA

DIRECTOR DE TESINA: DR. RICARDO MASSA ROLDÁN

CIUDAD DE MÉXICO 2022

Resumen

El presente trabajo expone e implementa el enfoque de Opciones Reales para evaluar decisiones de inversión en el sector energético. La metodología es aplicada al proyecto de la Refinería de Dos Bocas puesto en marcha por Petróleos Mexicanos en 2019. El estudio define el precio de la Mezcla Mexicana de Exportación como el activo subyacente de la Opción Real. En consecuencia, identificamos un modelo E-GARCH con el fin de capturar efectos de apalancamiento y aglomeración en la estimación de la volatilidad del activo subyacente. Finalmente, contrastamos los resultados del método propuesto con los obtenidos en un modelo de Valor Presente Neto.

Índice

1. INTRODUCCIÓN 1
2. CONTEXTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE INVERSIÓN 4
3. EVALUACIÓN SUBSIDIARIAS DE PEMEX 6
3.1 PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN: ANÁLISIS OPERATIVO 6
3.2 PEMEX TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL: ANÁLISIS OPERATIVO 9
3.3 PEMEX TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL: ANÁLISIS FINANCIERO 14
4. METODOLOGÍA Y DATOS 20
4.1 MODELO DE OPCIONES REALES 20
4.2 MODELO E-GARCH 33
4.3 DATOS 37
5. RESULTADOS 38
5.1 PRONÓSTICO MME 38
5.2 MODELO ROA 43
6. CONCLUSIONES 47
7. BIBLIOGRAFÍA 48

Lista de Figuras

Figura 1. Producción de Petróleo Crudo 6
Figura 2. Reservas Petroleras de PEMEX 7
Figura 3. Tasa de Restitución de Reservas 8
Figura 4. Precio de la Mezcla Mexicana 8
Figura 5. Relación Extracción y Refinación 9
Figura 6. Producción de Hidrocarburos por Configuración de Refinería 10
Figura 7. Producción de combustóleo por configuración de refinería 11
Figura 8. Distribución Crudo Pesado 12
Figura 9. Capacidad Utilizada en el SNR 12
Figura 10. Activo Total 14
Figura 11. Activo Total No Circulante 15
Figura 12. Activo Total Circulante 15
Figura 13. Pasivo Total 16
Figura 14. Patrimonio Total 17
Figura 15. Precio de una opción tipo Call en función de un stock como activo subyacente 21
Figura 16. Diagrama del movimiento del valor del activo subyacente 24
Figura 17. Diagrama del árbol binomial 29
Figura 18. Precio de la Mezcla Mexicana de Petróleo 37
Figura 19. Volatilidad del precio de la Mezcla Mexicana de Petróleo 38
Figura 20. Innovaciones en la serie del precio de la Mezcla Mexicana de Petróleo 39
Figura 21. Función de autocorrelación de las innovaciones 40
Figura 22. Flujo de Efectivo Neto sobre la Rentabilidad de la Refinería Dos Bocas 45

Lista de Tablas

Tabla 1 Indicadores Financieros y Operativos 19
Tabla 2 Resumen de los estimadores del modelo ARMA (0,1) - EGARCH (1,1) 42
Tabla 3 Pruebas Estadísticas 42
Tabla 4 Resultados Estimados 46

1. INTRODUCCIÓN

La característica principal de las inversiones en la industria energética es el alto nivel de incertidumbre al que están expuestas. En el caso del sector petrolero, la rentabilidad de los proyectos está sujeta esencialmente al precio del crudo, cuyo comportamiento es naturalmente volátil (Laughton 1998). La complejidad del estudio de inversión aumenta cuando la incertidumbre es alta, ya que surge la necesidad de considerar decisiones estratégicas que respondan a las diferentes condiciones de negocio posibles y permitan maximizar los retornos del proyecto. De tal manera, la incertidumbre constituye una oportunidad para generar valor si el inversionista es capaz de actuar de forma óptima en las etapas cruciales del negocio (Dias 2004). No obstante, la teoría ortodoxa sobre las decisiones de inversión está limitadas en la tarea de incluir en su análisis la estimación de la fuente de utilidad mencionada.

El valor presente neto (VPN) es la herramienta utilizada más extensamente para evaluar la rentabilidad de una inversión. La metodología comparar el valor presente de los flujos de ingresos contra los gastos en los que esperamos que el negocio incurra a lo largo de su existencia. Además, la medida del riesgo al que está sujeto el proyecto está indicado por la estimación de una tasa de descuento, normalmente representada por el costo de capital promedio ponderado (WACC por sus siglas en ingles). Con todo, el enfoque anterior omite tres características determinantes para calcular los retornos de un proyecto. En primer lugar, una inversión es parcial o completamente irreversible. En segundo, los rendimientos de una inversión están sujetos a la incertidumbre. En tercer lugar, las decisiones de inversión son dinámicas en el tiempo (Dixit y Pindyck 1993).

El análisis de opciones reales (ROA por sus siglas en inglés) propone un marco conceptual en el que es posible incluir las características anteriores en el estudio de valuación. La novedad deriva de definir el proyecto de inversión como una combinación entre activos reales y opciones reales, dónde éste último concepto surge como una adaptación de las opciones financieras. Este enfoque parte por incluir un componente dinámico en el estudio al definir que un plan de inversión intrínsecamente entraña la posibilidad de demorar el pago del costo inicial del proyecto y esperar a observar nueva información que afecte la intensión o el tiempo de la decisión (Ipsmiller, Brothers and Dikova 2019).

Intuitivamente, el costo inicial en una inversión parcialmente reversible no es un costo hundido, ya que, por ejemplo, si las condiciones no favorecen la decisión, es posible ejercer la opción de abandonar y podemos omitir el gasto o recuperar una parte del valor total del negocio. A lo largo de la vida de la inversión existen diferentes tipos de opciones (Abandonar, Expandir, Diferir, Contraer, Compuestas etc.) que pueden usarse cuando sea necesario para maximizar el valor neto conforme las incertidumbres son aclaradas en el tiempo (Smit and Trigeorgis 2004). Así, el ROA toma en cuenta las características principales de las decisiones de inversión y logra capturar el efecto de ellas en términos de valor para la estimación de la rentabilidad.

En la práctica aún hay resistencia por incluir en el análisis herramientas como el ROA, ya que sus conceptos y metodología pueden parecer complejos (Lambrecht 2017). No obstante, el objetivo de la presente investigación es romper con el paradigma anterior al introducir de forma intuitiva los conceptos que conforman al análisis de opciones reales y mostrar una aplicación del instrumental para resolver un problema de inversión en un caso práctico. Así mismo, haremos hincapié sobre el contraste entre los resultados obtenidos con el marco conceptual propuesto y los de la teoría ortodoxa. Es pertinente precisar a partir de este momento que el propósito principal del enfoque ROA no es sustituir al VPN, sino extender su análisis de forma complementaria.

Asimismo, incluiremos la aplicación del modelo E-GARCH como un procedimiento adicional a la metodología ROA usual. Lo anterior con el fin de extender el estudio sobre el comportamiento de las variables económicas sobre las que están basadas las fuentes de valor del proyecto. Precisamente, el precio de los energéticos es un factor relevante para la rentabilidad y si consideramos a tal variable como el activo subyacente de la opción real, requerimos una estimación de su volatilidad. No obstante, la serie de tiempo de los precios muestra características particulares de la industria energética que los modelos estándar de volatilidad no logran capturar: sensibilidad a las noticias del mercado (apalancamiento) e intercalado de periodos de alta y baja volatilidad (aglomeración). El modelo E-GARCH está diseñado específicamente para incluir los efectos anteriores, de forma que su aplicación resultaría apropiada para los objetivos del presente estudio en términos de precisión.

Esta investigación está organizada de la siguiente forma: en la sección 2 presentaremos una breve descripción del caso práctico. En la sección 3 realizaremos un análisis operativo y financiero como usualmente haríamos en el estudio del VPN para construir posteriormente un modelo de flujos de efectivo descontados. La sección 4 presentará los conceptos y las herramientas que conforman la teoría del ROA, así como un modelo E-GARCH para estimar la volatilidad del activo subyacente. Finalmente, en la sección 5 y 6 mostraremos los resultados y expondremos nuestras conclusiones respectivamente.

2. CONTEXTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE INVERSIÓN

El 12 de julio de 2019 el Poder Legislativo aprobó el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 (SEGOB 2019) presentado por el presidente electo Andrés Manuel Lopez Obrador. El documento contiene los objetivos y las estrategias que el Gobierno Federal busca realizar en tres principales ejes: Politica y Gobierno, Política Social y Economía. Para los fines de esta investigación resulta particularmente relevante uno de entre varios apartados que conforman el último de los tres ejes mencionados y que lleva por título "Rescate al sector energético". Lopez Obrador hace referencia en dicha sección a las implicaciones negativas que las decisiones de administraciones anteriores tuvieron en el desarrollo de las empresas productivas del estado en materia energética: PEMEX y CFE. Particularmente, el presidente señala en el documento su preocupación por la creciente tendencia en la importación de petróleo y sus derivados a causa de las deficiencias operativas de PEMEX a lo largo de los años de la última década. En cuanto a lo anterior, Obrador indicó que el principal objetivo de su gobierno respecto al sector energético será revertir el decadente desempeño de las empresas estatales eléctrica y petrolera.

El Plan de Negocios de PEMEX 2019-2023 (PEMEX 2019) fue aprobado el 16 de julio de 2019. El documento muestra un diagnóstico de la condición operativa, financiera y administrativa. Las conclusiones de la evaluación argumentan que existen tres principales factores que impiden a PEMEX operar eficientemente: elevada carga impositiva, altos niveles de deuda e insuficiente capacidad de inversión como consecuencia directa de los dos primeros. Por ende, las estrategias para cumplir el objetivo del Plan Nacional giran en torno a corregir lo anterior. El documento plantea el compromiso del Gobierno Federal para presentar una reforma a la Ley de Ingresos sobre Hidrocarburos (LISH) que reduzca la carga impositiva a PEMEX. Además, el Presupuesto de Egresos de la Federación del periodo 2019-2022 contemplará aportaciones de capital para Pemex destinadas a proyectos de inversión, entre los cuales destaca la construcción de la nueva refinería Dos Bocas. En perspectiva, el plan esperaba que para 2021 la empresa alcanzaría su equilibrio financiero y comenzaría a generar recursos para solventar su deuda y continuar invirtiendo.

La organización corporativa de Pemex está compuesta por tres empresas subsidiarias: Exploración y Producción, Transformación Industrial y Logística. El estudio sobre la viabilidad económica y la ejecución de la nueva refinería fueron puestas a disposición de Pemex

Transformación Industrial (PTRI) por ser la filial responsable del desarrollo de proyectos, operación y mantenimiento para refinar petróleo. PTRI indicó que Dos Bocas sería una refinería con configuración tipo coquizadora capaz de procesar 340 mil barriles diarios (Mbd) de crudo 100% maya y de los cuales esperan producir 280 Mbd de gasolina y diésel. Así mismo, la filial estimó que la construcción de la refinería tomaría cuatro años, por lo que en el 2022 iniciaría operaciones y a partir de ese momento le tomaría siete años recuperar la inversión calculada originalmente en 166,760,728.8 miles de pesos (SENER 2019).

El caso de negocio sobre Dos Bocas es información reservada de PEMEX por sus implicaciones comerciales. No obstante, la Auditoría Superior de la Federación (ASF) publicó un escrito (ASF 2020) dónde fiscaliza el proceso en la ejecución de la nueva refinería y los documentos relacionados, entre los que se encuentra el caso de negocio. La ASF identificó una serie de anomalías en las estimaciones sobre la viabilidad económica de la refinería y en el proceso de autorización. Particularmente, en la auditoría destacan las notas que recomiendan moderar los supuestos utilizados en el modelo de valuación del proyecto porque no son compatibles con las condiciones a la que ha estado sujeto el Sistema Nacional de Refinación (SNR) en los últimos años. Aunado a esto, llama la atención que el Consejo Administrativo de PTRI autorizó el proyecto de negocios el 28 de mayo de 2019 y al día siguiente la subsidiaria presentó el caso al Consejo de Administración de PEMEX y fue aprobado esa misma fecha sin modificación alguna.

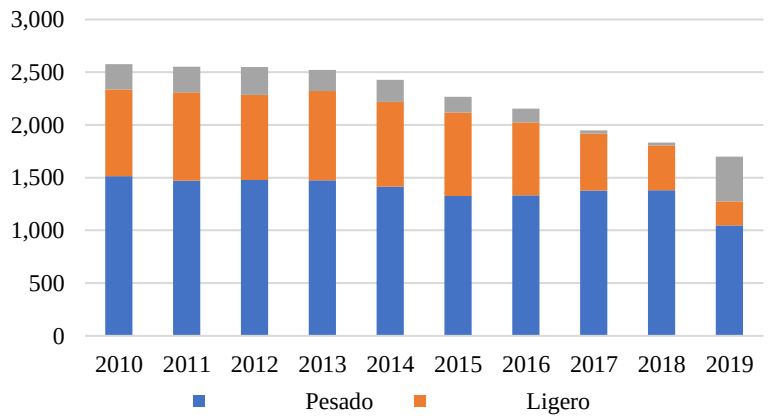
En diciembre del 2019 comenzaron a ser reportados un número creciente de casos de pacientes hospitalizados en China por una enfermedad causada por un nuevo coronavirus: COVID-19. En el año siguiente la enfermedad causó una pandemia que costaría la contracción de 3.5% en la actividad económica global (WB 2021). Para el 2020, México reporto una tasa de variación anual del PIB de -8.3% (WB, Banco Mundial 2021). La incertidumbre sobre la viabilidad de Dos Bocas incrementó con informes de consultoras (McKinsey 2021) sobre los impactos negativos a corto, mediano y largo plazo que la pandemia generaría en la industria petrolera global particularmente. No obstante, el Gobierno Federal mantuvo su esquema de inversiones previstas en su plan de rescate a PEMEX y CFE. En conjunto, las recomendaciones de las ASF emitidas antes de iniciar la pandemia y la persistencia en las acciones del gobierno para salvar a PEMEX ponen en duda el criterio que fundamenta la viabilidad de Dos Bocas y el nivel de rigor con el que ha sido evaluada.

3. EVALUACIÓN SUBSIDIARIAS DE PEMEX

3.1 PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN: ANÁLISIS OPERATIVO

La producción general de petróleo crudo de PEMEX ha mostrado una tendencia decreciente en la última década. Particularmente a partir del 2014 la tendencia comienza a agudizarse y desde entonces la tasa anual de crecimiento promedió -6% como lo muestra la gráfica 1. Por una parte, la producción de petróleo es propensa a disminuir por la misma naturaleza del negocio de extracción, ya que el crudo proviene de una fuente finita cuya formación natural es por mucho más lenta que la tasa a la que es extraído. Además, el petróleo está distribuidos heterogéneamente en yacimientos a lo largo del subsuelo. Según la ubicación del campo petrolero puede resultar relativamente sencillo acceder a ellos o hasta en algunos casos imposibles con la tecnología disponible. Por lo tanto, la producción está estrechamente relacionado con la disposición del recurso y la capacidad operativa de la empresa para extraerlo.

Figura 1. Producción de Petróleo Crudo (miles de barriles diarios)

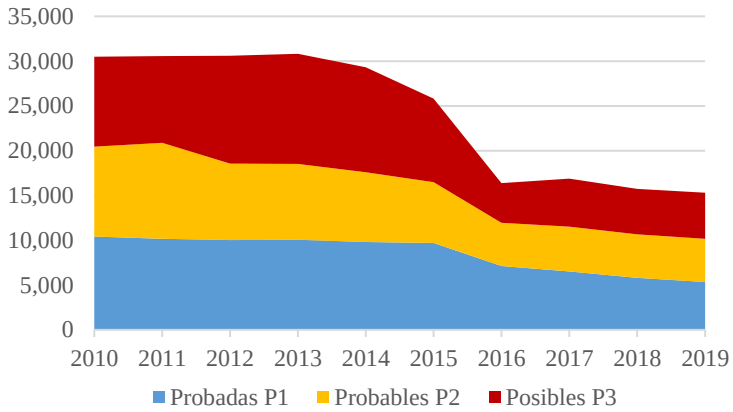


Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

La tecnología actual no es suficiente para calcular precisamente el volumen de petróleo que contiene un yacimiento. No obstante, hoy son aplicados métodos para evaluar la cantidad de crudo a la que una empresa tiene acceso por medio de una aproximación sobre la cantidad de recurso en un reservorio y asignan una medida de probabilidad a la capacidad de extraerlos. El resultado es una clasificación del volumen de reservas con base al grado de incertidumbre sobre su aprovechamiento: reservas comprobadas o P1 (90% de probabilidad), reservas no comprobadas-probables o P2 (50%) y reservas no comprobadas-posibles o P3 (10%) (CNH

2020). La gráfica 2 muestra que los 3 tipos comenzaron a disminuir en el 2014 y coincide con el momento en el que la producción aceleró su caída.

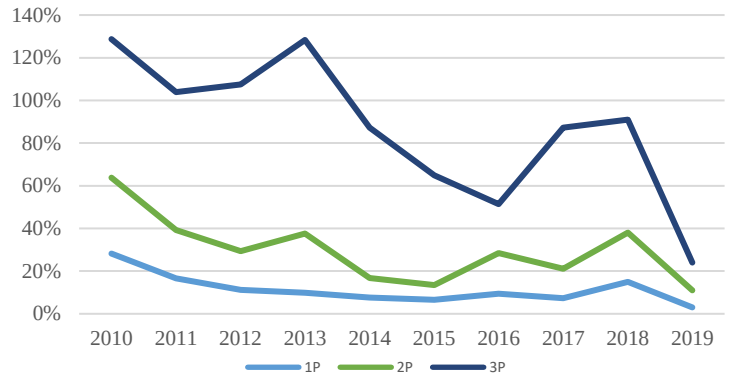
Figura 2. Reservas Petroleras de PEMEX (millones de barriles)



Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

Otro factor que contribuye a la explicación de la menor producción de crudo es la dificultad operativa que PEMEX ha padecido en los últimos años para ejecutar actividades de exploración. La tasa de restitución de reservas es un cociente que mide el volumen de petróleo descubierto entre la cantidad de crudo producido durante un periodo. En la gráfica 3, el indicador muestra una tendencia decreciente a pesar de que la producción petrolera ha sido menor, lo cual indica que la capacidad de PEMEX para descubrir nuevos yacimientos ha mermado en los últimos años. Además, segmentar la tasa de restitución por tipo de reservas descubiertas muestra la condición del reto operativo del sector de extracción al enfrentarse a una mayor proporción de reservas P3. El aprovechamiento de las reservas P3 requiere mayor tecnología, por lo que de no contar con ella sería necesario intensificar los esfuerzos por aumentar la Tasa de Restitución de los otros tipos de reservas.

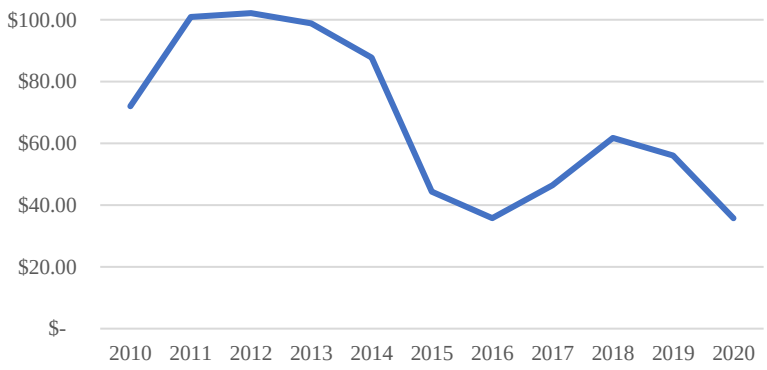
Figura 3. Tasa de Restitución de Reservas



Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

La gráfica 4 muestra una caída consecutiva en el precio la Mezcla Mexicana de Exportación (MME) entre 2014 y 2016, lo cual fue un factor determinante para la contracción de la inversión de PEMEX en actividades de exploración que afectó el nivel de reservas y consecuentemente la producción (PEMEX, Las Reservas de Hidrocarburos de México 2015). En 2020 por primera vez en la historia el petróleo estadounidense West Texas Intermediate (WTI) y la MME cotizaran en valores negativos por el nivel de saturación en el mercado y la contracción en la demanda ocasionada por la pandemia. En perspectiva, a menos de que observemos un repunte en el precio del MME, PEMEX podría entrar en un círculo vicioso en el que un bajo precio presione los recursos que genere para invertir y atender sus problemas operativos que le permitan impulsar su producción.

Figura 4. Precio de la Mezcla Mexicana (dólares por barril)

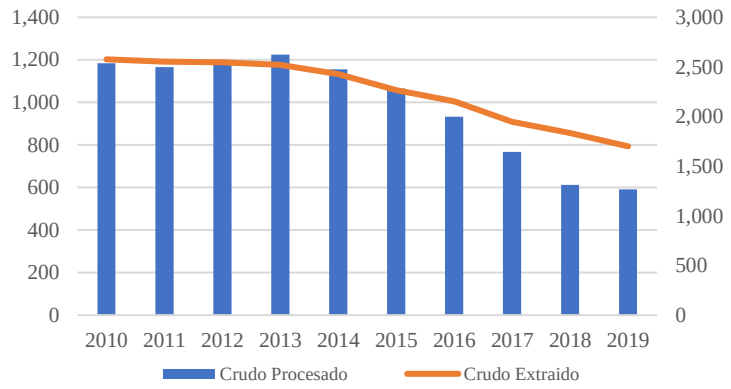


Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

3.2 PEMEX TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL: ANÁLISIS OPERATIVO

El problema operativo de producción de crudo tiene implicaciones negativas en los siguientes eslabones de la cadena de valor de hidrocarburos. Básicamente, las refinerías del SNR cuentan con menor materia prima para procesar ante una disminución en la disponibilidad de petróleo crudo. En la gráfica 5 observamos que hasta 2015 existió una relación estrecha entre la producción de petróleo y su proporción procesada en las refinerías del país. No obstante, la brecha entre ambos indicadores comenzó a expandirse en los últimos años de la década. Lo anterior es consecuencia de problemas técnicos del SNR que no le permitieron refinar la misma proporción del petróleo producido como en años anteriores. En parte esto se debe a la disminución en la producción de crudo ligero como lo muestra la gráfica 1.

Figura 5. Relación Extracción y Refinación (miles de barriles diarios)

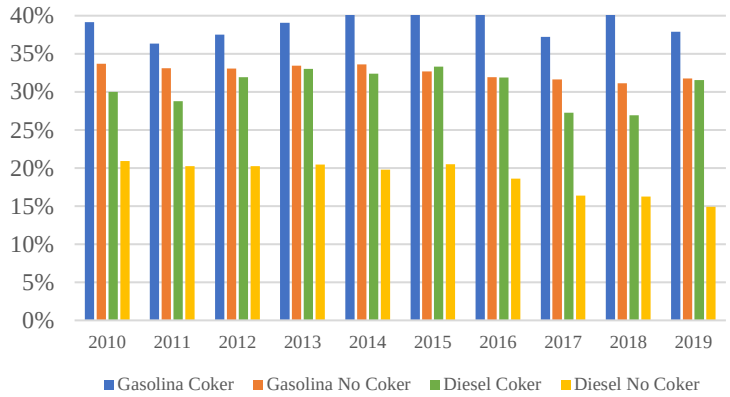


Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

En términos prácticos, la función de una refinería es purificar el petróleo y añadirle componentes químicos para obtener los diferentes hidrocarburos (EIA 2022). Esencialmente, el proceso de refinación busca limpiar la principal impureza que contiene el petróleo: azufre. No obstante, los niveles de concentración de azufre varían entre los distintos tipos de crudo. El proceso de refinación es más complejo e industrialmente más demandante conforme la concentración de azufre es mayor. El crudo ligero contiene un bajo porcentaje de azufre y para procesarlo el SNR fue configurado con equipamiento de craqueo catalítico. Sin embargo, una menor proporción en la producción de crudo ligero es preocupante porque las refinerías con craqueo catalítico necesitan ser adaptadas con plantas coquizadoras (Coker) para procesar crudo pesado eficientemente. Actualmente sólo la mitad de las refinerías en el SNR cuentan con plantas

coquizadora. La gráfica 6 muestra las diferencias en eficiencia entre configuración de refinería al comparar las tasas de rendimiento de producción de combustible por barril de petróleo.

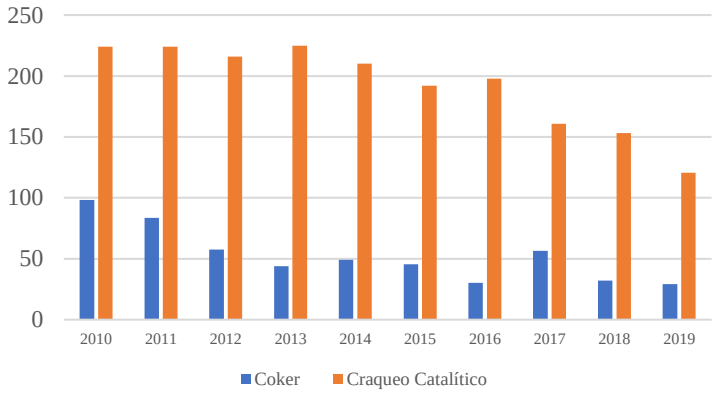
Figura 6. Producción de Hidrocarburos por Configuración de Refinería (% por barril de petróleo)



Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

Una característica adicional a la planta coquizadora que es fundamental para procesar crudo pesado es un mayor suministro de hidrógeno. Contar con ambos factores es imprescindible para llevar a cabo un proceso de refinación eficiente, por lo que no contar con ellos afecta la tasa de rendimiento e impulsa la producción de combustóleo. El combustóleo es un producto residual del proceso de refinación que tiene un valor comercial, pero autoridades internacionales buscan prohibir su uso por su alto efecto contaminante que resulta de su elevada concentración de azufre (Murrieta, Nexos 2021). Además, el almacenamiento y transporte del combustóleo es costoso y su precio de venta ha llegado a ser menor que el mismo petróleo crudo. Por lo tanto, la producción de combustóleo es preocupante porque aumenta su riesgo de generar pérdidas. La gráfica 7 muestra la diferencia entre producción de combustóleo en el SNR por configuración de refinería.

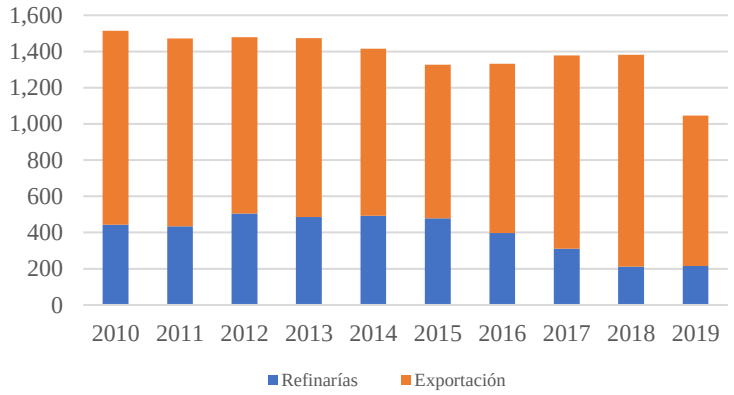
Figura 7. Producción de combustóleo por configuración de refinería (miles de barriles diarios)



Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

No obstante, actualmente las adaptaciones siguen en operación para las refinerías de Tula y Salamanca, mientras que para la de Salina Cruz aún está en planeación (Murrieta 2021). Ahora bien, una revisión sobre la tendencia en la distribución del petróleo pesado entre las refinerías y la exportación nos permite notar que PEMEX ha disminuido la porción destinada a las refinerías como lo muestra la gráfica 8. Particularmente podemos observar que la producción total de crudo pesado ha tenido un pequeño crecimiento en el periodo entre 2015 y 2018. En contraste, la proporción absorbida por el SNR alcanzó su nivel más bajo en 2018 con 211 Mbd que equivalen a utilizar únicamente el 33% de la capacidad instalada total de sus tres refinerías equipadas con plantas coquizadoras. Esto podría resultar positivo para el SNR si fuera consecuencia de una sustitución del crudo pesado por un aumento en la producción de crudo ligero. En cambio, éste no es el caso de PEMEX como hemos señalado y el dato permite entrever un problema técnico que se suma a las desventajas técnicas mencionadas.

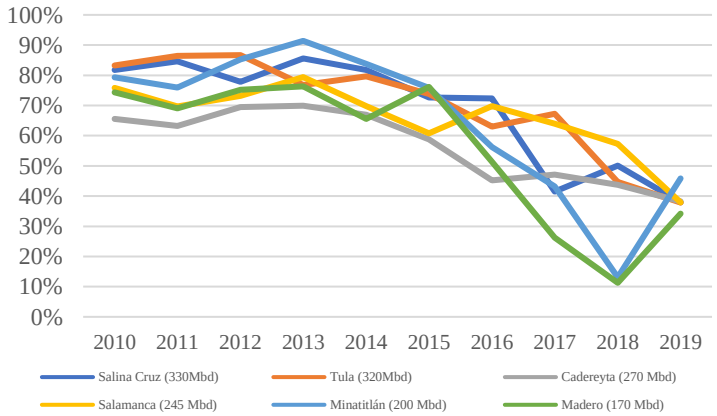
Figura 8. Distribución Crudo Pesado



Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

El menor uso de la capacidad instalada del SNR en general es la causa principal por la que el procesamiento de crudo total ha caído. La gráfica 9 muestra que el periodo en el que todas refinerías redujeron su nivel de utilización coincide con el momento en el que bajaron los precios del petróleo que señalamos previamente. No obstante, llama la atención que las refinerías de Cadereyta, Minaltitlán y Madero han sido la que han hecho un menor uso de su capacidad productiva aun cuando son las únicas que cuentan con planta coquizadora. En 2017 el índice de paros no programados de PEMEX promedio 31.9 mientras que la referencia internacional es de 4.5 (Portillo 2018). El 63% de todos los momentos que la empresa ha tenido que detener sus actividades productivas han sido por falta de suministro de hidrógeno. El resto de las ocasiones han sido por fallas en los equipos, retrasos en mantenimiento e insuficiencia en otros suministros como agua y electricidad.

Figura 9. Capacidad Utilizada en el SNR



Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos Institucional (BDI) de Petróleos Mexicanos. Disponible en: https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction%20=applyOptions

El análisis de los precios de la gasolina y diésel en México puede resultar engorroso porque han estado determinados artificialmente por políticas de control gubernamentales. El precio de la gasolina en la costa del golfo (USGC) es la referencia internacional más relevante para México, pero los precios del combustible en el país han presentado movimientos distintos. Desde los años 90 hasta el 2015 los precios fueron administrados al usar el IEPS como una tasa variable mensual que se ajustaba en función del precio de las gasolinas en los mercados internacionales de referencia. En el 2016 el IEPS pasó a ser una tasa fija, pero posteriormente fue implementado un mecanismo de bandas sobre precios máximos y mínimos (Sánchez 2019). El año siguiente ocurrió la liberalización de los precios de los combustibles y su determinación quedó sujeta a las condiciones de mercado específicas en cada una de las 83 regiones del país.

La subsidiaria PTRI es la encargada de establecer los precios del combustible en las Terminales de Almacenamiento y Reparto (TAR) para su venta al mayoreo. A pesar de la liberalización en 2017, la COFECE demostró en un estudio que entre el 1 de diciembre del 2017 y el 12 de octubre de 2018 existieron 179 ocasiones en las que los cambios en el precio del USGC fueron mayores a cinco centavos, mientras que en los precios de TAR sólo hubo cambios por la misma cifra 27 ocasiones (COFECE 2019). En los medios públicos no existe información sobre las razones de PTRI para justificar lo anterior. No obstante, existen dos posibles implicaciones en las finanzas de la compañía por el hecho de que los precios a los que vende no sigan condiciones de mercado: 1) la empresa absorbió pérdidas ocasionadas por el incremento en sus costos cuando el tipo de cambio se depreciaba y/o ocurría el mismo efecto cuando el precio internacional del combustible aumentaba, 2) sus ingresos crecieron artificialmente cuando caían los precios de referencia.

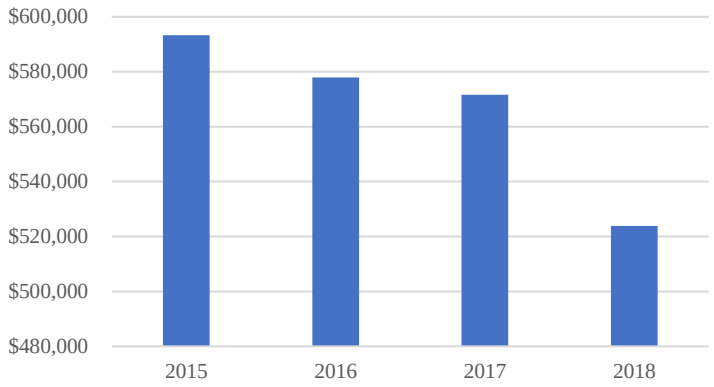
El hecho de que la variación en los precios que impone Pemex no siga al mercado internacional es aún más preocupante si consideramos que en el 2016 el 62% del combustible consumido a nivel nacional fue importado y en el 2018 la cifra aumentó a 79% (COFECE 2019). En suma, los problemas operativos junto con las prácticas en precios que hemos mencionado previamente tienen un impacto negativo en la rentabilidad del segmento de refinería. Una característica de la industria petrolera es su economía de escala, por lo que una menor utilización incrementa el costo variable. Así mismo, la mayor producción de combustóleo gracias a las ineficiencias operativas obstruye la capacidad de generar valor y aumentan el riesgo de incurrir en pérdidas. Además, resultaría más rentable vender el petróleo crudo en el exterior si las altas tasas de

producción de combustóleo perduran, por lo que aumentaría el riesgo de que no llegue el petróleo suficiente para mantener la capacidad instalada de las refinerías.

3.3 PEMEX TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL: ANÁLISIS FINANCIERO

Al considerar el tamaño de PTRI como el total de activos que posee, vemos que no existe un comportamiento que nos indique una tendencia de crecimiento, sino todo lo contrario. Entre 2015 y 2018 los activos han disminuido en casi 70 mil millones de pesos, es decir, en 3 años la compañía decreció 12% como lo muestra la gráfica 10.

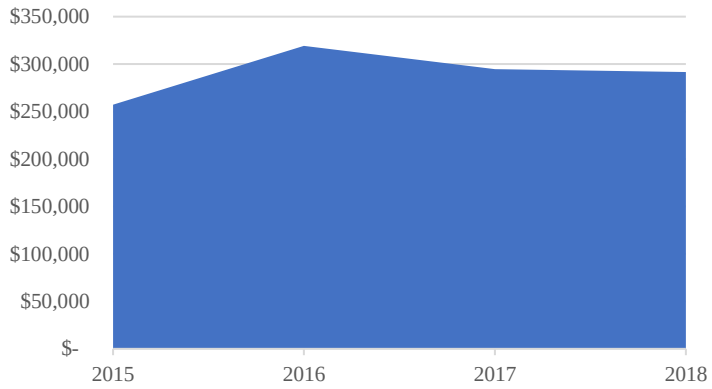
Figura 10. Activo Total (millones de pesos)



Fuente: Elaboración propia con información de los Estados Financieros Separados de PTRI Disponible en: https://www.cuentapublica.hacienda.gob.mx/

El activo no circulante que está compuesto principalmente por propiedades, plantas y equipo no juega un papel determinante en el movimiento que observamos de los activos totales de la empresa. De hecho, los activos no circulantes han mantenido una tasa de crecimiento relativamente constante en los últimos años a pesar de que no han sido los mejores para la empresa como lo muestra la gráfica 11. El valor más bajo que observamos es el del 2015 que coincide con el momento en el que el precio de la MME tuvo su mayor caída, por lo que en gran parte el ajuste en el activo es consecuencia de la aplicación del principio de deterioro. La volatilidad en el precio del crudo fue menor en los años subsecuentes y para 2018 el valor de las propiedades, planta y equipo tuvo un crecimiento de 15% respecto del 2015.

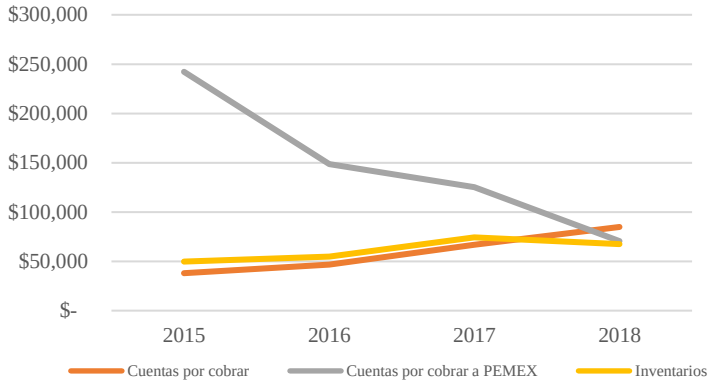
Figura 11. Activo Total No Circulante (millones de pesos)



Fuente: Elaboración propia con información de los Estados Financieros Separados de PTRI Disponible en: https://www.cuentapublica.hacienda.gob.mx/

La gráfica 12 muestra que la disminución en las cuentas por cobrar que el segmento de refinería tiene a cuenta de las demás ramas de PEMEX es la variable cuyo impacto ha afectado en mayor medida el activo total de la empresa. A pesar de que las demás cuentas por cobrar al resto de sus clientes han aumentado, no es suficiente para compensar.

Figura 12. Activo Total Circulante (millones de pesos)

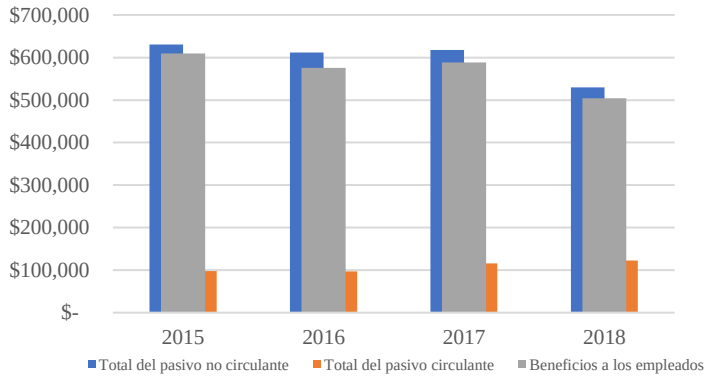


Fuente: Elaboración propia con información de los Estados Financieros Separados de PTRI Disponible en: https://www.cuentapublica.hacienda.gob.mx/

La principal obligación de PTRI en sus pasivos totales son los beneficios a sus empleados según la gráfica 13. El monto indicado es una estimación actuarial del valor presente que considera los pagos probables en los que PTRI incurriría de ser ejercidos los compromisos económicos derivados de sus relaciones laborales. La gráfica muestra que la estructura de los pasivos limita la capacidad de PTRI para financiar por medio de deuda sus necesidades de inversión. La

estrategia que la empresa ha seguido para reducir sus pasivos es recortar su plantilla laboral. No obstante, la ASF han identificado irregularidades en el ejercicio y la configuración de los recursos destinados a prestaciones laborales por lo que sugieren a PEMEX restructurar su esquema de beneficios y reforzar su sistema de administración (ASF, Informe del Resultado de la Aditoría Practicada al Pasivo Laboral 2015).

Figura 13. Pasivo Total (millones de pesos)

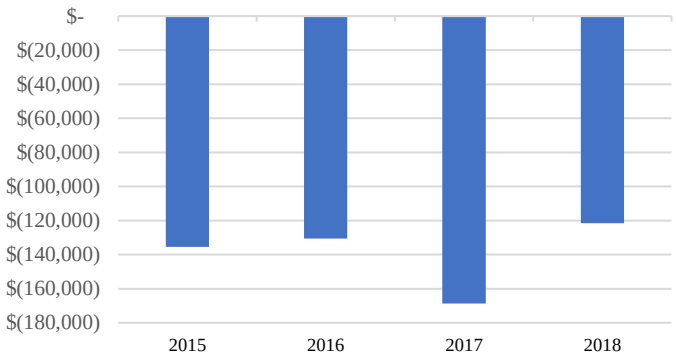


Fuente: Elaboración propia con información de los Estados Financieros Separados de PTRI Disponible en: https://www.cuentapublica.hacienda.gob.mx/

En el periodo comprendido entre 2015 y 2018, la partida de PTRI sobre los beneficios a sus empleados equivalen al total de los activos que posee la empresa. En consecuencia, el riesgo en que incurre la empresa por problemas de liquidez y solvencia es alto, razón suficiente para que el costo del financiamiento sea mayor. Además, las operaciones de PTRI sólo han podido mantenerse a costa de la degradación del patrimonio. La posición financiera de PTRI implica que los recursos con los que cuenta no son suficientes para pagar las obligaciones económicas que ha contraído, por lo que, al tratarse de una empresa paraestatal, el Gobierno debe realizar aportaciones para mantener el balance contable. En condiciones normales, las aportaciones de capital hechas a una empresa suponen un rendimiento, pero en el caso de las aportaciones del Estado a PTRI ni siquiera le serán repuestas. La gráfica 14 muestra la evolución en el déficit sobre el patrimonio total de la filial de PEMEX. El monto de cada periodo vendría a representar

la responsabilidad en la que el Gobierno Federal incurriría en caso de declarar la empresa en banca rota en el respectivo año.

Figura 14. Patrimonio Total (millón de pesos)



Fuente: Elaboración propia con información de los Estados Financieros Separados de PTRI Disponible en: https://www.cuentapublica.hacienda.gob.mx/

Los ingresos por venta de productos relacionados con las actividades de refinación han crecido en el periodo evaluado. Por la tendencia decreciente en la gráfica del crudo procesado en refinerías, sabemos que el incremento anterior no se debe a una mayor cantidad de productos vendidos. Por lo tanto, dicho comportamiento puede deberse al incremento en el precio de los combustibles en México a raíz de la liberalización. No obstante, los costos de producción aumentaron más que los ingresos, por lo que el rendimiento bruto ha sido negativo y a lo largo del periodo estudiado no ha logrado ser positivo en parte por la decreciente tasa de capacidad utilizada o por pérdidas originadas por la conversión en tipo de cambio de las importaciones.

Así mismo, la empresa ha incurrido en un aumento en los gastos generales, específicamente los gastos relacionados con las actividades administrativas han mantenido una tasa de crecimiento positiva. Lo anterior empeora el resultado del rendimiento bruto de forma que el margen operativo registra un promedio del -7% para el periodo estudiado. Las ventas de los últimos tres años promediaron casi el billón de pesos anuales, por lo que el margen operativo indica que en el mismo periodo las operaciones del segmento de refinería generan anualmente perdidas equivalentes a casi 70mil millones de pesos. El desempeño de PTRI pone a la empresa en una posición en la que no es capaz de pagar impuestos. Por lo tanto, el comportamiento del margen neto equivale al del operativo. Derivado de lo anterior, es más claro comprender las causas que producen el efecto negativo que indicamos anteriormente sobre el patrimonio.

En cuanto al monto de inversión, sabemos que la mitad de las refinerías requieren adaptaciones para poder procesar de forma más eficiente el petróleo pesado. A este respecto, el balance de flujos de efectivo muestra que en el 2016 hubo un incremento importante en la adquisición de propiedades, planta y equipo, pero subsecuentemente se posicionaría por debajo de los niveles previos a ese año. Esto es un indicador negativo sobre el panorama de la producción por lo que hemos mencionado anteriormente en el análisis operativo de PTRI. No obstante, derivado de la condición financiera y el incremento en el costo de la deuda reducen las opciones de la empresa para satisfacer sus necesidades de inversión.

Así mismo, la Tabla 1 desglosa una serie de indicadores financieros de rentabilidad, apalancamiento y operatividad. Por un lado, el Margen Bruto ha ganado recuperación en el intervalo de tiempo mostrado, el EBITDA no continua con la misma tendencia por el aumento gastos administrativos y servicios corporativos, lo cual afecta las siguientes ratios de rentabilidad. Por otro lado, el total de los pasivos han permanecido relativamente constantes, mientras que las pérdidas acumuladas han erosionado en cada periodo el patrimonio de la empresa, de modo que el apalancamiento ha alcanzado niveles riesgosos y poco saludables financieramente. Así mismo, PTRI es capaz cubrir sus obligaciones financieras de corto plazo, aunque su capital de trabajo neto ha tenido una evolución decreciente.

Tabla 1 Indicadores Financieros y Operativos

Pemex TRI	2015	2016	2017	2018
Ingresos	$ 132,570	$ 771,597	$ 992,257	$ 1,105,256
Rentabilidad				
Margen bruto (%)	-14.2%	-4.3%	-2.3%	-2.2%
EBITDA Margen (%)	13.5%	-5.7%	-4.2%	-4.7%
EBIT Margen (%)	10.6%	-7.7%	-4.3%	-5.7%
NI Margen (%)	8.9%	-8.1%	-4.5%	-5.9%
ROE (%)	-8.7%	47.8%	26.4%	53.7%
ROIC (%)	2.0%	-10.8%	-7.9%	-12.3%
Apalancamiento y liquidez				
Deuda Total/ EBITDA	1.2	-0.8	-0.7	-0.5
D/E (%)	-538%	-542%	-435%	-537%
Ratio de liquidez	3.4	2.7	2.4	1.9
Indicadores Operativos				
Petrolíferos producidos (Mbd)	1114	977	787	629
Petrolíferos vendidos (Mbd)	1427	1446	1408	1315
EBITDA por Barril de Petrolífero vendido	$ 12.57	$ (30.27)	$ (29.86)	$ (39.26)
Capital de Trabajo Neto	$ 237,914.01	$ 161,791.27	$ 161,453.58	$ 109,503.56
CAPEX	$ 18,055.77	$ 34,220.29	$ 14,678.18	$ 16,457.51

Fuente: Elaboración propia con información de los Estados Financieros Separados de PTRI Disponible en: https://www.cuentapublica.hacienda.gob.mx/. Cifras expresadas en millones de pesos.

4. METODOLOGÍA Y DATOS

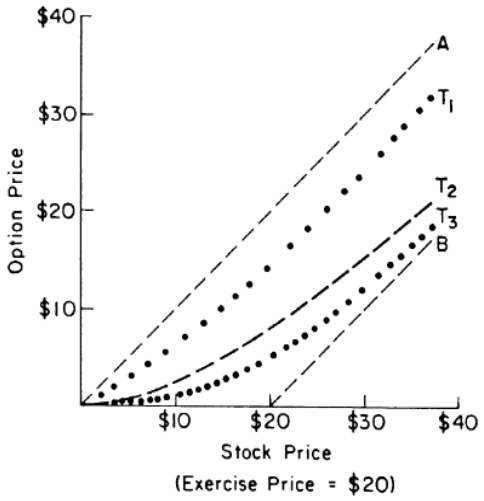
4.1 MODELO DE OPCIONES REALES

El NPV ofrece una visión limitada sobre la valuación porque únicamente considera los flujos de efectivo que se esperan generar con determinada estructura corporativa y pasa por alto otras fuentes de valor económico intrínsecas a un proyecto. No obstante, incluir y justificar teóricamente de forma sólida en los modelos de valuación estándar factores como el potencial de crecimiento estratégico ha sido complicado. En (Myers 1977) el monto estimado de la valuación en el NPV es principalmente un reflejo de la serie de inversiones que la firma espera realizar durante el periodo analizado. Sin embargo, las decisiones de inversión y el crecimiento están determinados por factores discrecionales de los directivos que a su vez dependen de las condiciones variables del mercado. Myers propuso utilizar las bases teóricas de las opciones financieras para crear una metodología de valuación que lograra incorpora en el análisis la incertidumbre de los escenarios esperados y contempla las decisiones estratégicas que pueden ser tomadas en cada circunstancia con el objetivo de maximizar el valor del proyecto.

El ROA es una extensión de la teoría de opciones financieras hacia la valuación de opciones en activos reales. Una opción es el derecho, pero no la obligación de realizar una acción en el futuro (Mun 2002). Una opción financiera tipo call (put) permite comprar (vender) un valor a un precio y en un momento posterior acordados. La incertidumbre sobre el precio del activo desaparece una vez que llega la fecha determinada y gracias a la opción podemos decidir en ese momento comprar (vender) el valor si es que los términos nos benefician. En el caso de los activos reales, una opción brinda la *flexibilidad* de tomar o no una decisión en puntos críticos de un proyecto (Amram and Kulatilaka 1999). La adquisición de una fábrica puede entenderse como una opción porque le permite a la firma adquirir el derecho, mas no la obligación de producir. Cuando incertidumbres relacionadas con el proyecto son aclaradas en el tiempo, la empresa puede optar en el momento por otro tipo de opciones como: crecer, abandonar o cambiar el negocio. En general, una *opción genera valor por sí misma* gracias a la oportunidad de realizar una acción después de que observamos el desenlace de un evento y está relacionado positivamente con el nivel de incertidumbre. De tal manera, el ROA incorpora dicha noción para obtener una valuación más apropiada.

Comprender los fundamentos de la metodología del ROA implica remitirse a la teoría las opciones financieras, por lo que vale la pena realizar una breve mención de sus principios. En general, podemos definir el valor de una opción como una función del activo subyacente y del tiempo (Black and Scholes 1973). Black y Scholes representaron con la gráfica 15 la relación del valor de una opción call cuyo activo subyacente es un stock con un Strike Price de $20. Las líneas A y B indican el precio máximo y mínimo de la opción respectivamente. El resto de las líneas muestran que el valor de la opción cae conforme el periodo de madurez es cada vez menor si mantenemos el precio del stock fijo en el tiempo. Así mismo, en la gráfica podemos observar una relación convexa, la cual indica que un cambio porcentual en el precio del stock resulta en un cambio mayor en el valor de la opción. Es claro entonces que la volatilidad del precio de la opción está sujeta a los cambios en el activo subyacente y la madurez considerada.

Figura 15. Precio de una opción tipo Call en función de un stock como activo subyacente



Fuente: (Black y Scholes 1973)

La principal dificultad técnica con la que nos enfrentamos al valuar una opción viene de pronosticar la trayectoria del activo subyacente hasta el periodo de madurez. Esencialmente hablando, la volatilidad asociada a una variable es una medida de la incertidumbre sobre sus movimientos futuros. Por lo tanto, la información del pasado de una variable con alta volatilidad no está relacionada con su comportamiento en el futuro y decimos que dicha variable sigue un proceso estocástico. El cálculo estocástico es una rama de las matemáticas que trata este tipo de

procesos y comenzó a desarrollarse a partir de 1900 para estudiar fenómenos físico sujetos a fuerzas aleatorias. No obstante, los principios de la disciplina fueron usados hasta 1969 por Merton para modelar los precios de mercados financieros y posteriormente constituyeron la base matemática con los que Black y Scholes construirían su modelo de valuación de opciones.

La relevancia del modelo Black-Scholes-Merton no deriva de emplear cálculo estocástico para obtener los pagos esperados, sino de obtener una expresión con la que es posible obtener teóricamente el valor de cualquier derivado. El modelo supone la existencia de una tasa libre de riesgo constante para todos los periodos de madurez, no existen oportunidades de arbitraje, no hay pago de dividendos y el activo subyacente sigue un proceso de movimiento browniano geométrico:

$$dS = \mu S\, dt + \sigma S\, dz$$

Dónde S es el precio del activo subyacente en el momento t, miu es el parámetro de la tasa de retorno esperada sobre el activo, sigma es el parámetro de volatilidad del precio del activo y dz es un proceso Wiener con distribución normal de media cero y varianza equivalente al periodo de vencimiento T. Black y Scholes usan la representación de una opción call sobre el activo subyacente como una función f que depende del valor de S y t. El lemma de Ito muestra que una función con las características mencionadas sigue el siguiente proceso:

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial S}\mu S + \frac{\partial f}{\partial t} + \tfrac{1}{2}\frac{\partial^2 f}{\partial S^2}\sigma^2 S^2\right) dt + \frac{\partial f}{\partial S}\sigma S\, dz$$

Un resultado relevante del lemma de Ito es que el término dz en la expresión anterior es el mismo proceso de Wiener que el del activo subyacente, por lo que el factor de incertidumbre es el mismo para el precio del S y del f. Lo anterior es fundamental para derivar el modelo porque permite construir un portafolio del activo subyacente y la opción de forma que matemáticamente sea suprimido dz. De tal manera, el factor de incertidumbre queda excluido y el portafolio sin riesgo debe obtener un rendimiento igual a la tasa libre de riesgo en ausencia de oportunidades

de arbitraje. Consecuentemente, Black-Scholes obtuvieron la siguiente ecuación diferencial como resultado de construir el portafolio sin riesgo y usar el argumento de no arbitraje.

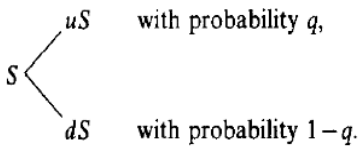
$$\frac{\partial f}{\partial t} + rS\frac{\partial f}{\partial S} + \tfrac{1}{2}\sigma^2 S^2 \frac{\partial^2 f}{\partial S^2} = rf$$

Matemáticamente, la ecuación diferencial implica que sólo existe una única expresión correcta del precio teórico (f) para el derivado que depende de S y t. Podemos estar seguros de lo anterior porque si el derivado es comercializado a otro precio, entonces existiría la oportunidad de obtener una ganancia libre de riesgo y violaríamos el supuesto de no arbitraje. Si el retorno del portafolio es mayor entonces es posible obtener una ganancia sin riesgo al solicitar un préstamo a la tasa libre de riesgo y comprar el portafolio; si el retorno es menor podemos shortear el portafolio y comprar valores que paguen la tasa libre de riesgo. Por lo tanto, para encontrar el precio basta con que la función f cumpla la ecuación diferencial. De tal manera, Black y Scholes lograron obtener un método teóricamente sólido para determinar el precio de cualquier derivado. En finanzas existen diferentes variedades de derivados, por lo que no sólo existe una única solución a la ecuación diferencial. En general, la fórmula de valuación para un derivado en específico depende de las condiciones de frontera que sean consideradas.

Una propiedad de la ecuación diferencial de Black-Scholes que resulta considerablemente útil es el hecho de que la preferencia de los inversionistas sobre el riesgo no la afecta. La variable miu del Movimiento Browniano Geométrico representa el retorno esperado del stock cuyo valor es mayor conforme el inversionista es más averso al riesgo. No obstante, al no aparecer en la ecuación diferencial, la solución no está afectada por las preferencias sobre el riesgo y podemos usar cualquier tipo de preferencia para evaluar el precio teórico f. Suponer que los inversionistas son neutrales al riesgo implica que el retorno esperado en cualquier inversión sea la tasa libre de riesgo. Así, en un mundo neutral al riesgo es válido usar la tasa libre de riesgo para descontar al presente cualquier flujo. El argumento de la valuación risk neutral puede resultar irrealista. Aunque es posible demostrar que las soluciones obtenidas se aproximan a las del mundo real, es preciso mencionar que su objetivo es simplificar la valuación de derivados.

El modelo de Black-Scholes puede resultar matemáticamente complejo y poco intuitivo en la práctica, por lo que algunas líneas de investigación subsecuentes a su publicación estuvieron enfocadas en encontrar procedimientos numéricos más simples. No obstante, es posible construir una representación binomial para modelar el proceso estocástico del activo subyacente y obtener una expresión para el valor de una opción al usar los argumentos económicos de Black-Scholes que relacionan el activo subyacente con el derivado (Cox, Ross and Rubinstein 1979). Un modelo binomial puede ser entendido como un diagrama de árbol en el que las ramificaciones representan la evolución del precio del activo subyacente. Como muestra la figura 16, para un valor de la variable sólo contemplamos dos posibles cambios proporcionales a u y d respectivamente. Así mismo, cada movimiento tiene asociado una respectiva unidad de probabilidad. Específicamente, la innovación del trabajo de Cox, Roos y Rubinstein surge de su interpretación de los últimos dos elementos mencionados con base al marco teórico de Black-Scholes.

Figura 16. Diagrama del movimiento del valor del activo subyacente



Fuente: (Cox, Ross y Rubinstein 1979)

El término q indica la probabilidad que el activo subyacente tenga un cambio en la proporción u en un mundo neutral al riesgo. Para demostrar lo anterior, es necesario derivar un portafolio sin riesgo compuesto por el activo subyacente y el derivado, así como usar el argumento de no arbitraje. Por la estructura del modelo, sabemos con seguridad que en el siguiente periodo el valor del activo subyacente sólo puede cambiar en dos formas, entonces sólo existen dos posibles caminos que el precio del activo subyacente puede seguir. Supongamos que F_u es el precio de una opción call cuando el valor de activo subyacente S aumenta en una proporción u. El portafolio en el estado del mundo u con una posición corta en la opción y una posición larga de A unidades en el activo subyacente sería:

$$S_0 u \Delta - f_u$$

En el estado del mundo d dónde el precio del activo subyacente disminuye, el valor del portafolio es:

$$S_0 d\Delta - f_d$$

Por definición un portafolio sin riesgo debe ofrecer los mismo pagos en cada estado del mundo, es decir, su valor en cualquier circunstancia es igual. Por lo tanto, debe cumplirse:

$$S_0 u\Delta - f_u = S_0 d\Delta - f_d$$

Al despejar A encontramos una expresión que nos indica las unidades del activo subyacente necesarias en un portafolio para no estar sujeto al riesgo.

$$\Delta = \frac{f_u - f_d}{S_0 u - S_0 d}$$

Si recordamos el argumento de no arbitraje sabemos que el retorno esperado del portafolios será la tasa libre de riesgo. Además, en un mundo neutral al riesgo podemos descontar los payoffs de cualquier estado del mundo con la tasa sin riesgo r para determinar el valor presente del portafolio. Por lo tanto, la valuación de la opción resulta de igualar la expresión del valor presente con el costo de construir el portafolio y despejar f:

$$S_0\Delta - f = (S_0 u\Delta - f_u)e^{-rT}$$

$$f = S_0\Delta(1 - ue^{-rT}) + f_u e^{-rT}$$

Al sustituir en la expresión anterior la definición de A y agrupando términos obtenemos la fórmula que Cox, Roos y Rubinstein propusieron para la valuación de una opción en un modelo binomial:

$$f = \frac{f_u(1 - de^{-rT}) + f_d(ue^{-rT} - 1)}{u - d}$$

En especial, una simplificación de la expresión anterior les permitió definir una medida de probabilidad neutral al riesgo para ambos estados del mundo, de forma que el precio de la opción puede ser interpretado como el valor esperado de los payoffs descontados en el presente a la tasa libre de riesgo:

$$f = e^{-rT}[p f_u + (1 - p) f_d]$$

Dónde:

$$p = \frac{e^{rT} - d}{u - d}$$

Del trabajo de Black–Scholes mencionamos que en un mundo neutral al riesgo las preferencias particulares de los inversionistas sobre el riesgo no son relevantes por lo que es posible fijar la tasa libre de riesgo como el retorno esperado de cualquier inversión. Cox, Roos y Rubinstein utilizan el mismo argumento para justificar su interpretación de p como la probabilidad de un movimiento hacia arriba q del activo subyacente en un mundo neutral al riesgo. Precisamente, la definición de p permite que el retorno esperado del activo subyacente sea la tasa libre de riesgo:

$$E(S_T) = pS_0u + (1 - p)S_0d$$

$$E(S_T) = pS_0(u - d) + S_0d$$

$$E(S_T) = S_0e^{rT}$$

Ahora bien, un modelo binomial únicamente considera dos posibles estados del mundo para los caminos que puede seguir el valor del activo subyacente en el tiempo: uno en el que el precio sube y otro en el que baja. Cox, Roos y Rubinstein definieron las variables u y d para indicar la proporción en la que el precio sube y baja para cada estado del mundo respectivamente. Ambos elementos son sumamente importantes porque van a determinar la evolución del activo subyacente en el modelo binomial. Las nociones teóricas y matemáticas sobre volatilidad en el cálculo estocástico constituyen una referencia útil derivar las expresiones de u y d. Para ilustrar lo anterior, resulta útil usar como referencia la ecuación del movimiento browniano geométrico

que representa el proceso estocástico del activo subyacente. El movimiento browniano geométrico está compuesto por el cambio esperado (drift rate) y la varianza (variance rate) por unidad de tiempo. Especialmente, la variance rate es el término que añade ruido al proceso estocástico. De la ecuación sabemos que la cantidad de variabilidad que agrega el variance rate al cambio en el valor de la variable dependiente es sigma veces el proceso de Wiener dz:

$$\sigma dz$$

El proceso de Wiener tiene una distribución normal estándar (0,1) por unidad de tiempo, de forma que el producto de sigma (para sacar la varianza es tratada como una constante) y el proceso de Wiener resulta en una varianza de sigma-cuadrada por unidad de tiempo (Hull 2015). Por lo tanto, el cambio en el valor del activo subyacente tiene la siguiente distribución normal en el límite conforme el cambio en el tiempo se aproxima a cero, es decir, el proceso estocástico del activo subyacente se distribuye de la siguiente manera cuando consideramos periodos suficientemente pequeños:

$$\frac{\Delta S}{S} \sim \phi(\mu\, \Delta t,\, \sigma^2 \Delta t)$$

En la expresión anterior sigma representa la medida de volatilidad del activo subyacente y sigma-cuadrada indica la tasa de la varianza. El resultado anterior es relevante porque es la base teórica para expresar u y d, ya que sirve como una referencia sobre la medida de volatilidad del activo subyacente. Específicamente, Cox, Roos y Rubinstein argumentaron que es posible encontrar una definición para u y d respectivamente si consideramos el precio del activo subyacente como una variable aleatoria e igualamos la expresión de su varianza con la varianza de la distribución definida previamente:

$$p(u-1)^2 + (1-p)(d-1)^2 - [p(u-1) + (1-p)(d-1)]^2 = \sigma^2 \Delta t$$

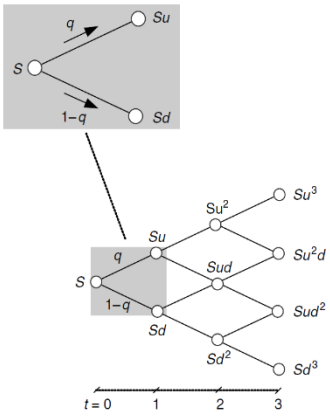
Al sustituir p y resolver para u y d obtenemos:

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad \text{and} \quad d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}$$

De tal manera, Cox, Roos y Rubins argumentaron que u y d son tales que permiten aproximar la media y la varianza del activo subyacente definidas teóricamente conforme la longitud de los periodos considerados (At) tiende a cero. La conclusión anterior implica que los factores u y d son variables endógenas que logran incorporar la volatilidad, por lo que resultan teóricamente apropiados para representar la evolución del activo subyacente. Además, ambos factores son determinante para definir la unidad de probabilidad neutral al riesgo p que mencionamos previamente, la cual nos permitirá descontar los flujos con la tasa libre de riesgo. En conclusión, la construcción de un diagrama de árbol en el modelo binomial para valuar opciones únicamente consta de especificar u, d y p con base en las variables exógenas: tasa libre de riesgo (r), periodo de madurez del derivado (T), volatilidad (sigma) y el precio inicial (So) del activo subyacente.

La aplicación del modelo binomial en la valuación de opciones puede parecer irrealista y poco apropiada por su simplicidad. Esto sucede frecuentemente por el hecho de que sólo considera dos posibles cambios para el precio del activo subyacente. No obstante, una variedad de diferentes caminos puede obtenerse para el valor del activo a lo largo del periodo de madurez de la opción con la composición de diferentes ramificaciones en el diagrama de árbol. La estructura mostrada en la figura 17 está compuesta básicamente por nodos que representan el valor del activo en un momento específico y los pasos que encada ramificación indican un movimiento en el precio. En general, en el modelo binomial no existe un límite de pasos que podemos utilizar para un periodo determinado. Los pasos están relacionados con la variable At que identificamos previamente, ya que considerar una cantidad suficiente de pasos es equivalente a aproximar At a cero. Lo anterior es relevante porque algunos resultados del cálculo estocástico que obtuvimos previamente se cumplen en el límite de At. De hecho, Cox, Roos y Rubinstein fueron capaces de demostrar que el modelo binomial logra aproxima los resultados de la fórmula de Black-Scholes para valuar opciones en el límite conforme At tiende a cero, es decir, cuando consideramos una cada vez más pasos en el diagrama de árbol.

Figura 17. Diagrama del árbol binomial



Fuente: (Brandão, Hahn y Dyer 2005)

Una vez mencionados los principios de la teoría de las opciones financieras y expuesto el modelo binomial que utiliza un procedimiento alternativo al cálculo estocástico para obtener su valuación, resulta más claro comprender la metodología del ROA. Recordemos que una opción es el derecho, pero no la obligación de realizar una acción en el futuro. Así mismo, sabemos que el valor de dicho derecho está determinado por lo que definimos como el activo subyacente. La diferencia entre una opción financiera y una opción real radica principalmente en la naturaleza del activo subyacente sobre la que está valuada. Mientras que la primera únicamente considera aquellos activos comercializados en los mercados financieros tales como stocks o índices principalmente, la segunda está basada en activos reales: tierra, bienes raíces, plantas o equipo de producción (Smit and Trigeorgis 2004). No obstante, a pesar de la diferencia anterior es posible utilizar la misma metodología de valuación únicamente adaptando los elementos del modelo binomial a las características específicas del activo real.

En una primera instancia puede resultar confuso interpretar el concepto de opción cuando hablamos de activos reales. No obstante, consideremos el caso en el que deseamos valuar la inversión para construir la refinería que se espera tenga una vida útil de 23 años. Realizar la inversión ofrece la opción, pero no la obligación de refinar petróleo. Sea S la variable que indica el precio de los hidrocarburos producidos y X representa el costo de la construcción más los costos operativos. Además, suponemos que S y X contemplan el valor del dinero en el tiempo durante la vida útil del proyecto. Podemos pensar en la variable S como el strike Price del proyecto y el precio del petróleo como el activo subyacente de forma que el valor de la opción sería:

$$S - X \quad si\ y\ sólo\ si \quad S > X$$

$$0 \quad si\ y\ sólo\ si \quad S \leq X$$

La valuación de nuestro ejemplo anterior es semejante al problema de valuar una opción tipo call porque si consideramos el caso en el que los costos de operación e inversión son mayores a los del activo subyacente la opción no tiene valor, es decir, la opción de producir hidrocarburos que brinda construir una refinería no genera valor. No obstante, en el caso opuesto el proyecto resulta rentable, por lo que la opción es ejercida y su valor es la diferencia entre S y X (Brennan and Schwartz 1985).

La simpleza del ejemplo anterior puede hacer parecer que el ROA es equivalente al modelo NPV. No obstante, el ROA incorpora en su metodología el estudio del proceso estocástico que sigue el activo subyacente, por lo que realiza un análisis de los diferentes posibles escenarios a los que está sujeto el proyecto en cada uno de sus periodos de vida, mientras que el NPV únicamente contempla solo un posible escenario. En otras palabras, la finalidad del ROA es ampliar el estudio de la incertidumbre intrínseca al proyecto en la valuación. Recordemos que la teoría de opciones financieras buscaba resolver un problema semejante y un supuesto clave para modelar la incertidumbre es suponer que el activo subyacente sigue un proceso browniano geométrico. En el caso del ROA, si realizamos el mismo supuesto sobre el valor del proyecto es posible utilizar los principios definidos por Black y Scholes para resolver el problema de valuación. De hecho, podemos emplear el modelo binomial para valuar opciones reales como una alternativa simple y práctica tal como lo mencionamos en el caso de las opciones financieras.

Otra propiedad dinámica de los proyectos de inversión es el papel que juegan los administradores a lo largo de la vida del proyecto. El director administrativo es un ente cuyas decisiones pueden maximizar el valor de un negocio al aprender de las circunstancias y adaptarse a ellas (Amram and Kulatilaka 1999). Por ejemplo, es posible maximizar los ingresos al expandir la inversión inicial cuando un negocio está teniendo éxito o podemos reducir las pérdidas al abandonar en una situación contraria. Modelar la decisión administrativa óptima implica tener una noción previa y futura de las condiciones económicas que puedan devenir y

poder determinar una acción apropiada en cada momento. Convenientemente, al representar el proceso estocástico del valor del proyecto como en el modelo binomial obtenemos un mapa de los posibles escenarios futuros. Si recordamos el diagrama presentado del modelo binomial, tenemos que para el caso de las opciones reales los nodos ahora van a representar el valor del proyecto en cada periodo.

Las implicaciones prácticas que un director administrativo encuentra al incorporar en la valuación el modelo binomial son evidentes porque con el diagrama resulta más esclarecedor discernir entre el pasado y el futuro del proyecto para modelar acciones que maximicen el valor del proyecto en cada momento (Brandão, Hahn and Dyer 2005). Por lo tanto, es claro que el proceso de valuación adquiere una característica flexible al considerar la posibilidad de modificar el proyecto a lo largo de su proceso. No obstante, incluir en el análisis de valuación la flexibilidad o la opción representa un problema técnico para las metodologías de convencionales principalmente porque cada una de las decisiones estratégicas que puedan ser tomadas tienen una característica de riesgo diferente. El tradicional NPV estima sólo una serie de cash flows sobre la vida del proyecto y utiliza una tasa ajustada que considerar el riesgo del proyecto para descontar los flujos. Si un directivo opta por ejercer la opción de expandir la inversión inicial en un momento futuro creará una oportunidad para recibir flujos de efectivos diferentes a los estimados inicialmente, lo que implica realzar un nuevo ajuste por riesgo para determinar el valor generado por la decisión.

En general, un proyecto de inversión tiene un amplio rango de flexibilidades u opciones que pueden afectar el valor de un proyecto por su impacto en lo flujos de efectivo. Además, en muchas ocasiones surge la necesidad estratégica de considerar una secuencia coordinada las diferentes opciones. Por ejemplo, si una inversión implica bastante riesgo en el momento presente, no es necesario desacreditar completamente el valor del proyecto, en cambio podemos evaluar la opción de diferir la inversión un periodo mientras la incertidumbre es aclarada y si las condiciones son favorables ejecutar la inversión o hasta ejercer la opción de expandir. Valuar un proyecto bajo dichos términos resultaría complejo si utilizamos únicamente el NPV porque requerimos asignar una tasa ajustada por riesgo a cada nuevo flujo de efectivo derivado de cada opción como mencionamos previamente. Además, si consideramos que en sí mismo definir y justificar una tasa ajustada por riesgo ya es suficientemente complicado, la tarea podría resultar

aún más engorroso. No obstante, el ROA propone una metodología teóricamente sólida para ofrecer una solución al problema con base a los conceptos de opciones financieras.

Principalmente, el enfoque del ROA adopta de la teoría de opciones financieras los argumentos para eludir la necesidad de calcular cualquier tasa de descuento ajustada por riesgo y simplemente usar la tasa libre de riesgo para descontar (Hull 2015). Recordemos que Black-Scholes partieron de la construcción de un portafolio libre de riesgo que consistía en una posición sobre el derivado y otra sobre el stock. Al suponer la ausencia de oportunidades de arbitraje el retorno esperado del portafolio puede ser la tasa libre de riesgo. La validez de lo anterior descansa sobre el supuesto de que existe un mercado completo compuesto por instrumentos financieros con características de riesgo similares al derivado y con los que es posible construir el portafolio. No obstante, a pesar de que no exista un mercado completo para el caso de las opciones reales, es suficiente hacer una estimación del valor del activo real como si fuera comercializado para poder emplear en la valuación las implicaciones del argumento de no arbitraje [(Copeland and Antikarov 2003); (Copeland and Tufano, A Real-World Way to Manage Real Options 2004)]. La clave del argumento anterior es suponer que el valor presente del proyecto sin opciones es el mejor estimador insesgado del valor de mercado del proyecto (Marketed asset disclaimer assumption).

El argumento de Copeland y Antikarov implica que el valor del proyecto sin opciones cumple una función análoga a la del activo subyacente en el modelo de Black-Scholes. Por lo tanto, es posible modelar el proceso del valor del proyecto en el tiempo como un GBM tal como lo mencionamos para las opciones financieras. Así, los métodos convencionales para valuar opciones financieras pueden ser utilizados en las opciones reales. En este sentido, emplear el modelo binomial resulta una alternativa práctica y viable para plantear el estudio de forma que, en lugar de calcular tasas libres de riesgo, únicamente debemos asegurarnos de realizar un cálculo apropiado de las probabilidades neutrales al riesgo.

El desarrollo en la teoría del ROA ha estado enfocado en adaptar el método base que hemos expuesto para evaluar los diferentes tipos de opciones dentro de los proyectos. En la práctica, las opciones más comunes son las opciones de abandonar, expandir, contraer, diferir o extender la inversión de un activo real. Determinar el tipo de opción para modelar el valor de un proyecto

depende de las circunstancias y las características particulares de cada proyecto. La presente investigación está enfocada en profundizar sobre el estudio de la opción de abandonar.

Una vez que un proyecto es emprendido, la administración tiene la opción de abandonar el proyecto a cambio de su valor de salvamento o simplemente dejar de invertir cuando las circunstancias económicas no favorecen al proyecto. Formalmente, la opción de abandonar es una opción americana tipo put porque al invertir implícitamente estamos adquiriendo el derecho, pero no la obligación de vender el proyecto. El valor del activo subyacente es el valor presente de los cash flows esperados del proyecto como hemos mencionado previamente. No obstante, particularmente en este caso el strike Price de la opción es el valor que obtendríamos de vender el proyecto menos cualquier costo en el que incurriríamos de llevar a cabo la transacción. Así mismo, al tratarse de una opción americana, podemos ejercerla en cualquier momento hasta la madurez. Por lo tanto, en cada momento el valor intrínseco de la opción será el máximo entre el Strike Price y el valor presente de los flujos de efectivo esperados del proyecto. De tal manera, ejerceríamos la opción en todos los nodos del árbol binomial en los que el strike Price sea mayor y administrativamente estaríamos maximizando administrativamente los flujos de efectivo del proyecto.

4.2 MODELO E-GARCH

Modelar la volatilidad es esencial entre las diferentes tareas en el área financiera, principalmente es útil para llevar a cabo la administración del riesgo y evaluar el valor de diferentes productos. El principal objetivo de modelar la volatilidad es traer a cuenta una métrica de la incertidumbre que podemos esperar en el futuro para una variable. Por su parte, las Series de Tiempo es la rama de las matemáticas que busca atender el trabajo anterior al identificar propiedades estadísticas en el comportamiento de una variable en el tiempo que sirvan para realizar adivinanzas educadas sobre el desempeño futuro de la misma. Específicamente, la ausencia de correlación lineal, colas pesadas, efectos de apalancamiento (asimetrías) y aglomeración de volatilidades son algunas de las principales propiedades que caracterizan a las series de tiempo financieras (Enders 1998).

Identificamos como aglomeración de volatilidad al hecho en el que la serie de una variable presenta una combinación de periodos cuyos valores muestran una fluctuación significante y

otros dónde su variación es relativamente baja. El modelo de MCO no es método viable para pronosticar el comportamiento de una serie con aglomeración de volatilidad debido a que el comportamiento de la variable no presenta un patrón identificable en el tiempo. Lo anterior significa que la serie es heterocedástica, es decir, que la variación de la variable explicada no es constante a lo largo del rango de valores de la variable explicativa. Las implicaciones estadísticas de modelar una serie con MCO son que, aunque los coeficientes seguirán siendo insesgados, los errores estándar y los intervalos de confianza serán demasiado estrechos dándonos una falsa percepción de precisión.

En (Engel 1982) presentó los modelos Auto Regresivos con Hetrocedasticidad Condicional (ARCH) como una metodología que modela la varianza de los residuos cuando esto últimos no son constantes. Básicamente, Engel propuso un esquema que busca estimar la volatilidad como una función de las observaciones previas de ella misma. En su modelo ARCH original, Engel representó en una regresión la varianza de los errores como una función lineal sobre los valores previos de errores cuadrados de la regresión. Es decir, suponiendo que la siguiente expresión representa la varianza condicional de un proceso Yt+1:

$$\begin{aligned} \text{var}(y_{t+1}|y_t) &= E_t[(y_{t+1} - a_0 - a_1 y_t)^2] \\ &= E_t(\varepsilon_{t+1})^2 \end{aligned}$$

Engel propuso modelar la expresión anterior como un proceso AR(q) al usar los residuos al cuadrado estimados de la expresión:

$$y_t = a_0 + a_1 y_{t-1} + \varepsilon_t$$

esto es:

$$\hat{\varepsilon}_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \hat{\varepsilon}_{t-1}^2 + \alpha_2 \hat{\varepsilon}_{t-2}^2 + \cdots + \alpha_q \hat{\varepsilon}_{t-q}^2 + v_t$$

Donde Vt representa un proceso de ruido blanco. En este ejercicio esperamos que los coeficientes de los errores al cuadrado sean diferentes de cero, de forma que estaríamos explicando la evolución en la varianza del proceso Yt como un proceso autorregresivo.

Posteriormente, Bollerslev extendió el trabajo de Engel al proponer los modelos GARCH (Bollerslev 1986). La novedad de los modelos GARCH deriva de agregar componentes auto regresivos y de media móvil de modo que la varianza condicional siga un proceso ARMA. En este caso, supondremos que el error de proceso Yt está determinado por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_t = v_t \sqrt{h_t}$$

Con Vt como una variable aleatoria idéntica e independientemente distribuida con media cero y varianza igual a uno. Usualmente el tipo de distribuciones que supones sigue Vt es Normal, T-Student o .Además, la varianza condicional ht de Et está definida como:

$$h_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{q} \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^{p} \beta_i h_{t-i}$$

Para asegurar que la varianza es finita todas las raíces características de ht deben encontrarse dentro del círculo unitario. Por una parte, los modelos GARCH resultan más convenientes en la práctica porque de la expresión de ht sabemos que todos sus coeficientes necesariamente son positivos, lo que resulta en un modelo más parsimonioso ya que no requerimos imponer más restricciones sobre ellos. Por otra parte, la estimación de los modelos ARCH frecuentemente demandan más parámetros que el resto de los modelos (Tsay, 2005). En resumen, el principal objetivo del modelo GARCH es encontrar una representación ARMA que se ajuste a la serie de los términos aleatorios Et en el proceso Yt. Por lo tanto, el requisito esencial para justificar el uso de un modelo GARCH es identificar que la varianza condicional ht actúe como un proceso ARMA.

Los modelos ARCH y GARCH sentaron las bases para tratar con el hecho estilizado propio de las series de tiempo que referimos previamente como aglomeración de volatilidad. A partir de ellos, los desarrollos posteriores en la teoría han trabajado y modificado la estructura de los modelos base para incorporar el tratamiento de otros hechos estilizados característicos de las series de variables financieras. Principalmente, las principales innovaciones que los nuevos modelos derivados han introducido resultan de restructurar la definición original de la varianza condicional del GARCH.

La crítica más extendida sobre los modelos ARCH y GARCH es que su representación lineal de la varianza condicional produce que un impacto simétrico de los choques positivos y negativos en la volatilidad del periodo siguiente. Nelson propuso el modelo GARCH Exponencial (EGARCH) que busca atender la idea sobre la volatilidad en la que esperamos que una "mala noticia" tenga un mayor efecto en su comportamiento que una "buena noticia" (Nelson 1991). El modelo EGARCH comienza con redefinir de la siguiente manera el error de proceso Yt:

$$a_t = \sigma_t \times \epsilon_t$$

Dónde Et mantiene las mismas propiedades que en el modelo GARCH base. Así mismo, la definición original de la varianza condicional es sustituida por la siguiente expresión:

$$\ln \sigma_t^2 = \alpha_o + \sum_{i-1}^{p} \alpha_i \left(|\epsilon_{t-i}| + \gamma_i \epsilon_{t-i} \right) + \sum_{j-1}^{q} \beta_j \ln \sigma_t^2{}_{j}$$

Nelson introduce el logaritmo natural de sigma cuadrada como un mecanismo alternativo para asegurar que las características sobre el signo de la varianza condicional sean cumplidas. Recordemos que en el modelo GARCH lo anterior ocurría haciendo que sigma cuadrada fuera una combinación lineal de pesos positivos de variables aleatorias positivas. No obstante, en el modelo EGARCH los coeficientes tienen permitido ser negativos gracias a las propiedades del logaritmo. Así mismo, Nelson en lugar de utilizar Et-1 al cuadrado, adopta una versión estandarizada cuya implicación es meramente interpretativa.

El tratamiento sobre la asimetría en los efectos está integrado en la definición del segundo término del lado derecho de la expresión. En la representación podemos identificar claramente que un choque negativo de un rezago tiene un mayor efecto que uno positivo en la volatilidad del periodo siguiente. Además, la magnitud sobre la diferencia en el efecto entre ambos tipos de impactos está capturada por el parámetro Yi. De tal manera, conforme mayor sea el valor de Yi en una serie, implica que la sensibilidad sobre una "mala noticia" aumenta. Por su parte, el resto de los parámetros cumplen funciones similares a los del modelo GARCH original.

4.3 DATOS

En el presente estudio son utilizados los precios en dólares de la mezcla mexicana de petróleo (MME) crudo de exportación al cierre diario de cotización. El umbral temporal de los datos comprende desde el año 2000 hasta el 2019 cuando fue anunciado el proyecto de Dos Bocas. Inicialmente, la gráfica 19 muestra una tendencia creciente en el valor del crudo desde el 2000 hasta el periodo que coincide con la crisis financiera del 2008 dónde ocurre un desplome en el precio de casi el 70%. La reactivación económica reorienta la tendencia de crecimiento en la serie hasta el 2014 cuando ocurre un choque en la demanda del recurso en economías emergentes como China y un exceso de oferta del petróleo a nivel internacional (Bloomberg 2014).

Figura 18. Precio de la Mezcla Mexicana de Petróleo (dólares por barril)

Fuente: Elaboración propia con información de la Base de Datos del Banco de México (Banxico). Disponible en: https://www.banxico.org.mx/apps/gc/precios-spot-del-petroleo-gra.html

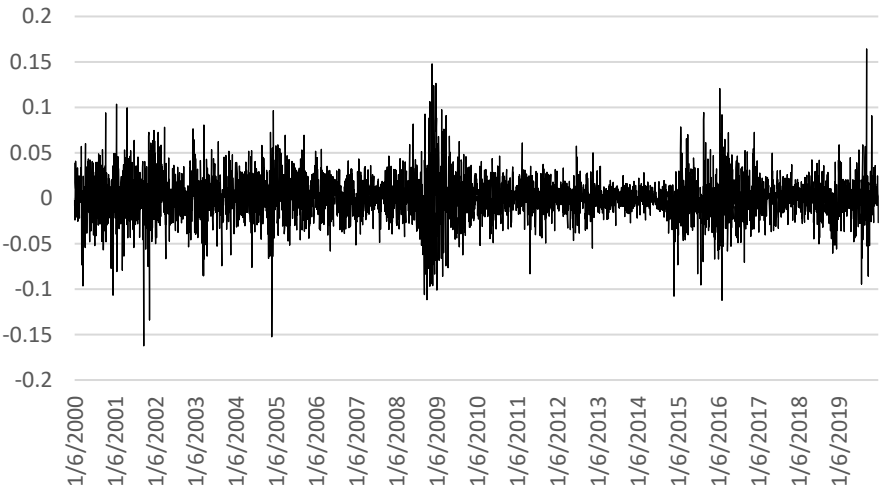
La media de nuestra serie es de $51.28 dólares, mientras que el valor mínimo y máximo son $12.15 y $132.71 dólares respectivamente. No obstante, los valores anteriores sin duda están afectados por los quiebres estructurales que mencionamos anteriormente para el año del 2008 y 2014. Dado lo anterior, primero es necesario realizar una prueba que nos indique precisamente cuándo los cambios son significativos entre la serie de datos. Así mismo, tomar en cuenta lo anterior dentro de nuestro análisis es necesario para obtener estimadores más precisos sobre el pronóstico. El procedimiento usual para incluir la característica anterior es desarrollar un modelo que el que algunos parámetros puedan cambiar en un cierto número de puntos de quiebre (Bai y Perron 1998).

5. RESULTADOS

5.1 PRONÓSTICO MME

En una primera impresión, nuestra serie aparenta no ser estacional ya que no parece moverse alrededor de una media constante y los picos agudos sugieren la existencia de heteroscedasticidad. Con ayuda del Software de programación R y la librería RUGARCH desarrollaremos los siguientes resultados. Comenzamos con someter la serie a una prueba de Dickey-Fuller sin constante ni tendencia con rezagos de orden 16 y obtenemos un p-value de 0.6, por lo que confirmamos la observación anterior sobre estacionalidad. Como es usual en el tratamiento de los procesos con raíz unitaria, aplicamos una transformación logarítmica a los datos y calculamos las primeras diferencias para obtener una serie de las tasas de crecimiento DoD. Nuevamente aplicamos una prueba de Dickey-Fuller a los nuevos datos y obtenemos un p-value = 0.01 por lo que aceptamos la hipótesis alternativa de estacionalidad y descartamos la necesidad de realizar más tratamientos a los datos.

Figura 19. Volatilidad del precio de la Mezcla Mexicana de Petróleo



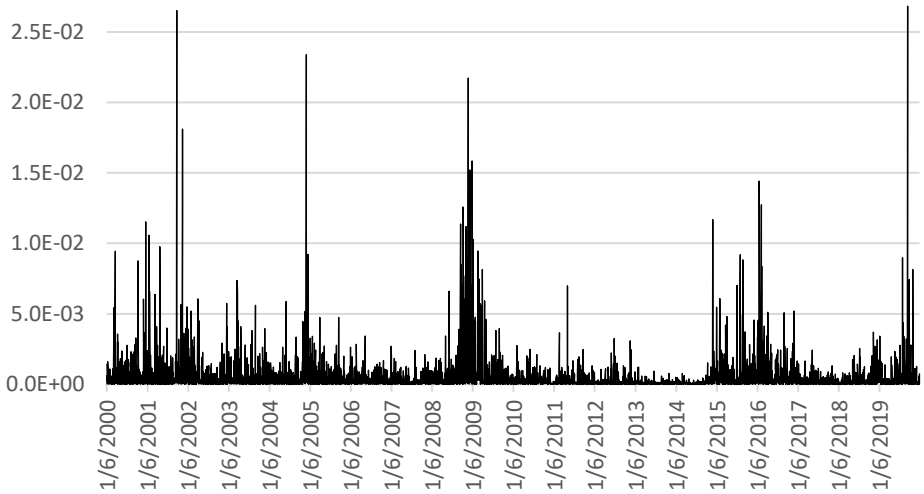
Fuente: Elaboración propia con software R studio

En la gráfica 19 podemos observar que la volatilidad de la tasa de crecimiento de los precios no es constante en el tiempo. A lo largo de la serie podemos observar que los movimientos en los precios han variado bastante. Para demostrar que los supuestos de homocedasticidad no se cumplen, supongamos que la serie de los rendimientos DoD siguen el siguiente proceso:

$$Y_t = \mu + \varepsilon_t$$

Donde μ representa la media de los rendimientos diarios y ε_t la perturbación contemporánea en la medición. Con los datos históricos y dado que la media de las observaciones se aproxima a cero, podemos calcular el valor de las distorsiones al cuadrado como la medida de volatilidad. Al representar los resultados del cálculo anterior, obtenemos los siguientes resultados de la gráfica 20 y a simple vista observamos que las innovaciones no parecen comportarse como un ruido blanco usual.

Figura 20. Innovaciones en la serie del precio de la Mezcla Mexicana de Petróleo



Fuente: Elaboración propia con software R studio

Para probar el supuesto de homocedasticidad, la función de autocorrelación de los errores al cuadrado no debería ser estadísticamente diferente de cero. Sabemos que la varianza condicionada de la serie yt está en función del error al cuadrado.

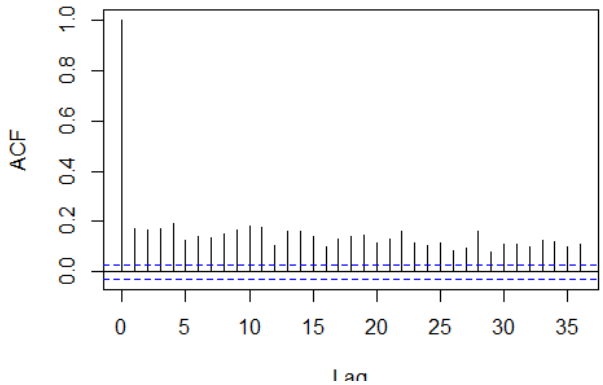
$$\begin{aligned} \text{var}(y_{t+1}|y_t) &= E_t[(y_{t+1} - a_0 - a_1 y_t)^2] \\ &= E_t(\varepsilon_{t+1})^2 \end{aligned}$$

Cumplir homocedasticidad implica que los coeficientes de los rezagos deben ser igual a cero, lo que indica que no hay relación entre los errores en el tiempo y dicho comportamiento debe estar reflejado en la función de autocorrelación derivada de la representación de la varianza condicional

$$\hat{\varepsilon}_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \hat{\varepsilon}_{t-1}^2 + \alpha_2 \hat{\varepsilon}_{t-2}^2 + \cdots + \alpha_q \hat{\varepsilon}_{t-q}^2 + v_t$$

En la gráfica 21 claramente podemos observar que la desviación al cuadrado del momento t tiene una persistente correlación con sus rezagos. Por lo tanto, los errores son heterocedásticos y transfieren esa característica al proceso de los rendimientos en general. Consecuentemente, al seguir la metodología podemos modelar la volatilidad de la serie como un proceso GARCH.

Figura 21. Función de autocorrelación de las innovaciones



Fuente: Elaboración propia con software R studio

Un camino alternativo para justificar el uso de un modelo de heterocedasticidad condicionada es utilizar la prueba del Multilpicador de Lagrange para efectos ARCH. La prueba realiza un proceso más exhaustivo al que describimos anteriormente, ya que aplica una regresión de los errores al cuadrado de sus rezagos y evalúa la hipótesis nula sobre que los coeficientes son iguales a cero. En este estudio aplicamos la prueba para cinco rezagos y obtenemos un p-value < 2.2e-16, lo que nos autoriza a aceptar efectos ARCH.

Ahora bien, identificar un modelo implica definir tres elementos: número de rezagos a utilizar, ecuación de la varianza y la distribución de la variable que acompaña la varianza condicional en la representación de los errores del proceso Yt. Encontrar el modelo más apropiado para nuestros datos depende de la correcta especificación de dichos componentes. En este punto, son útiles los indicadores de la bondad de ajuste: Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC). Cuanto mayor es la función de verosimilitud, mejor será el ajuste de nuestro modelo estadístico a los datos, lo que implicaría tomar en cuenta más parámetros, pero incluirlos nos pone en riesgo de caer en una sobrestimación. Ambos criterios ofrecen una medida de referencia que califica la calidad de un modelo evaluando el trade off entre la función de verosimilitud y el número de parámetros usado. La única diferencia entre ellos es la manera en la que penalizan el número de coeficientes en el modelo:

$$AIC = -2(loglik) + 2K \qquad BIC = -2(\text{loglik}) + Kln(N)$$

Por lo tanto, si evaluamos la bondad de ajuste de un conjunto de modelos, es claro que el mejor será aquel con el menor AIC o BIC.

Con ayuda de un software estadístico es posible automatizar la identificación del mejor modelo con referencia en los criterios mencionados. La automatización consistirá en codificar un loop que itere el cálculo de un modelo con base en los elementos a identificar: las diferentes distribuciones de los parámetros, la gama de modelos de la varianza considerados y un máximo de rezagos específicos. Posteriormente, calculamos el AIC o BIC de cada estimación obtenida en la iteración para establecer la referencia comparativa y de selección del modelo más apropiado para nuestro set de datos. En el presente estudio tomaremos en cuenta la distribución normal y student; los modelos Garch, e-Garch y GJR-Garch y un máximo de cinco rezagos. Usaremos el criterio de BIC porque ofrece modelos más parsimoniosos con un número relativo menor de coeficientes.

Nuestra estrategia arroja un modelo un ARMA (0,1)-EGARCH(1,1) como la mejor especificación para nuestros datos, suponiendo que Et sigue una distribución t-Student con V grados de libertad:

Tabla 2 Resumen de los estimadores del modelo ARMA (0,1) - EGARCH (1,1)

	MME	
	Coeficiente	P-Value
μ	0.0003	0.1457
Ma (1)	0.0629	0.0000
ω	-0.0386	0.0000
α_1	-0.0446	0.0000
β	0.9950	0.0000
γ	0.0952	0.0001

Fuente: Elaboración propia con paquetería *rugarch* en el software R studio

El intercepto y el componente MA en la ecuación de la media son positivos, lo que indicaría que el precio de MME tiende a aumentar en el largo plazo. En la ecuación de la varianza, vemos que beta es positiva y estadísticamente significativa, lo que implica que la volatilidad del pasado es una buena referencia para pronosticar los valores del siguiente periodo. Así mismo, resulta preciso realizar pruebas diagnóstico sobre nuestros residuos estandarizados para comprobar si nuestro modelo es apropiado. En primer lugar, los estadísticos Ljung-Box estimados son suficientemente pequeños y no estadísticamente significativos, por lo que verificamos que no se mantienen correlación serial. Posteriormente, observamos que el p-value de los estimadores del Multilpicador de Lagrange son mayores a 0.05 y confirmamos que nuestra especificación logra capturar los efectos GARCH.

Tabla 3 Pruebas Estadísticas

	Estadístico	P-Value
Ljung-Box	1.228	0.2677
Multiplicador de Lagrange	0.045	0.8315

Fuente: Elaboración propia con paquetería *rugarch* en el software R studio

Ahora bien, vamos a utilizamos nuestro modelo para pronosticar sigma por medio de un procedimiento Bootstrap. Al realizar dos mil simulaciones de la proyección a cien días, obtenemos que el valor de la volatilidad diaria tiende hacia un valor de 1.6%, es decir, una volatilidad anual de 27%. Finalmente, de acuerdo con el procedimiento que discutimos previamente sobre el modelo binomial para las opciones reales, nos serviremos de nuestro resultado obtenido para estimar los movimientos de u y d que indicarán los cambios en el tiempo a los que el valor del proyecto estará sujeto.

5.2 MODELO ROA

El presente estudio evalúa el proyecto de inversión de Dos Bocas como una opción de abandonar. Por una parte, el análisis operativo y financiero nos muestra que históricamente PEMEX ha tenido problemas para generar rentabilidad. Por otra, los reportes de consultoras indican que la industria energética a nivel global está trascendiendo a la adopción de fuentes sustentables. Ambos factores anteriores, ponen en tela de juicio la viabilidad de la refinería, por lo que en el estudio de inversión, los directivos estarían interesados en verificar una estrategia para revertir la inversión en caso de que las condiciones económicas no sean favorables. Bajo el esquema de la opción de abandonar, el valor intrínseco en cada etapa de vida del proyecto al está dado por:

$$Max(\,Valor\ de\ Salvamento, Continuar)$$

En la expresión anterior el Valor de Salvamento equivale al monto que esperaríamos recibir por la venta de los activos y derechos sobre la refinería. El concepto de Continuar representa los flujos de efectivo proyectados en valor presente por conservar el título del proyecto. De tal manera, modelar la opción de abandonar en la valuación incorpora un componente dinámico de decisión que permite en cualquier momento maximizar la rentabilidad de la inversión. El objetivo del ejercicio es capturar un mayor valor del proyecto como consecuencia directa de dicha flexibilidad administrativa y comparar el resultado con el VPN estimado por PTRI.

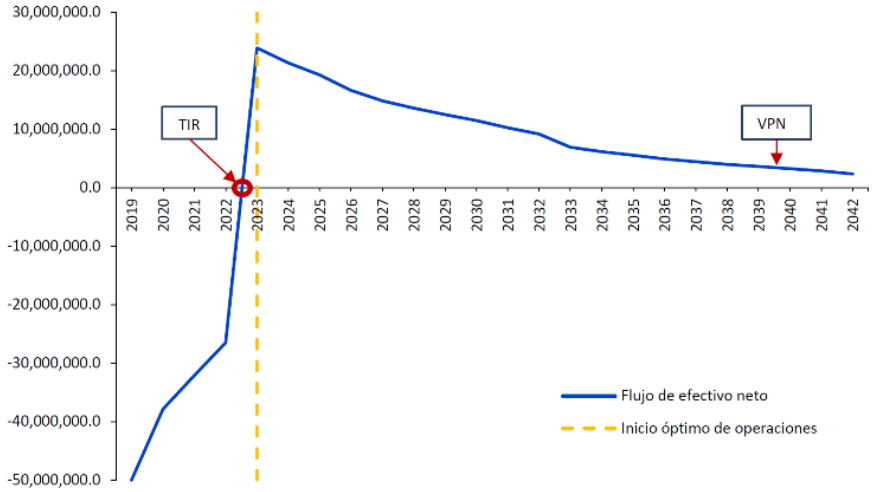
El periodo de valuación para este análisis comprende 23 años a partir del 2019 cuándo comenzó la construcción de la refinería. Así mismo, obtuvimos una estimación para la volatilidad de largo plazo del precio de la mezcla mexicana de 27% anual con base en nuestro modelo E-GARCH.

Determinar el valor de salvamento precisamente es complicado ya que la refinería aún sigue en construcción y la cifra de inversión total aún no es pública. No obstante, por simplicidad optamos por considerar el costo de inversión de refinerías constituidas que cumplieran con una configuración y capacidad semejante a la de Dos Bocas. Además, contemplamos aquellos casos que no representaran expansiones de refinerías existentes, sino diseñadas y construidas desde cero. Por la afinidad regional, resultó razonable el caso de la refinería ELK POINT en Dakota del Sur con capacidad de 400,000 MBD y cuya inversión fue estimada en 10 billones de dólares (Technology 2015).

En un apartado anterior mencionamos que PEMEX reservó de forma privada su estudio sobre la rentabilidad de la refinería. Sin embargo, la evaluación de los resultados de PTRI que realizó la Auditoria Superior de la Federación, si bien no hace referencia exacta a los valores sobre el cálculo del VPN, aporta información relevante sobre los supuestos necesarios para aproximar su estimación. Originalmente, PTRI estimó un costo de inversión previsto de 166,760,728.8 miles de pesos. El estudio de ASF refiere que la valuación de PTRI supone un porcentaje de utilización de la refinería del 90%. Así mismo, los flujos de efectivo fueron calculados bajo el supuesto en el que el 93% de los ingresos esperados provendrán de la venta de gasolina y diésel, así como el 84% de los gastos de operación son por consumo de insumos, principalmente petróleo.

Respecto al cálculo específico de la rentabilidad del proyecto, PTRI determinó el VPN con base al flujo de efectivo neto que considera un impuesto del 30%, una depreciación lineal durante el horizonte de valuación y una taza de descuento basada en una WACC cuyo valor es menor al 10%. Específicamente, el documento de la ASF muestra la siguiente gráfica del comportamiento del VPN:

Figura 22. Flujo de Efectivo Neto sobre la Rentabilidad de la Refinería Dos Bocas



Fuente: Elaborada por la ASF con base en el Caso de Negocio de la Refinería Dos Bocas proporcionado por PTRI. Disponible en la Auditoría de Desempeño: 2019-6-90T9M-07-0409-2020.

Al realizar el ejercicio de aproximación del VPN para el flujo de efectivo neto con base en la información anterior, obtenemos un valor de 40,112 millones de pesos, por lo que el proyecto resultaría rentable. No obstante, los supuestos sobre la WACC y el nivel de utilización no resultan compatibles con el análisis financiero y operativo de PTRI que hemos realizado en apartados anteriores. En primer lugar, la WACC es inferior a la tasa social de descuento cuyo valor de 10% fue determinado por la SHCP para evaluar los proyectos de inversión de las dependencias de la Administración Pública Federal. Además, dicha tasa fue calculada en 2014 y no ha sido modificada desde entonces, por lo que su valor puede nos ser coherente con las condiciones económicas contemporáneas al proyecto (ASF, Pemex Transformación Industrial Proyecto de Construcción de la Refinería Dos Bocas 2020). En segundo Lugar, el promedio histórico de la capacidad utilizada en el SNR es de 66%. Así mismo, en 2019 las refinerías nacionales e internacionales operaron en promedio 40% y 79.9% respectivamente.

Derivado de lo anterior, elaboramos dos casos adicionales a la aproximación del VPN calculado por PEMEX, dónde evaluaremos la sensibilidad de los resultados a cambios sobre la WACC y la capacidad utilizada. En el segundo caso emplearemos la tasa de descuento propuesta por la SHCP y la referencia internacional de la capacidad operativa. Con base en la información financiera de PTI hemos calculado una WACC del 13% y junto con el promedio histórico de la capacidad utilizada del SNR conformarán el tercer caso. Así, la siguiente tabla contrasta los resultados obtenidos para cada escenario.

Tabla 4 Resultados Estimados

Caso	VPN	ROA
Pemex @6%	$40,112	$59,888
Neutro @10%	$(75,925)	$175,925
Pesimista @13%	$(93,724)	$193,724

Fuente: Elaboración propia con software R studio. Cifras expresadas en millones de pesos. 6%, 10% y 13% figuran como las tasas de descuento utilizadas para la respectiva valuación

La columna del VPN en el cuadro anterior muestra que el proyecto es rentable únicamente en el caso de PTRI dónde utilizamos una WACC de 6% y suponemos que la refinería opera al 95% de su capacidad. Cuando el costo del capital es mayor al anterior, comenzamos a obtener valores no positivos en el VPN. El caso neutro indica que el valor de la inversión decrece 285% respecto del escenario previo al considerar los ajustes mencionados.

La columna ROA muestra el valor de la opción real que intuitivamente surge del hecho de contemplar la flexibilidad administrativa como oportunidades para maximizar los rendimientos a lo largo de la vida del proyecto. La opción de abandonar para nuestro caso práctico refleja el valor adicional en la evaluación que es producido por la alternativa de no continuar el desarrollo del proyecto y recuperar el componente de la inversión que definimos como el valor de salvamento. Por lo tanto, queda demostrado que la posibilidad de tomar decisiones futuras óptimas aumenta el valor del proyecto sobre su valor estático del VPN.

El valor total del proyecto de la refinería resulta de agregar el monto de la opción real al VPN, por lo que nuestros tres casos generar un estimado de $100,000 millones de pesos. En nuestro estudio, el valor total es igual al valor de salvamento, lo cual indica que la opción de abandonar fue ejercida desde el primer periodo de vida del proyecto, ya que, bajo las condiciones dadas, la operación de la refinería no es capaz de generar una rentabilidad mayor al ingreso por vender completamente el activo. En consecuencia, la decisión de inversión óptima de acuerdo con nuestros resultados es **no** llevar a cabo el proyecto.

6. CONCLUSIONES

Las herramientas de valuación ortodoxas fallan en capturar las condiciones económicas que rodean al proyecto de inversión. Sin embargo, la metodología ROA busca resolver tales limitantes y complementar el análisis del VPN al proporcionar un marco teórico que modele reversibilidad, flexibilidad e incertidumbre. Demostramos que el principal resultado de lo anterior es un aumento en el valor estimado como consecuencia de considerar la gama de opciones por las que el inversionista puede optar para maximizar rendimientos en las diferentes etapas del plan. Indicamos que la aplicación de la herramienta resulta más simple e intuitiva al usar un modelo binomial para determinar el valor de la opción, además de brindar un esquema útil para formular estrategias. Respecto de la estimación del parámetro de la volatilidad en el modelo binomial, optamos por el uso de un modelo E-GARCH para capturar los efectos de aglomeración y apalancamiento característicos en la serie de precios de los energético.

La complejidad de la teoría ROA ha confinado el uso de la herramienta únicamente en investigaciones académicas. Por ello, la sección dedicada a exponer los conceptos básicos pretende ofrecer una introducción accesible para quienes no están familiarizados en un principio con los modelos ROA. En conjunto, la aplicación al caso práctico busca promover el uso práctico de la herramienta, especialmente en aquellas decisiones de inversión con impactos económicos significativos que requieren análisis más sólidos e integrados. Este trabajo no intenta persuadir al lector de considerar la metodología discutida como la herramienta ulterior en el estudio de decisiones de inversión. El ROA es una disciplina relativamente nueva y está sujeta a sus propias limitantes, lo cual incentiva la discusión y abre paso a potenciales mejoras.

Aunque el ROA logra capturar las características principales del proceso de inversión, los supuestos que lo componen aún no integrar completamente las circunstancias económicas inherentes al negocio. La metodología presentada únicamente considera un activo subyacente, lo cual no es una condición realista, ya que son múltiples las variables que afectan a un proyecto (Roldán y Miranda 2019). Lo anterior ha incentivado el desarrollo de importantes extensiones a los modelos ROA. Sin embargo, el objetivo de promover la adopción de la herramienta en la práctica puede quedar obstaculizado como consecuencia de incorporar métodos matemáticos y estadísticos sofisticados. Por lo tanto, resultaría pertinente ampliar el desarrollo de alternativas que logren atender las limitantes y al mismo tiempo favorezcan su practicidad.

7. BIBLIOGRAFÍA

Amram, Martha, y Nalin Kulatilaka. 1999. *Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World.* Boston: Harvard Business School Press.

ASF. 2015. *Informe del Resultado de la Aditoría Practicada al Pasivo Laboral.* Ciudad de México: ASF.

ASF. 2020. *Pemex Transformación Industrial Proyecto de Construcción de la Refinería Dos Bocas.* Ciudad de México: Grupo funcional Desarrollo económico.

Bai, Jushan, y Pierre Perron. 1998. «Estimating and Testing Linear Models with multiple structural changes.» *Econometrica* 47-78.

Black, Fischer, y Myron Scholes. 1973. «The Pricing of Options and Corporate Liabilities.» *The Journal of Political Economy* 637-654.

Bloomberg. 2014. *El Financiero.* 02 de Noviembre. Último acceso: 05 de Diciembre de 2021. https://www.elfinanciero.com.mx/economia/por-que-el-precio-del-petroleo-bajo-tanto-y-tan-rapido/.

Bollerslev, Tim. 1986. «Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity.» *Journal of Econometrics* 307-327.

Brandão, Luiz, Warren J. Hahn, y James S. Dyer. 2005. «Using Binomial Decision Trees to Solve Real-Option Valuation Problems.» *Decision Analysis* 69-88.

Brennan, Michael J., y Eduardo S. Schwartz. 1985. «Evaluating Natural Resource Investment.» *The Journal of Business* 135-157.

CNH. 2020. *Análisis de Reservas de Hidrocarburos 1P, 2P y 3P.* Ciudad de México: CNH.

COFECE. 2019. *Transición hacia Mercados Competidos de Energía: Gasolinas y Diésel.* Ciudad de México: COFECE.

Copeland, Tom, y Peter Tufano. 2004. «A Real-World Way to Manage Real Options.» *Harvard Business Review* (Harvard Business Review) 9-90.

Copeland, Tom, y Vladimir Antikarov. 2003. *Real Options: A practitioner's Guide.* Cheshire: Texere.

Cox, John C., Stephen A. Ross, y Mark Rubinstein. 1979. «Option Pricing: a simplified approach.» *Journal of Financial Economics* 229-263.

Dias, Marco Antonio Guimarães. 2004. «Valuation of exploration and production assets: an overview of real options models.» *Journal of Petroleum Science and Engineering* 93-114.

Dixit, Avinash K., y Robert S. Pindyck. 1993. *Investment under Uncertainty*. New Jersey: Princeton University Press.

EIA. 2022. *EIA.* 23 de Febrero. Último acceso: 21 de Mayo de 2021. https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/refining-crude-oil-the-refining-process.php.

Enders, Walter. 1998. *Applied Econometric Time Series.* New Jersey: John Wiley & Sonds.

Engel, Robert F. 1982. «Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation.» *Econometrica* 987-1007.

Hull, John C. 2015. *Option, Futures, and Derivatives.* Toronto: Pearson.

Ipsmiller, Edith, Keith D. Brothers, y Desislava Dikova. 2019. «25 Years of Real Option Empirical Research.» *European Management Review* 55-68.

Lambrecht, Bart M. 2017. «Real Options in Finance.» *Journal of Banking & Finance* 166-177.

Laughton, David. 1998. «The Management of Flexibility in the Upstream Petroleum Industry.» *The Energy Journal* 83-114.

McKinsey. 2021. *Global downstream outlook to 2035.* New York: McKinsey & Company.

Mun, johnathan. 2002. *Real Options Analysis.* New Jersey: John Wiley & Sons.

Murrieta, Carlos. 2021. *Nexos.* 1 de Abril. Último acceso: 24 de May de 2021. https://www.nexos.com.mx/?p=54538.

—. 2021. *Nexos.* 1 de Abril. Último acceso: 21 de Mayo de 2021. https://www.nexos.com.mx/?p=54538.

Myers, Stewart C. 1977. «Determinants of corporate borrowing.» *Journal of Financial Economics* 147-175.

Nelson, Daniel B. 1991. «Conditional Heteroskedasticity in Asset Returns: A New Approach.» *Econometrica* 347-370.

PEMEX. 2015. *Las Reservas de Hidrocarburos de México.* Ciudad de México: PEMEX.

PEMEX. 2019. *Plan de Negocios de Petróleos Mexicanos 2019-2023.* Ciudad de México: PEMEX.

Portillo, Alejandro Limón. 2018. *CIEP*. 23 de Julio. Último acceso: 17 de Mayo de 2021.

Roldán, Ricardo Massa, y Montserrat Reyna Miranda. 2019. «Valuing a natural gas pipeline expansion project: a copula-TGARCH application in Mexico.» *Contadurí y Administración* 1-19.

Sánchez, Aranxa. 2019. *NEXOS*. 23 de Julio. Último acceso: 24 de Febrero de 2021. https://economia.nexos.com.mx/formacion-de-precios-de-gasolinas-y-diesel-en-mexico-por-que-importa/.

SEGOB. 2019. *Diario Oficial de la Federación.* 12 de Julio. Último acceso: 15 de Marzo de 2021. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019#gsc.tab=0.

SENER. 2019. *Refinería Olmeca.* 22 de Feberero. Último acceso: 15 de Marzo de 2020. https://dosbocas.energia.gob.mx/.

Smit, Han T.J., y Lenos Trigeorgis. 2004. *Strategic Investment.* New Jersey: Princeton University Press.

Technology, Hydrocarbons. 2015. *Hydrocarbons Technology.* 08 de Mayo. Último acceso: 25 de Marzo de 2022. https://www.hydrocarbons-technology.com/projects/elkpointrefinery/.

WB. 2021. *Banco Mundial*. 12 de Enero. Último acceso: 15 de Marzo de 2022. https://datos.bancomundial.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?locations=MX.

WB. 2021. *Global Economic Prospects.* Washington: World Bank Group.