

Tgarch y análisis de opciones reales como herramienta de decisión en el mercado del maíz en México

Ingrid Franco Vega*

Montserrat Reyna Miranda**

(Recibido: noviembre 2020/Aceptado: marzo 2021)

Resumen

En el presente trabajo proponemos una herramienta para la toma de decisiones de almacenamiento o venta en el mercado mexicano del maíz. La herramienta consiste en la aplicación del método de valuación de opciones reales con la implementación de la volatilidad del mercado a través de un modelo T-GARCH. Aplicamos la herramienta a un proyecto de inversión de diferir la venta de maíz en el Estado de Sinaloa, los resultados muestran que la herramienta es útil para la toma de decisiones y la administración de riesgos en el marco de la agricultura por contrato. Esta investigación está alineada con el objetivo de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) en México, de mejorar los ingresos de los productores promoviendo los procesos de agregación de valor.

Palabras clave: heteroscedasticidad, TGARCH, Opciones Reales, mercado de maíz.

Clasificación JEL: C22, C58, G31, G32, Q14.

* Profesora-investigadora en EGADE Business School, Tecnológico de Monterrey <ingrid_franco@cargill.com>.

** Profesora-investigadora en EGADE Business School, Tecnológico de Monterrey <montserrat.reyna@tec.mx>.

Tgarch and analysis of real options as a decision tool in the corn market in Mexico

Abstract

In the present work we propose a tool to decide between selling or storage in the Mexican corn market. The tool consists of the application of the real option valuation method along with a TGARCH model for the volatility of the prices of corn. We apply the methodology to an investment project of differing the sale of corn in Sinaloa, Mexico. The results show that the methodology is a valuable tool for decision making as well as risk management in the frame of contract agriculture. This research is aligned with the objective of the Agriculture authority in Mexico, which aims to improve the income of Mexican producers by promoting value adding.

Key words: heteroskedasticity, TGARCH, Real Options, maiz market.

JEL classification: C22, C58, G31, G32, Q14

1. Introducción

El cultivo de maíz ha sido de gran importancia a nivel mundial debido al consumo pecuario y también, en algunas regiones, al consumo humano, desde la época prehistórica (Kumar & Jhariya, 2013).

Para México, este cultivo es de particular importancia, no sólo porque México es el origen geográfico de la planta (Nadal, 2001), sino porque el maíz forma parte importante de la alimentación de la población a través de la tortilla. Este cereal representa el mayor cultivo en México, con el 30% de la superficie sembrada en el país (SIAP, 2018), sin embargo, esto no es suficiente para satisfacer la demanda interna (USDA, 2018). Dado el alto consumo de este cereal en el país, 40.4 millones de toneladas métricas anuales en el ciclo productivo 2017-2018 (USDA, 2018), México tuvo un déficit de 10.5 millones de toneladas métricas. De acuerdo con el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustainable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA), el país abastece la demanda de maíz blanco y el déficit presente se deriva de la falta de cosechas de maíz amarillo, grano utilizado en el sector pecuario, harinero y del almidón. Estados Unidos fue el principal proveedor para abastecer esta demanda (USDA, 2018).

Debido a la importancia de este cultivo, y a que se debe importar una parte para satisfacer la demanda nacional, los precios del maíz a nivel mundial afectan de manera importante el mercado nacional.

Como se puede intuir, el panorama no está exento de incertidumbre. Hay riesgos debidos a variables internacionales como producción mundial, niveles de inventarios de los principales productores y consumidores, tipo de cambio, tasas de interés, producción y precios de biocombustibles y crecimiento de la demanda en los países con mayor consumo (China consume 255 millones de toneladas, Bloomberg, 2019). Actualmente, el mercado enfrenta señales de mercados protecciónistas imponiendo aranceles que impactan en los flujos de importaciones y exportaciones a nivel mundial. Finalmente, nos enfrentamos al cambio climático. Este panorama propicia un entorno con gran incertidumbre presente, tanto en los precios del producto, como en las decisiones de consumidores y productores de maíz.

Esto vuelve de vital importancia que el productor cuente con herramientas adecuadas para la toma de decisiones, que le permitan administrar los riesgos a los que se enfrenta.

En el presente trabajo, proponemos una herramienta que integre la incertidumbre presente en el mercado para que los productores puedan tomar decisiones de manera asertiva y flexible, y así sean más competitivos en un entorno cambiante y volátil. Además, el objetivo es que la herramienta pueda ser usada en conjunto con otras que ya existen en el mercado, como el modelo de agricultura por contrato.¹

La herramienta consiste en la aplicación del método de opciones reales a la evaluación de la decisión de almacenamiento o comercialización de maíz nacional por parte del productor. La principal contribución es la implementación de un modelo de volatilidad T-GARCH que capture la incertidumbre presente en el mercado a través de la modelación del precio del futuro del maíz que cotiza en la Bolsa Mercantil de Chicago (Chicago Mercantile Exchange, CME). Esta herramienta permite al productor definir claramente momentos de almacenamiento y venta del grano, para optimizar los flujos que recibe por su cosecha. De esta forma, la investigación está alineada con el objetivo de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) en México, de mejorar los ingresos de los productores promoviendo los procesos de agregación de valor.

La herramienta se prueba con datos de la cosecha del estado de Sinaloa, el mayor productor a nivel nacional (SIAP, 2018), y que cuenta con la mayor

¹ En 1991, el gobierno mexicano creó un programa cuya principal finalidad era fomentar la comercialización de granos nacionales y proteger los ingresos del productor otorgando subsidios para la adquisición de coberturas, tanto para compradores como vendedores de dichos productos. Actualmente, el programa se conoce como agricultura por contrato y reúne a compradores y productores para la realización de un acuerdo de compra venta que ampara la transacción futura de los granos a sembrar en las cosechas de otoño-invierno y de primavera-verano. El contrato está ligado al precio del futuro de maíz que cotiza en la Bolsa Mercantil de Chicago (Chicago Mercantile Exchange, CME).

capacidad de almacenamiento en el país, con el 20.7% del total (ASERCA, 2013). Se toma la base del precio publicada por el gobierno para 2016 (ASERCA, 2016), y se le suma el futuro de maíz que cotiza en el CME correspondiente al mes de julio, siguiendo el mecanismo de fijación de precios del programa de agricultura por contrato. La incertidumbre se modela a través de la volatilidad del rendimiento en el futuro del maíz correspondiente. Se utiliza un horizonte de inversión de un año, pues en México no es factible almacenar el grano por más tiempo debido a la falta de infraestructura que hace que los costos de almacenamiento sean muy altos si no existe una rotación rápida de inventarios (CEDRSSA, 2019).

Los resultados de la aplicación de la herramienta muestran decisiones diferentes respecto a la evaluación del proyecto de venta de maíz mediante la metodología de Valor Presente Neto. De acuerdo con esta, la venta óptima era en abril, mientras que al aplicar la herramienta propuesta y tomar en cuenta la volatilidad del futuro de maíz, se concluye que el momento óptimo de venta es en el mes de julio, debiendo almacenar el grano tres meses más.

Se concluye que la utilización de métodos que incorporen volatilidad permite al agente económico contar con información que le permita actuar ante un entorno cambiante. También se permite al productor el hacer el análisis de diferentes escenarios y contar con la opción de vender al momento en que el rendimiento corresponda al riesgo que está dispuestos a tomar.

Los resultados encontrados van en línea con la literatura, que se revisará en la siguiente sección.

El trabajo está organizado como sigue. En la sección 1 se presenta la revisión de la literatura. En la sección 2 se explica el mercado mexicano del maíz y el modelo de agricultura por contrato. En la sección 3 se presenta la herramienta, seguida de su aplicación y resultados en la sección 4 y, finalmente, la sección 5 cierra con conclusiones y próximas líneas de investigación.

2. Sección 1. Revisión de la literatura

El análisis de opciones reales surge como una alternativa para incorporar la incertidumbre y flexibilidad presente en varios proyectos de inversión, cosa que las herramientas “tradicionales”² no incorporan (Dixit *et al.*, 1994; Trigeorgis, 1996; Schwartz & Trigeorgis, 2001, Copeland & Antikarov, 2001; Mun, 2006; Rozo, 2009). Además de agregar dinamismo y flexibilidad a la evaluación, las opciones reales nos permiten tomar diferentes decisiones, como la aplicación

² Valor Presente Neto (NPV por sus siglas en inglés), Tasa Interna de Retorno (IRR por sus siglas en inglés), Índice de Rentabilidad, Periodo de Recuperación, etcétera.

de estrategias que se pueden implementar durante la vida del proyecto (Tri-georis, 1996; Mun, 2006).

Específicamente en agricultura destacan los siguientes trabajos. Musshoff (2012) plantea el uso de opciones reales para evaluar la decisión de sembrar cultivos de rotación corta. Concluye que las opciones reales llevan a una toma de decisión mejor informada porque los resultados incluyen el efecto de la volatilidad de la siembra evaluada, que es calculada con la desviación estándar de los datos. Luong & Tauer (2006) evalúan la producción de café en Vietnam y determinan el nivel de precio y costos de producción a partir de los cuales se obtiene una ganancia. Para la volatilidad utilizan la desviación estándar de los precios y concluyen que la evaluación y decisión dependerá de los niveles de costos variables vs los precios de mercado. Hertzler (2007) estudia el cambio climático, su propuesta es utilizar diagramas de decisión por lo que su enfoque se basa en estrategias administrativas para mejorar la planeación de las empresas que son afectadas por este. Tzouramani & Mattas (2004) concluyen que la metodología de opciones reales es una mejor aproximación para la toma de decisiones en materia de evaluación de proyectos de invernaderos y utilizan la simulación Monte Carlo para proyectar la volatilidad. Koo y Wright (2000) aplican opciones reales para encontrar el momento óptimo para aplicar recursos genéticos que incrementan la calidad de diversas plantas con modificaciones genéticas teniendo en cuenta factores como el tamaño, el valor y la estrategia adecuada, utilizando un modelo de Poisson para modelar los efectos. Saphores (2000) evalúa un modelo estocástico sobre la aplicación y medidas de control de pesticidas, la utilización de opciones reales fue seleccionada por la aleatoriedad de las variedades y densidades de las plagas que atacan a las cosechas. Toscano Pardo (2004) analiza mediante opciones reales y aplicando el modelo de volatilidad histórica corregida, tres diferentes tipos de siembra: eucalipto, naranjas y fresas para optimizar el uso de suelo fértil. Manzanares & Colmenero (2008) estudia el mercado español de papa y el aseguramiento del ingreso de los productores mediante la aplicación de la metodología de opciones reales, utilizando como medida de volatilidad la desviación estándar. Concluyen que las opciones reales permiten una mejor óptica. Milanesi *et al.* (2012) dirige su investigación a la selección del momento óptimo de tala de árboles mediante el método de opciones reales y utiliza la simulación Monte Carlo para proyectar la volatilidad. Concluye que mediante el método de opciones reales es mejor diferir la tala para mejorar el ingreso esperado.

Los anteriores trabajos utilizan en su mayoría como medida de riesgo la desviación estándar, siguiendo la línea de Amran *et al.* (1999), algunos utilizan la simulación Monte Carlo y otros modelos estocásticos para predecir el precio. Otra línea de investigación se ha enfocado en la modelación de la

volatilidad antes de tomarla en cuenta como insumo para la metodología de opciones reales. Pederson & Zou (2009) evalúa el proyecto de la expansión de una planta de etanol mediante opciones reales, utilizando la simulación Monte Carlo para modelar la volatilidad. Calcula la correlación de la rentabilidad de la planta con los precios del maíz y el gas natural, y concluye que la decisión óptima de acuerdo es la de posponer o abandonar la opción de expandir la planta. Roldán & Miranda (2018), aplican la metodología de opciones reales a la valuación de una línea de distribución de gas natural, modelando la volatilidad del proyecto mediante un modelo de cópula con TGARCH aplicado al precio del gas natural y el tipo de cambio dólar-peso mexicano. Bulan *et al.* (2009) modelan la volatilidad del mercado inmobiliario de Vancouver a través de un GARCH(1,1), argumentando que la medición relevante de la volatilidad es una medición ex-ante. Encuentran que el impacto de la volatilidad es estadísticamente significativo, mientras que, si la competencia es mayor, el impacto de la volatilidad en el precio de la opción es menor.

El uso de las opciones reales como herramienta de administración de riesgos ha sido explorado por Miller & Waller (2003), que proponen que incorporar el análisis de opciones reales a un sistema de administración de riesgos es positivo, y se concentran en el estudio cualitativo de las opciones reales. Woodward *et al.* (2014) usan el análisis de opciones reales como una herramienta para lidiar con el riesgo de inundaciones, particularmente, encuentran el momento óptimo para realizar ciertas intervenciones. Watkiss *et al.* (2015) hacen algo similar, enfocándose en las fortalezas y debilidades de cada herramienta como ayuda en la toma de decisiones dinámica. Para proyectos agrícolas, poco se ha hecho siguiendo esta línea de investigación, Jacomé Gagñay & Garrido Colmenero (2017) usan un GARCH (1,1) para modelar la volatilidad del precio del café en Ecuador, definiendo mediante opciones reales precios de entrada y salida del mercado. Sin embargo, los trabajos enfocados al mercado del maíz son escasos o nulos, particularmente en lo que se refiere a México.

3. Sección 2. Mercado del maíz

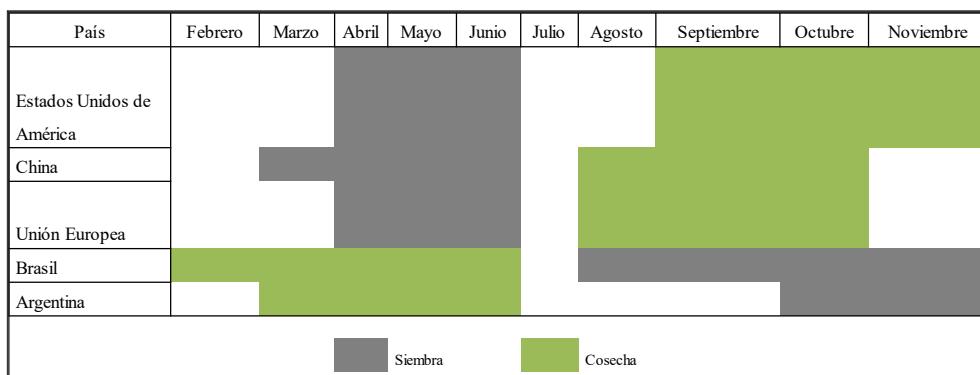
2.1 Mercado internacional

Las tablas 1 a 3 describen el mercado internacional del maíz. De la tabla 1, podemos notar que la cosecha del mayor productor y consumidor que es Estados Unidos está en línea con la del segundo mayor consumidor y productor que es China. Por otro lado, los exportadores más importantes de Sudamérica trillan³ cuando se está

³ Trilla: “se denomina trilla a la operación que se hace con los cereales, tras la siega o cosecha, para separar el grano de paja. Según las épocas y las regiones se han empleado diversos sistemas para separar el grano de la paja golpeándolo, pisoteando la mies o empleando mayales y trillos” (RAE,2019).

a finales de la “vieja cosecha” de Estados Unidos. Los niveles de exportaciones de Sudamérica y los rendimientos de las cosechas de Estados Unidos y China impactarán directamente en el precio del maíz.

Tabla 1
Calendario de las cosechas de los mayores
Productores a nivel internacional



Fuente: elaboración propia con información de Kowalski 2018.

En la tabla 3 se expone que Estados Unidos produce el 34% del flujo mundial de maíz, por lo cual, cualquier movimiento o impacto en sus cosechas afecta el precio del producto a nivel mundial. La segunda participación la tiene China al contar con el 24% de la producción mundial, sin embargo, esta producción no es suficiente para su consumo doméstico de 263 millones de toneladas métricas. Por el lado de los importadores, México ocupó el segundo lugar a nivel mundial con un déficit de 16.13 millones de toneladas. En la primera posición se encuentran Europa que cuentan con un déficit de 18.47 millones de toneladas métricas. En el continente americano se observa que, después de Estados Unidos, Brasil y Argentina cuentan con exportaciones que representan el 16% y 15% a nivel global. Finalmente, el flujo de maíz más importante en Europa se da en Ucrania donde se producen 24 millones de toneladas y se exportan 24 millones, que representan el 16% de las exportaciones en el mundo.

Tabla 2
Principales países productores ciclo agrícola 2017-2018

Principales Participantes del mercado	Importaciones	% Importaciones mundiales	Consumo doméstico total	Exportaciones	% Exportaciones mundiales
Mundial 2017-2018	149 960.00		1 090 281.00	147 776.00	
USA 2017-2018	915.00		313 981.00	61 916.00	41.90%
China 2017-2018	3 456.00		263 000.00	1 089.00	
Zona Euro 2017-2018	18 465.00	12.31%	76 500.00	1 749.00	1.18%
Brasil 2017-2018	915.00		63 500.00	24 154.00	16.35%
Argentina 2017-2018	7.00		12 400.00	22 000.00	14.89%
Otros países 2017-2018	91 670.00	61.13%	286 500.00	11 785.00	7.97%
Egipto 2017-2018	9 464.00	6.31%	15 900.00	10.00	
México 2017-2018	16 129.00	10.76%	42 500.00	958.00	
Irán 2017-2018	8 900.00	5.93%	9 800.00	-	
Ucrania Dic 2017-2018	39.00		6 200.00	24,115.00	16.32%

Fuente: elaboración propia con información del USDA-2018 recuperada de Bloomberg.

Tabla 3
Principales importadores - exportadores ciclo agrícola 2017-2018

Principales Participantes del mercado	Importaciones	% Importaciones mundiales	Consumo Doméstico Total	Exportaciones	% Exportaciones mundiales
Mundial 2017-2018	149 960.00		1 090 281.00	147 776.00	
USA 2017-2018	915.00		313 981.00	61 916.00	41.90%
China 2017-2018	3 456.00		263 000.00	1 089.00	
Zona Euro 2017-2018	18 465.00	12.31%	76 500.00	1 749.00	1.18%
Brasil 2017-2018	915.00		63 500.00	24 154.00	16.35%
Argentina 2017-2018	7.00		12 400.00	22 000.00	14.89%
Otros países 2017-2018	91 670.00	61.13%	286 500.00	11 785.00	7.97%
Egipto 2017-2018	9 464.00	6.31%	15 900.00	10.00	
México 2017-2018	16 129.00	10.76%	42 500.00	958.00	
Irán 2017-2018	8 900.00	5.93%	9 800.00	-	
Ucrania Dic 2017-2018	39.00		6 200.00	24 115.00	16.32%

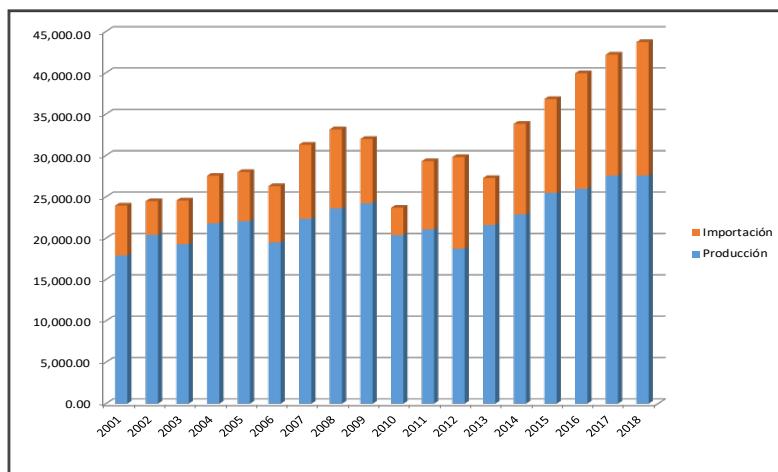
Fuente: elaboración propia con información del USDA-2018 recuperada de Bloomberg.

2.2 Mercado del maíz en México

México cuenta con un territorio de 196.4 millones de hectáreas, de las cuales el 50% se encuentran en zonas áridas y semiáridas, y únicamente el 14% se utilizan para agricultura (INEGI, 2015). Enfocándonos al maíz, en el ciclo agrícola 2017-2018 México tuvo un déficit de 16.13 millones de toneladas y con una producción de 27.57 millones de toneladas (USDA, 2018). La demanda nacional en el año analizado fue de 42.5 millones de toneladas. De acuerdo con el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA), el país abastece la demanda de maíz blanco y el déficit presente se deriva de la falta de cosechas de maíz amarillo.

Se estima que el 13% de la producción mundial de maíz es de la variedad de maíz blanco y que los países lo producen principalmente para su consumo doméstico (FAO, 1997).

En México, la industria de la nixtamalización representa el 33% del consumo de maíz, el sector pecuario consume 58% para la elaboración de alimento balanceado para el ganado de engorda; otros sectores como el almidón y derivados utilizan el 9% (FIRA, 2016). De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP, en el ciclo agrícola 2015-2016 el consumo de maíz amarillo del país fue de 17 millones 514 mil toneladas métricas, de las cuales el 72% fueron importaciones, y el resto abastecido con la producción nacional.



Fuente: elaboración propia con información del SIAP 2018

Figura 1
Producción nacional e importación de maíz grano en México

Los principales estados productores de productos agrícolas son Sonora, Sinaloa y Baja California. Sin embargo, las condiciones climatológicas en el sur y centro del país son favorables para la agricultura, por lo que la generación de conocimiento sería un incentivo para inversión de capital en el sector. Los datos de las cosechas de granos en el país en 2017 se presentan en la tabla 4. En 2017, el maíz representó el 60% de la producción, además de representar el 30% de las áreas cultivadas en el país en el ciclo agrícola 2016-2017 (SIAP, 2018). Desde el 2000 la superficie sembrada de maíz ha fluctuado en un promedio de 7 940 788 hectáreas por año y el rendimiento promedio fue de 2.99 toneladas métricas por hectárea (SIAP, 2018).

Tabla 4
Principales cultivos de commodities en México en 2017

Cereal	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	Porcentaje
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	Producción
Avena grano	631.770	582.550	8 963.102	15.386	19.44%
Cebada grano	364.453	346.079	982.074	2.838	2.13%
Maíz grano	7 426.412	7 060.275	27 762.481	2.94	60.21%
Sorgo grano	1 447.022	1 301.385	4 548.638	3.4905	9.86%
Soya	266.673	234.360	385.617	1.645	0.84%
Trigo grano	669.947	655.041	3 470.423	5.289	7.53%
Total	10 806.277	10 179.690	46 112.335		

Fuente: elaboración propia con información del SIAP 2018.

En México, los momentos de cosecha están divididos en dos ciclos principales: 1) primavera-verano en los estados de Jalisco, Estado de México, Michoacán, Chiapas y Puebla; y 2) otoño-invierno en Sinaloa, Sonora y Chihuahua (FIRA, 2016). La primera cosecha es de octubre a diciembre, representando el 90% de la superficie sembrada de temporal , que es menos competitiva que la siembra de riego por el diferencial de rendimientos. La segunda cosecha, correspondiente a los meses de marzo a septiembre, representa el 40% de siembras en el país que cuentan con sistema de riego (SIAP, 2018). En el presente trabajo los datos utilizados son de maíz grano que es el sembrado y cosechado en Sinaloa, y fueron obtenidos de bases de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y de la USDA. En la tabla 5 podemos observar la producción de maíz en el país en 2017, donde se ve que el Estado de Sinaloa tiene la mayor producción, a pesar de tener menor superficie sembrada y cosechada que Jalisco.

Tabla 5
Producción de maíz en México en 2017

Estado	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Producción	% de Producción respecto al tonelaje nacional anual	Rendimiento (ton/ha)
Sinaloa	574.414	574.275	6 167.096	22%	8.41
Jalisco	593.163	593.163	4 024.864	14%	6.22
México	516.538	513.768	2 219.616	8%	4.12
Michoacán	476.621	452.583	1 911.239	7%	4.40
Guanajuato	388.888	387.421	1 642.835	6%	5.13
Guerrero	483.178	470.684	1 357.557	5%	3.01
Chiapas	690.829	689.642	1 296.940	5%	1.86
Veracruz	578.477	547.728	1 268.916	5%	2.53
Chihuahua	204.987	204.319	1 201.125	4%	4.24
Puebla	525.109	514.557	1 027.726	4%	2.47
Tamaulipas	196.218	184.766	930.806	3%	2.71
Hidalgo	245.650	236.737	731.734	3%	3.24
Oaxaca	518.333	512.764	700.625	3%	1.74
Otros Estados	1 548.537	1 445.093	3 281.402	12%	
Total	7 540.942	7 327.501	27 762.481		2.94

Fuente: elaboración propia con información del SIAP 2018.

2.3 Establecimiento de precios de maíz en México

Hay tres formas de establecimiento de precios para el maíz en México. La primera es conocida como “por la libre”, en donde, de acuerdo con los movimientos del mercado, volatilidad, oferta y demanda y costos, el productor determina el precio al cual está dispuesto a vender su producto.

La segunda forma de fijación de precios es mediante la importación de grano, los consumidores tienen la opción de comprar grano local o de adquirir maíz en el mercado internacional para cubrir el déficit existente en el país. La determinación de precios internacionales está regulada por instituciones financieras que proporcionan las referencias que se utilizan en el establecimiento de precios de compra venta del maíz y de los principales commodities comercializados a nivel global. Los principales mercados que dan estas

referencias son bolsas de valores, mercados físicos y mercados de futuros; la bolsa con mayor presencia es el Chicago Mercantile Exchange (CME). Los diferentes exportadores establecen una base a la cual venden su producto, la cual considera los costos y erogaciones generados para entregar el maíz, y a ésta se le suma el futuro que corresponde al mes de entrega del bien o al posterior más cercano.

En el comercio internacional es importante considerar el tipo de cambio, ya que los futuros que cotizan en el CME están denominados en USD y la volatilidad del tipo de cambio impacta directamente el precio del grano a mediano y largo plazo. Ante la incertidumbre presente en la comercialización del maíz y la dependencia a la importación del producto, el gobierno busca, a través de programas como la agricultura por contrato, que los participantes del mercado utilicen instrumentos de administración de riesgo que ayudan a la fijación tanto de tipo de cambio, como del futuro referenciado a la fecha de entrega del producto.

La tercera opción es mediante el esquema de agricultura por contrato. Con esta opción el precio del maíz se compone de una base, publicada por el gobierno, y a esta se le suma el futuro correspondiente a la cosecha que cotice en el Chicago Mercantile Exchange (CME), esto hace que el mecanismo sea similar al establecimiento de precios a nivel internacional, y así logra que el producto nacional sea competitivo contra el importado (Echánove, 2011).

Además, con este esquema de fijación de precio, el gobierno ofrece la oportunidad de adquirir coberturas para administrar el riesgo del precio. El programa de agricultura por contrato (a partir de ahora lo llamaremos AxC) tiene como objetivo principal impulsar la producción mediante financiamiento y subsidios; además de proteger a los productores y compradores ante fluctuaciones de precios.

El programa es manejado por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) a partir de 2019 y que anteriormente el organismo era la Agencia de Servicios y Comercialización y Desarrollo de Mercados (ASERCA). El producto de mayor participación es el maíz, ya que se apoya la producción de 7 267.000 tm, que representan el 56% de este programa (ASERCA, 2016), pero también se apoya la siembra de trigo, sorgo y soya. Para que la siembra en un estado sea elegible para el programa, se debe contar con un nivel de producción importante.⁵ El presupuesto anual se distribuye en programas que impulsen la producción y comercialización de productos agrícolas. Por ejemplo, en 2016, del presupuesto de \$11 800 millones, se pagaron 5 200 millones

⁵ Los estados que el gobierno determinó de acuerdo a sus niveles de producción que podían participar en agricultura por contrato para el maíz en el ciclo de otoño-invierno 2017 fueron Baja California, Campeche, Guerrero, Oaxaca, Sinaloa, Quintana Roo, Sonora, Tamaulipas, San Luis Potosí y Veracruz.

de pasivos adquiridos en ejercicios anteriores, por lo que quedaron 6 600 millones para hacer frente a las necesidades del sector (Asociación Nacional de Fabricantes de Alimentos para Consumo Animal-ANFACA, 2016). En cuanto a 2017, el presupuesto estimado para el programa de agricultura por contrato fue de \$2 508 millones y la variación, de hasta un 10%, dependió principalmente de las cotizaciones de las primas de los instrumentos financieros utilizados en el programa en cuestión (SAGARPA, 2016). En cuanto a 2019, el presupuesto disminuyó a \$1 800 millones de pesos ante la expectativa de mayor nivel en los precios internacionales (CEDRSSA, 2019), sin embargo, al observar los mercados internacionales, el precio ha estado a la baja por la oferta disponible, los niveles de inventarios y las expectativas de producción de las siguientes cosechas (Reuters, 2019). La disminución en el presupuesto se deriva de la tendencia de buscar reducir los subsidios del gobierno e impulsar la adquisición de las coberturas independientemente de la participación del estado.

Los participantes del mercado tienen la oportunidad de participar en el AxC y garantizar los flujos futuros esperados, o tomar el riesgo de comprar y vender el cereal fuera del programa. El programa ha tenido gran aceptación por la flexibilidad y organización del mercado (Echánove, 2011). Organismos privados también otorgan beneficios alrededor del programa, como la utilización de financiamiento a través de operaciones de reportos. Este tipo de financiamiento permite a las bodegas pagar a los productores el grano a la entrega de este, contando con tasas competitivas gracias a la participación de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA).

A lo largo de los años el programa ha ido cambiando de acuerdo con las necesidades del mercado y a la evaluación de una eficiente asignación de los recursos, en el ciclo agrícola 2015-2016 dicho programa contaba con tres vertientes:

2.3.1. Cobertura directa (precio spot/primavera-verano 2015-2016)

Implica un subsidio al productor de un 70% para adquirir una opción de venta que lo proteja ante caídas en los precios. De los beneficios adquiridos mediante este instrumento, el productor tiene la posibilidad de recuperar el 25% de la cantidad que aportó en un inicio (el productor paga únicamente el 30% de la prima, por lo que recupera el 7.5% del total), y el 50% de lo aportado por ASERCA, que corresponde a un total de 42.5% (35% de lo aportado por ASERCA y 7.5% de lo que aportó en un inicio) de la prima y los beneficios adicionales generados.

Por otro lado, el comprador tiene dos opciones bajo este esquema (tabla 6), y podrá contar con un subsidio del 45%.

Tabla 6
Cobertura directa

Call	Put
Protege al comprador durante la siembra y cosecha del maíz.	Protege al comprador de caídas en los precios en la temporada en que cuenta con inventarios para su comercialización.
Al vencimiento del instrumento tiene la posibilidad de recuperar el 55% de su inversión en el instrumento de cobertura, el 22.5% aportado por Aserca y los beneficios adicionales generados.	Al vencimiento del instrumento tiene la posibilidad de recuperar el 55% de su inversión en el instrumento de cobertura, el 22.5% aportado por Aserca y los beneficios adicionales generados.

Fuente: elaboración propia con información de la circular 20 de Agricultura por Contrato disponible en <http://www.anfaca.org.mx/index.php/component/content/article/8-noticias/32-apertura-ventanillas-axcpv2015> a la fecha 1 de febrero de 2016.

3.2.2. Cobertura contractual (precio fijo/primavera-verano 2015-2016)

El productor puede adquirir una opción de compra del futuro correspondiente para fijar el precio al cual comercializará el grano al cosechar, pagando el 30% de su costo y obteniendo un subsidio del 70% por parte de ASERCA; con el mismo formato del esquema anterior, ya que puede recuperar el 30% que invirtió, el 35% del subsidio y los beneficios adicionales si la opción adquirida presenta una ganancia al evaluarla contra el mercado y liquidarla. Del otro lado, el comprador obtiene una opción de venta del futuro con un subsidio del 20% y puede recuperar el 80% del costo de la prima, el 10% de lo aportado por ASERCA y los beneficios adicionales. Al ser el esquema que brinda mayor seguridad y que distorsiona en mayor medida los precios relativos al precio de mercado, es el más costoso.

3.2.3. Cobertura contractual (sólo put/primavera-verano-2015-2016)

Se busca impulsar este esquema, porque permite mayor fluctuación en los precios de mercado e incentiva la administración de riesgo. En este caso, el comprador es el que adquiere la cobertura y ASERCA subsidia el 85% del costo de la prima de la opción. En cuanto al comprador, él es el que reconoce las fluctuaciones del precio en el mercado nacional cuando el precio es fijado al momento de la facturación del maíz, a diferencia de la cobertura contractual de precio fijo, donde el precio de comercialización es fijado antes de la cosecha. Existe un precio en el contrato de compraventa, que debe de ser respetado ante

caídas en el precio, sin embargo, si el precio del mercado es superior, el comprador deberá de pagar la base estipulada más el futuro que determiné el Chicago Mercantile Exchange (CME) al momento de la facturación.

Para el ciclo otoño-invierno 2016-2017, la modificación fue incentivar la participación de los productores otorgando un subsidio del 75% y el beneficio es íntegro para el participante:

- *Solo Put:*

Sin cesión de derechos de beneficios de la cobertura. Implica el pago de la base pactada más el precio del futuro del cierre del día anterior al día de facturación, con el tipo de cambio FIX de Banco de México del día de facturación.

Con cesión de derechos de beneficios de la cobertura. Implica el pago de la base pactada más el máximo entre el precio del futuro del cierre del día anterior al día de facturación y el futuro de la fecha de adquisición de la cobertura, con el tipo de cambio FIX de Banco de México del día de facturación.

- *Solo Call:*

Sin cesión de derechos de beneficios de la cobertura. Se paga base pactada más el precio del futuro del día en que se adquirió la cobertura, con el tipo de cambio FIX de Banco de México del día de facturación.

Con cesión de derechos de beneficios de la cobertura. Se paga la base pactada más el máximo entre el precio del futuro del cierre del día anterior al día de facturación y el futuro de la fecha de adquisición de la cobertura, con el tipo de cambio FIX de Banco de México del día de facturación.

Adicionalmente, en el periodo 2016-2017, se contó con coberturas especiales para pequeños productores y organizaciones de pequeños productores, que tenían un subsidio del 100% y recibieron la totalidad de los beneficios de la cobertura “sólo put”.

4. Sección 3. Propuesta de herramienta

La herramienta propuesta se compone de los siguientes pasos:

1. Ajuste de un modelo TGARCH al rendimiento del futuro de maíz, para obtener la volatilidad que será utilizada como entrada en el análisis de opciones reales
2. Cálculo de los flujos de efectivo esperado para el proyecto
3. Valuación de una opción real americana sobre estos flujos, mediante el método de árboles binomiales
4. Análisis de los resultados y toma de decisiones.

A continuación, revisaremos la justificación de cada uno de ellos y en seguida la aplicación a un proyecto.

4.1. Modelación de la volatilidad

Durante los últimos años, los precios de los cereales han sufrido ajustes importantes. En la primera década del milenio el índice de los cereales tuvo un incremento del 130% (CEDRSSA, 2014) derivado de diferentes factores. Dentro de estos destacan: el cambio climático,⁶ cambios en las superficies cultivadas por tendencias del sector agrícola, implementación tecnológica, importaciones y exportaciones, inventarios, volatilidad del tipo de cambio de las monedas a las cuales se fija el precio de venta (USD principalmente) y volatilidad en los precios de biocombustibles (principalmente el etanol) (Cruz *et al.*, 2006; FIRA, 2016). A pesar del incremento en el índice que engloba los principales cereales producidos en el mundo, el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA) reporta que a partir de 2013 los precios mundiales han tenido una tendencia a la baja.

Particularmente para México, el 2017 fue un año con alta volatilidad derivado de la incertidumbre presente con respecto a la renegociación del TLCAN (Barrera & Murray, 2017).

Así, el precio del maíz está expuesto a diferentes variables que contribuyen a la volatilidad. A continuación, presentamos un análisis de algunas de estas variables.

- *Oferta:* comienza con las decisiones de siembra de los agricultores, los cuales determinan el área cultivada en los ciclos productivos.
- *Riesgo climático:* dependiendo de las condiciones climáticas se obtendrán diferentes rendimientos de cosecha (toneladas métricas por cada hectárea sembrada). El efecto invernadero ha incrementado la temperatura del planeta, lo que se traduce en menores rendimientos e incremento de hierbas y plagas (Karuppaiah & Sujayanad, 2012). Hay cambios en las precipitaciones, eventos meteorológicos extremos con mayor frecuencia y modificación en las estaciones del clima, lo cual afecta los ciclos productivos y puede retrasar el acopio del grano (Conde, 2007; Ringler *et al.*, 2010). En México, los cultivos de maíz se han visto afectados por el fenómeno “El Niño-Oscilación del Sur”, ENOS, el cual consiste en que las temperaturas en el Pacífico ecuatorial fluctúen e implica una disminución en los rendimientos por hectárea (Álvarez-Bravo *et al.*, 2014).
- *Inventarios:* la suma de la producción mundial más los inventarios iniciales del ciclo productivo construirán la oferta total. Los inventarios

⁶ Heladas, sequías, inundaciones y climas extremos.

absorben el impacto de cambios en oferta y demanda (Salazar, 2000). Los inventarios iniciales del ciclo 2017-2018 se encuentran sobre 211 millones de toneladas, alineado a los últimos dos ciclos productivos (USDA, 2018).

- *Política monetaria:* esta línea de estudios nace con Hotelling (1931) quién planteó que la tasa de crecimiento de los precios de los commodities debería ser análoga a la tasa de interés. También se plantea que la diferencia del precio entre un periodo y otro se determina por la venta y colocación del maíz más el costo de acarreo de los periodos considerando el costo del dinero en la ecuación (Deaton & Laroque, 1996; Yang *et al.*, 2001). De lo anterior se concluye que a mayor tasa de interés el costo de acarreo es mayor y, por tanto, la decisión de incrementar inventarios no está incentivada y deriva en una caída en el precio, porque se busca vender el grano en el corto plazo, incrementando la oferta (Akram, 2009). En el mediano y largo plazo el precio volvería a ajustarse al alza por la disminución de los inventarios. En cuanto a inversiones, si las tasas de interés suben, los especuladores prefieren cambiar de instrumentos de fondos de inversión de commodities a bonos del Tesoro de Estados Unidos (Frankel, 2006). Por otro lado, los estudios sobre el modelo overshooting de Dornbusch, concluyen que una contracción monetaria por el incremento en la tasa de interés tiene un impacto temporal en el precio, por lo que el impacto a la baja en el precio inmediato va perdiendo potencia y su valor a largo plazo tiende a recuperarse gradualmente (Frankel, 1986). En otras palabras, en el largo plazo el nivel de precios se ajusta para cambiar la oferta monetaria real y tanto la tasa de interés real como los precios reales de los commodities regresan a sus valores iniciales. La implicación de la política monetaria tiene un efecto en el corto plazo, que se irá ajustando a sus niveles iniciales por el overshooting y la disminución de inventarios.
- *Demanda:* la demanda dictará la pauta del incremento o decremento de los inventarios finales. Se ha estudiado el comportamiento de las economías asiáticas como movilizadores del mercado de maíz (González *et al.*, 2011); el principal participante a observar es China que consume el 20% de la demanda mundial (USDA, 2018). A partir de 2002, la producción de biocombustibles con maíz incrementó su influencia (Gómez *et al.*, 2008; Perez *et al.*, 2007)
- *Mercado internacional y proteccionismo de los principales participantes del mercado:* durante los últimos dos años se ha observado un cambio de tendencia de los precios derivado de las noticias de materia de comercio internacional. En 2018, las noticias respecto a posibles imposiciones arancelarias entre Estados Unidos y China han derivado en movimientos del mercado de futuros (JP Morgan, 2018).

- *Fondos de inversión:* en los noventas se crearon los fondos de inversión de commodities que incluyen el maíz como principal inversión. A partir del 2000 los fondos empiezan a tener mayor presencia con el ingreso de inversionistas con instrumentos Over The Counter (OTC), lo que incrementó tanto los precios como la volatilidad de los commodities (Rosell & Viladomiu, 2008). El maíz cuenta con el mayor récord de posición corta y larga de contratos respecto al trigo, frijol soya, pasta de soya y aceite de soya (JP Morgan, 2018).

Dado el gran número de variables que impactan la volatilidad del precio del maíz, en el presente trabajo proponemos modelar directamente la volatilidad en el rendimiento del futuro del maíz que se cotiza en el CME. Para esto, se lleva a cabo un modelo TGARCH.

El Treshold-GARCH o T-GARCH (Glosten *et al.*, 1993; Zakoian, 1994) es un modelo asimétrico que considera el efecto apalancamiento de los datos de las series financieras. Esto significa que permite modelar el hecho de que el impacto de malas noticias es mayor al generado por buenas noticias (Lorenzo & Ruiz, 2014). Esto se explica por la especificación del modelo que permite que el signo de los shocks rezagados influya en el resultado de la volatilidad. Ramírez & Fadiga (2003) analizan la proyección de los precios de frijol de soya, sorgo y trigo, evaluando los alcances de las metodologías más usadas para este tipo de series de datos. Entre las metodologías propuestas se encuentran los modelos GARCH, GARCH con error distribuido no normalmente, modelos de saltos de difusión, modelos determinísticos y finalmente los modelos T-GARCH. El estudio concluyó que tanto el modelo T-GARCH como el A-GARCH pueden ser utilizados para capturar la leptokurtosis en las series de datos. Debasish & Kushankur (2011) analizan el movimiento del precio y cálculo de la volatilidad del pimiento en India, a través de modelos econométricos GARCH; el maíz al igual que el pimiento son productos agrícolas y sus precios presentan un movimiento geométrico browniano, y presentan una alternativa de medición de la volatilidad. Guida & Matringe (2004) aplican diferentes modelos GARCH para 4 diferentes índices de café y coca, y encuentran que un modelo GARCH no es suficiente para estudiar el comportamiento del precio de los commodities. En línea con este resultado, en este estudio proponemos integrar la metodología de opciones reales con un modelo T-GARCH para modelar la volatilidad del activo.

El modelo se describe a continuación (T-Say, 2005):

$$\sigma_t^2 = \Omega + \alpha_1 a_{t-i}^2 + \eta N_{t-i} a_{t-i}^2 + \beta_j \sigma_{t-j}^2 \quad (1)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{\Omega}{1 - \alpha_1} \quad (2)$$

$$\sigma_t^2 = \Omega + \alpha_1 a_{t-i}^2 + \eta (a_{t-i}^2 < 0) + \beta_j \sigma_{t-j}^2 \quad (3)$$

$$\text{Volatilidad} = \sqrt{\sigma_t^2} \quad (4)$$

donde N_{t-i} es el indicador de a_{t-i} cuando es negativo:

$$N_{t-i} = \begin{cases} 1 & \text{si } a_{t-i} < 0 \\ 0 & \text{si } a_{t-i} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

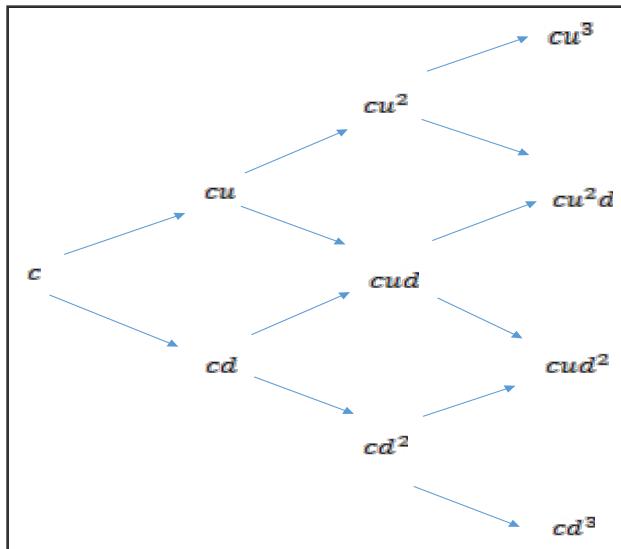
α_i , y_i , β_j son parámetros no negativos
 a_{t-i} positivo contribuye $\alpha_i a_{t-i}^2$ a σ_t^2
 a_{t-i} negativo tiene un mayor impacto en $(\alpha_i + \eta) a_{t-i}^2$ con $\eta > 0$

4.2 Valuación de una opción real por el método binomial

Para que el análisis de opciones reales nos sirva como herramienta de decisión, se realizará la valuación mediante el método de árboles binomiales o método binomial (Mauboussin, 1999; Rubinstein, 1974; Cox *et al.*, 1979). Los árboles binomiales arrojan el resultado deseado a través del uso de un portafolio réplica o mediante probabilidades, suponiendo neutralidad al riesgo. Se aproxima el proceso estocástico del activo subyacente dividiéndolo por períodos (nodos) hasta la fecha de expiración. Cada nodo cuenta con una probabilidad con un precio al alza (p) y otro a la baja ($1-p$).

Un proyecto de inversión puede ser visto como una opción call, en donde el inversionista cuenta con el derecho de adquirir activos que le otorguen un rendimiento en el futuro. La construcción de una opción call se realiza con la identificación de las variables que determinan el precio de la opción, los cuales son el valor presente de los flujos de efectivo, el costo de la inversión, el plazo del proyecto, la volatilidad y la tasa de interés libre de riesgo.

El modelo binomial multiperiodo es utilizado para n períodos y la valuación de la opción se realiza mediante inducción hacia atrás. En la figura 2, vemos la representación binomial de una opción de compra.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2
Árbol binomial

Para obtener los valores de las variables aleatorias de ascenso (u) y descenso (d) para el cálculo del valor de la opción se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$u = e^{\delta\sqrt{\Delta t}} \quad (6)$$

$$d = e^{-\delta\sqrt{\Delta t}} \quad (7)$$

El precio de cada nodo representa los posibles escenarios futuros generados con los flujos futuros y las variables aleatorias (u) y (d). El valor tiempo es considerado ya que a mayor intervalo de tiempo, incrementa el número de nodos y por tanto la incertidumbre del valor esperado. El valor esperado es calculado como:

$$FE_{ij} = [FE_{i(t-1)} * u; FE_{j(t-1)} * d] \quad (8)$$

Una vez calculados los flujos de efectivo de cada nodo del árbol binomial se construye el valor de la opción real para compararlo con el precio de ejercicio de la opción. Se maximiza el beneficio obtenido con la opción real en comparación con el precio de ejercicio, tomando en cuenta el tiempo, riesgo y los costos del proyecto. La comparación se da entre los flujos proyectados en

cada nodo contra el valor esperado del año posterior, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$X_{t-1} = \sum_{i=1; j=1}^n FE_{ij(t+1)} \quad (9)$$

decisión:

$$FE_{ij(t)} : (X_{(t+1)} * e^{-r\Delta t}) \quad (10)$$

$$VP_{ij(t)} \left\{ \begin{array}{ll} FE_{ij(t)}, & \text{si } FE_{ij(t)} > X_{t+1} * e^{-r\Delta t} \\ 0, & \text{si no} \end{array} \right\} \quad (11)$$

Cuando el valor de los flujos de efectivo del periodo evaluado es mayor al valor esperado del próximo año ($X_{(t+1)} * e^{-r\Delta t}$) se ejerce la opción con valor $VP_{ij(t)}$ (en el proyecto a evaluar, esto equivale a que el productor venda el producto). Si el valor esperado del año siguiente supera los flujos de efectivo del nodo evaluado, el valor de $VP_{ij(t)} = 0$ y se difiere la opción a un periodo (equivalente a almacenar el grano).

5. Sección 4. Aplicación y resultados

El proyecto de inversión a analizar es la compra, almacenamiento y comercialización de maíz blanco en el estado de Sinaloa, con horizonte de inversión a un año. Los costos en México y la falta de infraestructura para la conservación del grano no permiten que sea viable almacenar por más tiempo. La opción con la que se enfrenta el agricultor en el problema en cuestión es la de diferir la venta (almacenar el grano), que es una opción americana, ya que el maíz tendrá la opción de estar almacenado hasta 12 meses y se podrá vender en cualquier mes del año. Se evaluará un proyecto de un silo de 5 000 toneladas métricas para el cálculo de los flujos de efectivo.

5.1 Modelación de la volatilidad

Cuando comienza la siembra de maíz blanco en Sinaloa el gobierno establece las bases a las cuales serán inscritas las futuras cosechas de la región, y el precio final del producto será establecido al sumar la base fijada en el contrato de compraventa más el futuro más cercano a la cosecha, que es el de Julio (ZC-N).

Se utilizan datos de rendimientos logarítmicos diarios del futuro del maíz, de obtenidos de 2008 a 2018, de la base de datos Thompson Reuters. Se utiliza la herramienta computacional *R* para el manejo de los datos.

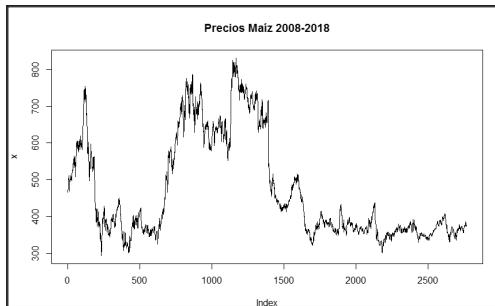


Figura 3
Precios del Maíz

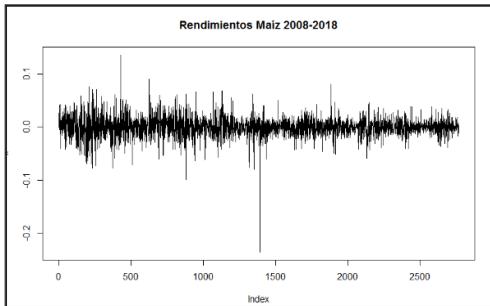


Figura 4
Rendimientos del Maíz

Fuente: elaboración propia con datos de Reuters, 2019.

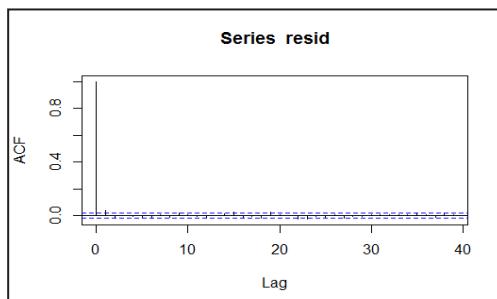
En la tabla 7 se observa que los rendimientos efectivamente cuentan con las características principales de las series de tiempo, su distribución se encuentra sesgada a la izquierda, además de contar con colas anchas.

Tabla 7
Estadísticas descriptivas

Variable	Observaciones	Mean	Desv. Estándar	Mediana	Mínimo	Máximo
Precio	2271	469.0919	139.525	392.5	293.5	831.25
Rendimiento	2271	0.000106	0.01915925	0	-0.23557	0.136066

Fuente: elaboración propia.

Para confirmar la utilización de un modelo GARCH se corre una prueba de efectos ARCH que arroja un p-value de 0.0002536 y por tanto existe evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula de que no existen efectos ARCH.



Fuente: elaboración propia con datos de Reuters, 2019.

Figura 5
Residuales de los rendimientos del maíz

Evaluamos los T-GARCH de orden (1,1), (1,2), (2,1) y (2,2); los resultados arrojaron que el modelo más eficiente sería el T-GARCH (1,1). Los resultados del ajuste del modelo se observan en la tabla 8.

Tabla 8
Resultados Modelo GARCH

Parámetros	Estimado	Error estándar	t-value	p-value
mu	0.000151	0.000267	0.56583	0.57151
omega	0.000149	0.000061	2.44311	0.014561
alpha	0.070153	0.009989	7.02308	0
beta 1	0.939276	0.00916	102.53557	0
eta 1	0.112079	0.091414	1.22606	0.220176

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con el modelo, la volatilidad anual proyectada es de 29.37%, mientras que la volatilidad diaria es de 8.48%.

5.2 Flujos de efectivo

El costo del producto que se determinó a través de la utilización del futuro correspondiente al mes de julio(N7) y a la base establecida por el gobierno federal en 2016 para la inscripción de agricultura por contrato (SAGARPA, 2016). La base se establece mediante un análisis de reemplazo de acuerdo con el precio del producto en diferentes zonas productoras y el grano de importación.

En seguida consideramos los costos de mercado de rentar una bodega en Sinaloa para almacenar producto en 2017. Es importante mencionar que los costos varían de acuerdo con las negociaciones que tenga el comercializador con cada una de las bodegas disponibles en el estado.

El costeo nos da una base integrada que incluye el costo pagado al productor que determinó ASERCA en la apertura de ventanillas de 2017. La segunda variable para la fijación del precio es el futuro utilizando el promedio de abril y mayo; la suma de la base integrada más el futuro multiplicados por el factor de conversión 0.3936825 nos da el costo en USD por tonelada métrica, y para el precio de venta se utilizó la base integrada más el futuro promedio del mes a evaluar. El periodo para evaluar son 12 meses evaluando la posibilidad de vender el mes analizado vs almacenar y diferir la venta al mes siguiente. Para costear el almacenamiento y mantenimiento del grano se utiliza el tipo de

cambio de cierre del 9 de febrero de 2018 publicado por el Banco de México. Como tasa libre de riesgo se utilizó la tasa de CETES a 28 días publicada por Banco de México en febrero de 2018, debido a que los flujos se analizan mes con mes.

A partir del valor presente neto (tabla 9) se observa que los meses en los que es conveniente vender es durante los meses de junio y julio. Por el contrario, en los meses siguientes se obtiene una pérdida y de febrero a mayo que se vuelven a obtener ganancias, pero son menores a las de los dos primeros meses. Dados los resultados, es conveniente vender los dos primeros meses porque el riesgo asociado a esperar a los meses siguientes no tiene el pago esperado, según la herramienta. Pero como se discutió antes, la incertidumbre del mercado le da valor a la opción de diferir, que es lo que calculamos en seguida.

Tabla 9
Valor presente neto de la inversión

Mes	VPN
Junio	\$ 19 561.86
Julio	\$ 19 440.36
Agosto	-\$ 23 183.54
Septiembre	-\$ 32 639.35
Octubre	-\$ 30 051.57
Noviembre	-\$ 41 052.41
Diciembre	-\$ 38 630.36
Enero	-\$ 22 940.61
Febrero	\$ 4 652.68
Marzo	\$ 4 623.78
Abril	\$ 18 380.24
Mayo	\$ 18 266.08

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10
Ejercicio de la opción considerando el valor presente de cada periodo

Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
\$ -	\$ 41 165.97	\$ 41 497.00	\$ 32 004.97	\$ 22 456.54	\$ 14 920.92
	\$ -	\$ -	\$ 37 735.65	\$ 60 472.93	\$ 74 000.96

Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
\$ 9 569.22	\$ 5 986.85	\$ 3 677.82	\$ 2 228.00	\$ 1 334.94	\$ 792.80
\$ 79 087.72	\$ 77 816.84	\$ 72 395.46	\$ 64 677.09	\$ 56 035.77	\$ 47 396.65
\$ 38 827.12	\$ 41 924.21	\$ 39 221.97	\$ 33 506.34	\$ 26 860.75	\$ 20 539.52
\$ -	\$ -	\$ 36 203.20	\$ 41 883.20	\$ 41 982.43	\$ 38 355.12
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 33 907.30	\$ 41 095.04

Fuente: elaboración propia.

La tabla 10 muestra el valor de la opción en cada periodo, y a diferencia del método de valor presente neto, esta metodología arroja que el mejor momento para la venta del maíz es en abril, sin embargo, el inversionista tiene la oportunidad de captar un mayor valor en diferentes meses. La tabla 11 resume los momentos en los cuales se ejerce la opción.

Tabla 11
Ejercicio de la opción del proyecto

Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Difiere	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce
	Difiere	Difiere	Ejerce	Ejerce	Ejerce
		Difiere	Difiere	Difiere	Difiere
			Difiere	Difiere	Difiere
				Difiere	Difiere
					Difiere

Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce
Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce
Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce
Difiere	Difiere	Ejerce	Ejerce	Ejerce	Ejerce
Difiere	Difiere	Difiere	Difiere	Ejerce	Ejerce
Difiere	Difiere	Difiere	Difiere	Difiere	Difiere
Difiere	Difiere	Difiere	Difiere	Difiere	Difiere

Fuente: elaboración propia

Al comparar los dos métodos y el cálculo de la opción real con las volatilidades 2008 a 2018 se obtiene que el valor estimado mediante la utilización del método de opciones reales es mayor al obtenido mediante la metodología del valor presente neto (tabla 12). El incluir la incertidumbre del proyecto mediante la incorporación de la volatilidad, permite a los inversionistas incrementar y capturar un mayor beneficio, maximizando los recursos y minimizando el riesgo mediante una toma de decisión flexible que les da la opción de diferir de acuerdo con las situaciones que se presenten en el entorno.

Tabla 12
Comparación de flujos de efectivo

Mes	VPN	OR 2008
Junio	\$19 561.86	
Julio	\$19 440.36	\$40 909.48
Agosto	(\$23 183.54)	\$40 981.52
Septiembre	(\$32 639.35)	\$68 445.17
Octubre	(\$30 051.57)	\$80 881.93
Noviembre	(\$41 052.41)	\$86 186.04
Diciembre	(\$38 630.36)	\$122 791.93
Enero	(\$22 940.61)	\$120 345.89
Febrero	\$4 652.68	\$144 109.78
Marzo	\$4 623.78	\$134 511.51
Abril	\$18 380.24	\$150 419.93
Mayo	\$18 266.08	\$138 334.12

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

En el presente trabajo proponemos el uso del análisis de opciones reales, añadido a la modelación de la volatilidad mediante un modelo TGARCH, para la toma de decisiones en el mercado de almacenaje y venta de maíz en México. La relevancia del estudio estriba en la importancia del maíz como cultivo en México, y a las condiciones en el mercado internacional, dado el déficit que se tiene para cubrir la demanda nacional.

Ante un entorno cambiante y globalizado, cada día es más importante que los agentes económicos cuenten con estrategias que les permitan integrar flexibilidad para actuar rápidamente ante cambios inesperados en el mercado. También es necesaria, una adecuada planeación que les permita administrar

la exposición al riesgo, de acuerdo con el perfil de riesgo de los inversionistas involucrados; contar con capacidad de adaptación, y seleccionar acciones rápidas que generen valor antes situaciones adversas o escenarios que permitan detectar oportunidades.

El uso del modelo TGARCH permite capturar el efecto apalancamiento, además de considerar la heterocedasticidad y clústers de volatilidad presentes en el mercado estudiado. El uso de las opciones reales permite capturar la incertidumbre y la flexibilidad.

Los resultados están alineados con estudios hechos para otros cultivos, donde se concluye que el uso de opciones reales aporta un elemento valioso a la toma de decisiones y permite maximizar el valor que el productor capture. Además, se pudo observar que la herramienta funciona para elegir el momento adecuado de venta, resultado alineado, también, con la literatura.

Al analizar los resultados del estudio, el método de valuación de proyectos tradicional o estático de valor presente arrojó como resultado vender los dos primeros meses de almacenamiento (junio-julio), obteniendo una ganancia de alrededor de \$19 000; los siguientes cinco meses con pérdida y los últimos cuatro con una ganancia de alrededor de \$4 600 en febrero y marzo y de alrededor de \$18 000 en abril y mayo. Si se considera el costo de oportunidad y el valor del dinero en el tiempo, la toma de decisión implicaría vender los dos primeros meses, porque si se obtiene el mismo flujo de efectivo en los primeros meses y en los últimos del análisis, vendiendo en junio y julio significaría liberar tanto recursos, como espacios de almacenamiento para realizar otra inversión y vender maíz u otro producto o invertir en un activo libre de riesgo y obtener el rendimiento que se está perdiendo por diferir la venta bajo este escenario. Sin embargo, al no considerar la volatilidad del precio del activo, la decisión podría implicar subestimar el ingreso máximo a obtener en el proyecto.

El valor que se captura al evaluar la oportunidad de diferir la venta es un 75% mayor. Si se difiere la venta hasta el mes de abril se cuenta con un flujo de efectivo esperado de \$32 209.58 vs un flujo de \$18 380.24 bajo el método de valor presente neto. Si se vendiera en junio por el método tradicional se tiene un flujo esperado de \$19 561.86 y se estaría subestimando un 60% del valor de la opción de venta en abril.

Al cumplirse los objetivos planteados, las líneas de investigación a explorar en el futuro son dos vertientes. La primera, es el estudio del tipo de cambio en el mercado, porque durante el proceso de la investigación, se platicó con productores y consumidores que externaron que uno de los factores de mayor riesgo en México es el tipo de cambio USDMXN. Derivado de lo anterior, podría evaluarse el proyecto mediante una opción arcoíris, siguiendo la línea de Roldán & Miranda (2019). La segunda vertiente, es extender el estudio y el modelo no solo al maíz, sino evaluar opciones reales para un proyecto que

analice los commodities como una cartera de inversión. Es decir, evaluar la opción de abandono de un producto para intercambiarlo con otro como lo sería el trigo o el sorgo. Y a la vez, estudiar opciones de diferir para tener una rotación del inventario y diversificar el almacenamiento en las bodegas.

Referencias

- Álvarez-Bravo, A.; V. A. Vidal-Martínez; J. I. Bojorquez-Serrano & D. García-Paredes (2014). Respuesta del maíz al impacto ambiental ocurrido en las etapas de floración y ciclo vegetativo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(SPE10), 2035-2045.
- Amran, M.; N. Kulatilaka & J. C. Henderson (1999). Managing strategic investments in a world of uncertainty.
- Akram, Q. F. (2009). Commodity prices, interest rates and the dollar. *Energy economics*, 31(6), 838-851.
- ANFACA (2016). Apertura de Ventanillas axc pv 2016. marzo 20, 2017, de ANFACA Sitio web: <http://www.anfaca.org.mx/index.php/component/content/article/8-noticias/32-apertura-ventanillas-axcpv2016>.
- ASERCA (2013). Padrón Nacional de Bodegas y Centros de Acopio. Marzo 20, 2017 de Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios Sitio web: <http://www.infoaserca.gob.mx/DGPC/CentrosAcopio.asp> (Consulta: Mayo 2014).
- ASERCA (2016). AVISO de apertura de ventanillas para la compra de coberturas anticipadas en agricultura por contrato o cualquier mecanismo de comercialización que publique ASERCA para el ciclo agrícola otoño-invierno 2016-2017 (OI 16-17). diciembre 2, 2017, de SEGOB Sitio web: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5461985&fecha=22/11/2016.
- Barrera, A. & C. Murray (2017). México va en busca de maíz de Argentina y Brasil ante incertidumbre sobre TLCAN. diciembre 2, 2017, de Reuters Sitio web: <https://lta.reuters.com/article/businessNews/idLTAKBN15V2MR>.

- Bloomberg (2019). Agriculture Supply and Demand, 2018, de El Economista Sitio web: <https://www.eleconomista.com.mx/mercados/Abundancia-de-inventarios-afecta-a-soya-y-maiz-20170323-0134.html>.
- Bulan, L.; C. Mayer & C. T. Somerville (2009). Irreversible investment, real options, and competition: Evidence from real estate development. *Journal of Urban Economics*, 65(3), 237-251.
- CEDRSSA (2019). Comparación entre precios de garantía y otros incentivos a la comercialización. octubre 10, 2019, de Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria Sitio web: http://www.cedrssa.gob.mx/post_comparacionin_entre_n-precios_de_garantia-n_y_otros_n-incentivos_a_la_comercializacion-n.htm.
- CEDRSSA (2014). Evolución de los precios del maíz, frijol y sorgo. febrero 12, 2019, de Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y Soberanía Alimentaria Sitio web: <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/35Evoluci%C3%B3n%20de%20los%20precios%20del%20ma%C3%ADz,%20frijol%20y%20sorgo.pdf>.
- Conde, C. (2007). México y el cambio climático global. México: SEMARNAT & UNAM.
- Copeland, T., & V. Antikarov (2001). Real options (No. BOOK). New York: Texere.
- Cox, J. C.; S. A. Ross & M. Rubinstein (1979). Option pricing: A simplified approach. *Journal of financial Economics*, 7(3), 229-263.
- Cruz, M.; M. Gómez; M. Ortiz; A. Entzana; C. Suárez & V. Santillán (2006). Situación Actual y Perspectivas del Maíz en México 1996-2012. noviembre 26, 2017, de SIAP Sitio web:
- Deaton, A., & G. Laroque (1996). Competitive storage and commodity price dynamics. *Journal of Political Economy*, 104(5), 896-923.
- Debasish, M. A. I. T. R. A., & D. E. Y. Kushankur (2011). Volatility and spill over effects in indian commodity markets: a case of pepper. *Studies in Business & Economics*, 6(3).
- Dixit, A. K.; R. K. Dixit & R. S. Pindyck (1994). Investment under uncertainty. Princeton university press.
- Echánove, F. (2011). Política Agrícola en México: El esquema de Agricultura por Contrato en Maíz. diciembre 15, 2018, de Woodrow Wilson International Center for Scholars Sitio web: https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/Echanove_19_Agricultura_por_contrato.pdf.
- FAO (1997). El Maíz Blanco: Un Grano Alimentario Tradicional en los Países en Desarrollo. diciembre 15, 2018, de FAO Sitio web: <http://www.fao.org/3/W2698S/W2698S00.htm>.
- FIRA (2016). Panorama Agroalimentario Maíz 2016. noviembre 26, 2017, de Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2016.pdf.
- Frankel, J. A. (2006). The effect of monetary policy on real commodity prices (No. w12713). National Bureau of Economic Research.
- Frankel, J. A. (1986). Expectations and commodity price dynamics: The overshooting model. *American Journal of Agricultural Economics*, 68(2), 344-348.

- Glosten, L. R.; R. Jagannathan & D. E. Runkle (1993). On the relation between the expected value and the volatility of the nominal excess return on stocks. *The journal of finance*, 48(5), 1779-1801.
- Gómez García, J. J.; J. Samaniego & M. Antonissen (2008). Consideraciones ambientales en torno a los biocombustibles líquidos. CEPAL.
- González-Rojas, K.; J. A. García-Salazar; J. A. Matus-Gardea & T. Martínez-Saldaña (2011). Vulnerabilidad del mercado nacional de maíz (*Zea mays L.*) ante cambios exógenos internacionales. *Agrociencia*, 45(6), 733-744.
- Guida, T & O. Matringe (2004). Application of GARCH Models in Forecasting the Volatility of Agricultural Commodities. septiembre 13, 2004, de ResearchGate Sitio web: file:///C:/Users/i096514/Downloads/Application_of_Garch_Models_in_Forecasting_the_Vol.pdf.
- Hertzler, G. (2007). Adapting to climate change and managing climate risks by using real options. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58(10), 985-992.
- Hotelling, H. (1931). The economics of exhaustible resources. *Journal of political Economy*, 39(2), 137-175.
- INEGI (2015). Encuesta Nacional Agropecuaria 2014. marzo 20, 2017, de INEGI Sitio web: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos//prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/promo/ena2014_pres.pdf.
- Jacomé Gagñay, A. R., & A. Garrido Colmenero (2017). A Real Option Analysis applied to the production of Arabica and Robusta Coffee in Ecuador. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(1), 1-12.
- JP Morgan (2018). J. P. Morgan Morning Agriculture Commodities Update. abril 8, 2018, de boletín JP Morgan.
- Karuppaiah, V & G. Sujayanad (2012). Impact of Climate Change on Population Dynamics of Insect Pests. *World Journal of Agricultural Sciences*, 8, 240-246.
- Koo, B., & B. D. Wright (2000). The optimal timing of evaluation of genebank accessions and the effects of biotechnology. *American Journal of Agricultural Economics*, 82(4), 797-811.
- Kowalski, C. (2018). Corn Crop Planting and Harvest Seasons. diciembre 15, 2018, de The Balance Sitio web: <https://www.thebalance.com/corn-planting-and-harvest-seasons-809309>.
- Kumar, D., & A. N. Jhariya (2013). Nutritional, medicinal and economical importance of corn: A mini review. *Res J Pharm Sci*, 2319, 555X.
- Lorenzo, A. & A. Ruiz (2014). Un modelo tgarch con una distribución t de estudio asimétrica y las hipótesis de racionalidad de los inversionistas bursátiles en Latinoamérica. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca, 19, 1-41. 2019, junio 20, De <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/handle/123456789/30163> Base de datos.
- Luong, Q. V., & L. W. Tauer (2006). A real options analysis of coffee planting in Vietnam. *Agricultural Economics*, 35(1), 49-57.

- Manzanares, S. A., & A. G. Colmenero (2008). Evaluación de un seguro agrario mediante opciones reales. *Revista de Economía Aplicada*, 16(47), 51-76.
- Mauboussin, M. J. (1999). Get real: Using real options in security analysis. In Credit Suisse First Boston Corp., <http://www.capatcolumbia.com/frontiers/Fof10.pdf>.
- Milanesi, G. S.; G. Woitschach & D. R. Broz (2012). Aplicación de la teoría de opciones reales a la determinación del momento óptimo de cosecha forestal.
- Miller, K. D., & H. G. Waller (2003). Scenarios, real options and integrated risk management. *Long range planning*, 36(1), 93-107.
- Mun, J. (2006). Modeling risk: Applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques (vol. 347). John Wiley & Sons.
- Musshoff, O. (2012). Growing short rotation coppice on agricultural land in Germany: a real options approach. *Biomass and Bioenergy*, 41, 73-85.
- Nadal, A. (2001). Mexican Corn: Genetic Variability and Trade Liberalization. Mexico, DF: PROCIENTEC, *El Colegio de Mexico*.
- Pederson, G. and T. Zou. (2009). Using Real Options to Evaluate Ethanol Plant Expansion Decisions. *Agricultural Finance Review* 69(1): 23-35.
- Pérez LL.C.; M. Chaves y C. Galperín (2007). Desarrollo de los biocombustibles: ¿cuál es el lugar de la política comercial?. *Revista del CEI*. 9, 81-99.
- Ramírez, O. & M. Fadiga (2003). Forecasting Agricultural Commodity Prices with Asymmetric -Error GARCH Models. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 28, 71-85. 2018, marzo 20, De Jstor Base de datos.
- Reuters (2019). Abundancia de inventarios afecta a soya y maíz. abril 8, 2018, de El Economista Sitio web: <https://www.eleconomista.com.mx/mercados/Abundancia-de-inventarios-afecta-a-soya-y-maiz-20170323-0134.html>.
- Ringler, C.; T. Zhu; V. Cai; J. Koo & D. Wang (2010). Climate change impacts on food security in sub-Saharan Africa. *Insights from Comprehensive Climate Change Scenarios*.
- Roldán, R. M. & M. R. Miranda (2019). Valuing a natural gas pipeline expansion project: A copula-TGARCH application in Mexico. *Contaduría y administración*, 64(2), 5.
- Rosell, J., & L. Viladomiu (2008). La producción de agrocombustibles y el aumento de los precios de los alimentos.
- Rozo, V. (2009). Contraste entre técnicas tradicionales de inversión y valoración de opciones reales en ambientes de incertidumbre utilizando el modelo de Black & Scholes y el método binomial. enero 7, 2018, de Universidad del Norte Sitio web: <http://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/93/55222723.pdf?sequence=1>.
- Rubinstein, M. (1974). An aggregation theorem for securities markets. *Journal of Financial Economics*, 1(3), 225-244.
- SAGARPA (2016). Aviso de Apertura de las Ventanillas para la Adquisición de Coberturas de Precios en el esquema de Agricultura por Contrato, y para la asignación de Coberturas Especiales, Ciclo agrícola otoño-invierno 2016-17, de los productos, Estados y Regiones elegibles, así como Ciclo agrícola primavera-verano 2017 de sorgo en el Estado de Sinaloa del Programa de Apoyos a

- la Comercialización. diciembre 2, 2017, de ASERCA Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/189141/20170207_AVISO_OI_16-17_v21.pdf.
- Salazar, J. A. G.; J. A. M. Gardea; M. A. M. Damián; M. D. J. S. Cruz & A. M. Garza (2000). Determinación de la demanda óptima de almacenamiento de maíz en México. *Agrociencia*, 34(6), 773-784.
- Saphores, J. D. M. (2000). The economic threshold with a stochastic pest population: a real options approach. *American Journal of Agricultural Economics*, 82(3), 541-555.
- Schwartz, E. S., & L. Trigeorgis (2001). Real options and investment under uncertainty: An overview. *Real options and investment under uncertainty*, 1-16.
- SIAP (2018). Avance de Siembras y Cosechas Resumen por Cultivo. diciembre 2, 2018, de gob.mx Sitio.
- Trigeorgis, L. (1996). Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation. MIT press.
- Toscano Pardo, D. (2004). Valoración de inversiones a través del enfoque de las opciones reales. Aplicación a la industria de celulosa onubense (Doctoral).
- Tzouramani, I & K. Mattas, 2004. Employing Real Options Methodology in Agricultural Investment: The Case of Greenhouse Construction. *Applied Economic Letters* 11(6): 355-359.
- USDA (2018) (en línea). "World Agricultural Supply and Demand Estimates", USA, Foreign Agricultural Service, diciembre 15, 2018. Base de datos disponible en USDA: <http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/index.htm>.
- Watkiss, P.; A. Hunt; W. Blyth & J. Dyszynski (2015). The use of new economic decision support tools for adaptation assessment: *A review of methods and applications, towards guidance on applicability*. *Climatic Change*, 132(3), 401-416.
- Woodward, M.; Z. Kapelan & B. Gouldby (2014). Adaptive flood risk management under climate change uncertainty using real options and optimization. *Risk Analysis*, 34(1), 75-92.
- Yang, J.; D. A. Bessler & D. J. Leatham (2001). Asset storability and price discovery in commodity futures markets: a new look. *Journal of Futures Markets: Futures, Options, and Other Derivative Products*, 21(3), 279-300.
- Zakoian, J. M. (1994). Threshold heteroskedastic models. *Journal of Economic Dynamics and control*, 18(5), 931-955.