

Coberturas financieras para mitigar los efectos del cambio climático

Financial coverage to mitigate the effects of climate change

Guillermo Sierra Juárez*^r

Información del artículo	Resumen
Recibido: 12 octubre 2024	<p>Objetivo: Estimar el valor de una prima de una opción financiera para realizar una cobertura en contra de los efectos del cambio climático, particularmente ante el incremento mundial en el nivel del mar producido por el aumento de la temperatura promedio en el mundo y en los casos especiales de Estados Unidos y México. Método: Se considera el modelo de Heston dentro de la metodología de teoría de opciones financieras donde se propone el comportamiento del nivel del mar como un movimiento geométrico browniano que está en función del aumento de la temperatura promedio también modelado como un geométrico browniano con la reversión a la media. Se encuentra la solución a través del método de simulación Monte Carlo. Resultados: De acuerdo al modelo planteado si la correlación entre nivel de incremento en el nivel del mar y temperatura media es positiva el precio de la cobertura resultaría ser más costoso como un seguro contra inundaciones. Por otro lado, entre más lento sea la convergencia a su valor de largo plazo de la temperatura media más costosa resultaría ser el valor de la cobertura. Limitaciones: El modelo aunque es complicado en su planteamiento y solución, es limitado en la consideración de sus supuestos, ya solamente considera un par de variables (nivel de mar y temperatura promedio) y supone un comportamiento estocástico y otro igual con reversión a</p>
Clasificación JEL: C02, G13, Q54.	
Palabras clave: cambio climático, Heston, cobertura.	

* Universidad de Guadalajara-CUCEA, gsierra@cucea.udg.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1927-834X>.

^r Autor de correspondencia.

la media, siendo que en la realidad tiene un gran número de variables involucradas. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones nos proporciona ideas generales sobre su evolución en el tiempo y del valor de la prima de la opción. **Principales hallazgos:** Bajo los supuestos del modelo del Modelo de Heston planteado, el precio de una cobertura contra inundaciones por incremento en el nivel del mar por aumento en la temperatura promedio como consecuencia del cambio climático es función del nivel de correlación entre las variables, su convergencia en el largo plazo y la volatilidad. Para considerar un caso práctico tendría que calibrarse y hacerse un ajuste en las unidades además de que hay que tener en cuenta que se trata de mercado incompleto.

Article information	Abstract
Received: 12 October 2024	Objective: in order to estimate the value of a financial option premium to hedge against the effects of climate change, particularly in light of the global rise in sea level caused by the increase in average global temperature and in the specific cases of the United States and Mexico.
Accepted: 29 August 2025	Method: The Heston model is considered within the financial option theory methodology, which proposes that sea level behavior is a geometric Brownian motion that is a function of the increase in average temperature, also modeled as a geometric Brownian motion with reversion to the mean. The solution is found using the Monte Carlo simulation method. Results: According to the proposed model, if the correlation between the increase in sea level and average temperature is positive, the price of coverage would be more expensive, like flood insurance. On the other hand, the slower the convergence to the long-term value of the average temperature, the more expensive the value of the coverage would be. Main findings: Under the assumptions of the Heston model, the price of flood insurance due to sea level rise caused by an increase in average temperature as a result of climate change is a function of the level of correlation between the variables, their convergence in the long term, and volatility. To consider a practical case, it would have to be calibrated and adjusted in units, and it must be taken into account that this is an incomplete market.
JEL Classification: C02, G13, Q54.	
Keywords: climate change, Heston, hedge.	

Introducción

Según Estrada (2001), el clima de nuestro planeta ha ido cambiando como consecuencia de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) que se han generado como resultado de la industrialización de las actividades realizadas por la humanidad. El aumento en la temperatura promedio global en el último siglo, así como los cambios en el nivel del mar, las alteraciones en la flora y fauna, entre otros efectos, no pueden ser

explicadas únicamente por causas naturales y obedecen principalmente a los mismos efectos de la industrialización. De acuerdo al mismo autor, la temperatura de nuestro planeta es función de su propio tamaño, la distancia que nos separa del sol y la composición de la atmósfera con nitrógeno, oxígeno y otros gases¹ con el 78.0%, el 21.0% y 1%, respectivamente y cuyo objetivo es retener la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre que de otro modo ocasionaría que la temperatura media en la superficie de la tierra fuera de -20 ° centígrados.

En los últimos 400,000 años, la temperatura de la tierra ha ido oscilando entre climas extremadamente cálidos y extremadamente fríos, pero a pesar de eso, en los últimos 10,000 años, la temperatura se ha ido estabilizando. Gracias a estudios de núcleos de hielo de Vostok (ver Petit *et al.* (1999)) se ha observado que la variación de la temperatura media global en dicho período ha sido menos de un grado. Y más recientemente, la temperatura superficial global desde 1861 se ha incrementado entre 4% y 8%.

Desde mediados del siglo XVIII como resultado de la revolución industrial, el producto de la quema combustibles fósiles (gas carbono y petróleo) y la deforestación, se han ido incrementando, la concentración de bióxido de carbono en un 31% (y otros, por ejemplo: metano 151%, óxido nitroso 17%) siendo la más alta de los últimos 2 millones de años.

Las emisiones promedio anuales de CO₂ por cambio de uso de suelo y quema de combustibles fósiles en 1970 fue de alrededor de 7,500 millones de toneladas de carbono (MtC) y para 2100 se espera que sea entre 5 mil y 35 mil (MtC). Al aumentar la cantidad de CO₂ en el aire, los océanos y los suelos, se absorberían cada vez menos las emisiones de este gas, lo que aumentaría su acumulación en la atmósfera.

En otras palabras, existe evidencia que sugiere que la actividad de los humanos está implicada en las modificaciones del clima, sobre todo en la temperatura, que no es posible explicar únicamente con exhalaciones volcánicas y con alteraciones de la actividad solar. También existe evidencia contundente de que el nivel medio del mar ha venido incrementándose entre 10 cm y 20 cm a lo largo del siglo XX. Los hielos perpetuos del ártico se están adelgazando, además se han ido reduciendo los glaciares no polares y han aumentado los eventos climáticos extremos como por ejemplo el fenómeno de “El niño”.

¹ Como son: vapor de agua, bióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O).

Continuando con Estrada (2001) una consecuencia del incremento de los gases de invernadero y en especial del CO₂ se esperaría que incrementaría la temperatura media superficial entre 1.4 grados y 5.8 grados centígrados entre 1990 y 2100. Este aumento en el peor de los casos llevaría hasta 10 veces en los 100 últimos años. Según algunos autores, se observará que la temperatura global se incrementará 1 grado en los siguientes de 100 a 500 años, aunque el aumento en la temperatura dependerá de las latitudes y regiones.

Por otra parte, con la disminución de los glaciares (Estrada, 2001) y la expansión térmica de los océanos se podría aumentar el nivel del mar entre 8 mm y 88 cm entre 1990 y 2100, con consecuencias graves para algunas islas o países como Bangladesh, las costas de Calcuta, Mumbai, Chennai, que incluso pudieran ser rebasados por el nivel del mar.

Adicionalmente, un aumento del nivel del mar podría provocar impactos negativos en los asentamientos humanos, por ejemplo, en el turismo, la pesca, los suelos agrícolas e incluso puede llevar al desplazamiento de millones de personas y a la extinción de especies en la Antártica.

En el caso de México, según Estrada (2001), se estima que la temperatura media podría incrementarse de 3 a 4 grados en el noroeste y en el sureste un poco más de 2 grados. Estudios evidencian que la producción de maíz y de algunos vegetales se vería afectada al cambiar los requerimientos óptimos de temperatura y precipitación. Como consecuencia, ante la escasez de los recursos hidrológicos, el país se vería muy afectado por la desertificación y sequías principalmente en el norte.

Por otro lado, un aumento en el nivel del mar afectaría la zona del Golfo de México y sus principales puertos pesqueros. Las zonas costeras de mayor vulnerabilidad serían las de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Yucatán. En resumen, las consecuencias del cambio climático serían de cuantiosas pérdidas para México.

Por otra parte, según Molina *et al.* (2017), los países más industrializados que albergan el 20% de la población mundial han sido los responsables de alrededor del 63% de las emisiones netas de carbono por quema de combustibles fósiles y modificaciones en el uso del suelo en los últimos 100 años, pero en contraste 140 países han generado apenas el 37% de dichas emisiones.

De 1900 a 1999, cuatro naciones en vías de desarrollo, incluyendo, China e India aportaron el 2% y 7 % de las emisiones totales. En comparación

EUA con una población 8 veces menor que los países mencionados ocupa el primer lugar en la lista de emisiones con el 30.3 %.

Un punto importante a considerar es que para combatir el cambio climático es necesario reconocer que la mayor parte de las emanaciones de gases invernadero ha sido reducida por las naciones desarrolladas, aunque en los últimos años las emisiones de los países en desarrollo se han vuelto muy importante. México ocupa el lugar 17 con apenas el 1% del total de emisiones en el mundo. Para que se tenga un verdadero efecto y poder disminuir la temperatura, todos los países deberían colaborar para alcanzar el objetivo y ser los beneficiados de manera conjunta por los resultados.

Los economistas, de acuerdo con Molina *et al.* (2017), coinciden en que una forma para corregir el problema del cambio climático es proponer un precio al CO₂ ya que tanto personas como empresas pensaría en tomar la opción de contaminar debido al costo que les representaría. De acuerdo con el mismo autor, el cambio climático puede verse como el principal problema de todas las externalidades ambientales por su dimensión, su complejidad y las incertidumbres inherentes al problema. Además, las personas que se benefician de la mitigación no son aquellas que necesariamente son las que deberían llevarlas a cabo.

Según el mismo autor, tanto los bienes públicos como las externalidades se consideran fallas de mercado por lo que no podrán resolverse por sí mismos, por lo tanto, en forma resumida las recomendaciones de los economistas son: a) establecer un precio a las emisiones de CO₂ y b) asegurarse de la cooperación de todos los países con adecuados incentivos legales. La solución al problema tendría que ser aplicada por todos los países en su conjunto considerando las situaciones particulares y capacidades de cada uno de los países.

Otra manera de plantear y entender el problema es verlo como un bien público. Que los países arrojen a la atmósfera sus GEI sin límites conlleva consecuencias trágicas para todos, pero el sistema internacional a la fecha no ha logrado un acuerdo, es decir, todos los países estarían mejor si tuvieran un acuerdo de cooperación, pero cuando existe un bien público es difícil de lograrlo.

La presente propuesta de trabajo se encuentra distribuida de la siguiente manera: en la sección presente se hace una introducción general de los efectos del cambio climático y de su importancia en la economía. En la

segunda sección se hace una revisión de la literatura de los derivados financieros aplicados al cambio climático; en la tercera sección se hace un planteamiento de los hechos estilizados, relacionados a variables del clima. Posteriormente, en la sección cuatro se revisa el modelo de Heston en finanzas; en la cinco, los modelos aplicados al cambio climático. Por último se presentan los resultados y las conclusiones.

1. Revisión de la Literatura

Existe una amplia bibliografía referente al tema del cambio climático y también sobre el modelo de Heston y sus aplicaciones, sin embargo, una combinación de dicha problemática y dicho modelo prácticamente no existe. A continuación, se mencionan algunos de los trabajos más sobresalientes relacionados con esos tópicos:

Según Ortiz (2024) se conoce como financiamiento verde a las inversiones financieras en proyectos, iniciativas y políticas para el desarrollo de una economía sustentable, aunque no se limita únicamente al financiamiento climático. En el trabajo *Taxonomía sostenible* (2023) se presenta una clasificación que permite identificar y definir actividades, activos o proyectos de inversión con impactos en el medio ambiente y sociales, con metas y criterios establecidos. El objetivo de dicho trabajo es que al dar certidumbre y transparencia en los mercados financieros se fomenta la inversión en actividades sostenibles.

En Xue *et al.* (2023) se diseña un contrato sobre un índice de bonos verdes y a partir de un modelo de heterocedasticidad condicional autorregresivo generalizado se pronostica primero el precio de un bono verde y luego la valuación de la opción con volatilidad variable y como resultado las predicciones del modelo resultaron ser bastante consistentes.

En el trabajo de Kutrolli (2021) se hace un análisis de los precios e instrumentos financieros en los mercados meteorológicos y financieros. El trabajo está constituido por tres secciones: en la primera se evidencia la necesidad de utilizar los derivados climáticos y los seguros para mejorar los mercados financieros mundiales, en la segunda se utiliza las técnicas de valor en riesgo para definir la temperatura crítica y las valuaciones de los derivados asociados. Por último, se presentan coberturas de temperatura contra eventos meteorológicos utilizando distribuciones de colas pesadas y se comparan la medida de incertidumbre basada en el enfoque del caso de una medida basada en el valor de riesgo.

En Rayén (2001) se realiza una revisión de las principales iniciativas del desarrollo e implementación de indicadores de sostenibilidad ambiental y del desarrollo sostenible en el mundo que podrían ser relevantes para los países latinoamericanos y del Caribe. En su trabajo se menciona que algunos países están desarrollando, desde hace algunos años, indicadores ambientales, mientras que más recientemente, otros trabajan desde el enfoque de desarrollo sostenible, esto es, incorporando las dimensiones económica, social, ambiental e institucional del desarrollo.

En el trabajo *¿Qué son las finanzas verdes? Un análisis desde la teoría y la práctica* Rivera *et al.* (2023) mencionan que las finanzas verdes representan una oportunidad no solamente como instrumentos para el combate al cambio climático y el desarrollo sostenible, sino como oportunidades de negocio a largo plazo, e incluso a mediano. El estudio demuestra el potencial no sólo en términos ambientales, sino de oportunidad de negocio de acuerdo a los principios de finanzas y desarrollo, además se asocia a la reducción de riesgos ambientales, climáticos y sistémicos.

Pindyck (2020) menciona que no sabemos mucho aun sobre el cambio climático, como por ejemplo la relación exacta entre aumento de CO₂ y temperatura. El autor busca explicar las implicaciones políticas de la incertidumbre en el cambio climático como el caso del CO₂ donde se obliga a tomar medidas más urgentes y energéticas para su reducción, tomando en cuenta que el CO₂ permanece por siglos en la atmósfera. Al final el autor reconoce que es difícil dar un valor a un seguro climático.

Xu *et al.* (2016) desarrollan un modelo para medir impacto de las opciones financieras en la mitigación de la volatilidad de los precios de los permisos de carbono en un sistema particular. Los autores comentan que la existencia de un mercado de opciones proporcionaría un mecanismo para la incertidumbre de precios y un estímulo para la reducción de emisiones de carbono, y demuestran cómo la introducción en un sistema bancario ofrece más flexibilidad para la gestión del comercio asociado al carbono.

Se menciona en Oliislagers (2022) que aún existe mucha incertidumbre sobre la evolución del clima y los efectos en la economía y todavía no se sabe con certeza cómo el calentamiento global tendrá graves consecuencias para el crecimiento económico, la vida humana y el medio ambiente. La temperatura media global más alta afectará la seguridad de alimentos y los ecosistemas, con el riesgo de desencadenar puntos de inflexión que conducirán a cambios irreversibles en el mismo sistema. Por

otra parte, conduce a niveles más altos del mar con amenazas adicionales de inundaciones y fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes, como desastres naturales. Algunas áreas se volverán inhabitables lo que obligará a las personas a migrar a otros lugares.

Kapphan (2012) afirma que el cambio climático reduce en promedio los rendimientos de los cultivos y produce cambios en el clima tradicional. El objetivo principal del estudio es establecer un seguro climático basado en índices para una cobertura óptima. Los autores implementan un algoritmo para derivar el valor del seguro climático basado en índices. El modelo compara las ventajas de cubrir el riesgo climático en la agricultura de pago lineal, con los derivados climáticos OTC y una estructura óptima no lineal propuesta por el mismo autor. El modelo desarrollado para simular un contrato de seguro climático óptimo constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para los empresarios que desean cubrir el riesgo climático.

Sturm *et al.* (2016) mencionan que existe una amplia variedad de problemas para los que el modelo propuesto puede ser utilizado. Los investigadores que estudian sistemas sociales y el clima bajo un umbral y con una estructura de pagos asimétrica descubren que pueden utilizar el enfoque Black-Scholes que permite realizar estimaciones rápidas de cómo cambiar costos ante cambios del clima o bajo una necesidad social o política.

Gelrud (2023) pretende encontrar la tasa de descuento de proyectos a gran escala para mitigar el cambio climático, que se manifiesta a través de desastres que destruyen el capital. El autor propone proyectos a gran escala destinados a mitigar el riesgo y menciona que se debería descontar a una tasa significativamente menor que la tasa de mercado y las pérdidas en la economía en caso de retraso y la explicación de una prima verde.

Estrada (2001) menciona cómo el cambio climático puede implicar una real amenaza contra la humanidad y los ecosistemas. Tratar de combatir sus efectos podría representar costos muy altos desde el punto de vista económico y desde el punto de vista de salud, de la pérdida de especies, etcétera. La solución debe conformarse con base en un esfuerzo global, pero considerando las capacidades y responsabilidad histórica de cada país. Se debería considerar que las naciones desarrolladas deberían asumir el liderazgo en la mitigación de emisiones y apoyar a las menos desarrolladas que son más vulnerables para proteger a sus generaciones futuras y así cuidarse de los efectos del cambio climático.

Blanc-Blocquel A. *et al.* (2024) mencionan que los gobiernos pueden utilizar contratos sobre futuros de bonos para protegerse contra el cambio climático. Se muestra cómo los instrumentos derivados transfieren volatilidad al mercado del bitcoin sin afectar negativamente al mercado de los bonos de carbono. Se propone el modelo de Heston y suponen que el subyacente sigue este comportamiento por su volatilidad estocástica y el método *wavelets* de Shannon.

Bilial A. *et al* (2024) estiman que los daños macroeconómicos del cambio climático son seis veces mayores de lo que se creía. Mencionan que se observa que un calentamiento de 1 °C reduce el PIB mundial en un 12 %. Según los mismos autores, la temperatura global se correlaciona fuertemente con eventos climáticos extremos, a diferencia de la temperatura a nivel de país utilizada en trabajos anteriores, lo que explica —según sus conclusiones— que los impactos estimados sugieren que una política unilateral de descarbonización es rentable para países grandes como Estados Unidos.

Kotz *et al.* (2023) hacen un estudio empírico de más de 1600 regiones de todo el mundo durante los últimos 40 años, para proyectar los daños originados por la temperatura y la precipitación, incluyendo los casos diarios y extremos. Los autores observan que la economía mundial se ha comprometido a una reducción de ingresos del 19% en los próximos 26 años, independientemente de las futuras decisiones sobre emisiones. Según el trabajo, los daños ya superan en seis veces los costos de mitigación necesarios para limitar el calentamiento global a 2 °C en este período a corto plazo y, posteriormente, divergen en gran medida según las decisiones sobre emisiones. Se proyectan pérdidas comprometidas para todas las regiones, excepto para aquellas en latitudes muy altas, donde la reducción de la variabilidad de la temperatura genera beneficios. Las mayores pérdidas se producen en latitudes más bajas, en regiones con menores emisiones históricas acumuladas y menores ingresos actuales.

Según los autores Griggs *et al.* (2021) debido a la población total de más de 300 millones de personas situadas en las costas, incluyendo 20 de las 33 megaciudades del planeta (más de 10 millones de personas), las zonas costeras bajas representan una de las áreas más vulnerables a los impactos del cambio climático. Muchas de las ciudades más grandes a lo largo de la costa atlántica de EE. UU. ya están experimentando frecuentes inundaciones por mareas altas, y estos eventos aumentarán en frecuencia, profundidad, duración y extensión a medida que el nivel del mar continúe aumentando a un ritmo acelerado durante el siglo XXI y más allá. Este

artículo ofrece una visión general del estado de la adaptación al cambio climático en las zonas costeras.

De los párrafos anteriores, correspondientes a la relación de la literatura sobre cambio climático y su relación con distintos activos y derivados financieros como instrumentos de financiamiento en proyectos de sostenibilidad ambiental, así como las finanzas verdes, en algunos casos se analizaron los orígenes del cambio climático a partir de las emisiones de carbono. Por otro lado, se pueden agrupar artículos enfocados en medir los efectos del cambio climático en la economía más real, como por ejemplo el impacto en el PIB o las afectaciones en la agricultura o incluso las afectaciones en los temas de salud. O también, finalmente el caso de valuación de bonos verdes para protección del cambio climático.

Sin embargo, cabe resaltar de la revisión efectuada sobre la aplicación del modelo de Heston, para la valuación de opciones financieras con volatilidad estocástica incluyendo los dos efectos del cambio climático correlacionadas, como son el aumento en el nivel del mar y la temperatura media, no existe prácticamente ningún antecedente parecido, a pesar de sus limitaciones prácticas, por lo que podemos afirmar que la aportación del modelo teórico en ese problema real del cambio climático presenta una grado de originalidad.

2. Hechos estilizados

El calentamiento de la superficie terrestre como consecuencia del cambio climático ha incrementado los fenómenos extremos en el clima terrestre como, por ejemplo, los incrementos en la temperatura, las fuertes precipitaciones pluviales, el incremento en la velocidad del viento, el aumento en el número de ciclones, las inundaciones, incluso el fenómeno de “El niño” entre otros efectos.

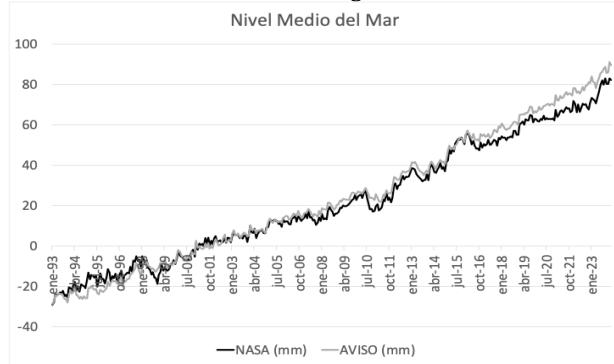
Por otra parte, los sistemas socioeconómicos también resultan afectados por el calentamiento, por ejemplo, en las pérdidas en la agricultura y ganadería, la pesca, los recursos naturales, la escasez de agua e incluso daños a nuestra salud. Los países en desarrollo son los que se verían más afectados por la adaptación de la tecnología para recursos financieros y económicos y de localización geográfica.

De la página Climate Met Offcie² donde se reportan las diferencias del nivel medio global mensual del mar entre 1993 y 2024, las series provienen de las bases de los satélites NASA y AVISO y muestran que las

² https://climate.metoffice.cloud/sea_level.html#datasets

variaciones van creciendo en el largo plazo. De 1993 a 2024 el nivel del mar ha subido en promedio global 80 mm, ver figura 1.

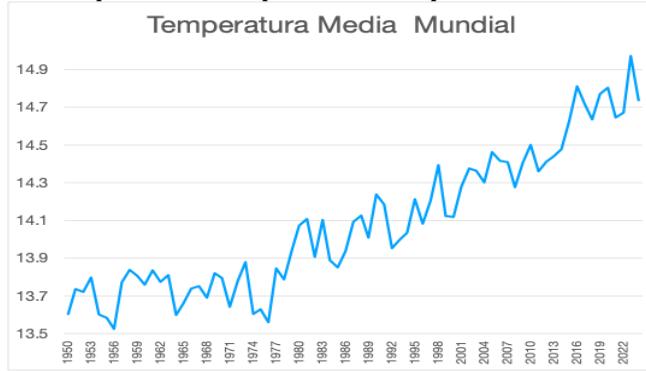
Figura 1
Diferencias medias mensuales global del Nivel del mar



Fuente: Met Office Climate dashboard

De la página Our world in data³ se puede obtener la temperatura promedio mensual anual de la superficie para todo el mundo y en particular para Estados Unidos y México. En las figuras 2, 3 y 4 se presentan la evolución para dichos países.

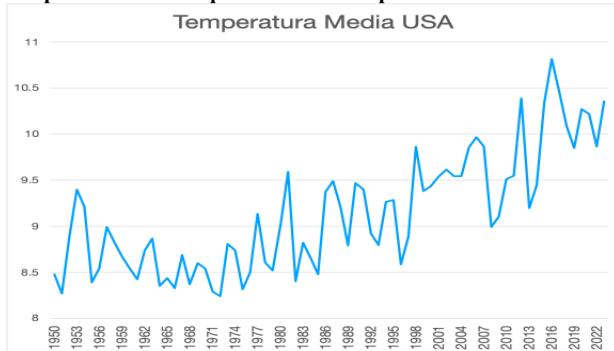
Figura 2
Temperatura en la superficie mensual promedio Mundial



Fuente: Our world in data

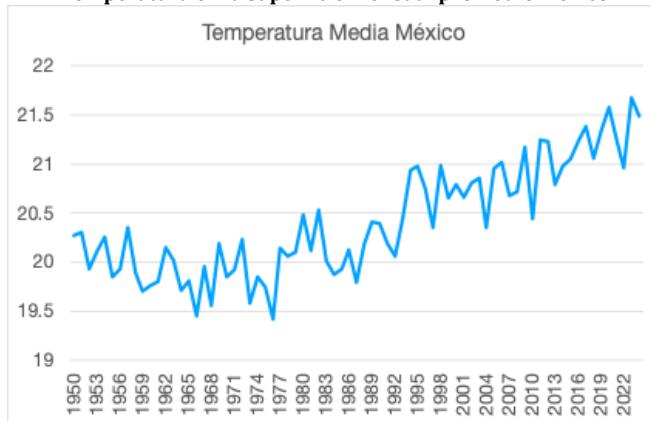
³ <https://ourworldindata.org/grapher/monthly-average-surface-temperatures-by-year>

Figura 3
Temperatura en la superficie mensual promedio Estados Unidos



Fuente: Our world in data

Figura 4
Temperatura en la superficie mensual promedio México



Fuente: Our world in data

De 1960 a 2024 la temperatura promedio global se ha incrementado alrededor 1.5 °C. En el mismo período de tiempo la temperatura promedio de Estados Unidos y México se ha incrementado en un poco menos de 2.0 °C.

De acuerdo con Molina *et al.* (2017), mientras se mantenga el incremento de la temperatura promedio por debajo de 2º C, los impactos negativos todavía pueden ser controlables, pero es importante que se otorguen recursos a países en desarrollo para la implementación de medidas para el control. Para alcanzar dicha meta, es necesario reducir las emisiones de GEI aproximadamente en 50% en este siglo respecto a las que se generaban en el año 2000. Algunas de las medidas relacionadas para

alcanzar este propósito tienen que evitar la deforestación, aumentar el uso de las energías limpias y la reducción de combustibles fósiles entre otros.

Ante la problemática del cambio climático, México ha actuado con seriedad y responsabilidad y su papel ha sido reconocido por los demás países. De acuerdo al Semarnat/INECC 2012 b en el 2010 la cantidad de CO₂ corresponde al 1.5 % de las emisiones globales de GEI.

La consecuencia más directa por efecto de acumulación de gases de invernadero en la atmósfera es la elevación de la temperatura media en la superficie del planeta, lo que ha desencadenado el cambio climático, incremento que no ocurre de manera homogénea. La evidencia más directa del aumento de la temperatura media es la medida con los instrumentos meteorológicos que muestran un aumento entre 0.5 y 1 grado centígrados. Y una de las consecuencias más visibles es la aceleración del efecto de deshielo de glaciares de las altas montañas del mundo y de casquetes polares, ubicándose en los puntos más bajos de la historia

La estimación para 2100 es un incremento entre 65 o 75 centímetros, tal vez en algunos sitios superaría 1.5 m. Las consecuencias serían daños para algunos puertos, y repercusiones en el drenaje de ciudades que se encuentran por debajo del nivel de mar como son los Países Bajos y Bangladesh (Estrada, 2001).

3. Modelo

De acuerdo con Molina *et al.* (2017) estudiar el cambio climático como un problema de riesgos, representa varias ventajas, ya que, así como es necesario prepararse para afrontar problemas de accidentes, protegerse contra enfermedades o comprar un seguro, en el mundo financiero para evitar repercusiones en pérdidas, el problema del cambio climático requiere acciones para reducir el impacto sobre la economía actual y del futuro.

El cambio climático, como ya se revisó en las secciones previas, está relacionado directamente con el uso de combustibles fósiles y ha crecido exponencialmente desde la revolución industrial, y si bien ha permitido elevar el nivel de bienestar en muchos países del mundo, también ha traído muchos problemas ambientales como efectos secundarios.

Desde finales del siglo XX la producción industrial está basada en minimizar costos y maximizar ganancias presentes sin tomar en cuenta el daño al medio ambiente. Sin embargo, con el paso del tiempo este ahorro de corto plazo se ha convertido en un incremento en los costos de producción a largo plazo. La sociedad genera grandes daños ambientales que en su conjunto ocasionan más daños que beneficios, desde el punto de vista económico, es una falla de mercado que ocurre ante la presencia de costos no considerados.

En el estudio del cambio climático también se ha recomendado la adaptación de los nuevos instrumentos financieros, como son los derivados, que en términos generales funcionan como seguros ambientales ante los riesgos inminentes en temas de agricultura o inundaciones. Estados Unidos cuenta con el *Risky Business*. Molina *et al* (2017) elaboran estudios sobre el riesgo del cambio climático en diferentes regiones de Estados Unidos con el objetivo de apoyar a empresas con información sobre el riesgo en las distintas actividades y que pueden internalizar en temas como agricultura, energía, salud pública etcétera, este estudio puede extenderse a cualquier región o país del mundo.

El modelo propuesto para cobertura de cambio climático está basado en el modelo de Heston, utilizado en riesgos financieros para coberturas de precios de activos considerando volatilidad estocástica.

El modelo propuesto originalmente por el mismo en Heston (1993) ha llegado a ser popular entre los usuarios de finanzas cuantitativas. El modelo describe la dinámica de los precios y con su volatilidad y está definido por dos ecuaciones diferenciales estocásticas que definen la evolución en el tiempo a partir de un movimiento geométrico browniano. Además, tiene dos características principales que lo hacen muy útil para describir la volatilidad de los activos: La primera es que es capaz de capturar el *smile* de volatilidad, lo cual es un fenómeno donde las opciones con igual vencimiento, pero diferente precio de ejercicio tienen volatilidades implícitas diferentes, que es una característica crucial para la precisión del precio de la opción. Y la segunda, es que el modelo es capaz de capturar la naturaleza de reversión a la media de la volatilidad, lo que es una característica común en los medios financieros.

Una vez que se ha definido el modelo de Heston, es posible encontrar una solución cerrada⁴, pero también puede resolverse a través de un método numérico para aproximar las ecuaciones diferenciales (tales como: el

⁴ blog.quantisti.com/heston-model/

Método Euler-Muruyama, el Método Milstein o el Método Runge-Kutta) cada uno con sus respectivas ventajas y desventajas que además requerirán de ciertas especificaciones.

El modelo de Heston asume que la volatilidad sigue un proceso estocástico con reversión a la media, mejor conocida como una difusión de raíz cuadrada. Esto significa que se tiende a un valor promedio en el largo plazo con fluctuaciones aleatorias alrededor de este valor, al final el comportamiento es capturado por los parámetros del modelo.

Otro aspecto importante del modelo es la correlación entre el precio del subyacente y su volatilidad y juega un papel crucial en el precio de las opciones y las coberturas. Existe una correlación negativa entre rendimiento y volatilidad, esto implica que un aumento del precio de los activos subyacentes va acompañado de una disminución en la volatilidad y viceversa, en el caso de una correlación positiva los movimientos se dan en la misma dirección. Para la determinación del precio de las opciones, el modelo de Heston se estima con más precisión que los modelos de volatilidad constante.

Para derivar la ecuación del modelo de Heston se puede en primer lugar comenzar con el modelo Black Scholes y luego reemplazar a la volatilidad constante por un proceso de volatilidad estocástica y luego se introduce la correlación entre los brownianos del precio del activo y su volatilidad.

Supongamos que el precio de un activo S_t y su volatilidad v_t obedecen los siguientes comportamientos estocásticos:

$$dS_t = \mu_t S_t dt + \sqrt{v_t} S_t dZ_1 \quad (1)$$

$$dv_t = \lambda(\bar{v} - v_t)dt + \eta\sqrt{v_t}dZ_2 \quad (2)$$

$$\rho_{\eta v}dt = \text{correl}(Z_1, Z_2) \quad (3)$$

donde μ_t es la tendencia de crecimiento del rendimiento de los precios del activo, λ es la velocidad de reversión a la media de la volatilidad en el largo plazo \bar{v} , η es la volatilidad de la volatilidad, ρ es la correlación de rendimiento de los precios y la volatilidad y dZ_1 y dZ_2 son movimientos brownianos correspondientes a los precios y volatilidad.

Suponiendo $V = V(t, S_t, v_t)$ y después de seguir los pasos similares a la deducción de Black-Scholes se llega a la ecuación de Heston

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \lambda(\bar{v} - v_t)\frac{\partial V}{\partial v} + \frac{1}{2}vS^2\frac{\partial^2 V}{\partial S^2} + \frac{1}{2}\eta^2v\frac{\partial^2 V}{\partial v^2} + \rho_{\eta v}\eta v S\frac{\partial^2 V}{\partial v \partial S} + rS\frac{\partial V}{\partial S} - rV = 0 \quad (4)$$

siguiendo a Heston (1993) y Gatheral (2012) para el planteamiento y solución de (4), con las condiciones de frontera para una opción europea y después de un cambio de variable. Sea K el precio de ejercicio de la opción europea, C el valor de la prima *call*, T es la fecha de vencimiento, $F_{t,T}$ el precio *forward* de un índice accionario, además $x = \log(F_{t,T}/K)$ y $\tau = T - t$. La ecuación anterior se simplifica como:

$$-\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{1}{2}vC_{xx} - \frac{1}{2}vC_x + \frac{1}{2}\eta^2vC_{vv} + \rho_{\eta v}\eta v C_{xv} + \lambda(\bar{v} - v_t)C_v = 0 \quad (5)$$

y se propone una solución de (5) de la forma (6), donde el primer término representa las pseudo expectativas del nivel final del índice dada la opción en el dinero y el segundo término representa la pseudo probabilidad de ejercicio

$$C(x, v, \tau) = K\{e^x P_1(x, v, \tau) - P_0(x, v, \tau)\} \quad (6)$$

sustituyendo la anterior ecuación (6) en la ecuación (5)

$$-\frac{\partial P_j}{\partial \tau} + \frac{1}{2}v\frac{\partial^2 P_j}{\partial x^2} - (\frac{1}{2} - j)v\frac{\partial P_j}{\partial x} + \frac{1}{2}\eta^2v\frac{\partial^2 P_j}{\partial v^2} + \rho_{\eta v}\eta v\frac{\partial^2 P_j}{\partial v \partial x} + (a - b_j v)\frac{\partial P_j}{\partial v} = 0 \quad (7)$$

Para $j = 0, 1$ y donde $a = \lambda\bar{v}$, $b_j = \lambda - j\rho_{\eta v}\eta$ con condiciones terminales

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} P_j(x, v, \tau) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases} \quad (8a)$$

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} P_j(x, v, \tau) := \theta(x) \quad (8b)$$

definiendo la transformada de Fourier de P_j a través

$$\tilde{P}(u, v, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-iux} P(x, v, \tau) \quad (9a)$$

entonces

$$\tilde{P}(u, v, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-iux} \theta(x) = \frac{1}{iu} \quad (9b)$$

y la transformada inversa está dada por

$$P(x, v, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{du}{2\pi} e^{iux} \tilde{P}(u, v, \tau) \quad (10)$$

se llega a

$$-\frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial \tau} - \frac{1}{2} u^2 v \tilde{P}_j - \left(\frac{1}{2} - j\right) iuv \tilde{P}_j + \frac{1}{2} \eta^2 v \frac{\partial^2 \tilde{P}_j}{\partial v^2} + \rho_{\eta v} iu \eta v \frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial v} + (a - b_j v) \frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial v} = 0 \quad (11)$$

con las definiciones

$$\begin{aligned} \alpha &= -\frac{u^2}{2} - \frac{iu}{2} + iju \\ \beta &= \lambda - \rho_{\eta v} \eta j - \rho_{\eta v} \eta iu \\ \gamma &= \frac{\eta^2}{2} \end{aligned}$$

entonces la ecuación (11) llega a ser

$$v \left\{ \alpha \tilde{P}_j - \beta \frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial v} + \gamma \frac{\partial^2 \tilde{P}_j}{\partial v^2} \right\} + a \frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial v} - \frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial \tau} = 0 \quad (12)$$

sustituyendo

$$\begin{aligned} \tilde{P}_j(u, v, \tau) &= \exp(C(u, \tau)\bar{v} + D(u, \tau)v) \tilde{P}_j(u, v, 0) \\ &= \frac{1}{iu} \exp(C(u, \tau)\bar{v} + D(u, \tau)v) \end{aligned} \quad (13)$$

se sigue que

$$\frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial \tau} = \left\{ \bar{v} \frac{\partial C}{\partial \tau} + v \frac{\partial D}{\partial \tau} \right\} \tilde{P}_j \quad (14a)$$

$$\frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial v} = D \tilde{P}_j \quad (14b)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{P}_j}{\partial v^2} = D^2 \tilde{P}_j \quad (14c)$$

la ecuación (12) satisface si

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \lambda D \quad (15a)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \tau} = \gamma(D - r_+)(D - r_-) \quad (15b)$$

donde se define

$$r_{\pm} = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\gamma} := \frac{\beta \pm d}{\eta^2} \quad (16)$$

integrando con las condiciones terminales $C(u, 0) = D(u, 0) = 0$

$$D(u, \tau) = r_- \frac{1 - e^{-d\tau}}{1 - g e^{-d\tau}} \quad (17a)$$

$$C(u, \tau) = \lambda \left\{ r_- \tau - \frac{2}{\eta^2} \log \left(\frac{1 - g e^{-d\tau}}{1 - g} \right) \right\} \quad (17b)$$

donde

$$g := \frac{r_-}{r_+}$$

Usando la transformada inversa ecuación (10) y desempeñando la integración compleja da la forma de la pseudo probabilidades en la forma de una integral de una función real valuada

$$P_j(x, v, \tau) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} du \operatorname{Re} \left\{ \frac{\exp\{C_j(u, \tau)\bar{v} + D_j(u, \tau)v + iux\}}{iu} \right\} \quad (18)$$

Mientras el modelo de Heston es ampliamente usado en finanzas, este tiene sus limitaciones ya que asume que la volatilidad tiene un proceso de reversión a la media que no siempre ocurre en la realidad, además de que puede ser caro computacionalmente hablando especialmente cuando las opciones son exóticas. Además, el modelo no considera eventos extremos, ni saltos y supone que la volatilidad y el precio no siempre están en el mundo real. Finalmente, de las ecuaciones (1) y (2) después de una transformación y discretización en el tiempo puede aplicarse una simulación Montecarlo para analizar el comportamiento dinámico de las variables, como se muestra a continuación:

$$X_{i+1} = X_i e^{\left(r - \frac{1}{2}\sqrt{Y_j}\right)\Delta t + \sqrt{Y_j}\Delta t W_{S_{i+1}}^Q} \quad (19)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + \theta(\bar{Y}_0 - Y_t)\Delta t + \eta\sqrt{Y_t}W_{v_{i+1}}^Q \quad (20)$$

4. Modelo Propuesto

Como se mencionó en las secciones anteriores hay al menos dos consecuencias principales del cambio climático: 1) la elevación de la temperatura promedio de la superficie terrestre debido a los GEI 2) la elevación del nivel del mar a un nivel importante. Los dos efectos son dañinos para las actividades humanas y la economía como se mencionó previamente y las afectaciones pueden ser en la agricultura, el turismo, la extinción de especies.

El modelo propuesto está basado en el modelo de Heston (revisar sección anterior) y propone la estimación de un seguro basado en la teoría de opciones financieras que pueda servir como cobertura de los efectos de cambio en el clima y puede llamarse modelo de Heston verde.

Supongamos que el nivel del mar X_t y la temperatura media global Y_t son procesos estocásticos y satisfacen las siguientes ecuaciones:

$$dX_t = \mu X_t dt + \sqrt{Y_t} X_t dW_X \quad (21)$$

$$dY_t = \theta(\bar{Y}_0 - Y_t)dt + \sigma\sqrt{Y_t}dW_Y \quad (22)$$

$$\rho dt = \text{correl}(W_X, W_Y) \quad (23)$$

donde μ_t es la tendencia de crecimiento del nivel del mar, θ es la velocidad de reversión a la media de en el largo plazo de la temperatura media \bar{Y}_0 , σ es la volatilidad de la temperatura, ρ es la correlación de entre el cambio en el crecimiento del nivel del mar y la temperatura, dW_X y dW_Y son movimientos brownianos correspondientes al crecimiento del nivel del mar y la temperatura.

Se pueden aplicar una transformación y discretizar las ecuaciones (21) y (22) quedando de la siguiente manera (equivalente a las ecuaciones 19 y 20):

$$X_{i+1} = X_i e^{(r - \frac{1}{2}\sqrt{Y_j})\Delta t + \sqrt{Y_j}\Delta t W_{S_{i+1}}^Q} \quad (24)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + \theta(\bar{Y}_0 - Y_i)\Delta t + \sigma\sqrt{Y_t}W_{v_{i+1}}^Q \quad (25)$$

Por otro lado, siguiendo la sección anterior y suponiendo $F = V(t, X_t, Y_t)$ y después de aplicar lema de Ito, cobertura delta y no arbitraje se llega a la ecuación de Heston.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + rX \frac{\partial F}{\partial X} + \theta(\bar{Y}_0 - Y_t) \frac{\partial F}{\partial Y} + \frac{1}{2} X^2 Y_t \frac{\partial^2 F}{\partial X^2} + \frac{1}{2} \sigma^2 Y_t \frac{\partial^2 F}{\partial Y^2} + \rho \sigma X_t Y_t \frac{\partial^2 F}{\partial X \partial Y} - rF = 0 \quad (26)$$

Siguiendo las ecuaciones de la (5) a la (10) llegamos nuevamente a

$$-\frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial \tau} - \frac{1}{2} u^2 v \tilde{P}_j - \left(\frac{1}{2} - j\right) iuv \tilde{P}_j + \frac{1}{2} \eta^2 v \frac{\partial^2 \tilde{P}_j}{\partial v^2} + \rho \eta v iu \eta v \frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial v} + (a - b_j v) \frac{\partial \tilde{P}_j}{\partial v} = 0 \quad (27)$$

Y llegamos usando la transformada inversa y desempeñando la integración compleja de la misma forma que en la sección anterior (de las ecuaciones 11 a la 17)

$$P_j(x, u, \tau) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^\infty du \operatorname{Re} \left\{ \frac{\exp\{C_j(u, \tau)\bar{v} + D_j(u, \tau)v + iux\}}{iu} \right\} \quad (28)$$

con las definiciones

$$\alpha = -\frac{u^2}{2} - \frac{iu}{2} + iju$$

$$\beta = \lambda - \rho \sigma j - \rho \sigma iu$$

$$\gamma = \frac{\sigma^2}{2}$$

$$r_\pm = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\gamma} := \frac{\beta \pm d}{\sigma^2}$$

integrando con las condiciones terminales $C(u, 0) = D(u, 0) = 0$

$$D(u, \tau) = r_- \frac{1 - e^{-d\tau}}{1 - g e^{-d\tau}} \quad (29)$$

$$C(u, \tau) = \lambda \left\{ r_- \tau - \frac{2}{\sigma^2} \log \left(\frac{1 - g e^{-d\tau}}{1 - g} \right) \right\} \quad (30)$$

donde

$$g = \frac{r_-}{r_+} \quad (31)$$

5. Resultados

A partir del planteamiento y solución de modelo propuesto en la sección anterior se pueden mostrar algunos de los siguientes resultados. De las ecuaciones (24) y (25) podemos aplicar el método Montecarlo y para tener una idea de la evolución temporal de la temperatura media y del nivel del mar. A continuación, se puede observar la evolución de las variables.

Figura 5
Simulación Montecarlo de la evolución de la temperatura media

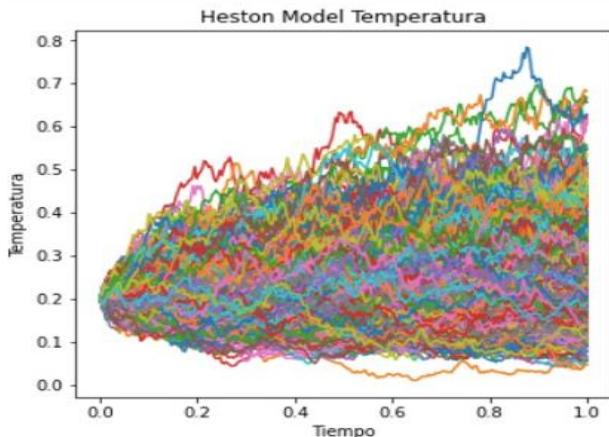
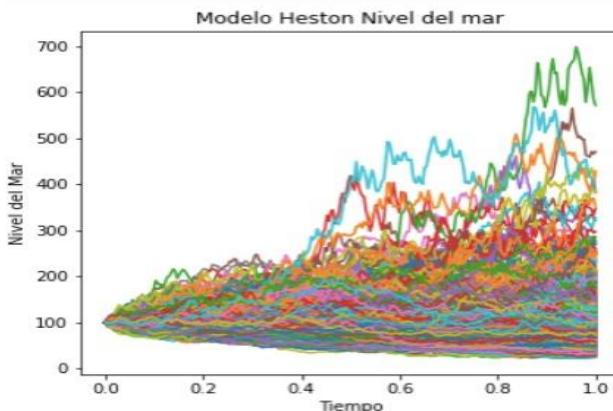


Figura 6
Simulación Montecarlo del nivel del mar

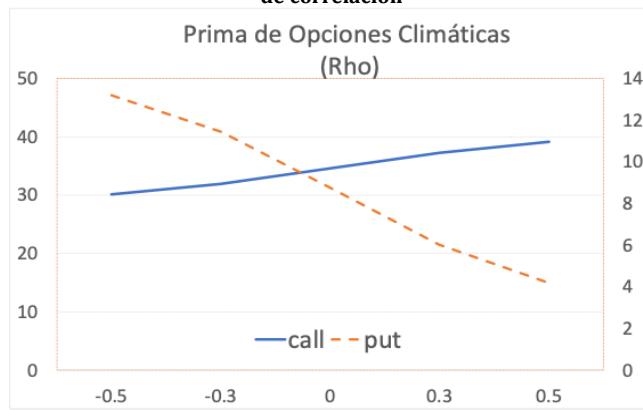


Para la resolución de las ecuaciones diferenciales estocásticas, nos apoyamos en una librería en Python y poder hacer la estimación de la prima de compra y venta del modelo climático, es decir, el modelo Heston con subyacente de nivel medio del mar y la temperatura media global. A continuación, se muestran unos ejercicios de estática comparativa que involucran el cambio el precio de las opciones (*call* y *put*) al variar los siguientes parámetros.

S_0	K	R	T	ρ	σ	θ	μ
100	[90,95,100,105,110,115]	0.5	1	[-0.5, -0.3, 0, 0.3, 0.5, 0.9]	[0.10, 0.20, 0.30, 0.40]	[1, 2, 3, 4, 5]	1

Figura 7

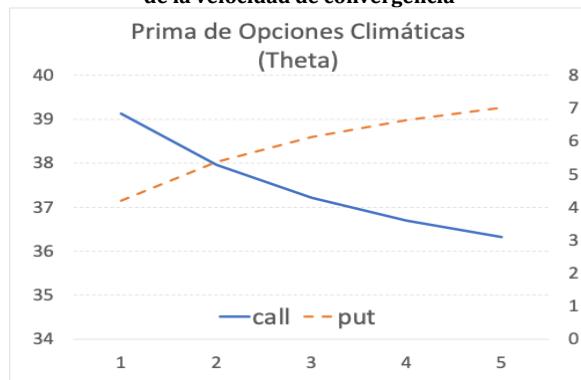
Valuación de opciones financieras con base al modelo Heston climático como función de correlación



Fuente: Elaboración propia

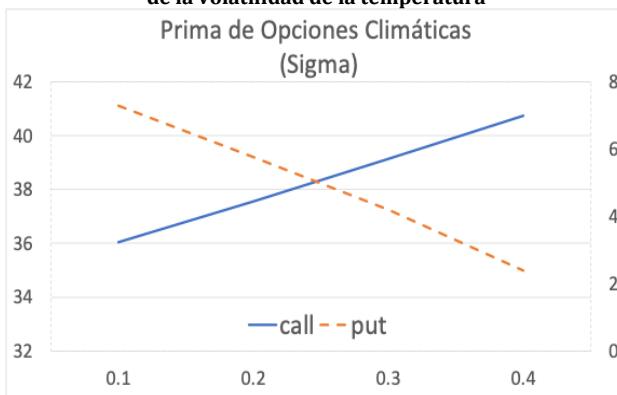
El valor de la prima de la opción *call* del modelo Heston verde conforme el valor de la correlación va incrementándose de negativa a cero y luego creciendo a valores positivos de la misma manera las primas de la opción *call* va aumentando en el mismo sentido, es decir, entre mayor correlación tenga la temperatura y el nivel del mar, mayor será el valor para una cobertura. Y, por otra parte, lo opuesto sucede para opciones *put* del mismo modelo de Heston verde.

Figura 8
Valuación de opciones financieras con base al modelo Heston climático como función de la velocidad de convergencia



Si theta aumenta, recordando que es la velocidad de convergencia de la reversión de la media de la temperatura promedio, el precio de la prima de la opción *call*, irá disminuyendo y para la opción *put* sucede lo contrario, es decir, a mayor velocidad de convergencia más costosa será la prima de la opción *call*.

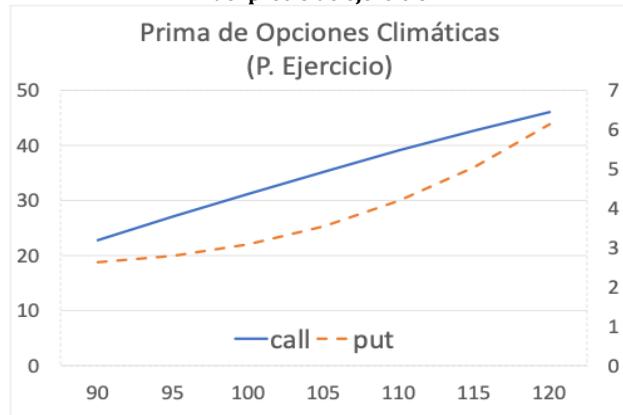
Figura 9
Valuación de opciones financieras con base al modelo Heston climático como función de la volatilidad de la temperatura



Si la volatilidad de la temperatura media aumenta (sigma), la prima de la opción *call*, también se irá incrementando, es decir, a mayor volatilidad más costosa la opción *call* con subyacente del nivel del mar, para la opción *put* sucede lo contrario como en los otros casos.

Figura 10

Valuación de opciones financieras con base al modelo Heston climático como función del precio de ejercicio



Al igual que en los casos anteriores al aumentar el valor del precio de ejercicio el valor de las primas *call* y *put* es mayor. Cabe hacer notar que en las figuras anteriores (7, 8, 9 y 10) la intención es indicar la relación de las primas de las opciones con sus parámetros. Para un resultado más real tendrían que calibrarse el modelo con opciones más reales provenientes de las ramas de seguros.

En los siguientes párrafos se presenta un caso con datos de series reales para la estimación de las primas. La primera serie considerada es referente al crecimiento del nivel medio del mar (en mm) de serie NASA⁵ en escala anual del 2023, de donde se toma de la dicha serie: el nivel inicial, el nivel de nivel de ejercicio y obtiene la tendencia de crecimiento. Y la segunda serie considerada es la temperatura media, de donde se considerada, la temperatura media inicial, y los parámetros de reversión a la media de la temperatura media. A continuación, se presentan los valores numéricos considerados y el valor estimado para las primas *call* y *put*.

	Valor Prima	SO (Nivel inicial del agua)	Nivel de ejercicio del agua)	Tasa de interés	Vencimiento (años)	Temperatura Media Inicial	Correlacion entre nivel del agua y Temperatura	Tendencia de crecimiento de la Temperatura	Theta
Call	1.66	72	100	0.02	1	14.7	0.09	0.2847	0.253
Put	59.65	72	100	0.02	1	14.7	0.09	0.2847	0.253

El agua puede causar muchos desastres en el patrimonio y usualmente los seguros contra inundaciones pueden ser adquiridos a través de un agente

⁵ climate.metofffcie

de seguros. Los propietarios de viviendas y negocios que viven en zonas de alto riesgo de inundaciones pueden cotizar y comprar un seguro. El deducible es la cantidad que se paga para tener acceso al pago del seguro en las viviendas y las pertenencias.

Para determinar un valor de un contrato (V) más real contra inundaciones tendría que calibrarse el valor de la prima de riesgos de la opción *call* (c) y compararlo con los valores del contrato de la aseguradora (V) y ajustándolo a través de una constante de calibración⁶. Debido a que los mercados son incompletos en la práctica, es complicado alcanzar una estimación real.

$$V = k * c \quad (32)$$

Se debe considerar que en el mercado de los seguros las estimaciones están basadas en cálculos actuariales relacionados con la severidad y frecuencia de los eventos históricos del mismo posible evento, además que el valor depende del bien asegurado y que va cambiando de región en región.

Conclusiones

El cambio climático es una realidad en nuestro mundo, entre los efectos más importantes se encuentran el aumento promedio de la temperatura global en todos y cada uno de los países, así como el aumento en el nivel del mar. Ambos incrementos tienen impacto en la economía y las finanzas que van desde la agricultura, el turismo, la posible desaparición de costas etcétera. A partir del modelo de Heston verde es posible plantear una cobertura contra dichos efectos.

En la literatura revisada hay coincidencias en que la temperatura seguirá subiendo mientras no exista un acuerdo mundial más real sobre la reducción de emisiones de CO₂, por lo tanto, se vuelve necesario utilizar instrumentos de cobertura.

El trabajo propone el modelo de Heston de finanzas cuantitativas aplicado al subyacente del nivel del mar y de la temperatura media de la superficie de la tierra. El modelo de Heston verde se resuelve con ayuda de librerías de Python y se generan gráficas para observar los comportamientos de las

⁶ Que debería de incluir un ajuste en unidades de medición.

primas como función de los parámetros. Al final también se plantea un ejercicio numérico.

De acuerdo al modelo considerado, si la correlación entre nivel de crecimiento del mar y temperatura media es positiva, el precio de la cobertura resulta ser mayor, es decir, parecería que se refuerza el aumento de temperatura con el nivel del mar y resultaría más caro un seguro contra inundaciones.

Por otro lado, entre más lento sea la convergencia a su valor de largo plazo la temperatura media más cara resulta el valor de la cobertura, es natural pensar que entre más tarde en estabilizarse más costosa sería la cobertura.

Como ocurre en las opciones financieras, entre mayor sea la volatilidad de la temperatura media, más cara es la cobertura contra el incremento del nivel del mar.

En el ejercicio numérico planteado en el caso de correlaciones casi nulas entre nivel de agua y temperatura media (ambos a nivel global) con un nivel de 72mm y en un año un nivel de ejercicio de 100 y tomando los parámetros estimados de las mismas series, el precio de la cobertura sería de 1.62. Debido a que el mercado es incompleto este valor debería tomarse con mucho cuidado con las reservas de limitación del modelo. Estrictamente debería de considerarse un ajuste en las unidades de medición, para un caso local ambas series tendrían que estimarse parámetros adecuados, y calibrarse con un contrato obtenido por métodos actariales donde se toman en cuenta los históricos de frecuencia y severidad de los eventos.

Aunque el modelo es complicado en su planteamiento y solución, es bastante limitado en la consideración de sus supuestos, ya que solamente considera un par de variables y supone un comportamiento estocástico y con reversión a la media, siendo que en la realidad tiene un gran número de variables involucradas. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones nos proporciona ideas generales sobre su evolución en el tiempo.

Existen algunas variantes que pudieran aplicarse para investigaciones futuras, por ejemplo: realizar la calibración al compáralo con contratos reales. Por otra parte, podría utilizarse el modelo con otras variables ambientales o también podría considerarse incluir saltos de Poisson para considerar eventos extremos.

Referencias

- [1] Bilal, A., & Känzig, D. R. (2024). *The macroeconomic impact of climate change: Global vs. local temperature* (NBER Working Paper No. 32450). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w32450>
- [2] Blanc-Blocquel, A., Ortiz-Gracia, L., & Oviedo, R. (2024). Efficient likelihood estimation of Heston model for novel climate-related financial contracts valuation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 225, 430–445.
- [3] Estrada, M. (2001). Cambio climático global: causas y consecuencias. *Revista de Información y Análisis*, 16.
- [4] Gatheral, J. (2012). *The volatility surface: A practitioner's guide*. John Wiley & Sons.
- [5] Gelrud, M. (2023). Climate change in financial markets. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4479064>
- [6] Griggs, G., & Reguero, B. G. (s.f.). Coastal adaptation to climate change and sea-level rise.
- [7] Heston, S. L. (1993). A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options. *The Review of Financial Studies*, 6(2), 327–343. <https://doi.org/10.1093/rfs/6.2.327>
- [8] Kapphan, I. (2012). Weather risk management in light of climate change using financial derivatives. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-007139821>
- [9] Kotz, M., Levermann, A., & Wenz, L. (2024). The economic commitment of climate change. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>
- [10] Kutrolli, G. (2021). *Modeling and risk management with applications in financial and weather derivatives* [Doctoral thesis, Universidad de Milán - Bicocca].
- [11] Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2017). *El cambio climático*. Fondo de Cultura Económica.
- [12] Olijslagers, S. (2022). *The economics of climate change: On the role of risk and preferences* [Master's thesis, Universidad de Ámsterdam].
- [13] Ortiz Niño, V. M., & Martínez, L. M. (s.f.). *Finanzas verdes* [Diapositivas]. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/1613/A_signaturas/2071/Archivo2.5431.pdf
- [14] Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., et al. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core in Antarctica. *Nature*, 399(6735), 429–436. <https://www.climateark.org/vital/graphics/large/2.jpg>
- [15] Pindyck, R. S. (2020). *What we know and don't know about climate change, and implications for policy*. National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w27304>
- [16] Rayén, Q. M. (2001, septiembre 1). Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. <https://hdl.handle.net/11362/5570>

- [17] Rivera, J. I., Guerra, P., & Ricaurte, B. D. (2023). ¿Qué son las finanzas verdes?: Un análisis desde la teoría y la práctica. <http://hdl.handle.net/10644/9583>
- [18] Sturm, M., Goldstein, M. A., Huntington, H., & Douglas, T. A. (2016). Using an option pricing approach to evaluate strategic decisions in a rapidly changing climate: Black-Scholes and climate change. *Climatic Change*, 140(3-4), 437-449. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1860-5>
- [19] Taxonomía sostenible de México. (2023). *Gobierno de México*. <https://www.gob.mx/shcp/documentos/taxonomia-sostenible-de-mexico?state=published>
- [20] Xu, L., Deng, S., & Thomas, V. M. (2016). Carbon emission permit price volatility reduction through financial options. *Energy Economics*, 53, 248-260. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.06.001>
- [21] Xue, J., Nie, F., Zhao, L., & Xie, X. (2023). An option pricing model based on a green bond price index. *University Park of Weiyang District*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4583080>