

# Valoración de opciones climáticas: una aplicación para el sector arrocero de Yopal (Colombia)

Juan Camilo Vargas Arayón\*  
Nathalia Alejandra Ríos Castro\*\*

---

\* Profesional en finanzas y comercio internacional, Universidad de La Salle, Bogotá (Colombia). [kamilo1993@hotmail.com]. Grupo 7 Constructores.

\*\* Profesional en finanzas y comercio internacional, Universidad de La Salle, Bogotá (Colombia). [nataliaríos\_06@hotmail.com].

Fecha de recepción: 06 de noviembre de 2016.

Fecha de aceptación: 15 de enero de 2017.

Para citar este artículo

Vargas Arayón, J. C. y Ríos Castro, N. A. (2017). Valoración de opciones climáticas: una aplicación para el sector arrocero de Yopal, Casanare. ODEON, 12, pp. 55-75. DOI: <https://doi.org/10.18601/17941113.n12.03>



## Introducción

El cambio climático como resultado del calentamiento global ha generado consecuencias negativas en las actividades económicas y productivas (Cruz y Llinas, 2010). Estudios realizados por la Asociación de Gestión del Riesgo Climático (WRNA, por la sigla en inglés de *Weather Risk Management Association*) en el año 2009 demuestran la importancia del factor medioambiental dentro de las economías mundiales, como elemento que repercute en la capacidad de generar valor en diferentes sectores productivos como la construcción, el turismo, la energía y la agricultura; siendo la actividad agrícola una de las más vulnerables ante los fenómenos climáticos, donde las altas temperaturas afectan directamente la productividad, los ingresos de los productores y la seguridad alimentaria (Ortiz, 2012).

En Colombia, la agricultura constituye un importante motor para la economía (Mejía, 2014) y se ha visto seriamente afectada por las variaciones climáticas relacionadas con los fenómenos de El Niño y La Niña, lo que genera fuertes implicaciones de carácter económico, que se resumen en pérdidas millonarias, como bien lo evidencia el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Colombia es el segundo país productor de arroz en América Latina y el Caribe y la producción de este ocupa el primer lugar en términos de valor económico entre los cultivos de ciclo corto (Fedearroz, 2010). Sin embargo, ha sido uno de los sectores más afectados como consecuencia del cambio climático, desencadenando importantes pérdidas en la producción.

En este sentido, se evidencia que los productores de alimentos en Colombia no cuentan con la capacidad económica para hacer frente al riesgo climático y adaptarse a fluctuaciones del mismo (Charlotte, 2013). De esta manera, en la medida en que los cambios en los patrones climáticos constituyan una fuente de riesgo para la agricultura, y en especial para el sector arrocero colombiano, los derivados climáticos podrían convertirse en una valiosa estrategia de cobertura de riesgos para los productores agrícolas en Colombia.

De esta forma, el presente trabajo tiene como objetivo valorar una opción climática como mecanismo de cobertura del riesgo climático en el sector arrocero de Yopal, Casanare (Colombia). El documento se divide en cuatro secciones, siendo esta introducción la primera. En la segunda sección se realiza una descripción del mercado de derivados climáticos, sus ventajas y limitaciones; en la tercera, se presenta el modelo de valoración de opciones, a partir de la simulación del proceso estocástico de la temperatura, así como los principales resultados y, en la última sección se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones para futuros trabajos.

## 1. Mercado de los derivados climáticos

Los derivados climáticos se pueden definir como instrumentos financieros cuyo valor depende de variables subyacentes climáticas, como la temperatura, precipitaciones, heladas, entre otros (Cruz y Llinas, 2010). De acuerdo con Finas (2012), la estructuración de este tipo de instrumentos de cobertura obedece a:

1. El tipo de contrato por negociar (opción, futuro, *swap*).
2. La estación meteorológica de referencia.
3. El índice climático: sobre el cual se estructura el derivado, que regula cuándo y cómo los pagos del contrato se realizarán.
4. El periodo dentro del cual el contrato tiene vigencia.
5. El *pay-off* o función de pago.
6. La prima, que se establece en función del tipo de contrato negociado.

Además, según Cao, Li y Wei (2003), el mercado de derivados climáticos fue creado a mediados de 1990, como consecuencia de la desregulación en las industrias de energía y servicios públicos en Estados Unidos. Estas compañías buscaban instrumentos de cobertura para hacer frente a la creciente competencia y la incertidumbre en la demanda. Al mismo tiempo, los cambios en los patrones climáticos, derivados del fenómeno de El Niño en los años 1997 y 1998, ocasionaron importantes pérdidas para el sector energético, demostrando la importancia del factor medioambiental en las economías mundiales y la necesidad de crear un instrumento financiero que lograra mitigar el riesgo asociado a eventos del clima.

En 1997, las empresas Koch Energy y Enron realizaron la primera transacción de derivados climáticos, a través de un contrato sobre un índice de temperatura para Milwaukee, Wisconsin, en el invierno de 1997-1998 (Cao *et al.*, 2003). Inicialmente, estos instrumentos financieros fueron negociados a través del mercado Over The Counter (OTC); sin embargo, a partir de 1999, la bolsa mercantil de Chicago (CME), hoy en día conocida como CME Group, dio origen a contratos estandarizados, futuros y opciones, sobre índices de temperatura en 10 ciudades de Estados Unidos (Atlanta, Chicago, Cincinnati, Nueva York, Dallas, Filadelfia, Portland, Tucson, Des Moines y Las Vegas). Así, los contratos sobre Heating Degree Day (HDD) y Cooling Degree Day (CDD)<sup>1</sup> constituyeron los primeros derivados climáticos transados en bolsa.

---

<sup>1</sup> En el CME Group, los contratos de futuros y opciones sobre índices están basados en los grados de calor y frío extremos (HDD y CDD, respectivamente), los cuales son estimados como la suma acumulada de HDD o CDD diarios durante un mes.

En el año 2003, este mercado se consolida en Europa a través de la construcción y negociación de contratos HDD mensuales y por estación meteorológica para seis ciudades europeas. Posteriormente, en el 2005, aparecen nuevos contratos basados en la cantidad de precipitación de nieve en Holanda y Estados Unidos. En el 2006, Canadá ingresó al mercado de derivados climáticos con la negociación de contratos CDD, HDD y CAT (*Cumulative Average Temperature*)<sup>2</sup>. Dos años después, el CME Group se expandió a Australia bajo la negociación de contratos basados en temperatura y posteriormente al mercado japonés (Arango, 2013).

De esta forma, el mercado de derivados climáticos ha presentado un crecimiento importante tanto en volumen como en tipos de productos negociados. En la actualidad, EE.UU., el Reino Unido, Australia, Francia, Alemania, Noruega, Suecia y Japón presentan un desarrollo notable en este tipo de productos, los cuales se han convertido en herramientas de gestión de riesgo, en la medida que los precios de la energía están altamente correlacionados con el comportamiento del clima (Alatón *et al.*, 2002).

Los derivados climáticos sobre índices de temperatura, por ejemplo CDD y HDD, funcionan en épocas de invierno y verano, y son utilizados principalmente por empresas del sector energético con el objetivo de mitigar el riesgo climático que podría afectar la demanda por calefacción y aire acondicionado. La rentabilidad de estos contratos se basa en la diferencia acumulada que puede existir entre las temperaturas diarias y la temperatura de referencia (18 °C), durante un periodo determinado. Así, el comprador de estos contratos (usuarios finales) recibirá rentabilidades positivas en la medida en que la temperatura acumulada esté por debajo o por encima del nivel de referencia.

## 1.1 Derivados climáticos en la agricultura

De acuerdo con la Asociación de Gestión de Riesgo Climático (2015), los agricultores han sido afectados no solo por los aumentos en los costos de producción y las restricciones sobre el uso de los agroquímicos; sino también por las fluctuaciones en los eventos del clima. Lo anterior se traduce en la necesidad de generar una mayor eficiencia en sus prácticas agrícolas, que podría lograrse mediante avances

---

<sup>2</sup> Refleja el índice de futuro sobre el promedio de temperatura reportado por el sistema de Información Federal (MDA) de Canadá.

tecnológicos en pro de potenciar el rendimiento de sus cultivos. No obstante, el riesgo que involucra las fluctuaciones del clima persiste como un factor de vital importancia desde la siembra hasta la cosecha, donde las precipitaciones, la temperatura, el viento, entre otros, pueden afectar la calidad de los cultivos.

Ahora bien, la relación que existe entre los volúmenes de los cultivos y las fluctuaciones climáticas puede desencadenar tanto situaciones financieras favorables como escenarios de importantes pérdidas económicas (Asociación de Gestión del Riesgo Climático, 2015). Por tal motivo, las herramientas de gestión de riesgos climáticos han sido ampliamente utilizadas con el propósito de mitigar los efectos financieros como resultado de los fenómenos del clima. Lo anterior es soportado por los innumerables casos de éxito que demuestran que el uso de estos instrumentos financieros genera oportunidades de crecimiento en el sector agrícola de las economías mundiales.

Por otro lado, la literatura y la evidencia disponible han demostrado que el tema crucial en la aplicación de estas herramientas de cobertura está determinado por la existencia de una relación clara y satisfactoria entre el factor clima y la variable de producción. De acuerdo con Stoppa *et al.*, la puesta en marcha de estos instrumentos financieros requiere que la variable climática sea medible y que los registros históricos de la misma se encuentren disponibles. De igual forma, la relación entre producción y los fenómenos climáticos que involucra la dinámica de los derivados climáticos no es tan sencilla como en otros sectores de la economía. Dado que las diferencias en los productos, las etapas de desarrollo de los cultivos, entre otros factores, tienden a presentar distintas respuestas frente al mismo factor clima.

## 1.2 Limitaciones de los derivados climáticos

De acuerdo con Stoppa *et al.* (2003) existen tres limitaciones principales en la implementación de los derivados climáticos:

- El riesgo base, en la medida en que no exista una fuerte correlación entre la producción y la variable climática que constituye el subyacente del derivado climático.
- El riesgo por localización, en la medida en que el agente que desea utilizar este tipo de mecanismos, bajo condiciones de un mercado organizado, realice operaciones a una distancia importante de la estación de referencia del contrato.

De esta forma, en caso de que exista una distancia considerable entre el lugar de interés del usuario final y la estación meteorológica que registra los datos correspondientes, la variable climática que determina los flujos de efectivo del derivado no podrá explicar cambios en la producción, perdiéndose así la eficiencia de estos instrumentos.

- La falta de un método de fijación de precios universal, que podría generar falta de transparencia en el mercado y un aumento de los costos de transacción.

Estas limitaciones pueden ser superadas en la medida en que se estructuren métodos alternativos de valoración y se logre garantizar una fuerte correlación entre la producción y el subyacente del derivado climático. Estos aspectos se detallan en la siguiente sección.

## 2. Modelo de valoración de la opción climática

### 2.1 Variable subyacente del derivado

Con el objetivo de identificar la variable climática que afecta la producción del cultivo de arroz, se propone la función de producción Cobb-Douglas modificada siguiendo el modelo propuesto por Cruz y Llinas (2010), el cual permite medir los efectos marginales de la pluviosidad y de la temperatura sobre la producción de arroz:

$$P_{\alpha} = AT_m^{\beta_1} P_m^{\beta_2} \quad (1.1)$$

Donde,  $P_{\alpha}$  es la producción mensual de arroz en toneladas;  $A$  representa una constante (intersección en el eje vertical);  $P_m$  es la precipitación total mensual;  $T_m$  la temperatura media mensual medida en grados Celsius, y  $\beta_1$  y  $\beta_2$  representan los coeficientes de elasticidad de la precipitación y temperatura. De esta forma, los parámetros de la ecuación 1.1 pueden ser estimados a través un modelo de regresión múltiple, el cual permite analizar el comportamiento de la variable producción frente a los cambios de las variables temperatura y precipitación. Este modelo de regresión se puede expresar de la siguiente forma:

$$\ln(P_{\alpha}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(T_m) + \beta_2 \ln(P_m) + u \quad (1.2)$$

Aquí,  $\beta_0$  representa  $\ln(A)$  y  $u$  el término de error o perturbación. Cabe resaltar que la transformación logarítmica<sup>3</sup> de las series de datos de temperatura y precipitación permite corregir el problema de no estacionariedad en media y varianza<sup>4</sup>. Superada esta dificultad, se procede a determinar la relación entre la producción y las variables temperatura y precipitación, a través de la estimación del modelo por mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Los resultados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Estimación del modelo econométrico de producción de arroz

Variable	Coficiente	Error estándar	Estadístico t	P-Valor
Temperatura	1,0337	0,2631	3,9278	0,0002*
Precipitación	0,0321	0,0134	2,3958	0,0201
Constante	0,0039	0,0444	-0,0890	0,9294
R-cuadrado: 0,7864		* Significativo al 99% de confianza		
R-cuadrado ajustado: 0,7706				
Estadístico F: 49,7247				
Prob. (Estadístico F): 0,0000				
Durbin-Watson: 1,9074				

Fuente: elaboración propia.

Los resultados anteriores muestran que el modelo explica la dinámica del comportamiento de la producción del arroz en un 77,06 %<sup>5</sup>, donde con un 99% de confianza, la variable temperatura resulta ser significativa con una medida de sensibilidad (coeficiente) de 1.033. De esta forma, la temperatura se toma como la principal variable que explica el nivel de producción y, representa para el

<sup>3</sup> Teniendo en cuenta que este problema de no estacionariedad afecta de forma significativa las distribuciones en las etapas de contraste y validación del modelo econométrico y, si no se corrige, se presentarían regresiones espurias. Este ejercicio se verificó con la implementación del test de raíz unitaria de Dickey-Fuller.

<sup>4</sup> Además, se consideró necesario eliminar la tendencia y la variabilidad en la media a través de la aplicación del filtro Hodrick-Prescott.

<sup>5</sup> Cabe anotar que el modelo no presenta problemas de autocorrelación serial y heterocedasticidad, lo cual fue confirmado mediante la aplicación de los test de Durbin-Watson y Breusch-Godfrey respectivamente.



posterior desarrollo del trabajo al subyacente en el proceso de valoración del derivado climático.

## 2.2 Modelo de comportamiento del subyacente: temperatura

El modelo que se presenta a continuación tiene como propósito describir la evolución del activo subyacente (temperatura) como proceso fundamental en la valoración de opciones climáticas. Para lograr este objetivo se empleó el mismo procedimiento realizado por Téllez *et al.* (2014), donde se determina que la estacionalidad, la reversión a la media y la memoria a largo plazo son factores que caracterizan el comportamiento de esta variable. Así, la dinámica de la temperatura estará caracterizada por dos componentes: i) determinista y ii) estocástico.

### 2.2.1 Modelo determinista de la temperatura

Dado que la temperatura media del municipio de Yopal, para los años en estudio, presenta una variación periódica, esta podría modelarse según el modelo de Alatón *et al.* (2002), a través de una función seno de la forma:  $\text{sen}(\omega t + \varphi)$  donde  $t$  denota el tiempo expresado en días y  $\varphi$  el ángulo de fase, parámetro que se incluye dado que la temperatura anual promedio mínima y máxima no suele ocurrir durante un periodo de tiempo determinado. Además, bajo un periodo de oscilación igual a 1 año, se tiene que  $\omega = 2\pi/365$ .

De esta manera, el modelo determinista para la temperatura media en el periodo de tiempo  $t(T_t^m)$  seguirá la forma

$$T_t^m = A + Bt + C \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

Conforme a la metodología desarrollada por Téllez *et al.* (2014), los parámetros del modelo determinista A, B, C y  $\varphi$  son estimados a través del método de mínimos cuadrados ordinarios, partiendo de la expresión 2.2c, como sigue:

$$T_t^m = A + Bt + C [\text{sen}(\omega t)\cos(\varphi) + \text{sen}(\varphi)\cos(\omega t)] \quad (2.2a)$$

$$T_t^m = A + Bt + D \text{sen}(\omega t) + E \cos(\omega t) \quad (2.2b)$$

$$T_t^m = \beta_0 + \beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \beta_3 t_3 \quad (2.2c)$$

Donde los coeficientes del modelo se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$A = \beta_0 \quad (2.3)$$

$$B = \beta_1 \quad (2.4)$$

$$C = \frac{\beta_2}{\cos \varphi} \quad (2.5)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\beta_3}{\beta_2} \quad (2.6)$$

### 2.2.2 Modelo estocástico de la temperatura

Según Alatón *et al.* (2002), el modelo estocástico que describe el comportamiento de la temperatura debe asegurar la propiedad de reversión a la media que caracteriza la dinámica de este tipo de variables. De esta forma, la dinámica de los cambios en la temperatura sigue un proceso estocástico del tipo Ornstein-Uhlenbeck, el cual se caracteriza por incorporar la reversión a la media, a partir de la expresión 2.7

$$dT_t = \left[ \frac{dT_t^m}{dt} + \alpha(T_t^m - T_t) \right] dt + \sigma_t dW_t \quad (2.7)$$

Donde,  $\alpha$  es la velocidad a la cual la temperatura revierte a su valor medio,  $\sigma$  la volatilidad del proceso y  $dW_t$  es un proceso de Wiener estándar. Por su parte,  $\frac{dT_t^m}{dt}$  viene dado por

$$\frac{dT_t^m}{dt} = B + \omega C \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.8)$$

Además,

$$T_t^m = A + Bt + C \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.9)$$

La ecuación 2.9 describe la estacionalidad de la temperatura o la variación promedio estacional.

### 2.2.3 Estimación de la volatilidad del proceso estocástico ( $\sigma_T$ )

Según Alatón *et al.* (2002), la volatilidad de la temperatura se puede estimar como la raíz de la variación cuadrática entre cada mes, como se define a continuación:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} (T_{j+1} - T_j)^2} \quad (2.10)$$

$\alpha_T$  representa la volatilidad de un mes específico  $j$ , calculado a partir de la información disponible de  $n$  días en el respectivo mes. Esto indica qué volatilidad de la temperatura para cada mes es diferente.

$$\sigma_T \begin{cases} \sigma_1, & \text{durante enero} \\ \sigma_2, & \text{durante febrero} \\ \dots & \\ \sigma_{12}, & \text{durante diciembre} \end{cases}$$

Sin embargo, aunque Alatón *et al.* (2002) indican que la volatilidad de la temperatura varía a lo largo de los diferentes meses del año, esta es casi constante dentro de cada mes. Por tanto, ellos incorporan el supuesto de que  $\alpha_T$  es una función constante por partes, es decir, presenta un valor constante durante cada mes.

### 2.2.4 Estimación parámetro reversión a la media del proceso estocástico ( $\alpha$ )

Siguiendo a Téllez *et al.* (2014) se estima el parámetro de reversión a la media del proceso estocástico (ecuación 2.7) haciendo uso del método de funciones martingala. De esta manera, se identificaron observaciones de la variable temperatura sobre  $n$  días siguiendo la expresión planteada por Alatón *et al.* (2002)

$$\alpha = -\log \left( \frac{\sum_{i=1}^n Y_{j-1} \{T_t - T_t^m\}}{\sum_{i=1}^n Y_{j-1} \{T_{t-1} - T_{t-1}^m\}} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

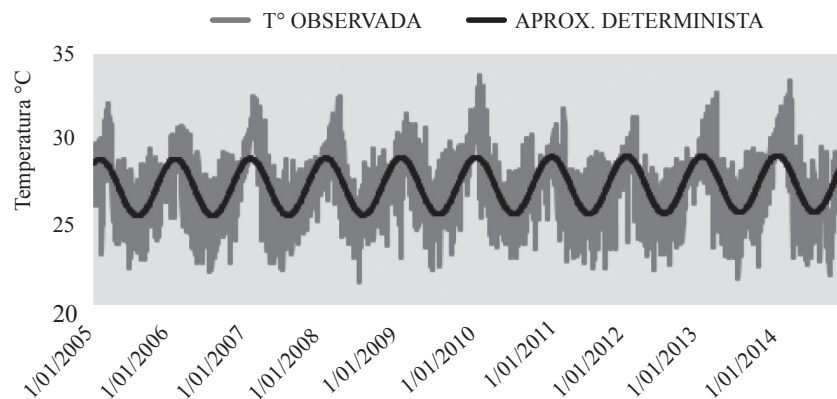
$$Y_{j-1} = \frac{T_{t-1}^m - T_{t-1}}{\sigma_{j-1}^2}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.12)$$

### 2.3 Modelación de la temperatura a través de un proceso estocástico Ornstein-Uhlenbeck

Los datos empleados en el modelo corresponden a observaciones diarias de la temperatura media del municipio de Yopal, durante los años 2005-2014 considerando un total de 3.650 observaciones, las cuales fueron registradas por la estación meteorológica 35215010 ubicada en el aeropuerto de Yopal y, cuyos faltantes fueron estimados a través del método inverso a la distancia<sup>6</sup>.

La figura 1 muestra la aproximación determinista de la temperatura promedio diaria para los años de estudio, demostrando el patrón cíclico propio de una serie climática, donde se resalta el comportamiento *sinusoidal* del subyacente que oscila entre 25 y 29 °C.

Figura 1. Aproximación determinista de la temperatura, periodo 2005-2014



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se observan los resultados del modelo determinista de temperatura graficado en la figura 1, los cuales fueron estimados a partir del método de mínimos cuadrados ordinarios, siguiendo la expresión 2.2c.

<sup>6</sup> El objetivo del método es asignar un valor a un punto mediante la combinación lineal de los valores de las muestras próximas. Así, se le asigna el mayor peso a las muestras cercanas y un menor peso a las muestras lejanas, ponderando siempre mediante la regla  $1/d^2$ .

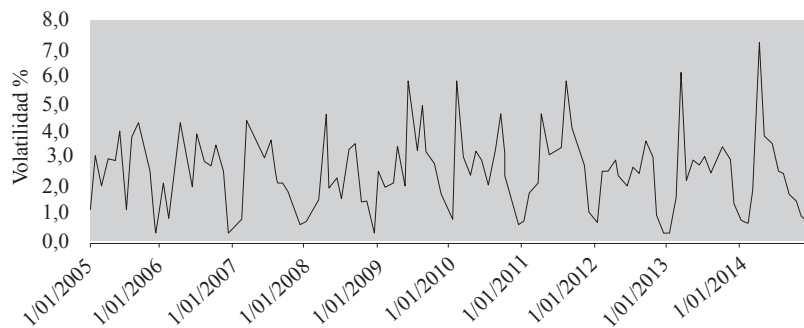
Tabla 2. Estimación de los parámetros del modelo determinista de temperatura

Parámetro	Ecuación	Estimación
$A$	$A = \beta_0$	27,07820371
$B$	$B = \beta_1$	0,00006561
$C$	$C = \frac{\beta_2}{\cos \varphi}$	1,62922826
$\varphi$	$\varphi = \tan^{-1} \frac{\beta_3}{\beta_2}$	1,01724356

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al componente estocástico que caracteriza esta serie climática, la figura 2 permite analizar el comportamiento de la volatilidad mensual para la serie de temperaturas medias diarias, donde es posible evidenciar el comportamiento cíclico de esta variable que revierte a un valor medio en el largo plazo, y es modelada a partir de la ecuación 2.10.

Figura 2. Volatilidad mensual de la temperatura, periodo 2005-2014



Fuente: elaboración propia.

Basado en la metodología de Alatón *et al.* (2002), se obtienen los siguientes parámetros (ver tabla 3) que hacen posible la modelación estocástica de la temperatura.

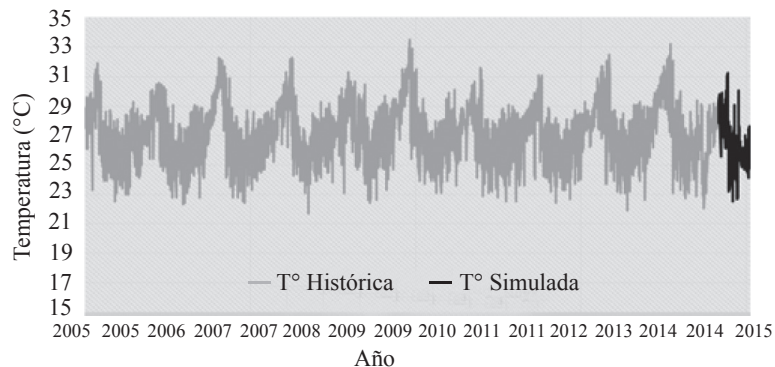
Tabla 3. Estimación de parámetros del proceso estocástico ou

Parámetro	Coficiente	Definición
$\alpha$	0,2596	Parámetro de reversión a la media
$\sigma_T$	0,2457	Volatilidad del proceso estocástico

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la figura 3 presenta el comportamiento histórico de la temperatura y su correspondiente simulación para el primer semestre del año 2015, bajo un proceso estocástico Ornstein-Uhlenbeck usando la técnica de simulación de Monte Carlo<sup>7</sup>.

Figura 3. Comportamiento histórico de la temperatura y simulación



Fuente: elaboración propia.

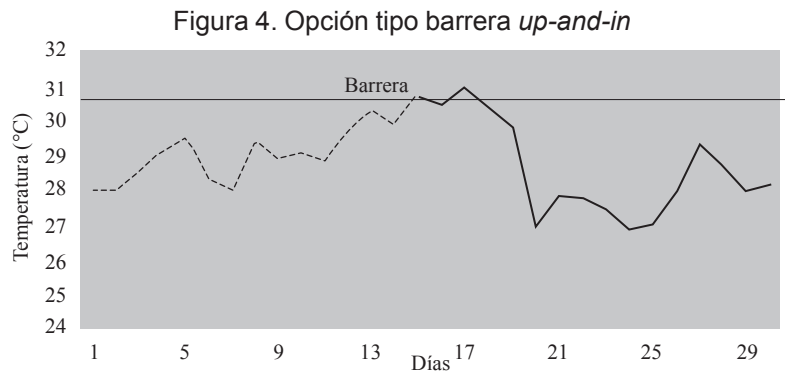
## 2.4 Valoración de la opción climática

En la valoración de la opción climática, se propone una opción barrera *up-and-in*, implementando la técnica de simulación MC, en la medida que involucra el umbral

<sup>7</sup> La simulación de MC es ampliamente utilizada en la valoración de opciones financieras al proporcionar soluciones aproximadas a las fórmulas cerradas del modelo Black-Scholes (Vázquez, 2011).

crítico de temperatura bajo la cual la morfología de la planta empieza a sufrir importantes daños, al igual que el grano de arroz<sup>8</sup>. Este procedimiento de valoración tiene como objetivo crear una muestra artificial de temperaturas, mediante la generación de números aleatorios.

La opción barrera *up-and-in* es un tipo de opción dependiente de trayectoria, cuya principal característica es que la activación de la opción ocurre cuando el subyacente, en este caso la temperatura, alcanza un valor determinado, denominado nivel barrera. Lo anterior indica que si la temperatura alcanza el nivel barrera establecido cuando sube (*up*), la opción se activa (*in*) y, por tanto, puede ser ejercida. La figura 4 muestra un ejemplo simulado de este comportamiento.



Fuente: elaboración propia.

La técnica de simulación MC permite estimar el valor esperado de la prima de la opción climática, mediante la generación de  $n$  trayectorias del proceso estocástico de la temperatura, representado en la ecuación 2.7. De esta forma, se obtiene una aproximación del valor esperado, a partir de la media aritmética de las primas estimadas en cada trayectoria, como se indica en la ecuación 2.13.

$$A(\text{Prima}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Prima}_i) \quad (2.13)$$

<sup>8</sup> Además, como se demostró en la sección 2.1, el rendimiento del cultivo de arroz (producción) depende en gran medida del comportamiento de la temperatura.

De igual forma, para la valoración de la opción se toma la siguiente función de pagos (*pay-off*) tomando la estructura para una opción barrera *up-and-in*:

$$\begin{aligned} \text{pay-off} &= \Omega * \text{Max}(0; T_m - K) \\ &\text{si } T_m \geq B \end{aligned} \quad (2.14)$$

Donde,  $T_m$  representa el *subyacente* de la opción, es decir a la temperatura;  $K$  es el *strike* o precio de ejercicio de la opción y se define a partir del promedio histórico de la temperatura;  $B$  es el nivel barrera establecido, en su definición se toma un punto crítico en el nivel de temperatura acordado por las partes. Para efectos de este ejercicio se establece como nivel crítico 32 °C, nivel en el cual la planta presenta daños es su morfología y productividad. Además, en la valoración se toma como referencia una tasa  $rf$  (tasa libre de riesgo) a partir de la estructura a plazo de las tasas de interés de los TES de clase B<sup>9</sup> disponibles en el mercado colombiano para la fecha de valoración (5,7 % anual).

Finalmente, se establece un *tick* ( $\Omega$ ) o valor nominal, el cual hace referencia a la cantidad de dinero que el tenedor de la opción recibe por cada grado centígrado en que la temperatura se encuentre por arriba del *strike* ( $K$ ) durante el tiempo de vigencia de la opción. Para la estimación de este parámetro se realizó un análisis de la variación de los rendimientos semestrales de arroz en el municipio de Yopal, frente a la temperatura promedio en el cierre de cada cosecha para el periodo en estudio, lo que permitió identificar una relación inversa entre estas dos variables cuyo comportamiento puede ser explicado por las altas temperaturas que generan efectos negativos en el ciclo productivo del grano de arroz.

Tomando esta información como referencia, se identificaron las tasas de variación de los rendimientos (Tn/h)<sup>10</sup> y temperaturas, así como la temperatura máxima y mínima, con el propósito de estimar los cambios en el rendimiento del cultivo como consecuencia de aumentos en la temperatura durante el semestre (tabla 4).

<sup>9</sup> Cabe anotar que la tasa de referencia libre de riesgo ( $rf$ ) corresponde a la del instrumento a un año dentro de la curva, ya que es el vencimiento más cercano en comparación al vencimiento de la cosecha.

<sup>10</sup> Toneladas por hectárea.



Tabla 4. Variación del rendimiento del arroz por °C adicional

	T° sem	Rend Tn/h
T° min	21,7	6,1
T° max	33,5	5,2
VARIACIÓN NETA		
	T° sem	Rend Tn/h
	11,8	0,9
	1	0,076

Fuente: elaboración propia.

De esta forma, se encuentra que la producción de arroz se reduciría aproximadamente en 0,55 Tn/h por cada °C que aumente la temperatura, el cual a precios de 2015 publicados por Fedearroz (2015) adquiere un valor monetario aproximado de \$ 415.737,26 COP / °C<sup>11</sup>.

Los parámetros iniciales del modelo de valoración se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de valoración opción

A(T <sub>0</sub> )	32,5
K	27,2
B	32,0
r=	5,7%
T=	0,5
Ω	\$415,737,26

Fuente: elaboración propia.

<sup>11</sup> Cabe señalar que estos resultados son coherentes con el informe titulado *El cambio climático y la producción agrícola*, emitido por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2012), donde se evidencia que como consecuencia del cambio climático “el rendimiento del grano de arroz disminuye un 10 por ciento por cada incremento de 1 °C” (p. 2).

Finalmente, utilizando la simulación de Montecarlo se generan 100.000 trayectorias (iteraciones) de la temperatura y se encuentra que el valor de la prima de la opción correspondería a \$102.800. Cabe señalar que en la definición de la prima se debe tener en cuenta el rendimiento esperado promedio por hectárea (Tn/h) que para el periodo de referencia y ubicación corresponde a 6 Tn/h. De esta forma, un agricultor debería adquirir un total de 6 contratos de este tipo, lo cual le representaría un costo de \$616.800.

### 3. Conclusiones

Ante la actual problemática ambiental, que afecta el rendimiento y la calidad de los cultivos, la seguridad alimentaria y que tiene fuertes implicaciones de carácter económico y social para los agricultores de la zona de los Llanos Orientales, es posible constatar que los derivados climáticos resultan ser una estrategia de cobertura innovadora que permite hacer frente a un riesgo financiero inherente al cambio climático, mitigar las pérdidas financieras y generar oportunidades de crecimiento para el sector arrocerero colombiano. Paralelamente, estos instrumentos involucran importantes ventajas en la medida en que ofrecen una eficiente cobertura y garantizan un mercado más transparente al corregir el problema de riesgo moral propio de los seguros agrícolas tradicionales.

No obstante, estos instrumentos de cobertura presentan algunas limitaciones que obedecen principalmente al riesgo base, el riesgo por localización y los métodos de valoración. De ahí que el éxito en la puesta en marcha de estos mecanismos requiera que la variable climática sea medible; exista una relación clara y satisfactoria entre el factor clima y la producción; y que la actividad agrícola se desarrolle a una distancia óptima de la estación meteorológica que registra los datos de la variable climática correspondiente. De igual forma, la valoración de una opción climática requiere como etapa previa la construcción de un modelo que describa el comportamiento futuro de la temperatura, en la medida en que el riesgo inherente en estos instrumentos de cobertura depende de la incertidumbre propia del comportamiento del subyacente.

Así, se presenta la modelación de la temperatura bajo un proceso estocástico con reversión a la media, donde el ruido del modelo se aproxima a partir de proceso estocástico de reversión a la media al suponer que la serie climática sigue una distribución normal. Los resultados permiten evidenciar la capacidad de predicción del modelo, el cual se ajusta bastante bien a los datos de

temperatura media del municipio de Yopal y logra que la temperatura modelada para el semestre siguiente siga el mismo patrón que caracteriza el comportamiento de la serie histórica. Además, es posible evidenciar que tanto la temperatura media como la volatilidad mensual revierten a un valor medio en el largo plazo cumpliéndose así las propiedades que caracterizan la dinámica de esta variable.

Por otro lado, la valoración de una opción climática constituye un claro ejemplo de un mercado incompleto, donde modelos de valoración por replicación como el propuesto por Black-Scholes no podrían ser desarrollados. Lo anterior obedece principalmente a la naturaleza exótica de este tipo de instrumentos, donde el activo subyacente no continúa un camino de tipo aleatorio sin reversión a la media y tampoco constituye un producto financiero negociable en el mercado de valores. De esta forma, es posible determinar que la simulación MC representa un buen método de valoración, en la medida en que permite simular el subyacente, generar un vector de pagos y calcular el valor esperado o estimador Montecarlo, otorgando mejores resultados en el proceso de valoración.

Finalmente, los derivados climáticos podrían presentar un alto crecimiento en los próximos años debido a los bruscos cambios en los patrones climáticos, que día a día afectan en mayor proporción a las economías globales. No obstante, la implementación de estos mecanismos representa un gran desafío para los países que hoy por hoy han decidido emprender este proceso, principalmente porque la puesta en marcha de estos instrumentos financieros requiere de un mercado de derivados desarrollado a gran escala, al igual que la modernización del servicio meteorológico nacional que junto con la instalación de infraestructura moderna, garantice una mayor cobertura sobre la medición de las principales variables climáticas y permita tanto una mejora en las técnicas de simulación y pronóstico, como en el acceso confiable y oportuno a la información climática.

## 4. Recomendaciones

Para el desarrollo de futuras investigaciones se recomienda que la modelación del subyacente (temperatura) se realice a través de un proceso de reversión a la media con volatilidad estocástica, bajo el cual se logra capturar la asimetría y la presencia de colas pesadas, los cuales son factores que caracterizan la dinámica de algunas series de temperatura.

## Referencias

- Alaton, P., Djehiche, B., y Stillberger, D. (2002). On modelling and pricing weather derivatives. *Applied mathematical finance*, 9(1), 1-20.
- Arango, J. (2013). Contratos financieros derivados del clima como estrategia de cobertura en Colombia. Aplicación a una central de generación hidroeléctrica. Medellín, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/36252/1/1017131504.2014.pdf>
- Asociación de Gestión del Riesgo Climático (2015). *Weather Risk Management Association (WRMA)*. Recuperado de <http://wrma.org/what-is-weather-risk-management/>
- Ayastuy, G. A. y Vallejo, B. (1997). *Análisis de la valoración de opciones asiáticas*. Universidad del País Vasco.
- Cao, M., Li, A. y Wei, J. (2003). *Weather Derivatives: A new class of financial instruments*. S.D.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (2013). *Agricultura colombiana: adaptación al cambio climático*. Recuperado de [http://dapa.ciat.cgiar.org/wpcontent/uploads/2014/08/politica\\_sintesis1\\_colombia\\_cambio\\_climatico.pdf](http://dapa.ciat.cgiar.org/wpcontent/uploads/2014/08/politica_sintesis1_colombia_cambio_climatico.pdf)
- CME Group (2009). Weather products. Managing global weather exposures. Growing opportunities. Reducing risks. Recuperado de <https://www.celsiuspro.com/Portals/0/Downloads/CMEWeatherProductsBrochure.pdf>
- Cruz, J. y Llinas, A. (2010). Modelo analítico de derivados de clima para eventos específicos de riesgo en la agricultura en Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 7, 123-149. Recuperado de <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/desarrolloRural/article/view/1179>
- Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ) (2010). Fondo Nacional de Arroz. *Compendio de resultados de investigación 2005-2007*.
- Finas, B. (2012). The transfer of weather risk faced with the challenges of the future. *SCOR Global P&C, Technical Newsletter*. Recuperado de [http://www.scor.com/images/stories/pdf/library/newsletter/pc\\_nl\\_cata\\_naturelles\\_en.pdf](http://www.scor.com/images/stories/pdf/library/newsletter/pc_nl_cata_naturelles_en.pdf)

- Jiménez, D. (2014). El cambio climático hace estragos en el agro colombiano. *La República*. Recuperado de [http://www.larepublica.co/economia/el-cambio-clim%C3%A1tico-hace-estragos-en-el-agro-colombiano\\_113151](http://www.larepublica.co/economia/el-cambio-clim%C3%A1tico-hace-estragos-en-el-agro-colombiano_113151)
- Mejía, C. (2014). ¿Por qué El Niño aumenta la producción de café de Colombia? Federación Nacional de Cafeteros, *Editorial*, edición No. 14. Recuperado de <http://bit.ly/1hEJ3sv>
- Ortiz, R. (2012). *El cambio climático y la producción agrícola*. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Stoppa, A. y Hess, U. (2003). *Design and use of weather derivatives in agricultural policies: The case of rainfall index insurance in Morocco*. Recuperado de <https://agriskmanagementforum.org/sites/agriskmanagementforum.org/files/Documents/Design%20and%20Use%20of%20Weather%20Derivatives%20Morocco.pdf>
- Téllez, J., Serrano, M. y Rico, J. (2014). Modelación del clima bajo un proceso estocástico de reversión a la media estacional. *Estocástica: finanzas y riesgo*, 4, 9-32.
- Vázquez, A. A. (2011). *Opciones climáticas para el sector pesquero del pacífico mexicano*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Weather Risk Management Association (s.f.). *Weather risk by application*. Recuperado de <http://wrma.kihostingvps7.com/weather-risk-by-application/agriculture/>