

41 Jornadas Nacionales de Administración Financiera
Septiembre 30 y Octubre 1, 2021

Derivados climáticos contra sequía en Argentina: Comparación de estrategias de cobertura

Gabriela Pesce

Matías Gzain

Luca Panizzi

Gastón Milanese

Valentina Gregorio

Universidad Nacional del Sur

SUMARIO

1. Introducción
2. Marco de antecedentes
3. Metodología
4. Resultados y discusión
5. Conclusiones

Para comentarios:
gabriela.pesce@uns.edu.ar

Resumen

Los eventos climáticos extremos y sistémicos, como las sequías, generan un gran impacto en la economía y esto podría agravarse como consecuencia del cambio climático. En países como Argentina, donde la actividad agropecuaria representa un alto porcentaje del PBI así como en la generación de divisas, los shocks negativos en los rindes de los cultivos producto de la exposición al riesgo climático pueden provocar crisis macroeconómicas. Si bien existen diversos seguros patrimoniales tradicionales para riesgos climáticos orientados al sector agropecuario, la cobertura sobre sequía no es la más habitual. En los últimos años, también se desarrollaron contratos derivados menos tradicionales sobre la base de una opción exótica tipo asiática para la cobertura del riesgo de sequía e inundación, que se ofrecen en el mercado a término OTC y actualmente como un seguro paramétrico. En este contexto, el objetivo del trabajo es comparar los resultados que obtendría un productor agropecuario que no tome cobertura contra el riesgo de sequía para el cultivo de soja versus diferentes estrategias de cobertura con derivados climáticos, simulando escenarios diferenciales de precipitaciones a partir de datos históricos de un estudio de caso real. Se propone abordar el objetivo bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo, a partir de fuentes primarias y secundarias. Los principales resultados permiten afirmar que existen grados de sequía con diferentes zonas de conveniencia para cada tipo de estrategia de cobertura. En particular, los seguros paramétricos sobre la base de una opción asiática son más eficientes para sequías moderadas, mientras que el seguro tradicional o no paramétrico permitiría una cobertura más abarcativa en casos de extrema sequía, siempre que no se supere el límite indemnizatorio.

1. Introducción

Los riesgos climáticos son fenómenos caracterizados por la aleatoriedad y dificultad de previsión con cierto horizonte temporal no inmediato a nivel mundial. Algunos de ellos tienen un efecto localizado (como la caída de granizo, fuertes vientos o huracanes) mientras que para otros los impactos son sistémicos (como las sequías o las inundaciones). Si bien algunas tecnologías pueden morigerar los efectos del clima, para algunas actividades la exposición a este riesgo deviene en una cuestión inevitable con sus consecuentes efectos sobre múltiples variables económicas, entre ellas el ingreso de las empresas, predominantemente vinculadas al sector primario, por el rendimiento de la producción agropecuaria extensiva.

En Argentina, el sector agropecuario presenta una gran importancia en la matriz económico productiva. De acuerdo a datos del 2018 de la Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina (FADA), las cadenas agroalimentarias generan el 9,92% del PBI argentino y el 34% si se considera el PBI de bienes. Además, el 22% del empleo privado nacional y el 10,6% de la recaudación tributaria de AFIP (Pisani & Miazzi, 2019). Durante el año 2018, el 60% de las exportaciones del país fueron producto del sector agropecuario y agroindustrial, con una suma exportada de US\$ 36.755 millones del total de US\$ 61.559 millones en concep-

to de exportaciones (Calzada & Treboux, 2019). En relación a esto, de acuerdo a este mismo informe de la Bolsa de Comercio de Rosario, durante 2018 el sector generó 28.800 millones de dólares netos, siendo el sector con mayor aporte en la generación de divisas netas de la economía.

Dada la importancia relativa de la actividad agropecuaria en la economía argentina, las variaciones climáticas se convierten en un fenómeno de impacto significativo, no solo por su incidencia directa sobre los rindes en la producción primaria sino también por sus consecuencias en el crecimiento y la estabilidad macroeconómica de nuestro país. Es por ello que la aparición de herramientas que brinden cobertura frente a la variabilidad climática sistémica se convierte en una gran oportunidad para el entramado productivo nacional.

Los derivados climáticos son herramientas de cobertura de estos riesgos en donde la variable de la cual depende el valor del contrato está asociada a los fenómenos meteorológicos o índices climático (Vázquez & García Fronti en Casparri & García Fronti, 2010). Entre ellos, se distinguen seguros tradicionales (no paramétricos) en donde se audita el efecto del daño para estimar la compensación, y opciones exóticas que funcionan como contratos paramétricos. Estos últimos instrumentos otorgan pagos contingentes en función de la evolución de una variable climática o meteorológica subyacente, o alguna correlacionada con los efectos del clima. Son contratos celebrados para una región determinada, que tienen vigencia durante un período contractual establecido. Los contratos derivados del clima relacionan un evento específico y pueden ser emitidos según variables definidas, tomando simples o múltiples eventos climáticos.

La existencia de derivados climáticos es condición necesaria pero no suficiente para el uso de estos instrumentos como medio de cobertura de este riesgo ineludible: también es necesario comprender su funcionamiento, evaluar sus costos y la eficiencia de su cobertura en términos de la correlación con el riesgo a cubrir. Considerando que en otros países el desarrollo de derivados climáticos es más amplio (Hoyt & McCullough, 1999; Casparri & García Fronti, 2010; CME, 2021), cabe preguntarse por qué aún no sucede esto en Argentina, sobre todo para fenómenos sistémicos como la sequía y las inundaciones.

En este contexto, el objetivo del trabajo es comparar los resultados que obtendría un productor agropecuario que no tome cobertura contra el riesgo de sequía para el cultivo de soja versus diferentes estrategias de cobertura con derivados climáticos, simulando escenarios diferenciales de precipitaciones a partir de datos históricos de un estudio de caso real. En particular, se establecen los siguientes objetivos específicos: (a) Identificar y caracterizar el funcionamiento de algunos derivados climáticos para la cobertura de sequía disponibles en Argentina, entre ellos seguros paramétricos u opciones climáticas, y seguros tradicionales. (b) Evaluar los costos y grados de eficiencia de la cobertura ante diferentes escenarios de evolución climática para un fenómeno sistémico como la sequía.

El trabajo se estructura presentando en la sección 2 el marco de antecedentes, dedicado al riesgo climático (2.1) y a los instrumentos de cobertura, tanto tradicionales como exóticos para este tipo de riesgo (2.2). En el apartado 3 se detalla la metodología del trabajo, su diseño, fuente de datos y descripción de los contratos utilizados. Luego, la sección 4 presenta los resultados y su discusión considerando que el productor no realice cobertura alguna para el riesgo climático (4.1), que realice cobertura con un seguro tradicional (4.2) y que utilice opciones exóticas (4.3). Este apartado cierra con una comparación de las estrategias. Finalmente,

en el apartado 5 se exhiben las conclusiones, las limitaciones del trabajo y futuras líneas de investigación.

2. Marco de antecedentes

2.1 Riesgo climático

Tal como lo plantea el informe de impactos de las crisis climáticas en la pobreza y en la macroeconomía del Banco Mundial (Rozenberg, Dborckin, Jooste, et al., 2021), los eventos extremos como inundaciones y sequías generan un gran impacto en la economía argentina y podrían serlo mucho más en el futuro, producto de mayores y más frecuentes reducciones en los rendimientos agrícolas, como consecuencia de las sequías generadas por el cambio climático. De acuerdo al mismo informe, si no hubiera adaptación, podría haber una caída de hasta el 5% del PBI en los próximos 30 años.

Rozenberg *et al* (2021), en el mencionado informe, también indican que en años recientes se han producido sequías con graves consecuencias en nuestro país, como en la campaña 2017/2018, donde la producción conjunta de 5 provincias (Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos y Santiago del Estero) evidenció una caída del 18% y su Producto Bruto Provincial consolidado cayó en torno al 1,4%. Más de la mitad de la actividad económica de 2018 (con una caída del 2,5%) se explicó por la grave sequía. Situaciones similares se observaron en las campañas 2008/2009, representando más del 40% de la caída del PBI de 2009, y en 2012 donde representó el 80% de la recesión.

La Argentina conforma el grupo de los tres países con mayor producción mundial de soja, junto a Brasil y Estados Unidos. Asimismo, en la Argentina se observa una mayor exposición al riesgo climático, liderando la variabilidad en los rendimientos de la producción de soja producto de las oscilaciones climáticas, presentando variaciones entre el 43% y 47% en los niveles de producción como consecuencia del clima.

En la información suplementaria del informe de Rozenberg y colab. (2021) se presentan estimaciones del coeficiente de determinación de cultivos por país. En particular para la soja a nivel mundial el 67% de la variabilidad en el rinde se explica por la evolución del clima, mientras que en Argentina este porcentaje se eleva a 79%.

A pesar de las tecnologías que buscan morigerar el riesgo climático, para algunas actividades, como las vinculadas a la agricultura extensiva, esta exposición a la incertidumbre puede provocar daños económicos de elevada magnitud si no se siguen estrategias de cobertura para este riesgo.

2.2 Instrumentos de cobertura para el riesgo climático

Dada la variabilidad y la exposición particular al riesgo climático que sufre nuestro país, los avances tecnológicos y las herramientas de administración del riesgo climático proveen una potencial cobertura contra dichas pérdidas para el productor agropecuario y otros actores de esta cadena de valor. La utilización de derivados climáticos podría poner un piso a las pérdidas en el PBI, producto de fenómenos como las sequías y las inundaciones. Para profundi-

zar en este aspecto, a continuación se analizan dos tipos de contratos: los seguros climáticos tradicionales o no paramétricos y las opciones climáticas o seguros paramétricos.

1) Derivados tradicionales

Un instrumento financiero derivado es un contrato a plazo cuyo valor depende exclusivamente del valor de un activo financiero o real conocido como subyacente. En un contrato de derivados financieros la duración y el valor futuro o precio de ejercicio se encuentra estipulado en el contrato. El valor intrínseco de la prima o el beneficio diferencial es una función directa de la evolución estocástica temporal del subyacente. Los beneficios esperados del contrato son asimilables a resultados de juegos suma cero, con resultados contrapuestos (pérdidas-ganancias).

El género derivados financieros se compone de tres clásicas especies como los futuros, las opciones y los pases (Hull, 2012).¹

- Futuros: contratos estandarizados en monto, plazos, cantidades y calidades entre otras variables para comprar o vender un activo subyacente, a una fecha determinada a precios regulados por un mercado determinado.
- Opciones: contratos estandarizados en los cuales el comprador (tomador), mediante el pago de una prima adquiere el derecho, pero no la obligación de comprar (*call*) o vender (*put*) un activo subyacente (S) a un precio previamente acordado (precio de ejercicio o X) en una fecha futura establecida. El vendedor (lanzador) se obliga a vender o comprar, según corresponda, el activo subyacente al precio convenido.
- Pases (*swaps*): contratos en los cuales se pacta de manera concomitante la venta o compra al contado de un activo subyacente y la obligación de recompra o reventa a plazo determinado.

Los contratos indicados precedentemente se estructuran de manera institucionalizada, regulados y estandarizados, asegurando su cumplimiento y por ende evitando riesgos de *default*. También pueden estructurarse de manera *over de counter* (OTC), operaciones por fuera del marco institucional del mercado de capitales, donde el derivado se desarrolla a medida de las partes involucradas. El caso típico está dado por los *forwards*, contratos a futuro cuya estructura de pagos y riesgo se ajusta a las características idiosincráticas de la transacción a plazo. La flexibilidad contenida en los contratos OTC cede frente a los potenciales riesgos de incumplimiento asociados a la transacción, ya que no existe un mercado institucionalizado garantizando la operación.

Una de las principales funciones de los derivados financieros y en particular de las opciones financieras constituye en ser un instrumento de cobertura, dando origen al *hedging*. Este consiste en gestionar riesgo realizando transacciones financieras con derivados a los efectos de lograr coberturas frente a incertidumbres a las cuales se encuentra expuesta la firma. Básicamente

¹ El lector interesado en familiarizarse con la estructura de los contratos derivados, su operatoria y modelos de valuación puede consultar, entre otros, Higham (2004), Jarrow & Chatterjea (2018) y Boyle & McDougall (2019).

camente, lograr cobertura de riesgos con controlables como el riesgo de precios, tanto de ingresos como costos.

Para que la cobertura sea efectiva el valor del subyacente del contrato de derivado debe correlacionarse con la posición a cubrir. Cuanto mayor es esta correlación, más efectiva es la cobertura, diluyendo los riesgos de base. En tal sentido, para el tomador de un contrato de opciones, este brinda cobertura contra el riesgo de precio o abastecimiento de la posición a cubrir, a cambio del pago de una prima.

En esa línea de razonamiento, un contrato de seguro y una opción financiera presentan similitudes, pues su valor depende de un activo subyacente. En el caso del seguro, la prima es el resultado de calcular el valor actual de una serie de pagos futuros ajustados por una probabilidad de ocurrencia del siniestro a cubrir. El valor de la opción surge por diferencia entre el valor actual de una corriente futura de ingresos asociada al activo subyacente y el precio de ejercicio, siendo este el valor pactado de la contingencia a cubrir. Por la ley del precio único (Wilmott, 2009) la combinación de los flujos de fondos asociados a la combinación entre activo subyacente y precio de ejercicio genera una cartera réplica. Este valor representa el precio de la opción, o de la cobertura flexible contra el riesgo objetivo.

Lo expuesto precedentemente configura la principal diferencia entre ambos instrumentos, el valor de la opción surge de una cartera réplica o de cobertura (derivado), el valor del seguro representa el valor actual de pagos futuros ajustados por la probabilidad de ocurrencia del siniestro (evento). La combinación entre la lógica de opciones de cartera réplica, su flexibilidad y la siniestralidad contenida en las rentas matemáticas de los contratos de seguro genera una nueva especie de derivado. Estos son las opciones exóticas sobre riesgos climáticos o genéricamente derivados climáticos a ser desarrollado en la próxima sección.

2) Opciones exóticas

Las opciones exóticas son un tipo de instrumento derivado que presenta modificaciones en la estructura de resultados y, por lo tanto, en la matriz de pagos, producto de cambios sobre las reglas del contrato respecto a los derivados tradicionales (Hull, 2002; Kolb, 2003; Fernández & Ariño, 1996, García-Machado *et al.*, 2000, Pesce *et al.*, 2021). Estas características les otorgan mayor flexibilidad a dichos contratos, tornándolos atractivos y permitiéndoles adaptarse a situaciones diversas, pero su valuación se ha convertido en un problema complejo con amplio desarrollo analítico.

Dentro de la familia de opciones exóticas dependientes de la evolución del precio del activo subyacente (S) se encuentran las *opciones asiáticas*, que son aquellas cuyos pagos dependen del precio medio del subyacente, tanto en el rol del subyacente propiamente dicho, como en el rol del precio de ejercicio. A partir de esta cuestión se distinguen:

- 1) opciones asiáticas puras, en las que el valor del subyacente se sustituye por el valor medio del subyacente durante la vida del contrato (o una parte de ella)
- 2) opciones pseudo asiáticas, en las que el precio de ejercicio se sustituye por el valor medio del subyacente
- 3) opciones asiáticas geométricas, en donde se trabaja con medias geométricas para sustituir S o X (Pesce *et al.*, 2021).

Este tipo de opciones reduce la posibilidad de manipular los precios de los activos subyacentes para obtener mayores pagos al momento del ejercicio de la opción. Como un valor medio es menos volátil que la serie de precios empleadas para calcularlo, el precio de una opción asiática es menor que el de las opciones estándar. La referencia del valor del subyacente se toma de fuentes de reconocido prestigio acordadas por las partes contratantes, en intervalos de tiempo regulares.

En las opciones climáticas, la variable subyacente de la que depende el valor del contrato es un índice climático (Vázquez & García Fronti en Casparri & García Fronti, 2010) que monitorea la evolución de una variable meteorológica mediante promedios. Incluso el precio de ejercicio también puede contener promedios sobre la evolución histórica de S. De este modo las opciones climáticas se constituyen como una tipología de opción asiática. Si el evento climático estimado sobrepasa o es menor a los promedios históricos establecidos en el contrato, el comprador de la opción o tomador del seguro podrá ejercer el derecho de reclamar el pago para cubrir el riesgo.

Actualmente para cubrir el riesgo climático existen diferentes contratos de futuros y opciones alrededor del mundo, e incluso, sobre diferentes eventos meteorológicos, como la sequía, las inundaciones, las heladas, el calor, la caída de granizo, los huracanes, la nieve, los vientos fuertes, los terremotos, los tifones y otros desastres naturales (Medina Granados, 2016; Sutton-Vermeulen, 2021; CME Group, 2009, 2014, 2021a, 2021b). A continuación, se describe de manera no exhaustiva alguna evidencia empírica al respecto.

Dentro de los derivados climáticos asociados a catástrofes, existieron opciones desarrolladas a partir de 1992 y lanzadas por el *Chicago Board of Trade* en el año 1995 (Hoyt & McCullough, 1999). Este es el primer antecedente de un instrumento financiero relacionado con desastres naturales en el mercado organizado. Sin embargo, dado que el tenedor debía demostrar que había sufrido una pérdida debido a alguno de los eventos catastróficos enumerados en el contrato, eran instrumentos muy similares a los seguros, más que al resto de derivados, a pesar de poseer índices como subyacentes. El instrumento salió del mercado media década después de su lanzamiento debido a que la demanda fue menor a la esperada (Pesce, 2012).

Los derivados climáticos en sí mismos comenzaron a utilizarse en el año 1996 en el mercado *over-the-counter*, principalmente por empresas de energía. Por el impacto de las condiciones climáticas en las actividades económicas, este instrumento siguió desarrollándose y llegó a estandarizarse en 1999 en el *Chicago Mercantile Exchange*. Los índices más difundidos en los mercados organizados son los siguientes: días con temperatura para calefacción (*heating degree days* o HDD), días con temperatura para refrigeración (*cooling degree days* o CDD), temperatura media acumulada (*cumulative average temperature*), días de helada (*frost days*), nieve precipitada (*snowfall*) y huracanes (Sutton-Vermeulen, 2021).

En relación a los futuros y opciones con la temperatura como activo subyacente (CME Group, 2021a), el HDD se relaciona con un índice de *calentamiento* que toma como base los 65 grados F, y toma valor en aquellos días de invierno en que es necesario usar la energía para calentar, es decir, cuando la temperatura promedio del día es menor al valor de referencia de 65. Analíticamente se comporta de la siguiente forma: $HDD = \text{Max}(0; 65^\circ \text{F} - \text{temperatura promedio diaria})$. Por ejemplo, si la temperatura promedio entre la máxima y mínima diaria es de 40 F, entonces el valor intrínseco del HDD correspondiente a ese día se calcula como: $\text{Max}(0; 65 \text{ F} - 40 \text{ F}) = 25 \text{ F}$. Si la temperatura diaria promedio excediera los 65 ° F, el HDD para ese día sería cero. Este tipo de contratos en los Estados Unidos se negocia considerando

9 regiones distintas. En Europa la particularidad radica en que se considera como temperatura base los 18 ° Celsius y que solo toman la referencia de dos ciudades (Ámsterdam y Londres).

Por el contrario, el CDD se vincula con un índice de *enfriamiento* que también considera como punto de referencia los 65 grados F, pero en este caso toma valor en aquellos días de verano en que es necesario usar energía para refrigerar, es decir, cuando el promedio diario de temperatura está por encima del valor de referencia. Analíticamente, el valor intrínseco en el mercado de Estados Unidos, se comporta de la siguiente forma: $CDD = \text{Max}(0; \text{temperatura promedio diaria} - 65 \text{ } ^\circ \text{F})$. En el caso de las ciudades europeas los futuros climáticos del CME toman como referencia otro índice para el verano (considerando como punto de referencia los 18 grados C), basado en las temperaturas acumuladas, el índice de temperatura media acumulada (CAT). Además, para incrementar la cobertura global, también existen contratos de futuros sobre índice de temperatura del CME en Asia (Tokyo), pero se utilizan para todos los meses del año.

Los derivados climáticos sobre *heladas* (*frost days*) toman un índice que considera los días en los que hubo helada durante un periodo de tiempo respetando límites de temperatura prefijados. Se considera que un día es de helada cuando se produce alguna de las siguientes condiciones: (a) la temperatura registrada a las 7:00 de la mañana es inferior a $-3,5^\circ\text{C}$ y la registrada a las 10:00 de la mañana es inferior a $-1,5^\circ\text{C}$. O bien (b) la temperatura registrada a las 7:00 y a las 10:00 de la mañana es inferior a $-0,5^\circ\text{C}$. Este índice tiene la particularidad de ser flexible en cuanto al periodo de cobertura y puede referirse tanto a un mes en particular, como al conjunto de los meses de invierno. En la Argentina, Cortina & Sánchez (2013), modelan un derivado climático sobre la base de una opción asiática para cubrir el riesgo de heladas tardías en la producción vitivinícola.

Desde hace más de una década existen contratos de futuros y opciones sobre *nevadas* (*snowfall*). Estos han permitido a empresas de energía, turismo e incluso gobiernos estatales o locales poder contar con una herramienta que les permita administrar de manera eficiente y flexible la exposición al riesgo de nevadas y también aprovechar la oportunidad de beneficiarse económicamente con la incertidumbre del clima. Este contrato considera como subyacente el índice de nieve, analizando aquellos días en que se producen precipitaciones en forma de nieve durante un rango de fechas determinada (CME Group, 2014). Se comercializan contratos de futuros y opciones de estilo europea de futuros sobre índice de snowfall los cuales pueden realizarse durante los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril (hemisferio norte). También se negocian contratos de derivados sobre índice de nieve de temporada que pueden celebrarse con un mínimo de dos y máximo de seis meses calendario consecutivos entre los meses de noviembre y abril. Los contratos de índice *snowfall* que ofrece el CME incluye las diferentes localizaciones².

En cuanto contratos para la cobertura contra *huracanes*, se desarrollaron en primera instancia derivados conocidos como Hurricane Risk Landfall Options (HuRLOs) (Casparri & García Fronti en Casparri & García Fronti, 2010). El instrumento se negoció por primera vez en el año 2008 en el Chicago Mercantile Exchange. En este caso el sistema que se utiliza es *pari-mutuel*, que implica que cualquier participante puede comprar HuRLOs sin tener que

² Entre ellas: Baltimore Washington International Airport, Boston Logan International Airport, Chicago O'Hare International Airport, Colorado Springs Municipal Airport, Detroit Metro Airport, Minneapolis/St. Paul Airport, New York Central Park, New York LaGuardia Airport, Newark Liberty International Airport, Port Columbus International Airport.

buscar otro participante en el mercado que quiera lanzar la opción. Estas primas se acumulan en un fondo mutual de riesgo que se reparte entre los titulares de los instrumentos en el primer lugar donde el evento acaezca; es decir, en la costa que recibe el primer huracán dentro de las comprendidas en la cobertura. Actualmente y considerando las pérdidas y hechos devastadores del pasado y el potencial de destrucción (tanto física como económica) de futuros huracanes, el CME Group (2009) ha desarrollado diversos derivados de huracanes basados en el Carvill Hurricane Index (CHI), para la cobertura de huracanes, temporada de huracanes y máximos estacionales de huracanes. El activo subyacente de estos contratos es el índice CHI, el cual expresa de forma numérica el potencial de daño del huracán a través del uso de datos que se encuentran disponibles públicamente en el Centro Nacional de Huracanes del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos. Este se mide tomando como referencia la velocidad máxima del viento y el tamaño de cada tormenta declarada oficialmente. Cuanto mayor sea el valor del índice, mayor potencial de daño del huracán considerado. Es un contrato muy utilizado en México.

También existen derivados climáticos sobre índices de *precipitaciones* acumuladas, que consideran las lluvias acumuladas durante un período de tiempo, que puede referirse a una semana, un mes o una temporada. Dentro de los usos de estos contratos está la cobertura para empresas hidrológicas (Hernández Arango & Carvajal-Serna, 2017). En relación a este riesgo, ya sea por defecto o exceso, en Argentina existen derivados sobre sequía e inundación. Los índices (*S4 index*) se construyen a partir de imágenes satelitales y algoritmos matemáticos que reflejan el impacto del clima sobre los cultivos (S4 Risk, 2020). En particular, los derivados sobre el índice para sequía funcionan como una opción de venta: cuanto mayor sea el valor del índice, mejor es para el cultivo (es decir, hay menos sequía). De esta manera, el pago se activa toda vez que la medición perfora el precio de ejercicio.³ Por otro lado, el índice para inundación, mide el porcentaje de área cubierta con agua en superficie sobre la capa agro, con lo cual cuanto mayor sea su valor, peor será para el cultivo (es decir, habrá mayor inundación). De este modo, las opciones que se armen usando como activo subyacente a este índice, serán opciones de tipo call (S4 Risk, 2019).

En la tabla 1 se muestra un resumen de los contratos de derivados climáticos antes mencionados, sistematizados de manera no exhaustiva.

3. Metodología

3.1 Diseño metodológico y función de producción

Esta investigación procura comparar los resultados que obtendría un productor agropecuario que cultiva soja de primera y no toma cobertura contra el riesgo de sequía versus diferentes coberturas con derivados climáticos, simulando escenarios diferenciales de precipitaciones. Se propone abordar el objetivo bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo. Para ello, se desarrolla un análisis de simulación de escenarios y sensibilidad de la producción agropecuaria a partir de diferentes niveles de precipitaciones para un establecimiento rural del

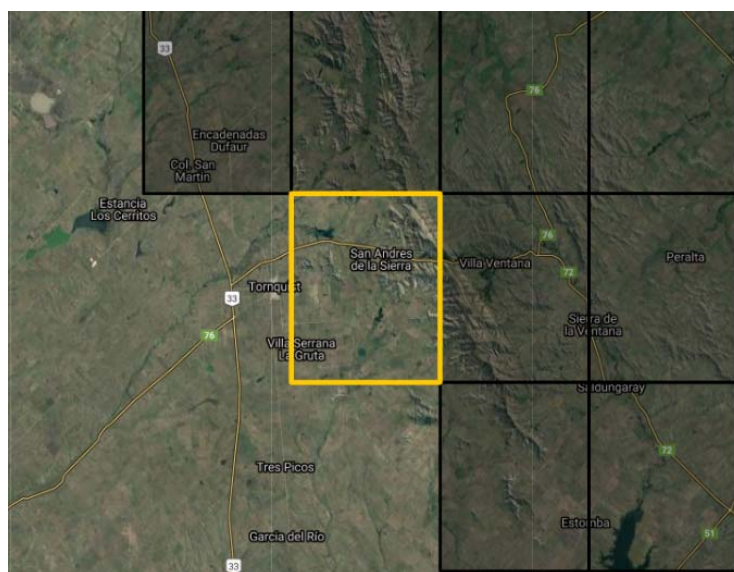
³ Se presenta descripción detallada de este contrato en la sección de metodología 3.2 por tratarse de uno de los utilizados para abordar el objetivo del trabajo.

Tabla 1. Algunos derivados climáticos en el mundo

Riesgo climático a cubrir	Índice subyacente / contrato	Algunos países de aplicación
Cambio de temperatura (calentamiento)	Futuros sobre índice HDD Opción Europea sobre Contrato de futuros del índice HDD	Estados Unidos, Reino Unido (Londres), Países Bajos (Ámsterdam), Japón (Tokio).
Cambio de temperatura (enfriamiento)	Futuros sobre índice CDD Opción Europea sobre Contrato de futuros del índice CDD Futuros sobre índice CAT	Estados Unidos Estados Unidos Reino Unido (Londres), Países Bajos (Ámsterdam), Japón (Tokio)
Sequía	Opción Asiática (PUT) sobre índice S4-Sequia	Argentina, Uruguay, Brasil
Inundación	Opción Asiática (CALL) sobre índice S4-Inundación	Argentina, Uruguay
Helada	Índice Frost Day	Estados Unidos
Nieve	Monthly Snowfall	Estados Unidos
Precipitaciones	Índice de precipitaciones acumuladas	Estados Unidos
Huracanes	HURLOs Índice CHI (Carvill Hurricane Index)	Estados Unidos Principalmente en México

partido de Tornquist de la Provincia de Buenos Aires (localizado en 38° 07 '06 "S - 62° 02' 17" O) (Ilustración 1).

Ilustración 1. Geolocalización de la zona de estudio



Fuente: extraída del sistema de simulación de riesgos S4risk

La información utilizada en este trabajo surge de fuentes primarias y secundarias. Entre las primeras se realizaron entrevistas semi-estructuradas a un referente de la organización S4 (Ing. Santiago Gvenzano) y a una productora especialista en seguros patrimoniales (Analía Fernández Blanco). También, se realizaron solicitudes de cotización de diferentes contratos de seguros agropecuarios a productores de diferentes empresas aseguradoras. Complementariamente se toma la información primaria técnica de estudios previos (Galantini *et al.*, 2007; Galantini *et al.*, 2018). Finalmente, se recurre a fuentes secundarias para precios de mercado, información del sistema S4 Risk, cálculo de correlaciones y tasas de mercado.

La elección del cultivo (soja de primera) se fundamenta en ser una alternativa para la cual existen diversos contratos de cobertura contra sequía y por la importancia relativa de su cadena de valor a nivel nacional dentro de la matriz agropecuaria. La elección de la zona se fundamenta en la disponibilidad de estudios previos que estiman la función de producción según se detalla a continuación.

Para el cálculo del rinde proyectado en cada escenario, el trabajo toma resultados de investigaciones previas (Galantini *et al.*, 2007, Durán *et al.*, 2012; Pesce *et al.*, 2017) en las que se estimó interdisciplinariamente la función de producción para un establecimiento agropecuario tomando datos reales de 442 observaciones correspondientes a 23 años de análisis (1986-2008) del Establecimiento “Hogar Funke” (Partido de Tornquist, Provincia de Buenos Aires, Argentina), sin extrapolación de datos de otras regiones agroecológicas similares. Dada la incidencia que tienen las precipitaciones en la productividad del sistema y su alta variabilidad en el sudoeste bonaerense, se realizó un análisis econométrico con una regresión fusionada de datos de panel desbalanceado con mínimos cuadrados ordinarios, en el que se explican los rendimientos de los cultivos en función de un índice de lluvias; los niveles de nitrógeno en el suelo; las heladas y el tipo de cultivo. El modelo propuesto para estimar el rendimiento de los cultivos se expone en la ecuación 1.

$$R_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Llc_t + \alpha_2 N_{it} + \alpha_3 H_t + \alpha_4 C(T_1)_{it} + \alpha_5 C(T_2)_{it} \quad Ec 1$$

R_{it} Rendimiento en quintales (qq.) por hectárea (ha.) en un momento de tiempo (t) para un lote (i) bajo un sistema de laboreo determinado.

Llc_t Índice de lluvias para un momento de tiempo (t) que pondera las precipitaciones reales y requeridas por mes para cada tipo de cultivo. En él, se compara mensualmente, a través de un cociente, la necesidad de agua para cada tipo de cultivo, respecto a las precipitaciones reales. Luego se suman los cocientes de cada mes del cultivo ponderados por un factor de importancia (ecuación 2).

$$Llc = \sum_{m=1}^n \frac{P_{m_real}}{P_{m_req}} I_m \quad Ec 2$$

Donde: P_{m_real} son los milímetros de precipitaciones reales para un período de tiempo mensual (m) en la zona bajo estudio. P_{m_req} son los milímetros de precipitaciones requeridos para cada tipo de cultivo en el mes (m). Para estimar este valor, se trabaja con el cálculo de la evapotranspiración de cada cultivo (ETc) mediante el uso de coeficientes (Kc). Luego, con los datos de la finca bajo estudio respecto a la evapotranspiración potencial (ETp), se calculan valores de ETc para cada cultivo. I_m es el factor de ponderación para el mes (m) calculado como la necesidad teórica de agua

de ese mes sobre la necesidad total de agua.

- N_{it} Nivel de nitrógeno en kg ha^{-1} en un momento de tiempo (t) para un lote (i) bajo un sistema de laboreo, que surge de la sumatoria del nivel de nitrógeno medio del suelo para cada sistema de laboreo más el aporte de nitrógeno vía fertilizantes.
- H_t *Heladas*, variable que representa temperaturas bajo cero durante el período crítico, considerado el mes de noviembre. Se prueban dos versiones de la variable H_t . Una cuantitativa medida como número de heladas en el mes de noviembre; y otra cualitativa dicotómica que toma valor 1 si se presentan heladas en dicho mes.
- $C(T_1)_{it}$ Variable dicotómica que representa al cultivo tipo 1 para cada campaña (t). Toma valor igual a 1 si el cultivo es MAIZ, ó 0 si el cultivo es cualquier otro.
- $C(T_2)_{it}$ Variable dicotómica que representa a los cultivos tipo 2 para cada campaña (t). Toma valor igual a 1 si el cultivo es GIRASOL o SOJA, ó 0 si el cultivo es cualquier otro. De este modo, la situación base cuyo coeficiente es α_0 es para los cultivos de TRIGO o CEBADA.

Las estimaciones encontradas para el sistema de siembra directa son las expuestas en la ecuación 3, todas significativas estadísticamente a excepción de las heladas:

$$R_{it} = 5,0335 + 15,7425 Llc_t + 0,0634 N_{it} - 0,0638 H_t + 16,9236 C(T_1)_{it} - 1,9729 C(T_2)_{it} \quad Ec 3$$

Si se fijan valores para las variables explicativas, a excepción de Llc_t que se decide sensibilizar, definiendo el análisis para la siembra de soja ($C(T_2)=1$; $C(T_1)=0$), sin considerar heladas en el período crítico ($H_t=0$) y con niveles de nitrógeno promedios para el suelo ($42,43464908 \text{ Kg. ha}^{-1}$), sin considerar interacciones entre este y el nivel de precipitaciones, la estimación del rinde se resume en: $R_{it} = 5,0335 + 15,7425 Llc_t + 0,0634 * 42,43464908 - 1,9729$. A partir de este análisis se proyectan diferentes escenarios de precipitaciones y en función de ello, estimaciones de rinde de soja, para analizar los resultados para un productor agropecuario que no realice cobertura versus los que realizan estrategias de reducción del riesgo climático.

Para valorizar la producción de soja se toma un precio medio de mercado, promediando el valor spot de la Cámara Arbitral de Cereales de Bahía Blanca y los futuros sobre soja Rosario (único puerto con cotización a la fecha de búsqueda) con vencimiento en julio 2022. El promedio resulta en US\$332,50/tonelada (tn.). Se asume un capital a asegurar de US\$ 400 por hectárea que refleja un rinde de 1,2 tn./ha. aproximadamente. Todos los cálculos monetarios se exhiben en US\$/ha.

3.2 Descripción de los contratos analizados

1) Seguro tradicional no paramétrico contra sequía

El seguro contra sequía dentro de los que existen para el sector agropecuario, se suele ofrecer como un adicional de otros contratos para la cobertura de riesgos climáticos no sistemáticos, como el granizo, el incendio, los vientos fuertes, entre otros.

De acuerdo al manual de suscripción de riesgos agropecuarios de una empresa aseguradora argentina (Federación Patronal, 2020), “la cobertura contra sequía cubre los daños causados al cultivo por la ausencia anormal de lluvias durante un tiempo determinado y de una intensidad tal que reduzca la disponibilidad de agua en el suelo y que resulte en una merma de rendimiento. Se limita a cubrir la merma en kilos de los granos o frutos producidos y no en su calidad. Este riesgo solo es cubierto cuando el fenómeno de sequía se declara para toda la zona geográfica donde se encuentra ubicado el cultivo asegurado y cuando afecten a toda el área sembrada en el predio asegurado. Para el funcionamiento de este adicional se establece, un rendimiento disparador de la cobertura. Cuando el rendimiento en promedio por hectárea de todo el predio asegurado, sea inferior al disparador, el asegurador indemniza la diferencia entre éste y el disparador establecido. Asimismo, la indemnización a abonar por el asegurador bajo esta cobertura en ningún caso podrá superar la suma asegurada indicada para este adicional de sequía como límite de indemnización”.

El contrato de seguro contra sequía suele establecer un rendimiento gatillo o disparador a partir del cual se activa una compensación, que nunca podrá superar el límite indemnizatorio. Por ejemplo, si el disparador de sequía se fija en 20 qq./ha. y el productor cosecha 15 qq./ha., se pagan 5 qq./ha. Si cosecha 11 qq./ha., se pagan 9 qq./ha.; y así sucesivamente hasta llegar al límite indemnizatorio, asociado a la suma asegurada.

2) Derivados no tradicionales o seguros paramétricos contra sequía

Las principales divergencias entre los seguros tradicionales y los derivados climáticos paramétricos radican en que los primeros requieren que se produzca el evento adverso para que se ejecute el pago, y que el mismo sea constatado por peritos especialistas, elevando los costos de transacción; mientras que en los contratos paramétricos el pago contingente se basa en el comportamiento de una variable que tiene una alta correlación con el riesgo a cubrir, sin intervención de peritos. Por otro lado, también se diferencian en que el seguro sólo puede contratarlo el coberturista en una relación bis a bis con la empresa aseguradora, mientras que en los derivados climáticos no tradicionales no es necesaria una relación directa entre quien contrata el derivado y el fenómeno climático. Esto genera que los derivados paramétricos no sean sólo utilizados con fines de cobertura, sino también con fines especulativos y potencialmente de arbitraje.

En relación a los derivados climáticos en Argentina existen contratos *over-the-counter* para cubrir el riesgo de sequía, que se asemeja a una opción *put*, y el de inundación, que se comporta como una opción *call*. El activo subyacente de dichos contratos es el índice de sequía S4 y el índice de inundación S4 respectivamente, que mediante imágenes satelitales provistas por la NASA y la Agencia Espacial Europea, estiman un valor que se construye en base a algoritmos que reflejan el impacto del clima sobre los cultivos (S4 Risk, 2019). Los índices son estimados por la empresa de tecnología aplicada al agro S4, quien creó los primeros índices climáticos paramétricos de cobertura contra sequía e inundación del mundo. Los índices tienen una alta correlación con los rindes de los cultivos. En particular, para soja, la correlación es de 88% para Argentina y de 81% para Brasil (S4Risk, 2020a, 2020b).

Al analizar las opciones sobre derivados climáticos en nuestro país, su característica central radica en las particularidades del subyacente, que es el índice S4 de tipo climático. Es por ello que es una opción de tipo exótica, dada las características distintivas que presenta el sub-

yacente y la determinación de la prima. Existen N activos subyacentes dado por las combinaciones de elementos que lo componen. Dado que el subyacente (el índice elegido) toma valores medidos en un rango de tiempo para una zona determinada, se asimila a una opción de tipo asiática, donde el valor de S no es un único valor sino un promedio ponderado de ellos, durante una ventana de tiempo determinada.

Dado que este artículo analiza el riesgo de sequía, a continuación, se profundiza sobre dicha opción. Este contrato se establece para un cultivo (maíz convencional, maíz tardío, soja de primera y soja de segunda) y zona geográfica determinada (provincia, partido/departamento, celda o grilla). La celda o grilla es una subdivisión geográfica de 20 km. por 20 km. Cuanto más correlacionado esté el comportamiento del rinde del cultivo a cubrir con el valor del índice en esa celda, mejor será la cobertura sobre el riesgo climático. El principal riesgo de base que presenta este tipo de derivados financieros se vincula con las diferencias de activo que se generan entre la zona de la grilla de cada región y la ubicación puntal de cada parcela, dado que pueden observarse diferencias entre los efectos climáticos en cada lugar específico.

El contrato sobre el índice para sequía es una opción de venta: cuanto mayor sea el valor del subyacente, mejor es para el cultivo (es decir, hay menos sequía) y menores chances de ejercicio tendrá la mencionada opción. De esta manera, el pago se activa toda vez que la medición de S perfora el precio de ejercicio ($S > X$, 2019). La opción está dentro del dinero si el índice, que puede asumir valores entre 0 y 1 con tres decimales, a la fecha límite de publicación de su valor, está por debajo del valor de ejercicio ($S < X$). La fecha de publicación del índice para la cobertura contra sequía en el cultivo de soja en la zona sur del país es el 26 de mayo de cada año.

La tasa del contrato corresponde al porcentaje a pagar por el comprador de la opción sobre el capital a cubrir y está directamente relacionada con el valor de ejercicio del contrato en el caso de las opciones sobre sequía (a mayor X, mayor prima porque son opciones con mayores chances de ejercicio). La tasa por el capital a cubrir da como resultado el monto total de la prima a pagar por el comprador antes de una fecha límite determinada conocida como *cutt off date*, que para la cobertura de sequía en el cultivo de soja en la zona sur es el 10 de octubre de cada año. El rango de tasas generalmente usadas para los contratos de sequía comprende valores de entre 2% y 8% (anteriormente oscilaba entre el 2 y el 4,5%), cuanto mayor sea esta, mayor será el strike.

El valor de ejercicio corresponde al valor del índice a partir del cual se dispara el pago de la opción. El valor del *strike* surge como un porcentaje de la media histórica del índice con opciones que van del 85% al 95% de la media histórica por partido, grilla y cultivo.

Respecto al pago del contrato, si la opción está fuera del dinero, por supuesto el pago es nulo. Por el contrario, si la opción está dentro del dinero, es decir si el valor del índice está por debajo del precio de ejercicio, se determina el porcentaje del capital a cubrir que se pagará, siguiendo la ecuación 4.

$$\% \text{ de pago} = \frac{(X - S)}{\text{paso}} * \text{pago por paso} \quad \text{Ec 1}$$

Para las opciones de sequía, por defecto el paso es de 0,003 y el pago por paso de 1%, es decir, 1% del capital cubierto por cada 0,003 del S4 Sequía por debajo del valor de ejercicio. De este modo, se monetiza el valor intrínseco que naturalmente está expresado en unidades de índice. En términos temporales, el pago se produce a los 12 hábiles de la fecha de publicación del índice.

Las opciones climáticas sobre sequía establecen pagos máximos, que surgen del menor valor entre el cálculo de la ecuación 4 y el máximo pago histórico registrado en los últimos 18 años para ese contrato más un plus de 25%. Esta restricción sobre el pago máximo evita el encarecimiento de la prima al no incluir la cobertura de eventos poco probables, pero de gran impacto en el rinde, conocidos como cisnes negros.

Actualmente estos derivados paramétricos fueron aprobados por la Superintendencia de Seguros de la Nación, y son ofrecidos por la compañía El Norte SA en Argentina (La Voz, 2020) y Rus en Uruguay.

En la tabla 2 se presenta un extracto de los contratos de sequía disponibles para el partido de Tornquist, sobre soja, extraídos de S4.

Tabla 2. Contratos paramétricos sobre sequía para soja en partido de Tornquist

Sequía Soja Argentina Tile				S4Index Sequía (put)					
Grilla	Provincia	Partido	Media histórica	Valor del strike					
				85	87	89	91	93	95
2615	BUENOS AIRES	TORNQUIST	0,464	0,395	0,404	0,413	0,423	0,432	0,441
2682	BUENOS AIRES	TORNQUIST	0,521	0,443	0,453	0,464	0,474	0,484	0,495
2683	BUENOS AIRES	TORNQUIST	0,562	0,477	0,489	0,500	0,511	0,522	0,534

S4Index Premium (%)							S4Index Sequía pagos máximos (%)					
Grilla	Valor						Pagos máximos					
	85	87	89	91	93	95	85	87	89	91	93	95
2615	4,36%	5,08%	5,93%	7,06%	ND	ND	40%	40%	40%	40%	ND	ND
2682	2,80%	3,33%	4,09%	4,97%	6,05%	ND	40%	40%	40%	40%	40%	ND
2683	2,26%	2,77%	3,41%	4,25%	5,32%	7,91%	40%	40%	40%	40%	40%	100%

Fuente: extraído y adaptado de S4 Risk (2020b).

En la campaña 2020/2021, el índice S4 publicado tomó valor de 0,550 para la grilla 2615, de 0,583 para la grilla 2682 y de 0,651 para la grilla 2683, habiendo quedado todos los contratos fuera del dinero y por lo tanto sin generar compensación alguna para el tomador.

Por la localización de la zona bajo estudio (-38,11833333 de latitud y -62,0380555555 de longitud), la grilla de S4 correspondiente al contrato a seleccionar es la 2682 (ilustración 2).

Ilustración 2. Selección de la grilla bajo análisis

Fuente: extraída del sistema de simulación de riesgos de S4 Risk (2020b).

4. Resultados y discusión

En esta sección se buscan estimar los resultados que obtendría un productor agropecuario que cultiva soja de primera de la zona de Tornquist que no tome cobertura alguna contra el riesgo de sequía (sección 4.1) versus diferentes estrategias de cobertura con derivados climáticos tradicionales o no paramétricos (sección 4.2) y contratos exóticos paramétricos (sección 4.3), para comparar sus resultados (sección 4.4).

Para ello, se simulan 24 escenarios diferenciales en cuanto a las precipitaciones que ocurren en la zona bajo estudio utilizando el índice de la ecuación 2 para el cultivo de soja durante su período crítico. El rango de valores simulados para el índice Llc se establece en $[0,251301; 1,120973]$ que corresponde con el valor mínimo y máximo respectivamente de la serie histórica analizada de 23 años, siendo la media de 0,719438 (sombreada en gris en la tabla 3).

4.1 Resultados sin cobertura del riesgo climático

En la tabla 3 se sensibiliza el rendimiento de soja por hectárea para diferentes niveles de precipitaciones en torno a este intervalo planteado para la variable Llc , siguiendo la función de producción de la ecuación 3. El rinde resultante se encuentra en un rango de 9,6 a 23,4 qq./ha. El valor máximo predicho coincide casi con exactitud con el máximo histórico del período analizado, de 23,93 qq./ha., mientras que el mínimo se encuentra por encima del histórico de 4,0 qq./ha., suscitado en la campaña 2002/03 por factores no vinculados a las precipitaciones. La media histórica del rinde se encuentra en 12,26 qq./ha., lo que da un valor de aproximadamente US\$ 400/ha.

El ingreso bruto surge del producto entre el rinde por hectárea y el precio futuro promedio de la soja según se detalla en la sección de metodología.

Tabla 3. Estimación del rinde por hectárea y su ingreso bruto para diferentes precipitaciones Llc

Rendimiento estimado (qq./ha.)	Índice Llc	Ingreso bruto (US\$/ha.)
23,3979	1,121	777,98
23,0677	1,100	767,00
22,2806	1,050	740,83
21,4935	1,000	714,66
20,7063	0,950	688,49
19,9192	0,900	662,31
19,1321	0,850	636,14
18,3450	0,800	609,97
17,5578	0,750	583,80
17,0767	0,719	567,80
16,7707	0,700	557,63
15,9836	0,650	531,45
15,8309	0,640	526,38
15,6687	0,630	520,99
15,5113	0,620	515,75
15,3539	0,610	510,52
15,1965	0,600	505,28
14,4093	0,550	479,11
13,6222	0,500	452,94
12,8351	0,450	426,77
12,0480	0,400	400,59
11,2608	0,350	374,42
10,4737	0,300	348,25
9,6866	0,250	322,08

El ingreso bruto medio para la situación sin cobertura del riesgo climático se sitúa en US\$ 550,88/ha y su volatilidad para los escenarios proyectados, calculada a partir de su desvío estándar, arroja un valor de US\$ 130/ha.

4.2 Resultados con seguros climáticos no paramétricos

Del relevamiento de información surgen dos observaciones importantes en relación a los oferentes en el mercado. En primer lugar, no todas las empresas aseguradoras ofrecen seguros patrimoniales agropecuarios. En segundo lugar, no todas las empresas que trabajan con seguros agropecuarios, ofrecen seguros contra sequía. Incluso algunas aseguradoras *rankeadas* en los primeros puestos de ventas para seguros contra granizo, no tienen este adicional.

Esta característica sobre la escasa oferta para el seguro contra sequía en la zona bajo estudio limita la estimación de la prima, que fue calculada como el promedio de dos cotizaciones que incluyen este adicional menos la cotización de una cobertura básica que solo incluye el daño provocado por el granizo. De este modo, se alcanza una prima de US\$ 17,68/ha.

El resarcimiento del seguro se activa si el rinde es menor al gatillo que establece el contrato, compensándose la diferencia entre ambos, hasta el límite indemnizatorio. Entonces, el pago se calcula como el máximo entre 0 y (rinde gatillo - rinde estimado) * precio soja. En ninguno de los escenarios proyectados la compensación supera al límite indemnizatorio, por lo que no se provoca el techo de la cobertura. Pero como puede observarse en la tabla 4, el ingreso neto se estabiliza en US\$ 481,07/ha. producto de que el cese en el rinde se compensa exactamente con el pago recibido.

Tabla 4. Estimación del valor del pago del seguro e ingreso neto de la estrategia

<i>Rendimiento (qq./ha.)</i>	<i>Pago (US\$/ha.)</i>	<i>Prima (US\$/ha.)</i>	<i>Ingreso bruto (US\$/ha.)</i>	<i>Ingreso neto (US\$/ha.)</i>
23,3979	0,00	17,68	777,98	760,30
23,0677	0,00	17,68	767,00	749,32
22,2806	0,00	17,68	740,83	723,15
21,4935	0,00	17,68	714,66	696,98
20,7063	0,00	17,68	688,49	670,81
19,9192	0,00	17,68	662,31	644,64
19,1321	0,00	17,68	636,14	618,46
18,3450	0,00	17,68	609,97	592,29
17,5578	0,00	17,68	583,80	566,12
17,0767	0,00	17,68	567,80	550,12
16,7707	0,00	17,68	557,63	539,95
15,9836	0,00	17,68	531,45	513,78
15,8309	0,00	17,68	526,38	508,70
15,6687	0,00	17,68	520,99	503,31
15,5113	0,00	17,68	515,75	498,07
15,3539	0,00	17,68	510,52	492,84
15,1965	0,00	17,68	505,28	487,61
14,4093	19,64	17,68	479,11	481,07
13,6222	45,81	17,68	452,94	481,07
12,8351	71,98	17,68	426,77	481,07
12,0480	98,16	17,68	400,59	481,07
11,2608	124,33	17,68	374,42	481,07
10,4737	150,50	17,68	348,25	481,07
9,6866	176,67	17,68	322,08	481,07

El ingreso neto medio para la situación con cobertura del riesgo climático a partir de un seguro no paramétrico se sitúa en US\$ 561,83/ha y su volatilidad para los escenarios proyec-

tados, calculada a partir de su desvío estándar, arroja un valor de US\$ 95,75/ha. Es decir, el riesgo de la corriente de ingresos se ve reducido en 36% respecto a la situación sin cobertura del riesgo climático.

En la tabla 5 se realiza un análisis de sensibilidad cruzada con los escenarios en relación al rinde gatillo del contrato, para un intervalo de 10 a 16 qq./ha. A medida que el rinde disparador se reduce, como es de esperar, se observa menor cantidad de escenarios en los que se activaría la compensación del seguro, y por lo tanto el ingreso neto medio es menor y la volatilidad se reduce en menor cuantía.

Tabla 5. Sensibilización del ingreso neto y su riesgo para la elección de diferentes contratos

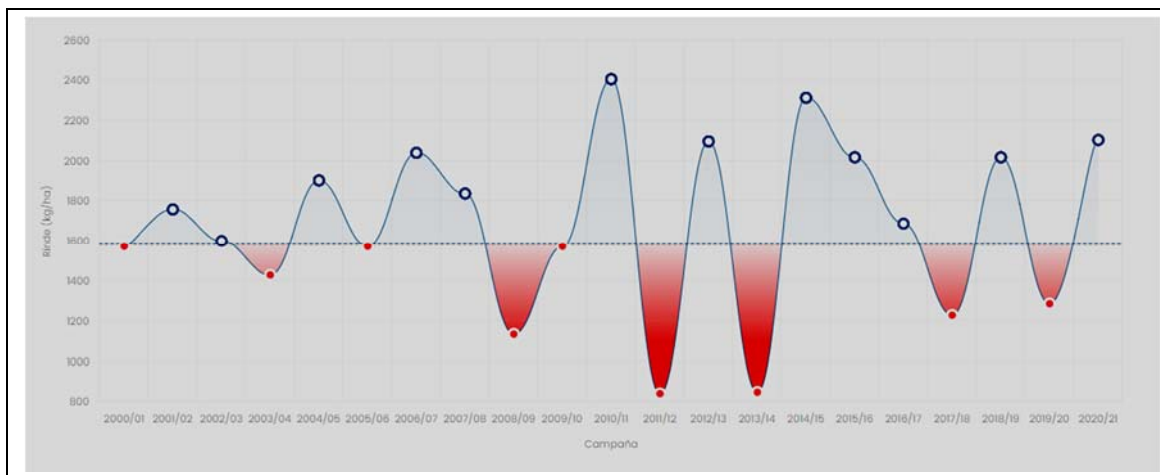
<i>Rinde gatillo (qq./ha.)</i>	<i>Q de escenarios con compensación</i>	<i>Ingreso neto medio (US\$/ha.)</i>	<i>Volatilidad (US\$/ha.)</i>
16	13	574,93	85,35
15	7	561,83	95,75
14	6	552,70	104,53
13	5	545,25	112,90
12	3	539,55	120,24
11	2	535,75	125,77
10	1	533,64	129,24

4.3 Resultados con derivados climáticos paramétricos

Si el productor agropecuario hubiese tomado una cobertura mediante un contrato climático paramétrico sobre el índice S4 de sequía, debería en primer lugar seleccionar el contrato a comprar. Para ello, el sistema de simulación de riesgos S4 Risk permite analizar la serie de rindes para el cultivo en la grilla seleccionada (2682) para los últimos 20 años (ilustración 3), indicando un rinde de indiferencia. En este caso y a los fines ilustrativos se fija un nivel de 16 qq./ha para evaluar en cuántas campañas el rinde se presenta debajo esa productividad. Así puede observarse que en 6 de las 20 campañas el rinde se sitúa por debajo del umbral (en rojo) y en las peores campañas con rendimientos en torno a 8 qq./ha.

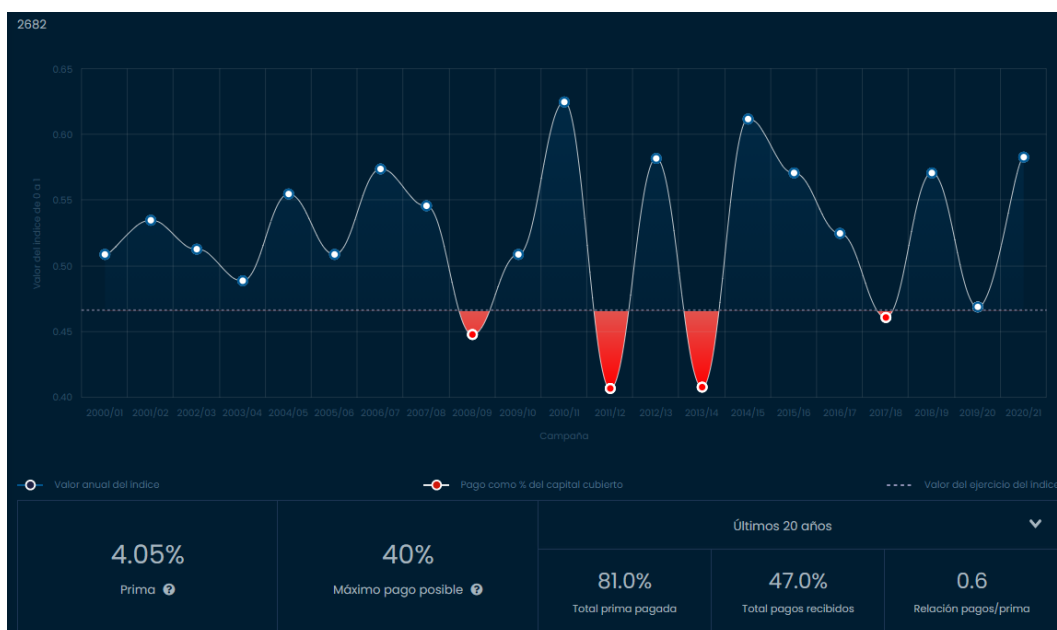
Asimismo, pueden analizarse los valores publicados para el índice subyacente en cada una de las campañas para la grilla de localización bajo estudio (ilustración 4). De acuerdo a la información presentada en la tabla 2 de la metodología, la media histórica del índice S4 para esa grilla es de 0,521. A partir de ese valor se determinan los precios de ejercicio como un porcentaje de la media histórica, que va desde el 85% al 95%, en intervalos de 2 puntos porcentuales. Seleccionando un nivel para el strike (X) de 89% sobre el valor histórico del índice, el nivel de S4 que gatilla la entrada al dinero del contrato se determina en 0,464. En la ilustración 4, este nivel se indica con una línea discontinua y puede observarse que en cuatro de las campañas informadas el nivel de S4 bajó a niveles inferiores a X, por lo que los contratos produjeron compensaciones para sus tomadores.

Ilustración 3. Serie histórica de rendimientos para soja en la grilla 2682



Fuente: extraída del sistema de simulación de riesgos de S4 Risk (2020b).

Ilustración 4. Serie histórica de valores para el índice S4 sequía para soja en la grilla 2682



Fuente: extraída del sistema de simulación de riesgos de S4 Risk (2020b).

El contrato seleccionado de 89% sobre el valor histórico tiene una prima de 4,05% que al sumarle otros costos (sin IVA) alcanza el 4,09%. Para un capital asegurado de US\$ 400 por ha., el premio a pagar es de US\$ 16,36 /ha. El pago máximo establecido para el contrato es de 40% del capital asegurado, no cubriendo la incidencia de *cisnes negros*.

Dada la concordancia conceptual entre el valor del índice de lluvias LI_c y el valor del índice S4 que pondera los períodos críticos de cultivo, se estima un valor para S a partir del valor fijado LI_c sobre su media histórica multiplicado por la media histórica del índice S4. Si bien

esto puede implicar alguna limitación, que la correlación entre el índice S4 y el rinde sea alta y positiva permite realizar este supuesto para proyectar el valor del subyacente.

En la tabla 6 se exhibe el análisis detallado de la estimación de S y la determinación del estado de la opción en función a ello: la opción se encuentra fuera del dinero (O-T-M) para valores de S superiores a $X=0,464$, en el dinero para $S=X$ (A-T-M) y dentro del dinero (I-T-M) para $S<0,464$. Para estos últimos escenarios, se calcula el % de pago que corresponde a la opción, siguiendo lo explicado en la ecuación 4. Como puede observarse, el pago en los últimos cinco escenarios supera el porcentaje de pago máximo que establece el contrato, por lo que en esos casos el mismo se fija en 40% del valor asegurado (US\$ 400/ha.). El pago en unidades monetarias se calcula como el % de pago por el capital asegurado. Finalmente, el ingreso neto surge de deducir del ingreso bruto el monto abonado por la prima y adicionar el pago recibido en términos de compensación cuando corresponde.

Tabla 6. Estimación del valor de S, resultado de la opción e ingreso neto de la estrategia

Rendimiento (qq./ha.)	Valor S	Moneyness	% pago	Pago (US\$/ha.)	Prima (US\$/ha.)	Ingreso bruto (US\$/ha.)	Ingreso neto (US\$/ha.)
23,3979	0,812	O-T-M	0%	0,00	16,36	777,98	761,62
23,0677	0,797	O-T-M	0%	0,00	16,36	767,00	750,64
22,2806	0,760	O-T-M	0%	0,00	16,36	740,83	724,47
21,4935	0,724	O-T-M	0%	0,00	16,36	714,66	698,30
20,7063	0,688	O-T-M	0%	0,00	16,36	688,49	672,13
19,9192	0,652	O-T-M	0%	0,00	16,36	662,31	645,95
19,1321	0,616	O-T-M	0%	0,00	16,36	636,14	619,78
18,3450	0,579	O-T-M	0%	0,00	16,36	609,97	593,61
17,5578	0,543	O-T-M	0%	0,00	16,36	583,80	567,44
17,0767	0,521	O-T-M	0%	0,00	16,36	567,80	551,44
16,7707	0,507	O-T-M	0%	0,00	16,36	557,63	541,27
15,9836	0,471	O-T-M	0%	0,00	16,36	531,45	515,09
15,8309	0,464	A-T-M	0%	0,00	16,36	526,38	510,02
15,6687	0,456	I-T-M	2,49%	9,94	16,36	520,99	514,57
15,5113	0,449	I-T-M	4,90%	19,60	16,36	515,75	518,99
15,3539	0,442	I-T-M	7,31%	29,26	16,36	510,52	523,41
15,1965	0,435	I-T-M	9,73%	38,91	16,36	505,28	527,83
14,4093	0,398	I-T-M	21,80%	87,19	16,36	479,11	549,94
13,6222	0,362	I-T-M	33,87%	135,47	16,36	452,94	572,05
12,8351	0,326	I-T-M	45,94%	160,00	16,36	426,77	570,41
12,0480	0,290	I-T-M	58,01%	160,00	16,36	400,59	544,23
11,2608	0,253	I-T-M	70,08%	160,00	16,36	374,42	518,06
10,4737	0,217	I-T-M	82,15%	160,00	16,36	348,25	491,89
9,6866	0,181	I-T-M	94,22%	160,00	16,36	322,08	465,72

El ingreso neto medio ronda los US\$ 581/ha. La volatilidad del ingreso neto utilizando cobertura con el contrato exótico paramétrico es de US\$ 84,45/ha., lo que implica una reducción del desvío estándar en un 54% respecto al caso en donde no se realice cobertura sobre el riesgo climático.

Si se sensibilizan los resultados anteriores de manera cruzada con los escenarios, ante la elección de otros contratos derivados climáticos paramétricos, se obtienen los resultados de la tabla 7, en donde se puede observar que efectivamente el riesgo sobre el ingreso neto disminuye a medida que se eligen contratos con valores de ejercicio superiores.

Tabla 7. Sensibilización del ingreso neto y su riesgo para la elección de diferentes contratos

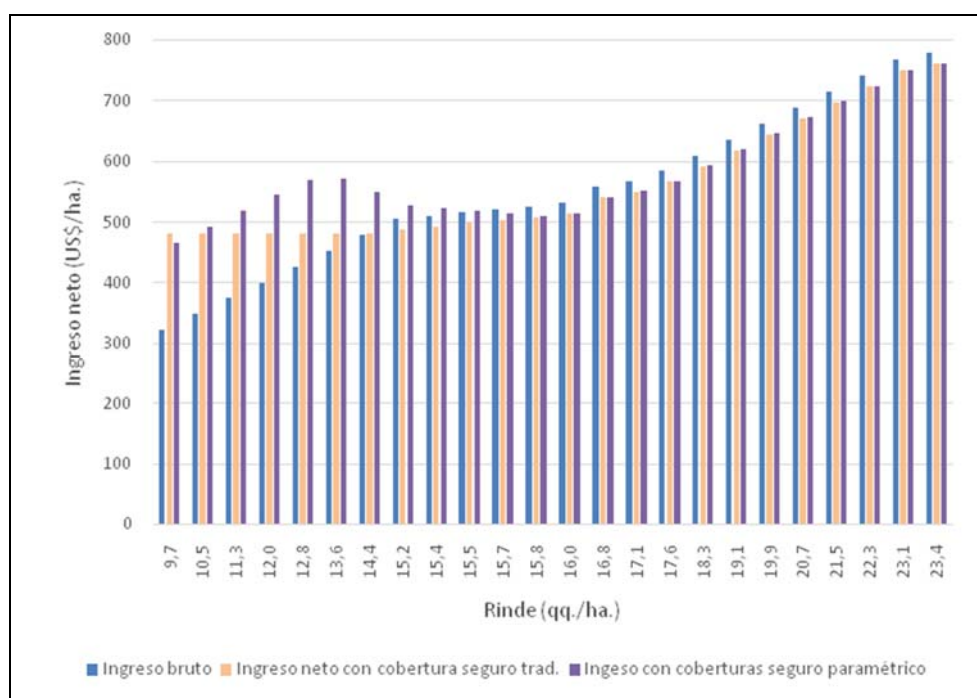
Contratos paramétricos	Valor X	Prima	Q de escenarios I-T-M	Ingreso neto medio (US\$/ha.)	Volatilidad (US\$/ha.)
85%	0,443	2,80%	9	580,33	88,23
87%	0,453	3,33%	10	580,93	86,51
89%	0,464	4,09%	11	581,20	84,45
91%	0,474	4,97%	13	581,92	81,99
93%	0,485	6,05%	13	582,10	79,64
95%	0,495	6,55%	13	584,15	77,72

4.4 Comparación de estrategias de cobertura

Al analizar comparativamente los resultados de no realizar cobertura del riesgo climático versus las estrategias de cobertura, en todos casos los derivados bajo análisis producen una reducción de la volatilidad del ingreso medio por hectárea, consistente con el objetivo principal de la administración de riesgos, y esto es válido para cualquiera de los contratos analizados. En particular, el desvío estándar del ingreso neto se reduce en 36% utilizando seguros tradicionales y 54% mediante opciones climáticas sobre sequía.

Tal como se ilustra en la siguiente gráfica (ilustración 5), para rindes superiores a 15,5 qq./ha. aproximadamente, las estrategias de cobertura reducen el resultado puesto que la prima pagada deviene en un costo sobre un derecho contingente que no se activa, es decir, no se produce el siniestro. Luego, para sequías moderadas que producen rindes más bajos pero no mínimos (de 10 a 15,5 qq./ha. aproximadamente), las opciones climáticas presentan el mejor resultado de cobertura por la relación prima-pagos. Para los rindes más bajos (menores a 10 qq./ha.) resulta ser el seguro convencional no paramétrico el que presenta el desempeño de cobertura más eficiente, puesto que el límite indemnizatorio es más holgado que las pérdidas producidas (ilustración 5). Estos resultados son esperables en tanto las opciones climáticas o seguros paramétricos fijan un pago máximo, en este caso del 40% sobre el monto asegurado, poniendo un techo “bajo” a la compensación cuando ocurren grandes pérdidas.

Ilustración 5. Comparación de los ingresos por estrategia de cobertura para diferentes rindes



En relación al valor de los contratos, la prima del seguro no paramétrico resulta ser levemente más costosa que la del contrato paramétrico, en particular un 8% superior. Sin embargo, esta relación depende claramente del contrato seleccionado para cada tipo de cobertura. Por ejemplo, una opción climática con un precio de ejercicio del 93% sobre el valor histórico del índice S4 tendría una prima superior a la del seguro no paramétrico.

Por el lado de la transparencia y objetividad de la cobertura, no se puede dejar de mencionar que los seguros tradicionales sobre sequía tienen un proceso administrativo de auditoría para proceder con la compensación correspondiente, lo que deriva en un pago con mayor dilación y burocracia. Mientras que los contratos paramétricos tienen un criterio de compensación objetivo y el pago ocurre a los 12 días hábiles de publicación del índice indefectiblemente.

En relación a la oferta, para los seguros contra sequía no paramétricos existen escasas compañías aseguradoras que ofrezcan en la zona bajo estudio este adicional dentro de los seguros climáticos sobre riesgos agropecuarios. En el caso de los contratos paramétricos la oferta está restringida a un número amplio de partidos de las principales provincias agropecuarias del país.

Finalmente, es dable destacar que el seguro tradicional tiene un menor riesgo de base puesto que se asegura la sequía en el terreno propio del cultivo, mientras que para la opción climática subyace un índice que toma valores promedio de una grilla de 20 kilómetros cuadrados y esto puede tener una correlación menor con la situación climática ocurrida en el propio predio del tomador del derecho. En términos técnicos, la opción climática asiática presenta riesgo de base por diferencia de activos: se busca cubrir la merma en el rinde de un cultivo en una zona en particular y el activo subyacente mide la evolución climática a partir de algoritmos sobre imágenes satelitales de la biomasa de una superficie mayor, correlacionada posi-

tivamente con el activo a cubrir, pero no de manera perfecta. Los especialistas en el cálculo del índice S4 informan una correlación de 88% entre los rindes de soja y el valor del índice para sequía en Argentina, pero, de todos modos, esto puede variar para cada caso particular: grilla a grilla y campo a campo a lo largo de todo el territorio nacional de cobertura producto de la heterogeneidad natural de los suelos y el riesgo intrínseco de cada geolocalización.

5. Conclusiones

El objetivo del artículo fue comparar los resultados que obtendría un productor agropecuario que no tome cobertura contra el riesgo de sequía para el cultivo de soja versus diferentes estrategias de cobertura con derivados climáticos, simulando escenarios diferenciales de precipitaciones a partir de datos históricos de un estudio de caso real y sensibilizando cruzadamente la selección de contratos con los escenarios. En particular, se establecieron dos objetivos específicos. El primero, identificar y caracterizar el funcionamiento de algunos derivados climáticos para la cobertura de sequía disponibles en Argentina, entre ellos seguros paramétricos u opciones climáticas, y seguros tradicionales. Este objetivo fue cumplido a partir del desarrollo de la sección 3.2 sobre los contratos climáticos analizados.

El segundo objetivo específico fue evaluar los costos y grados de eficiencia de la cobertura ante diferentes escenarios de evolución climática para un fenómeno sistémico como la sequía, encontrándose zonas de conveniencias de acuerdo a los escenarios de precipitaciones: los seguros paramétricos sobre la base de una opción asiática son más eficientes para sequías moderadas, mientras que el seguro tradicional o no paramétrico permitiría una cobertura más abarcativa en casos de extrema sequía, siempre que no se supere el límite indemnizador.

En términos de implicancias de los resultados, este trabajo colabora en incrementar el entendimiento sobre este tipo de instrumentos de cobertura para un riesgo climático sistémico como la sequía, de relevancia superlativa para economías altamente dependientes de la producción agropecuaria extensiva, como la argentina. Cabe preguntarse si los costos para morigerar estos tipos de riesgos climáticos sistémicos (y no particulares de cada campo individualmente) deberían ser absorbidos colaborativamente por varios agentes de la cadena de valor, e incluso relevantes para el estado.

Las limitaciones de la investigación provienen de trabajar con un estudio de caso y por lo tanto los resultados no son generalizables. Además, si bien se parte de datos reales de un período histórico de 23 años, este no se puede consolidar con la serie de S4 Risk de 20 años por tener superposición solo en ocho campañas de las observadas. Por otro lado, la estimación del valor del índice de sequía subyacente se realiza tomando un criterio conceptualmente lógico, pero que aún carece de validación empírica. Finalmente, se estiman rendimientos del cultivo para diferentes escenarios de precipitaciones utilizando una función de producción estimada con una bondad de ajuste (R^2) satisfactoria, pero con una predicción con márgenes de error estadísticos que se deben tener presentes.

Entre los futuros pasos para continuar y profundizar esta investigación se propone: (a) Extender el período histórico de observaciones del caso bajo estudio para tener una serie consolidada de 20 años. (b) Validar empíricamente la función de relación entre el índice de precipitaciones y el valor del índice S4, a partir de un trabajo interdisciplinario con ingenieros agrónomos. (c) Valorar teóricamente el contrato put de cobertura contra sequía, sabiendo que se

utiliza una función de probabilidad que combina la distribución Beta Limitada y Pareto para comparar con el precio de mercado.

REFERENCIAS

- Calzada, J. & Treboux, J. (2019). *Importancia económica del sector agropecuario y agroindustrial en la República Argentina*. Bolsa de Comercio de Rosario. Informe semanal, Año XXXVI N° Edición 1927. <https://www.bcr.com.ar/es/print/pdf/node/75425>
- Casparri, M. T. & García Fronti, J. (2010). *Algunas innovaciones financieras para la gestión del riesgo global*. Facultad de Ciencias Económicas. Universidad de Buenos Aires.
- CME Group (2009). *CME Hurricane Index Futures and Options*. Disponible en https://www.cme-group.com/trading/weather/files/WT106_NEWHurricaneFC.pdf
- CME Group (2014). *Snowfall Futures and Options*. Disponible en <https://www.cmegroup.com/trading/weather/files/snowfall-fact-card.pdf>
- CME Group (2021a). *Temperature Based Indexes*. Disponible en <https://www.cmegroup.com/trading/weather/temperature-based-indexes.html>
- CME Group (2021b). *Weather Products*. Disponible en <https://www.cmegroup.com/trading/weather/#heating>
- Cortina, E. & Sánchez, I. (2013). *Hedging late frost risk in viticulture with exotic options*. *Agricultural Finance Review*, 73 (1): 136-160.
- Durán, R., Scoponi L., Pesce, G. y De Batista, M. (2012). *Beneficios y costos ecológicos de sistemas de laboreo en el largo plazo: Estudio de caso en el SO bonaerense, Argentina*. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 12 (2): 57-76.
- Fernández, P. & Ariño, M.A. (1996). *Derivados exóticos*. Documento de investigación 308. Centro Internacional de Investigación Financiera (CIIF) y División de Investigación IESE, Universidad de Navarra.
- Galantini, J. A., Duval, M. E., Landriscini, M. R. & Suñer, L. G. (Comp) (2018). *Actas III Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos, AACS Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*.
- Galantini, J.A., Iglesias, J.O., Maneiro, C. y Kleine, C. (2007). *Efectos de largo plazo sobre la materia orgánica del suelo*. *Revista Técnica Especial en Siembra Directa*, octubre: 11-15.
- García-Machado, J.J., Sancha Dionisio, M.P., Tejero Rioja, C. & Toscano Pardo, D. (2000). *Opciones "exóticas"*. *Boletín Económico de ICE* N° 2673: 1-8.
- Grima, I. (2020). *Los derivados climáticos como herramienta de cobertura y su impacto en Argentina*. Trabajo Final de Maestría en Finanzas. Universidad de San Andrés.
- Hoyt, R. & McCullough, K. (1999). *Catastrophe insurance options: Are they zero-beta assets?* *Journal of Insurance Issues*, 22 (2): 147-163.
- Hull, J. (2002). *Introducción a los mercados de futuros y opciones*, 4ª Ed. Prentice-Hall.
- Hull, J. (2012). *Options, Futures and other Derivatives* 12th Ed. Pearson Education Global Edition.
- Kolb, R. (2003). *Futures, Options, and Swaps*. Blackwell Publishing.
- Kolb, R. W. (2011). *Exotic Options*. En Kolb, R. W. & Overdahl, J. *Financial Derivatives: Pricing and Risk Management*. JohnWiley & Sons.

- La Voz (2020). *Seguro paramétrico de sequía, la nueva forma de proteger los cultivos*. Disponible en <https://www.lavoz.com.ar/espacio-publicidad/seguro-parametrico-de-sequia-nueva-forma-de-proteger-cultivos/>
- Maya, C. (2009). *Monte Carlo option pricing*. Lecturas de Economía, 61: 53-70.
- Medina Granados, R. (2016). *Derivados sobre clima*. Memòria del Treball de Fi de Grau. Facultat d'Economia i Empresa. Universitat de les Illes Balears. Disponible en https://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/147574/Medina_Raul.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pesce G., Pedroni F. V., Chavez E., Moral M. de la P. & Rivero M. A. (2021). *Opciones exóticas: Conceptualización y evolución en la literatura a partir de una revisión sistemática*. Lecturas de Economía, 95: 231-275.
- Pesce, G. (2012). *Metodología integral para la internalización de efectos ambientales en las decisiones empresariales*. Tesis de Doctorado en Economía. Universidad Nacional del Sur. Disponible en: <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2496>
- Pesce, G., Scoponi, L., Galantini, J.A., Durán, R., Sánchez, M.A., De Batista, M., Chimeno, P., Cordisco, M., Olivers, G., Merino, L. y Gzain, M. (2017). *Valoración de la sustentabilidad de sistemas de labranza: Estudio de caso en el SO bonaerense*. III Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y del II Taller Nacional de Cartografía Digital. Bahía Blanca. <http://repositorio.digital.uns.edu.ar/handle/123456789/5273>
- Pisani, N. & Miazza D. (2019). *El campo argentino en números*. Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina (FADA). Disponible en: <https://fundacionfada.org/informes/el-campo-argentino-en-numeros-4/>
- Ray, D.K., Gerber, J.S., MacDonald, G.K. & West, P.C. (2015). *Climate variation explains a third of global crop yield variability*. Nature Communications, 6: art. 5989.
- Rozenberg, J. y colaboradores (2021). *Impactos de las crisis climáticas en la pobreza y en la macroeconomía del Banco Mundial*. Disponible en <https://documents1.worldbank.org/curated/en/121961624981444917/pdf/Argentina-Poverty-and-Macro-Economic-Impacts-of-Climate-Shocks.pdf>
- S4 Risk (2019). *Cobertura. Todo lo que necesitás saber*. Campaña 2018/2019. Disponible en: https://s4agtech.com/rofox_indices/img/todo_lo_que_necesitas_saber_v181116.pdf
- S4 Risk (2020a). *Cómo se construye el S4 Index*. Disponible en <https://www.s4risk.co/flow/landing/s4index/#section-inundacion>
- S4 Risk (2020b). *Las coberturas paramétricas de S4Risk® se basan en índices climáticos contruídos en base a tecnologías propias desarrolladas por S4*. Disponible en <https://s4risk.co/flow/landing/s4index/>
- Sutton-Vermeulen, D. (2021). *Managing climate risk with CME Group weather futures and options*. Disponible en <https://www.cmegroup.com/education/articles-and-reports/managing-climate-risk-with-cme-group-weather-futures-and-options.html>
- Tucker, M. (1997). *Climate change and the insurance industry: The cost of increased risk and the impetus for action*. Ecological Economics, 22: 85-96.
- Wilmott, P. (2009). *Frequently Asked Questions in Quantitative Finance*, 2nd. Ed. John Wiley & Sons.