



TESIS DOCTORAL

GESTIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS: EL CASO DE LA GANADERÍA OVINA CÁRNICA EN EXTENSIVO EN EXTREMADURA Y DE LA PRODUCCIÓN DE SOJA Y MAÍZ EN ARGENTINA.

ISMAEL PÉREZ FRANCO

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN ECONOMÍA Y EMPRESA
POR LA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA**

Con la conformidad del Dr. D. Agustín García García, director de la tesis, y del Dr. D. Esteban Otto Thomasz, co-director de la misma.

Esta tesis cuenta con la autorización del director/a y coautor/a de la misma y de la Comisión Académica del programa. Dichas autorizaciones constan en el Servicio de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Extremadura.

2023

Agradecimientos

Al final del camino me dirán: —¿Has vivido? ¿Has amado?

Y yo, sin decir nada, abriré el corazón lleno de nombres.

Pedro Casaldáliga

La realización de un trabajo de esta envergadura no es un éxito individual, sino un éxito colectivo conseguido de forma artesanal, a través de los años, por todas las personas que me han acompañado. Así es como yo veo esta tesis doctoral. Desde que nací, todo me ha sido dado y, quizás, esta ha sido mi primera oportunidad de aportar un 'granito de arena' al beneficio común. Pero no lo he hecho solo, a lo largo de este camino he sido empujado, guiado y acompañado por múltiples personas e instituciones a las que quiero agradecer en las siguientes líneas.

A mi padre, madre y hermanos, por confiar en mí, aun cuando yo lo veía todo derrotado. Por ser roca firme en la que apoyarme.

A Olga, por su acompañamiento generoso en todo este proceso.

A mi hijo Guille, por ser motivación, energía y alegrías en los últimos meses de elaboración de esta tesis.

A mis abuelas, abuelo, tíos, tías, primos y primas. En especial a mi tío Antonio, por ser fuente de inspiración desde pequeño en el trabajar desde la constancia y la perseverancia.

A mi familia política, por la motivación que me han dado en forma de conversaciones, de pacientes escuchas sobre la investigación o del interés mostrado en la evolución de este trabajo.

Gracias a toda mi familia por hacer del amor la forma más poderosa de acompañamiento.

A mis dos directores de tesis, el doctor Agustín García y el doctor Esteban Otto Thomasz, ambos han sido mi soporte intelectual en el que se asienta todo este trabajo. Por apostar por mí para desarrollar esta investigación, por toda la dedicación que me han ofrecido, proporcionándome un espacio intelectual motivante y desafiante para poder alcanzar los resultados que se presentan.

A la Fundación Valhondo Calaff que, con su contrato predoctoral, me ha proporcionado una oportunidad laboral sin incertidumbre a través de la que desarrollarme, no solo académicamente, sino personalmente.

A las instituciones públicas de enseñanza por las que he pasado, por proporcionarme todas las herramientas que he usado en este trabajo. En especial a todas las personas con las que me he cruzado, que han creído en la educación como un vehículo de construcción de una sociedad mejor.

A la Cooperativa Agroalimentaria EA Group, por la información experiencial imprescindible para entender el funcionamiento de las explotaciones ganadera ovina

cárnica en extensivo en Extremadura. Y a la Fundación Caja de Extremadura por el apoyo que ha dado en el desarrollo de la primera parte de esta tesis.

A el grupo ProVul (Programa de Vulnerabilidad Socioeconómica al Riesgo Climático) de la Universidad de Buenos Aires, por permitirme aprender de las actividades agrarias comprendidas en esta tesis (maíz y soja) realizadas en Argentina, aún sin ir al país (esto lo dejo pendiente).

A la doctora Lourdes Moreno, por su interés, por sus comentarios y por su confianza en que este trabajo llegara a buen puerto.

A mis compañeros y compañeras de la Juventud Estudiante Católica (JEC). Con ellos y ellas empezó mi interés en el 'estudio con-sentido' desde mi ser llamado a cuidar y mejorar el mundo que nos encontramos. En especial a Saray, Fernando, Pepe, Manolo, Poche, Maitane, Edu, Álvaro, Carmen y otras muchas personas que me han acompañado desde mi inicio como estudiante universitario.

A mis amigos y amigas más cercanos que han estado presentes en los momentos en los que este trabajo se ponía cuesta arriba.

Por último, a todas las personas que, aun no estando implícitamente en estas líneas, de una manera u otra han participado en este trabajo, gracias.

Resumen

El cambio climático, siendo un fenómeno global, tiene consecuencias que se manifiestan a nivel local. Una de sus principales consecuencias es el aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2019). El objetivo de esta tesis doctoral es examinar cómo dichos eventos han afectado económicamente a dos actividades agropecuarias muy distintas, una a nivel microeconómico y otra a nivel macroeconómico. Se lleva a cabo una identificación y evaluación de los impactos pasados para generar estrategias de adaptación frente a futuros eventos climáticos extremos.

En los últimos años, ha habido un aumento en la cantidad de literatura que examina las implicaciones económicas del cambio climático. No obstante, todavía existe una escasez de investigaciones que ofrezcan una evaluación robusta del impacto de eventos climáticos extremos en el flujo monetario de actividades agropecuarias. El presente trabajo permitió, por un lado, diseñar estrategias de adaptación ante futuros eventos, y, por otro, comparar el impacto a lo largo del tiempo y entre diferentes regiones geográficas.

Las aportaciones de esta tesis doctoral se pueden dividir en dos líneas. Desde el punto de vista metodológico, se aporta un enfoque que, por un lado, identifique los eventos climáticos extremos que han impactado en las actividades agropecuarias, para, a continuación, evaluar las pérdidas monetarias que dichos eventos han generado. Desde el punto de vista empírico, se analizan los impactos en dos actividades concretas muy diferentes entre sí: la ganadería ovina cárnica extensiva en Extremadura y la producción de soja en Argentina. Además, se aportan estrategias de adaptación para cada una de estas actividades productivas.

En el capítulo 1 se analiza el caso concreto de la ganadería ovina cárnica en extensivo en Extremadura. Tras el estudio de la actividad ganadera, se determina que el impacto de los eventos extremos se produce de forma indirecta a través del aumento de la suplementación alimenticia. De los resultados de la evaluación del impacto en dos explotaciones representativas -una en régimen de propiedad y otra arrendatario- en los años con déficit extremo de precipitaciones se concluye que: las explotaciones en régimen de propiedad reducen sus beneficios un 45% y las explotaciones en régimen arrendatario llegan a tener pérdidas. Estos resultados ponen de manifiesto la vulnerabilidad de la actividad ante una escasez de precipitaciones y la necesidad de generar herramientas de adaptación para las explotaciones. Tras un análisis de las diferentes herramientas disponibles, se puede concluir que, a pesar de que la suplementación alimenticia es la vía de impacto, aun no existen vías de adaptación al riesgo de precios de esta. Utilizando los contratos de futuros de los componentes del pienso, se realiza una cobertura cruzada del precio del pienso que permite reducir hasta el 65.3% de la volatilidad de su precio. Por último, se valida la eficacia de la herramienta financiera poniéndola en práctica en una explotación representativa.

El capítulo 2 analiza el caso de la producción de soja y maíz en Argentina. Al ser ambas commodities cultivos que se desarrollan sin riego, en este caso el impacto se produce de forma directa. Los resultados muestran que las sequías provocan una pérdida de producción de soja y maíz que tiene como consecuencia un efecto a escala macroeconómica. Las pérdidas producidas por sequía en el periodo analizado supusieron un 57.45% de las reservas internacionales. Sin embargo, aún no existe una herramienta que mitigue el impacto de los eventos climáticos extremos. Se hace uso de un modelo de sensibilidad de la soja a las precipitaciones, y de la proyección de precipitaciones de 115 modelos climáticos de la base de datos de Copernicus para proyectar la producción de soja con un objetivo de generar una estrategia de planificación macrofiscal. De esta proyección se determina que las pérdidas futuras duplican a las de la serie histórica por un aumento de la frecuencia de eventos extremos.

Para finalizar, cabe destacar que esta tesis es un punto de partida para estudios que desarrollen evaluaciones de impacto de eventos climáticos extremos. De hecho, se pone de manifiesto la capacidad de los modelos utilizados para estimar pérdidas monetarias que permiten diseñar herramientas de adaptación.

Abstract

Climate change, being a global phenomenon, has consequences that are manifested at the local level. One of its main consequences is the increase in the frequency and intensity of extreme climate events (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019). This doctoral thesis aims to examine how such events have economically affected two very different agricultural activities, one at the microeconomic level and the other at the macroeconomic level. An identification and economic valuation of past impacts is carried out to generate adaptation strategies for future extreme weather events.

In recent years, there has been an increase in the amount of literature examining the economic implications of climate change. However, there is still a paucity of research that provides a robust economic valuation of the impact of extreme climate events on the cash flow of agriculture and livestock activities. This would allow, on the one hand, to design adaptation strategies for future events, and, on the other hand, to compare the impact over time and between different geographical regions.

The contributions of this doctoral thesis can be divided into two lines. From a methodological point of view, it provides an approach that, on the one hand, identifies the extreme weather events that have had an impact on agricultural and livestock activities, and then evaluates the monetary losses that these events have generated. From an empirical point of view, the impacts on two very different specific activities are analysed: extensive sheep farming in Extremadura and soybean production in Argentina. In addition, adaptation strategies are provided for each of the productive activities.

Chapter 1 analyses the specific case of extensive meat sheep farming in Extremadura. Once the livestock activity has been studied, it is determined that the impact of extreme events is produced indirectly through increased feed supplementation. From the results of the impact assessment in two representative farms -one owned and one rented- it can be concluded that, in years with extreme rainfall deficit, the owned farms reduce their profits by 45% and the rented farms make losses. These results highlight the vulnerability of the activity in the event of low rainfall and the need to generate adaptation tools for farms. After an analysis of the different tools available, it can be concluded that, although feed supplementation is the way to have an impact, there are still no ways of adapting to the price risk of feed supplementation. By using futures contracts on feed components, a cross hedging of the feed price is carried out, which makes it possible to reduce up to 65.3% of the volatility of its price. Finally, the effectiveness of the financial tool is validated by putting it into practice on a representative farm.

Chapter 2 analyses the case of soybean and maize production in Argentina. As both commodities are non-irrigated crops, in this case the impact is direct. The results show that droughts cause a loss of soybean and maize production that has a macroeconomic effect. Drought losses in the period analysed accounted for 57.45% of international reserves. However, there is still no tool to mitigate the impact of extreme weather events. A soybean rainfall sensitivity model and rainfall projections from 115 climate models in the Copernicus database are used to project soybean production to generate a macro-

fiscal planning strategy. From this projection it is determined that future losses are double those of the historical series due to an increase in the frequency of extreme events.

Finally, it should be noted that this thesis is a starting point for studies to develop impact valuation of extreme climate events. In fact, it shows the capacity of the models used to estimate monetary losses that allow the design of adaptation tools.

Índice

Agradecimientos.....	2
Resumen.....	4
Abstract.....	6
Índice de cuadros.....	11
Índice de figuras.....	13
Introducción.....	14
Definición del tema.....	14
Formulación del problema.....	14
Aspectos formales y metodológicos.....	16
Estructura de trabajo.....	17
Capítulo 1. Impacto microeconómico de los eventos climáticos extremos: el caso de la producción de cordero en Extremadura.....	18
1.1. Identificación y evaluación de los eventos climáticos extremos en la ganadería ovina extensiva.....	19
1.1.1. Estado de la cuestión.....	20
1.1.1.1. Ciclo productivo y estructura del ovino de carne en Extremadura.....	20
1.1.1.2. Caracterización de las técnicas disponibles para calcular el impacto climático en la ganadería.....	21
1.1.2. Materiales y métodos.....	25
1.1.2.1. Los datos.....	25
1.1.2.2. Metodología.....	26
1.1.2.2.1. El modelo de identificación de casos extremos.....	27
1.1.2.2.2. Extrapolación.....	29
1.1.3. Resultados.....	30
1.1.4. Conclusiones.....	35
1.2. Diseño e implementación de una herramienta financiera de adaptación al riesgo de precios del pienso.....	37
1.2.1. Estado de la cuestión.....	38
1.2.1.1. La gestión del riesgo por parte de las explotaciones ganaderas en extensivo....	38
1.2.1.2. Alimentación y mercados de futuros.....	39
1.2.1.3. Cobertura y cobertura cruzada.....	41
1.2.1.4. Técnicas de cobertura cruzada.....	44
1.2.2. Materiales y métodos.....	47
1.2.2.1. Materiales.....	47
1.2.2.2. Metodología.....	48
1.2.3. Resultados.....	52

1.2.3.1. Modelo más eficiente para la cobertura.....	52
1.2.3.2. Puesta en práctica de la cobertura cruzada.....	58
1.2.4. Conclusiones.....	61
1.3. Síntesis del capítulo.....	63
Capítulo 2. Impacto macroeconómico de los eventos climáticos extremos: el caso de la	
producción de soja y maíz en Argentina.....	65
2.1. Identificación y evaluación de los eventos climáticos extremos en la en la producción soja	
y maíz en Argentina.....	67
2.1.1. Estado de la cuestión.....	68
2.1.2. Materiales y métodos.....	72
2.1.2.1. Materiales.....	72
2.1.2.2. Metodología.....	74
2.1.3. Resultados.....	78
2.1.4. Conclusiones.....	88
2.2. La proyección de soja como herramienta de gestión del riesgo climático.....	90
2.2.1. Estado de la cuestión.....	91
2.2.1.1. La gestión soberana del riesgo.....	91
2.2.1.2. Modelos de proyección de cosechas.....	92
2.2.2. Materiales y métodos.....	95
2.2.2.1. Materiales.....	95
2.2.2.1.1. Datos agrícolas.....	95
2.2.2.1.2. Datos pluviométricos históricos.....	95
2.2.2.1.3. Datos pluviométricos futuros.....	97
2.2.2.2. Metodología.....	98
2.2.2.2.1. Prueba de regresión parcial.....	98
2.2.2.2.2. Prueba de capacidad de predicción del modelo: Validación cruzada Leave-	
One-Out.....	99
2.2.2.2.3. Análisis de riesgos.....	100
2.2.3. Resultados.....	103
2.2.3.1. Modelo óptimo.....	103
2.2.3.2. Producción prevista.....	105
2.2.3.3. Análisis de riesgos.....	106
2.2.3.4. Pérdidas y valoración monetaria.....	109
2.2.4. Conclusiones.....	112
2.3. Síntesis del capítulo.....	114
Conclusiones finales.....	116
Bibliografía.....	119

Apéndice	141
Apéndice 1: Valores de los parámetros estimados por cultivo y provincia.....	141
Apéndice 2: Correlación parcial de cuatro regresores.....	148
Apéndice 3: Análisis de residuos.....	149
Apéndice 4: Elección de la metodología de distribución de los modelos en los grupos.....	150
Apéndice 5: Clasificación de los modelos en grupos y asociaciones con el riesgo de fenómenos extremos.....	151
Apéndice 6. Casos por debajo de una desviación típica en cada modelo.....	152
Apéndice 7. Valoración de pérdidas extremas de producción por escenario y por modelo, pérdidas en USD (millones).....	153

Índice de cuadros

Cuadro 1. Caracterizaciones de la precipitación para Extremadura	31
Cuadro 2. Resumen de los resultados.	33
Cuadro 3. Composición de los piensos para ovejas	40
Cuadro 4. Mercados dónde se encuentran los contratos de futuros que componen el pienso..	40
Cuadro 5. Características de los distintos contratos de futuros de componentes de piensos	41
Cuadro 6. Prueba de Dickey-Fuller aumentada (constante y tendencia)	53
Cuadro 7. Regresiones de modelos semanales, mensuales y trimestrales.....	54
Cuadro 8. Modelo de regresión trimestral y semestral en el mercado de futuros de Chicago ...	55
Cuadro 9. Cobertura directa utilizando un modelo de regresión bianual con cada commodity en el mercado de futuros de Chicago.....	56
Cuadro 10. Proporción de contratos de futuros sobre commodities necesarios para cubrir una tonelada de pienso.	56
Cuadro 11. Eficacia de la cobertura con contratos completos	57
Cuadro 12. Gastos previstos en piensos para una explotación representativa en 2012	58
Cuadro 13. Ejecución de la cobertura cruzada semestral del pienso con futuros CME en 2012.	59
Cuadro 14. Balance de cobertura cruzada para el año 2012	59
Cuadro 15. Aplicación de la cobertura cruzada	60
Cuadro 16. Resumen de los modelos de impacto en la actividad agraria usados en la literatura	71
Cuadro 17. Departamentos con desviaciones negativas extremas en los rendimientos en porcentaje del total de departamentos por provincia.....	78
Cuadro 18. Resumen de zonas y cultivos afectados y niveles de sequía	80
Cuadro 19. Valor de las pérdidas totales de ingresos debidas a bajada de rendimiento por provincia en casos de sequía en USD corrientes	81
Cuadro 20. Valor de las pérdidas totales de ingresos por disminución de superficie por provincia en caso de sequía en USD corrientes.....	81
Cuadro 21. Pérdidas totales de ingresos por provincia en actual USD corrientes por evento de sequía	84
Cuadro 22. Pérdidas totales en USD corrientes y pérdidas relativas en porcentaje de la producción de referencia	85
Cuadro 23. Pérdidas estimadas en millones de USD e indicadores de comercio exterior	86
Cuadro 24. Pérdidas estimadas actuales y ajustadas.....	86
Cuadro 25. Pérdidas totales en USD en 2021 por eventos de sequía.....	87
Cuadro 26. Número de modelos para cada escenario socioeconómico (SSP).....	97
Cuadro 27. Combinaciones de estaciones meteorológicas	99
Cuadro 28. Mejores combinaciones de tres estaciones meteorológicas.....	103
Cuadro 29. Resultados de la prueba de capacidad de previsión del modelo.....	103

Cuadro 30. Modelo de sensibilidad óptimo para el índice de rendimiento de la soja en Argentina	104
Cuadro 31. Valores medio, máximo y mínimo de la producción prevista por escenario en toneladas (millones)	105
Cuadro 32. Distribución de los modelos por escenario	107
Cuadro 33. Producción media por escenario y grupo en toneladas (millones de toneladas)....	109
Cuadro 34. Descripción de los fenómenos extremos previstos por escenario	110
Cuadro 35. Descripción de las pérdidas futuras en eventos extremos por escenario	110
Cuadro A.1: Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Buenos Aires	141
Cuadro A.2. Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Córdoba	144
Cuadro A.3. Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Chaco	145
Cuadro A.4. Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Entre Ríos....	146
Cuadro A.5. Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Santa Fe	147
Cuadro A.6. Mejores combinaciones de cuatro estaciones meteorológicas	148
Cuadro A.7. Prueba de Jarque-Bera para la distribución de normalidad	149
Cuadro A.8 Prueba de heteroscedasticidad: Breusch-Pagan-Godfrey.....	149
Cuadro A.9. Prueba de correlación serial de Breusch-Godfrey.....	149
Cuadro A.10. Distribución de los modelos por metodología y escenario en los tres grupos.....	150
Cuadro A.11. Casos por debajo de una desviación típica en cada modelo	152
Cuadro A.12. Escenario 1 (SSP 1.26).....	153
Cuadro A.13. Escenario 2 (SSP 2.45).....	154
Cuadro A.14. Escenario 3 (SSP 3.70).....	155
Cuadro A.15. Escenario 5 (SSP 5.85).....	156

Índice de figuras

Figura 1. Distribución geográfica de las explotaciones.....	25
Figura 2. Coste de la suplementación alimenticia en euros por año.....	30
Figura 3 Índices de precios y cantidades, 2008=100.....	30
Figura 4. El índice de alimentación y el umbral de una desviación típica.....	31
Figura 5. Precipitación acumulada de 12 meses y umbral de una desviación típica para la Estación de Don Benito.....	32
Figura 6. Valoración de los costes incrementales en alimentación complementaria.....	32
Figura 7. Beneficios en euros anuales por explotación.....	34
Figura 8. Distribución porcentual del gasto total en el periodo 2008-2017.....	39
Figura 9. Precio local de los piensos y precios internacionales de los principales componentes. En euros por tonelada.....	48
Figura 10. Variación logarítmica de los precios.....	52
Figura 11. Precios de alimentación modelizados y observados.....	57
Figura 12. Área de estudio para la soja y maíz en Argentina.....	72
Figura 13. Evolución histórica de los rendimientos, la producción, la superficie implantada y el precio internacional de la soja y el maíz.....	74
Figura 14. Relación entre eventos de sequías y casos de desviación extremo de los rindes.....	79
Figura 15. Departamentos con pérdidas de soja.....	82
Figura 16. Departamentos con pérdidas de maíz.....	83
Figura 17. Superficie utilizada para proyectar la soja en Argentina.....	95
Figura 18. Estaciones meteorológicas en la zona de producción de soja.....	96
Figura 19. Precipitaciones del periodo diciembre-enero-febrero de las 38 estaciones meteorológicas.....	96
Figura 20. Niveles de CO2 por escenario de SSP en América Latina.....	97
Figura 21. Localización de las estaciones meteorológicas óptimas en la zona de estudio.....	104
Figura 22. Producción de soja proyectada por los modelos Copernicus.....	106
Figura 23. Distribución de los modelos analizados.....	106
Figura A.1. Niveles de producción previstos por grupo y escenario con límite de desviación estándar en millones de toneladas.....	151

Introducción

Definición del tema

La investigación contenida en esta tesis doctoral se centró en el estudio del impacto económico producido por eventos climáticos extremos para dos actividades muy diferentes: una tiene un impacto a escala microeconómica y la otra a escala macroeconómica. Se ha efectuado una identificación y evaluación del impacto pasado, con el objetivo de proveer estrategias de adaptación ante nuevos eventos climáticos extremos.

En primer lugar, para el ovino extensivo en Extremadura se implementó un modelo de impacto indirecto para realizar una evaluación a nivel de explotación ganadera de las pérdidas económicas generadas por el déficit de precipitaciones sobre el flujo de caja. A partir de los resultados, se diseñó una herramienta financiera que permite reducir el riesgo que sufren las explotaciones ganaderas de ovino.

Para la soja en Argentina se aplicó un modelo de impacto directo para realizar una evaluación de las pérdidas por las sequías en el país, proporcionando valores monetarios comparables con otras macromagnitudes, como las reservas internacionales. Además, se analizó la producción futura de soja como estrategia para generar una planificación macrofiscal sostenible para el país latinoamericano.

Formulación del problema

El cambio climático es un fenómeno global que tiene como consecuencia impactos negativos también incluso a nivel local. El calentamiento global asociado a la actividad del ser humano llegó a ser en 2017 del 0.87°C respecto a niveles preindustriales (1850-1900). De seguir la tendencia actual de emisiones de CO₂, se podría llegar a un aumento de 2°C entre 2030 y 2052 según recoge el informe elaborado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2018). Se prevé que una de sus principales consecuencias es un aumento de la intensidad y la frecuencia de los eventos climáticos extremos que impactan de forma localizada: sequías, olas de calor, precipitaciones extremas o tormentas (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2019).

Desde la publicación del primer informe relevante elaborado por un economista sobre cambio climático, *'Review on the Economics of Climate Change'*, conocido como el *'Informe Stern'* (Stern, 2006), se ha incrementado el interés por aplicar la ciencia económica para analizar las consecuencias del cambio climático. El informe centra su trabajo en analizar cómo impactará el aumento del CO₂ en las diferentes proyecciones disponibles en el futuro y las posibles consecuencias que se producirán si no se toman medidas de adaptación a nivel global. Sin embargo, no se centra en impactos económicos de eventos climáticos extremos.

Uno de los sectores que se prevé más vulnerables al cambio climático es el agropecuario, que, además, tiene grandes repercusiones en la provisión de alimentos (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2022), de inputs a otros sectores (Loizou *et al.* 2019), y del mantenimiento de renta en regiones marginales (Herrera, 2020). En las últimas décadas, la literatura especializada en el estudio del impacto de eventos climáticos extremos en este sector se ha dividido en dos vertientes: por un lado, los trabajos que desarrollan modelos a escala de parcela con técnicas

agronómicas a través de la simulación de rendimientos con variables climáticas futuras (Motha, 2011; Moore y Ghahramani, 2013; Merlos *et al.* 2015, o Mimic *et al.*, 2022 entre otros). En el otro extremo, trabajos que utilizan modelos procedentes de la ciencia económica, como por ejemplo los que utilizan el enfoque de equilibrio general estocástico para analizar la variación de la producción de cada sector de la economía de un país. Para ello se utilizan variables climáticas proyectadas en distintos escenarios de emisiones de CO2 en el futuro (Banco Interamericano de Desarrollo, 2014; Juana *et al.*, 2014; Ziolkowska, 2016; Corfield, 2020 o Ferreira-Filho *et al.*, 2021 entre otros). Sin embargo, existe una escasez de trabajos que evalúen el impacto económico de eventos climáticos extremos pasados concretos para aportar magnitudes monetarias comparables a través de flujos de caja que permitan diseñar estrategias de adaptación. Este trabajo tiene el objetivo de cubrir una parte de ese vacío, al efectuar un análisis del impacto de eventos climáticos extremos pasados a través de modelos robustos, con el fin de generar estrategias orientadas a la adaptación. Además, existen otras razones que justifican este estudio. Entre ellas, se pueden encontrar las siguientes: (i) conocer los daños producidos por eventos climáticos extremos permite identificar los agentes más vulnerables y diseñar estrategias que reduzcan los riesgos por los que se ven afectados; (ii) los eventos climáticos extremos pueden ser impredecibles y devastadores, conocer el impacto de estos eventos en el pasado y cómo afectan a las comunidades permite generar una planificación para responder a emergencias en el futuro; (iii) por último, si una política pública o una estrategia de adaptación privada no logra reducir el impacto, conocer la magnitud del mismo permite evaluarla para poder mejorarla.

Para alcanzar los objetivos de esta tesis, se ha realizado el estudio del impacto de eventos climáticos extremos para dos casos diferentes: a lo largo del primer capítulo se estudiará el ovino cárnico extensivo en Extremadura, en el capítulo dos se analizará la soja y el maíz en Argentina. El contexto en el que se desarrollan ambas actividades justifica su elección como casos de estudio, como se presenta a continuación:

- Extremadura es la segunda Comunidad Autónoma de España donde más importancia tiene el sector primario, con un 8.8% de su producción final en 2020 (INE, 2022). Dentro del sector primario, la principal actividad agraria es el secano, que representa el 73.5% de las hectáreas ocupadas. No se ha estudiado en profundidad porque existe una gran variedad de clases de cultivo de secano (trigo, maíz, avena, cebada, viñedos, olivares, ...) lo que dificulta el análisis. Además, las tierras van cambiando su cultivo cada campaña por practicarse el barbecho, lo que no permite realizar un estudio con una dimensión temporal adecuada. Por otro lado, la principal actividad ganadera en la región es la ovina, representando el 76% de las cabezas de ganado de la región (Instituto de Estadística de Extremadura [IEEx] 2022). A diferencia del secano, sí se ha estudiado esta actividad, en primer lugar, por la importancia que tiene en volumen de producción: Extremadura es la primera productora de España de carne de ovino (Dirección General de Productos y Mercados Agrarios, 2020), y el país es el primer productor dentro de la Unión Europea (Dirección General de Productos y Mercados Agrarios, 2020). En segundo lugar, se trata de una actividad que aún hoy se desarrolla de forma homogénea en extensivo, lo que hace que los resultados se puedan extrapolar a todas las explotaciones de la región. Además, es una actividad que, aunque destaca en las comarcas de la Serena y Siberia, Los Llanos de Trujillo y La Sierra de San Pedro, se desarrolla a lo largo de todo el

territorio extremeño, ocupando a una población altamente dependiente de la misma.

- En relación con la soja, Argentina es la tercera productora mundial tras Estados Unidos y Brasil. Produce el 13% del total mundial (USDA, 2023). Además, Argentina es un país muy dependiente de la actividad. El modelo productivo de la soja argentina está orientado a la exportación: entre los años 2003 y 2020 las exportaciones de la commodity variaron entre el 19% y el 31% (en relación al valor exportado en el año 2015). En este periodo, en promedio el sector obtuvo un tercio de las divisas del país generadas por exportaciones (Thomasz y Stancio, 2021). Además, la singularidad de la commodity descansa en su contribución al fisco nacional por los derechos de exportación. Entre 2003 y 2020 las exportaciones de soja aportaron en promedio un 4% de la recaudación total nacional (Thomasz y Stancio, 2021). Con esto, valorar las pérdidas es necesario, en primer lugar, porque es un cultivo altamente dependiente de agua ya que se desarrolla sin riego (Sentelhas *et al.*, 2015; Sgroi *et al.*, 2021), y, en segundo lugar, porque su producción incide de forma directa en el crecimiento económico de Argentina (Pinzón *et al.*, 2019).

Además, aunque el centro de la investigación será la soja, también se evaluará el impacto de las sequías para el maíz en Argentina. Las razones para incorporar esta commodity al análisis son dos: (i) se ha producido un gran incremento de la producción en los últimos años (en la última década el maíz se ha incrementado en un 84%) (ii) tiene el mismo periodo crítico de crecimiento que la soja, lo que hace que el análisis del impacto económico de los eventos extremos sea parejo.

Aspectos formales y metodológicos.

En relación con el enfoque metodológico utilizado en esta tesis, se realizó, en primer lugar, una identificación y evaluación del impacto de los eventos extremos, que permitió, posteriormente, calcular estrategias de adaptación para cada caso de estudio.

En la identificación y adaptación se utilizó un modelo de impactos a través de varios pasos: (i) se analizó la actividad productiva con el fin de determinar en qué momento se produce el impacto de los eventos extremos; (ii) se analizó la conexión entre los eventos extremos y la actividad productiva, identificando los impactos en la misma; (iii) se cuantificó el impacto de los eventos extremos a través del análisis de la evolución del flujo de fondo de cada actividad, proporcionando valores monetarios comparables a nivel longitudinal y transversal.

A pesar de usar una metodología de modelos de impacto, al tratarse de dos actividades diferentes, a continuación, se concreta la metodología utilizada en cada una de ellas:

- Para el caso del ovino extensivo en Extremadura se utilizó un modelo de impacto indirecto. Una vez analizado el sector, se entendió que la productividad del ovino extensivo no depende directamente de las precipitaciones. En caso de sequía, el impacto inmediato es la pérdida de calidad y cantidad de pasto. En este contexto, los ganaderos se adaptan a la sequía aumentando la suplementación alimenticia con el objetivo de mantener la productividad de la actividad. Por tanto, el impacto es indirecto a través de un aumento del costo en pienso.
- En la soja en Argentina se utilizó un modelo de impacto directo. En este caso, el cultivo se desarrolla sin riego, por tanto, las precipitaciones son el principal

insumo de crecimiento. Con esto, en caso de sequía, se producen pérdidas en el sector porque la producción de soja disminuye.

El desarrollo de las estrategias de adaptación se realizó, en primer lugar, un estudio que indaga sobre cuáles son las estrategias de las que se dispone en la actualidad para que el sector se adapte al impacto de los eventos extremos. En segundo lugar, se utilizaron las herramientas disponibles en el mercado con el fin de desarrollar la estrategia que mejor se adapte en cada caso.

Por otro lado, cada uno de los estudios tiene una dimensión espacial y temporal que se detalla a continuación.

El estudio del ovino extensivo en Extremadura se refiere al análisis de dos variedades de granja típica representativa para Extremadura para el periodo 2008 – 2017: una en régimen de propiedad por el ganadero, y otra en régimen de arrendatario (REGRANTI, 2018). El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación a través de la Red Nacional de Granjas Típicas (REGRANTI) desarrolla, a través de la metodología *Technology Impact and Policy Impact Calculations* (TIPI-CAL), resultados del análisis financiero de una granja representativa para las principales áreas productoras de España. En el caso de Extremadura se desarrollan dos modelos de granja típica: el régimen de propiedad (1000-EXT) y el régimen de arrendatario (600-EXT). Los cálculos se basan, por un lado, en una explotación representativa de 1.437 cabezas de ovino y 483 hectáreas, en el caso del propietario, y, por otro, en una explotación con 578 cabezas y con una extensión de 170 hectáreas, en el caso del arrendatario.

El análisis de la soja y maíz en Argentina se desarrolla a nivel departamental entre la campaña 2000/01 y 2019/2020, aunque los resultados finales del estudio se obtienen para el conjunto de toda el área cosechada de cada commodity. Los departamentos son subdivisiones del territorio de segundo nivel de las provincias argentinas, que se caracterizan por no tener gobierno propio. Tienen un objetivo de división catastral y estadística. En este trabajo se analizaron un total de 183 departamentos, con una media de 4,172.85 km². A efectos comparativos, el promedio de la extensión de las comarcas de Extremadura es de 1,556.68 km². Por tanto, un departamento argentino tiene algo más del doble de extensión que una comarca extremeña.

Estructura de trabajo

El trabajo se organiza en dos bloques principales (coincidentes con los capítulos 2 y 3).

El primer bloque se estudiará el impacto de la sequía sobre el ovino extensivo en Extremadura.

En el segundo bloque se abordará el caso de la soja y maíz en Argentina.

El flujo de trabajo de ambas partes será el mismo: en un primer momento se diseñará un marco teórico para determinar la mejor forma de identificar y evaluar las pérdidas para cada caso. A continuación, se llevará a cabo el análisis del impacto de los eventos climáticos extremos. Los resultados servirán para desarrollar la segunda parte del capítulo: el diseño de una estrategia de adaptación. Para ello, en primer lugar, se establecerá un marco teórico sobre las estrategias existentes en la literatura, eligiendo la mejor para la actividad productiva estudiada. A partir de ellas, se desarrollará una estrategia de adaptación que se ajuste a las especificidades de cada caso de estudio.

Capítulo 1. Impacto microeconómico de los eventos climáticos extremos: el caso de la producción de cordero en Extremadura.

En este capítulo se realizó un análisis del sector ovino en extensivo en Extremadura en un contexto de déficit de precipitaciones: (i) se identificaron las sequías que impactan en el sector para poder evaluar las pérdidas por las mismas, (ii) se diseñó una herramienta financiera de adaptación. El objetivo del capítulo es mostrar que los eventos climáticos extremos determinan el resultado de ejercicio del flujo de caja de las explotaciones ganadera. Además, se persigue el objetivo del análisis de las herramientas de adaptación disponibles, para el diseño de una que maximice la utilidad de los ganaderos.

La importancia del análisis del sector ganadero extensivo en Extremadura es clave para el trabajo de esta tesis, como se presenta a continuación.

En primer lugar, por su dependencia del clima, ya que el sector está muy influenciado por la escasez de agua por sus efectos sobre la cantidad y calidad de los pastos para alimentación (Díaz *et al.*, 2018). La evaluación y adaptación es importante no sólo porque el Mediterráneo es una de las regiones más áridas del mundo, sino también por las previsiones climáticas futuras para España. Según la Agencia Estatal de Meteorología, el 87% de las proyecciones muestran una disminución de los niveles anuales de precipitación (Amblar *et al.*, 2017). En cuanto a los niveles de precipitación de primavera, los más importantes para el crecimiento de los pastos naturales, las proyecciones muestran una mayor proporción de descensos en comparación con las precipitaciones de invierno para casi todas las regiones de España. En particular, Extremadura presenta el tercer mayor descenso después de Andalucía y Murcia (Amblar *et al.*, 2017).

En segundo lugar, por su relevancia en la región: Extremadura cuenta con la mayor concentración de ganado ovino del país (con el 22% del total) (Subdirección General de Productos Ganaderos, 2018), siendo además España el principal productor de carne de ovino de la Unión Europea (el 27,5% del total) (Eurostat, 2022). Además, el caso de Extremadura no se trata de una actividad completamente anacrónica y marginal. Por el contrario, existe una coexistencia de productores tradicionales con empresas que invierten en investigación y desarrollo, con un producto orientado a la exportación de mercados de alta calidad, como la carne halal y kosher (Extremadura21, 2017).

De la ganadería extensiva dependen los medios de vida, el ahorro y los mecanismos de gestión de riesgos de miles de personas, así como innumerables servicios ecosistémicos y numerosas economías a pequeña escala (Herrera, 2020). Particularmente el área de estudio destaca por tener un 28,22% de las empresas en sector agrícola y ganadero, lo que supone que el 25% de los trabajadores lo hacen el sector primario (Red Extremeña de Desarrollo Rural [REDEX] 2022).

Esta combinación de presiones demográficas y la necesidad de ampliar la producción de alimentos sostenibles y de alta calidad en el contexto del cambio climático plantea la primera cuestión del capítulo, dirigida a estudiar cómo afecta actualmente el clima a la economía del sector ganadero.

La respuesta a esta pregunta dará paso a la segunda pregunta de investigación del capítulo: el diseño de estrategias de adaptación. En la actualidad los ganaderos cuentan con diversas estrategias de adaptación ante el cambio climático implantadas y conocidas por el sector (Pateiro *et al.*, 2020). El objetivo radica en elaborar una herramienta financiera de adaptación al riesgo que maximice la utilidad de los ganaderos y que sea eficaz, pero que aún no haya sido implantada hoy en este sector.

1.1. Identificación y evaluación de los eventos climáticos extremos en la ganadería ovina extensiva.¹

Este primer apartado tiene el objetivo de identificar los casos de los eventos de déficit de precipitaciones para evaluar su coste monetario en la producción de cordero cárnico, considerando las singularidades de la actividad en Extremadura. Para ello, en primer lugar, se desarrolló un marco teórico para contextualizar el caso de estudio de este capítulo: la ganadería extensiva ovina en la región. Después se definieron las técnicas usadas en la literatura para calcular el impacto económico del riesgo climático sobre el ganado. Por último, se utilizó un modelo de impactos para identificar los eventos climáticos y para proporcionar órdenes de magnitud de pérdidas monetarias ante eventos climáticos extremos.

¹ Los resultados de este capítulo fueron publicados en el siguiente artículo:

Thomasz, E., Pérez-Franco, I., y García-García, A. (2020). The Economic Impact of Climate Risk on Extensive Livestock: The Case of Lamb Production in Extremadura, Spain. *Sustainability*, 12(18), 7254. MDPI AG. DOI: 10.3390/su12187254

1.1.1. Estado de la cuestión

1.1.1.1. Ciclo productivo y estructura del ovino de carne en Extremadura

No existe una definición única de ganadería extensiva: se enumeran al menos diez definiciones para el caso de las explotaciones en España (Ruiz *et al.*, 2017). A través de una encuesta, los autores llegan a la siguiente definición:

"la ganadería extensiva aprovecha los recursos naturales del territorio, con un bajo uso de insumos externos y principalmente a través del pastoreo. En general, se caracteriza por el uso de razas ganaderas adaptadas al territorio, la utilización de pastos diversos en función de su disponibilidad espacial y temporal, y el mantenimiento del medio ambiente" Ruiz *et al.* (2017) (p. 25).

En el caso de Extremadura, la actividad se desarrolla en campo abierto y en grandes extensiones de terreno. Sólo el engorde de los corderos se realiza en entornos controlados en cebaderos. El ciclo reproductivo se ha modificado genéticamente para que las ovejas puedan quedar preñadas y parir en cualquier época del año, con el fin de distribuir los partos de forma más homogénea en el tiempo y controlar así el flujo de corderos hacia el cebadero.

Se fijó un nivel de productividad de las ovejas de la muestra analizada en 3 partos dentro de un período de 2 años. Para alcanzar el objetivo de productividad, el consumo de pastos naturales se complementó con piensos. Una menor cantidad o calidad de pastos implica mayores costes de suplementación.

El esquema de suplementación implica que entre el 75% y el 90% de la estructura de costes de producción está asociada a la alimentación de la madre. El alimento adquirido consiste en concentrado (pienso compuesto de maíz, soja, trigo, girasol, cebada y compuesto proteico) y volumen (heno y paja). Según las entrevistas con especialistas, la ración ideal en teoría es un 60% de ración de volumen y un 40% de concentrado, aunque en la práctica se da un 50% para ambos.

En cuanto al impacto climático, los riesgos más importantes que afectan a la actividad en la región son la escasez de precipitaciones y las sequías, fenómenos que afectan negativamente a la cantidad y calidad de los pastos naturales. Durante estas escaseces, la fertilidad de las madres podría disminuir por ausencia de cantidad o calidad de pasto. Como se persigue un objetivo de productividad, las ovejas seguirán preñadas y el número de corderos no disminuirá, pero a un coste más elevado: las necesidades proteínicas y energéticas se estabilizan mediante la suplementación alimentaria. En algunos casos, también supone aumentar el gasto en tratamientos hormonales.

Dada la estructura productiva, esos eventos climáticos impactan más en la estructura de costos del sector que en generar una disminución de la productividad, es por ello que es un impacto indirecto: La variable crítica es la menor producción de pasto natural, que se traduce en mayores compras de alimento balanceado (pienso) y, en menor medida, en un aumento de los tratamientos de fertilidad. En este sentido, las explotaciones no solo

se enfrentan al riesgo climático, sino que también al riesgo de precios del pienso, esto hace que se produzca una oportunidad a la hora de desarrollar una estrategia de adaptación.

Una vez conocidas las características del sector, en el siguiente apartado se presentará las diferentes técnicas usadas para estimar las pérdidas por los eventos climáticos extremos, para poder desarrollar la que más se adapte a este caso de estudio.

1.1.1.2. Caracterización de las técnicas disponibles para calcular el impacto climático en la ganadería

En la bibliografía se pueden encontrar diferentes enfoques para estimar el impacto del cambio climático sobre el ganado.

Escarcha *et al.* (2018) presenta una revisión bibliográfica en la que se llega a la conclusión de que existen relativamente pocos estudios sobre las repercusiones en la ganadería en comparación con los cultivos y que se desconoce la magnitud de las repercusiones del cambio climático; también sugiere que, debido a la heterogeneidad de los sistemas de producción, la variedad de zonas agroecológicas y los distintos objetivos de producción, la recopilación de datos es un reto y las pruebas siguen siendo fragmentarias.

Con el fin de mostrar la diversidad del problema y recopilar pruebas para diseñar y justificar la metodología del estudio, en esta sección se resumen distintos enfoques para estimar el impacto del cambio climático sobre el ganado.

En Guidry y Pruitt (2012) se utilizaron dos métodos para valorar los efectos de las catástrofes naturales en el ganado: la reducción de la producción de heno y la reducción del potencial de pastoreo. El impacto económico de la reducción de la producción de heno se valoró mediante un método similar al utilizado habitualmente para estimar los daños en los cultivos. Las pérdidas económicas asociadas a la reducción del potencial de pastoreo se calcularon utilizando: el número de acres y días en que el pastoreo se vio afectado; las tasas de carga ganadera típicas (es decir, número/tamaño de los animales por acre); el consumo de forrajes por vaca; y los precios del heno.

Moore y Ghahramani (2013) se evaluaron los efectos del cambio climático futuro sobre los pastos y la productividad ganadera en Australia. Los sistemas de producción ganadera de Australia se basan en pastos de secano y son muy sensibles a la variabilidad climática. El estudio utilizó los modelos de simulación GRAZPLAN (de uso común en Australia) para evaluar los impactos del cambio climático (clima 1970-99, 2030, 2050 y 2070). El estudio evaluó las repercusiones en la producción primaria neta aérea (PPNA) como indicador de los pastos, que se define como la cantidad de biomasa vegetal aérea o carbono acumulado durante un periodo de tiempo específico. Las estimaciones de la PPA se utilizan para determinar la disponibilidad de forraje y la carga ganadera. La sensibilidad de la ANPP a los cambios en las precipitaciones fue mayor (osciló entre 0,4 y 1,7) que a los aumentos de temperatura y CO₂. Además, los modelos climáticos prevén que el periodo seco del verano se alargará, lo que agravará el riesgo de erosión debido a la disminución de la ANPP. El estudio midió las pérdidas financieras en función de los

ingresos brutos por hectárea y los beneficios de explotación por hectárea. Según las proyecciones, los beneficios de explotación disminuirán en mayor medida en las zonas más secas.

Ziolkowska (2016) utiliza el modelo de matriz de insumo-producto (IO) y contabilidad social IMPLAN (IMpact analysis for PLANning) para estimar las repercusiones de la sequía en la ganadería y la agricultura y los efectos directos, indirectos e inducidos en la economía de Texas. El modelo se basa en datos estadísticos relacionados con la economía empresarial estadounidense. El estudio se centró en cuatro medidas de la actividad económica durante la sequía de 2011: producción de la industria, valor añadido, ingresos laborales y empleo. Un hallazgo importante fue la disminución del empleo como consecuencia de la sequía.

Juana *et al.* (2014) utiliza un modelo de Equilibrio General Computable para investigar el impacto de la sequía en toda la economía de Botsuana, en particular el impacto socioeconómico de la sequía en la producción sectorial, el pago de factores y el bienestar de los hogares.

Kachergis *et al.* (2014) realizó una encuesta sobre las estrategias de gestión de la sequía de los ganaderos de Wyoming, un estado propenso a la sequía. La encuesta reveló que el mayor impacto de la sequía en las explotaciones ganaderas es la disminución de la capacidad de pastoreo, seguida de la rentabilidad, la disponibilidad de piensos en invierno y el agua de riego. Muchos ganaderos gestionan la sequía de forma similar, vendiendo ganado y comprando piensos, lo que pone de relieve los riesgos de mercado de las grandes fluctuaciones de precios asociadas a la sequía. Las conclusiones sugieren "tres componentes de una política nacional contra la sequía que fomente la flexibilidad y aumente así la resistencia de los ranchos a la sequía: (1) fomentar mecanismos de reparto del forraje; (2) promover una diversificación de los ingresos que sea independiente de la variabilidad climática; y (3) facilitar un cambio hacia sistemas de producción ganadera diversificados. Estas medidas podrían aumentar la sostenibilidad de los medios de subsistencia ganaderos y la prestación de servicios ecosistémicos a pesar de los aumentos previstos en la intensidad y duración de las sequías futuras."

En cuanto a la región estudiada en este trabajo, aunque existen numerosos estudios que analizan diferentes características del sector ovino en Extremadura, ninguno se ha centrado en modelos de impacto económico utilizando un enfoque cuantitativo. A continuación, se mencionan algunos de estos estudios para España y Extremadura.

Ruiz *et al.* (2017) presenta un resumen de las definiciones y particularidades estructurales de la ganadería extensiva, en contraste con los sistemas intensivos. El estudio estima que alrededor del 54% de la producción de carne de ovino y caprino se realiza mediante pastoreo sin suplementación alimentaria externa, y el 37% se realiza mediante una mezcla de pastoreo y alimentación externa.

Estudio de Costes y Rentas de Explotaciones Agrarias [ECREA] (2015) estudió la estructura financiera del sector, mostrando como resultado la baja rentabilidad de la actividad. En cuanto a los modelos de costes, la Red Nacional de Granjas Típicas [REGRANTI] (2018)

desarrolla el esquema Agri-benchmark, que utiliza una metodología homogénea que permite la comparación de balances estimados para diferentes explotaciones, estimando dos esquemas de explotaciones representativos para Extremadura. Los modelos estimados desde 2008 hasta 2018 muestran una gran fluctuación en los costes de suplementación alimenticia en comparación con otras formas de gasto.

En Gaspar *et al.* (2007) y Gaspar *et al.* (2009) se analiza la estructura de las explotaciones de la Dehesa extremeña, presentando indicadores de sostenibilidad. En el caso de las explotaciones de ovino, el 37,8% de las mismas tienen una baja carga ganadera, con bajas necesidades de insumos como mano de obra y materiales, y con un uso extensivo de la tierra y el pasto. Sin embargo, presentan la rentabilidad más baja, con un escaso margen de beneficio (3,1%). Schnabel *et al.* (2009) realizó un primer estudio sobre la disponibilidad de agua para los animales de granja en Extremadura. Los métodos incluyeron trabajo de campo, mapas topográficos digitales y fotografías aéreas para evaluar los recursos hidrológicos potenciales de cada explotación, y entrevistas para recabar información sobre la gestión del agua. "Los resultados indican que casi el 20% de las explotaciones sufren problemas de disponibilidad de agua en verano y casi el 50% durante las sequías. Los datos indican una relación positiva entre los problemas de suministro de agua y el grado de aridez.

Rubio *et al.* (2017) presenta una amplia exploración de los impactos y vulnerabilidades del cambio climático sobre la ganadería extensiva en España. Sin embargo, el enfoque es cualitativo y no presenta estimaciones monetizadas de los impactos económicos. El propio informe identifica las ausencias de estimación de impacto en costes y promueve el desarrollo de evaluaciones económicas como base para la construcción de modelos de estimación a corto, medio y largo plazo para el seguimiento y desarrollo de estrategias de adaptación.

Como conclusión de esta sección, cabe resumir dos puntos.

1. Primero, la experiencia internacional demuestra que no existe un modelo único estandarizado para evaluar los impactos del cambio climático y la sequía sobre la ganadería extensiva.
2. En segundo lugar, no existen evaluaciones económicas monetizadas de esta actividad en Extremadura.

En cuanto al enfoque metodológico, los estudios de impacto se pueden dividir en dos grupos:

- (i) los que siguen un enfoque agronómico, relacionando la disponibilidad de agua con el potencial de pastoreo, como Moore y Ghahramani (2013) y Guidry y Pruitt (2012).
- (ii) Los que siguen un enfoque económico a través de los análisis sectorial o macroeconómico, aplicando modelos input output o de equilibrio general, relacionando los eventos de sequía con impactos sobre los beneficios y otras variables socioeconómicas como Ziolkowska (2016) y Juana *et al.* (2014).

En el caso de Extremadura, no se ha aplicado ninguno de estos enfoques, y la mayoría de los estudios se centran en la descripción de la estructura productiva del sector (Ruiz *et al.*, 2017; ECREA, 2015; Gaspar *et al.*, 2007; y Gaspar *et al.* 2009), sobre la disponibilidad de agua a nivel de explotación Schnabel *et al.* (2009) y caracterizaciones cualitativas de los impactos del cambio climático (Rubio *et al.*, 2017).

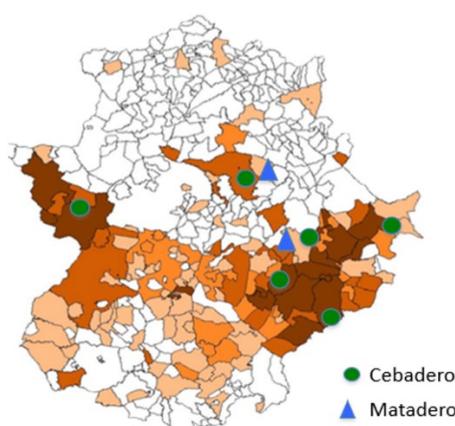
Dado que no existe un modelo único estandarizado y considerando las singularidades de las explotaciones extremeñas descritas en la literatura, se presenta aquí un modelo específico de valoración del impacto económico, adaptado a los objetivos del estudio y a la disponibilidad de información.

1.1.2. Materiales y métodos

1.1.2.1. Los datos

El estudio se centra en un conjunto de 1,583 explotaciones asociadas en la cooperativa EA Group, creada como resultado de la fusión de dos cooperativas de segundo grado: Oviso y Cordesur. Durante el periodo estudiado, los socios de EA Group disponían de un total de 804.000 animales, lo que representa más del 40% del total del ganado ovino extremeño. La distribución geográfica de las explotaciones se presenta en la Figura 1, observándose la mayor concentración en la zona centro/este de la Comunidad Autónoma.

Figura 1. Distribución geográfica de las explotaciones.



Distribución geográfica de las explotaciones. Esta figura ha sido facilitada por EA Group (2019).

Se utilizaron los siguientes datos:

- Para estimar la estructura de costes del sector se ha utilizado el modelo de explotación representativa diseñado por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente para el periodo 2008-2018. Los resultados del modelo procedían del esquema Agri-benchmark, que utiliza una metodología homogénea que permite comparar los resultados obtenidos para todas las explotaciones, independientemente del lugar en el que se encuentren. Esta metodología se basa fundamentalmente en el concepto de Explotación Típica del Modelo de Cálculo (TIPI-CAL), una herramienta de análisis técnico-económico que permite el seguimiento de las actividades financieras básicas (REGRANTI, 2018). Los datos de costes y actividades financieras abarcan desde 2008 hasta 2018.
- Se han utilizado los dos modelos representativos (propietario y arrendatario) de Extremadura. El balance del modelo propietario (1000-EXT) se estima sobre una cabaña de 1437 animales, mientras que el arrendatario (600-EXT) se basa en 578 animales. Se realizaron entrevistas con especialistas de EA group para obtener la confirmación de que la estructura de ambos esquemas es representativa del conjunto de explotaciones asociadas a la cooperativa EA Group.

- Para analizar el impacto en el precio de los piensos, se utilizaron los datos facilitados por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente de España. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de España [MAPAMA], 2020)
- Para determinar la estructura de tenencia de la tierra de cada explotación, se utilizaron los datos del Grupo EA, donde se dispone de información sobre las tierras arrendadas y en propiedad de todas las explotaciones de la muestra.
- En cuanto a la información climática, se utilizaron conjuntos de datos de precipitación proporcionados por el departamento de meteorología de la Universidad de Extremadura a partir de fuentes primarias de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se seleccionaron las estaciones meteorológicas de la zona de mayor concentración ganadera: Campanario, Don Benito y Monterrubio de la Serena.

1.1.2.2. Metodología

La metodología sigue un enfoque empírico, basado en la evaluación del comportamiento de las variables críticas (gasto en suplementación frente a niveles de precipitación) durante el periodo 2008-2018. Este enfoque es coherente con el objetivo del estudio: proporcionar órdenes de magnitud del impacto económico. Por lo tanto, el objetivo de la metodología era desarrollar un criterio para seleccionar casos de desviaciones considerables de la variable crítica, y comparar y contrastar esto con la existencia, o no, de condiciones meteorológicas adversas. La justificación de este método puede encontrarse en Thomasz *et al.* (2019), Thomasz *et al.* (2016), Heinzenknecht (2011), Baethgen (2010), y Tanura *et al.* (2008).

Los pasos básicos de la metodología fueron los siguientes:

- Se analiza la evolución de los costes, identificando si existen desviaciones significativas que pudieran estar relacionadas con condiciones climáticas desfavorables, concretamente déficit de precipitaciones en comparación con el comportamiento histórico.
- Las series se separan en precios y cantidades, para evaluar qué efecto tiene mayor repercusión en el aumento de los costes.
- Si las desviaciones de las variables pueden atribuirse al déficit pluviométrico, la valoración económica del fenómeno se estimará mediante un escenario contrafactual de las variables críticas. El escenario contrafactual representa cuál habría sido el valor en un escenario no extremo. Se estiman dos valores contrafactuales: uno para las cantidades y otro para el precio. Pueden aplicarse distintos criterios para determinar el valor contrafactual:
 - Media simple de toda la serie
 - Una media simple de la serie hasta el año anterior al acontecimiento crítico
 - Un valor interpolado

- Un valor estimado según la línea de tendencia estimada por mínimos cuadrados ordinarios
- Un valor teórico o exógeno.

En cuanto a los resultados, se valorará el incremento de costes por animal en ambos modelos de explotación (régimen de arrendamiento y de propiedad) y se extrapolará a todas las explotaciones de la muestra, con los datos de número de animales y tenencia de la tierra por explotación. Para la extrapolación, se utilizó el modelo de propietario y arrendatario en proporción a las tierras en propiedad y arrendadas de cada explotación. El aumento de los costes se valoró por animal, y la extrapolación fue proporcional al número de animales de cada explotación.

1.1.2.2.1. El modelo de identificación de casos extremos

La metodología estima la tendencia de la variable crítica y selecciona los casos de desviaciones considerables con respecto a ella. Sobre bases empíricas, se estudia a continuación si esas desviaciones pueden explicarse por fenómenos climáticos.

Existen muchos modelos para estimar la tendencia, como la regresión lineal y no lineal, el ajuste polinómico, las medias móviles y los modelos de regresión local. Sin embargo, en los estudios empíricos la estimación de la tendencia se realiza principalmente utilizando un modelo lineal o log-lineal (Tanura *et al.*, 2008; Thomasz *et al.*, 2016; Heinzenknecht, 2011; y Baethgen, 2010). Las ecuaciones de dichos modelos son:

$$\text{Modelo lineal: } y_t = b_0 + b_1x_t + \mu_t, \quad (1)$$

$$\text{Modelo log-lineal: } y_t = b_0 + b_1 \ln(x_t) + \mu_t, \quad (2)$$

donde y_t es el valor real en el año t , x_t es el período de tiempo, b_0 es el intercepto, b_1 es el coeficiente de la variable crítica y μ_t es el error estocástico. La desviación absoluta de la tendencia es:

$$d_t = y_t - \hat{y}_t, \quad (3)$$

donde y_t es el valor de la variable crítica en el año t y \hat{y}_t es la tendencia estimada en el año t . Para medir la magnitud de cada desviación, existen diferentes enfoques. Uno de ellos consiste en definir escalas exógenas en la desviación relativa (Heinzenknecht, 2011):

$$Rd_t = d_t / \hat{y}_t, \quad (4)$$

donde Rd_t es la desviación relativa d_t es la desviación absoluta y \hat{y}_t es la tendencia estimada. El otro enfoque consiste en clasificar en función de la desviación típica de la muestra (Baethgen, 2010).

$$d_t > -k\sigma \text{ casos no extremos,} \quad (5)$$

$$d_t < -k\sigma \text{ casos extremos,} \quad (6)$$

donde k es el número de desviaciones típicas que representa el límite a partir del cual los casos se consideran no extremos o extremos. La selección de k es empírica y depende de la distribución de la muestra.

Cualquiera de las dos clasificaciones permite identificar casos de desviaciones que deben ser contrastados con las variables climáticas para determinar si existe algún tipo de atribución. Por lo tanto, teniendo los casos potenciales, el siguiente paso es analizar las variables climáticas y determinar si hubo un contexto negativo en esos años.

La metodología nos permitió identificar fácilmente las desviaciones extremas de la variable que se explican potencialmente por perturbaciones climáticas. Se trata de un enfoque sencillo que trata adecuadamente la escasez de información. La estimación de la tendencia permite reconstruir un escenario teórico para cada año, en ausencia de variabilidad climática. Esto significa que el enfoque construye un escenario base o contrafactual a partir del cual es posible medir la pérdida de producción y, en consecuencia, la pérdida de ingresos utilizando diferentes previsiones de precios.

Sin embargo, la serie analizada en esta investigación tiene dos limitaciones para estimar la tendencia: es corta y está muy afectada por eventos extremos, lo que genera un sesgo en la tendencia, influida por el efecto que se intenta aislar. Por lo tanto, el enfoque se simplifica calculando la media simple de la serie y su desviación estándar. A pesar de que la media simple también se ve afectada por los extremos, el sesgo se redujo en comparación con el uso de la tendencia lineal. Una vez identificados los casos extremos, se contrastaron con la información climática para atribuir tales desviaciones a condiciones climáticas adversas.

Para los casos en que se confirma una atribución, se procedió a la valoración económica. Para ello, fue necesario determinar el precio de valoración y el escenario contrafactual de las cantidades de alimentación. El escenario contrafactual representa el nivel de alimentación utilizado en condiciones no extremas. Dado que el precio de valoración se considera exógeno², se utiliza el precio al contado del año analizado. En cuanto a las cantidades contrafactuales, se ha utilizado el nivel medio de cantidades excluyendo los años considerados extremos.

En conjunto, la metodología puede resumirse como sigue:

La función dicotómica $f(IA_t)$ selecciona los valores de alimentación que superan una desviación estándar de la media del índice:

$$f(IA_t) = \begin{cases} 1 & \text{si } IA_t > 100\% + \sigma IA_t \\ 0 & \text{si } IA_t < 100\% + \sigma IA_t \end{cases} \quad (7)$$

con $IA_t = \frac{A_t}{\bar{A}}$ donde IA_t es el índice de alimentación A_t la cantidad de pienso y \bar{A} es la media de la serie temporal.

² El precio del pienso se considera exógeno porque depende de materias primas cuyos precios cotizan en mercados internacionales, esto se analizará en el siguiente apartado de este capítulo.

Los valores de $IA_t > 100\% - \sigma IA_t$ son casos potenciales de grandes valores de alimentación generados por condiciones climáticas adversas. Esos casos se contrastan con los datos de precipitaciones, utilizando la misma metodología de selección de extremos.

Cantidad de alimentación contrafactual (\widehat{Q}_t) se utiliza para estimar el aumento de los costes de alimentación durante los años de escasez de precipitaciones. Se define como la media simple excluyendo los casos extremos identificados por $f(IA_t)$:

$$\widehat{Q}_t = \frac{\sum IA_t}{T} \quad \forall f(IA_t) = 0 \quad \wedge \quad T = \sum T_t \quad \forall f(IA_t) = 0 \quad (8)$$

El coste incremental (CI_t) se calcula como la diferencia entre el pienso observado durante el evento extremo ($Q_t(IA = 1)$) y la cantidad contrafactual (\widehat{Q}) valorada al precio de mercado de los piensos del año (P_t):

$$CI_t = (Q_t(IA = 1) - \widehat{Q}) * P_t. \quad (9)$$

1.1.2.2.2. Extrapolación

Las tierras de pastoreo (l_j) de cada explotación pueden ser en propiedad (l_j^P), alquiladas (l_j^A) o una combinación de ambas: $l_j = l_j^A + l_j^P$.

El número total de ovejas (n_j) puede distribuirse en función de la tenencia de la tierra (n_j^A, n_j^P), estimando el número de ovejas en cada tipo de propiedad de la tierra: $n_j = n_j^A + n_j^P$.

El número de ovejas en régimen de arrendamiento de tierras (n_j^A) se estima en relación con la proporción de tierras arrendadas: $n_j^A = \frac{l_j^A}{l_j} * n_j$. Asimismo, el número de ovejas en régimen de propiedad (n_j^P) se calcula en función de la proporción de tierras en propiedad: $n_j^P = \frac{l_j^P}{l_j} * n_j$.

El número total de ovejas de cada régimen (N^A, N^P), además de los casos de cada explotación:

$$N^A = \sum_{j=1}^n n_j^A, N^P = \sum_{j=1}^n n_j^P \quad (10)$$

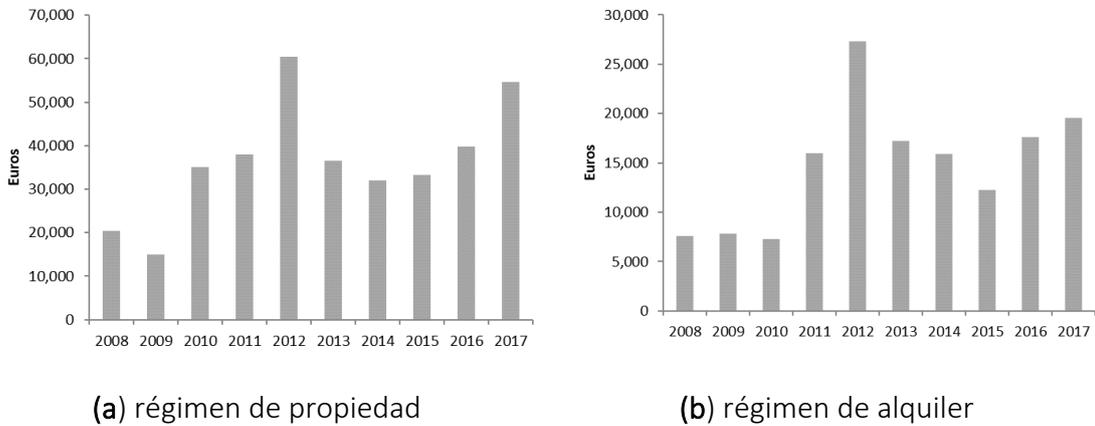
Con el coste incremental (CI_t) y el número de ovejas estimado para cada sistema (N^A, N^P) el coste incremental total de la muestra de agujeros (CIT_t):

$$CIT_t = CIT_t^A + CIT_t^P = CI_t^A * N^A + CI_t^P * N^P \quad (11)$$

1.1.3. Resultados

Los valores máximos de los costes de los suplementos alimenticios se observan en 2012 y 2017 (Figura 2).

Figura 2. Coste de la suplementación alimenticia en euros por año.

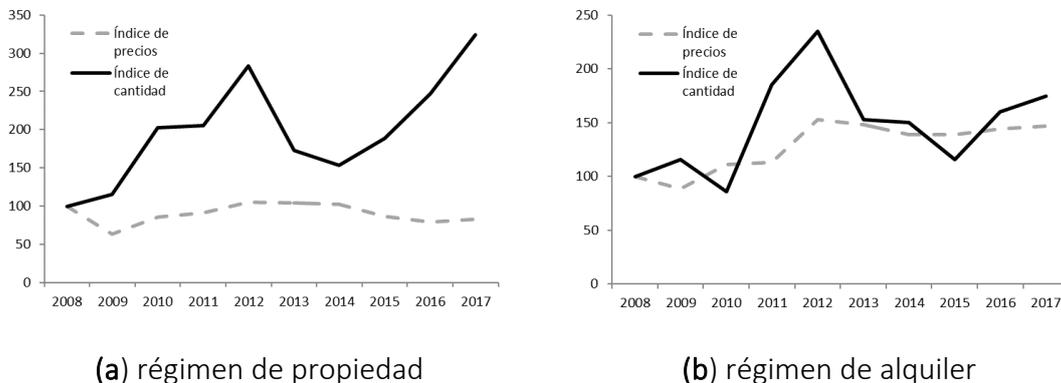


Fuente: Elaboración propia con datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, España REGRANTI (2018).

Dividiendo las series en precios y cantidades, se comprobó que el aumento en ambos años se explica en su mayor parte por el efecto cantidad (Figura 3). Las fluctuaciones en los precios de los piensos responden a efectos exógenos, como se verá en el siguiente apartado.

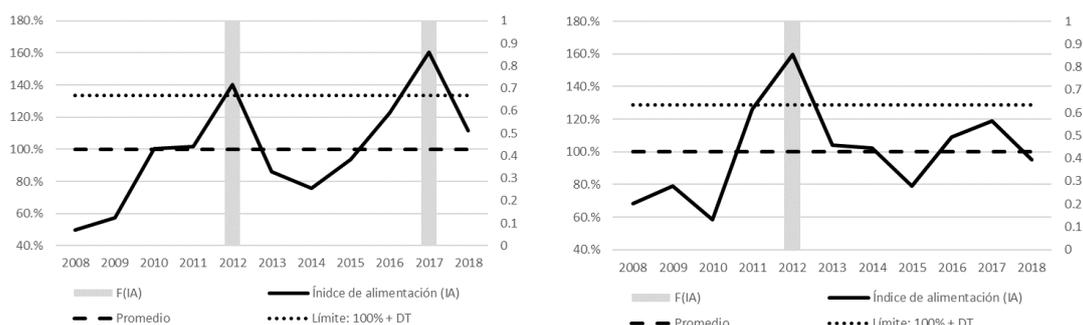
La metodología identificó tres casos de desviación que superan el umbral de desviación típica: dos en el régimen de propietarios y uno en el régimen de alquiler ($f^P(IA_{2012}) = 1$; $f^P(IA_{2017}) = 1$; $f^A(IA_{2012}) = 1$). Los años identificados fueron 2012 y 2017 (Figura 4a,b).

Figura 3 Índices de precios y cantidades, 2008=100.



Fuente: Elaboración propia con datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, España REGRANTI (2018).

Figura 4. El índice de alimentación y el umbral de una desviación típica



(a) Régimen de propiedad

(b) Régimen de alquiler

Nota: DT significa desviación típica de la alimentación complementaria a lo largo de toda la serie.

Los años seleccionados deben contrastarse con la información climática. La caracterización de la precipitación para Extremadura del Servicio Nacional de Meteorología de España muestra que 2012 se caracterizó entre seco y muy seco, y 2017 entre muy seco y extremadamente seco (Cuadro 1).

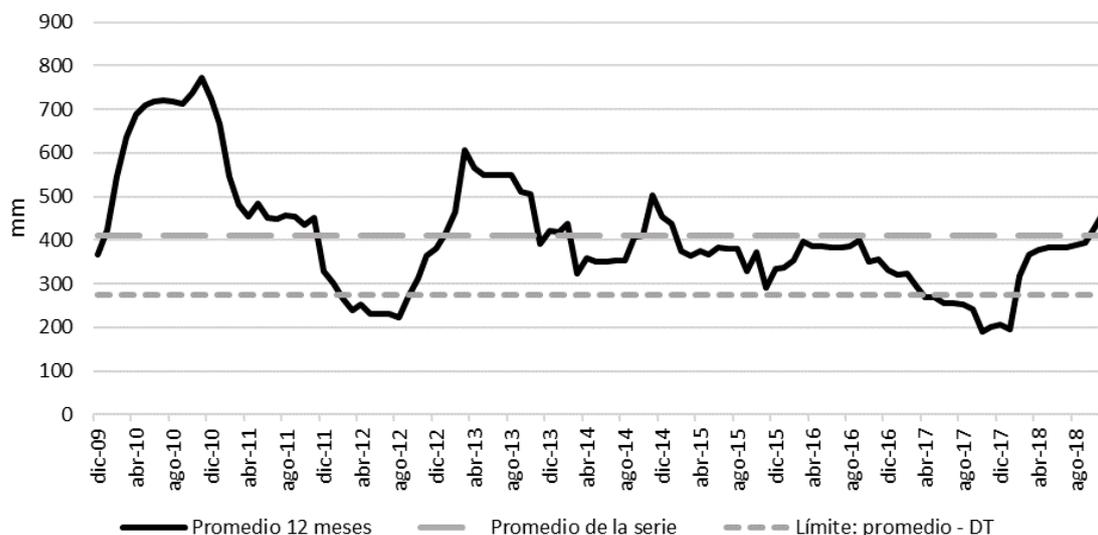
Cuadro 1. Caracterizaciones de la precipitación para Extremadura.

2008: Normal, húmedo	2014: Normal, húmedo
2009: Normal, húmedo	2015: Muy seco
2010: Muy húmedo, extremadamente húmedo	2016: Normal, húmedo
2011: Normal	2017: Muy seco, extremadamente seco
2012: Seco, muy seco	2018: Húmedo
2013: húmedo, muy húmedo	

Notas: Elaboración propia a partir de datos de la Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).

No obstante, para aplicar la identificación de extremos se han utilizado los datos de precipitación de la estación con mayor influencia territorial para las explotaciones estudiadas (Estación de Don Benito). La escasez de precipitaciones se observa para 2012 y 2017, alcanzando valores mínimos de la muestra. En ambos casos, los valores superaron el umbral de una desviación típica (Figura 5). Cabe destacar que, aunque el año 2015 se caracteriza por ser muy seco, la metodología no identificó extremos ni en la suplementación alimenticia ni en la escasez de precipitaciones en la Estación de Don Benito.

Figura 5. Precipitación acumulada de 12 meses y umbral de una desviación típica para la Estación de Don Benito.

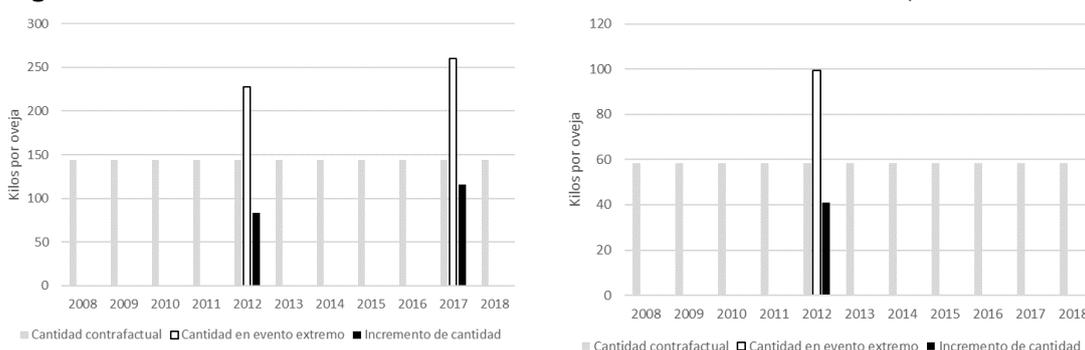


Elaboración propia con datos del Departamento de Meteorología de la Universidad de Extremadura.

Nota: DT significa desviación típica a lo largo de toda la serie de precipitaciones acumulada.

Por lo tanto, el aumento de la suplementación alimentaria en 2012 y 2017 puede atribuirse a la disminución de la cantidad y la calidad del pasto debido a la escasez de precipitaciones. Al aplicar la metodología de valoración, las necesidades incrementales de alimentación en el contexto de escasez de precipitaciones se estimaron en 83,7 kilos por oveja en 2012 y 116,2 kilos por oveja en 2017 en el régimen de propiedad, y 68,2 kilos por oveja en 2012 en el régimen de alquiler (Figura 6a,b).

Figura 6. Valoración de los costes incrementales en alimentación complementaria.



(a) Régimen de propiedad

(b) Régimen de alquiler

Valorando las cantidades incrementales con precios al contado, el coste incremental se estimó entre 22,3 y 24,4 euros por animal en régimen de propiedad y 31,3 euros en régimen de arrendamiento. Distribuyendo el coste incremental en todas las explotaciones en función de la tenencia de la tierra, se estimó que el coste incremental

agregado para la muestra completa era de 13,8 millones de euros en 2012 y de 6,7 millones de euros en 2017. En el cuadro 2 se resumen los resultados:

Cuadro 2. Resumen de los resultados.

	2012	2017
Índice de alimentación de valor extremo (propiedad)	$f^P(IA_{2012}) = 1$	$f^P(IA_{2017}) = 0$
Índice de alimentación de valor extremo (arrendatario)	$f^A(IA_{2012}) = 1$	$f^A(IA_{2012}) = 1$
Valor extremo de las precipitaciones	$f(IP_{2012}) = 1$	$f(IP_{2017}) = 1$
Coste incremental por animal (propiedad)	$CI_{2012}^P = € 22.3$	$CI_{2017}^P = € 24.4$
Coste incremental por animal (arrendatario)	$CI_{2012}^A = € 31.3$	$CI_{2017}^A = € 0$
Coste incremental total (arrendatario)	$CIT_{2012}^A = € 7,693,756$	$CIT_{2017}^A = € 0$
Coste incremental total (propiedad)	$CIT_{2012}^P = € 6,166,402$	$CIT_{2017}^P = € 6,758,552$
Coste incremental total	$CIT_{2012} = € 13,860,158$	$CIT_{2017} = € 6,758,552$

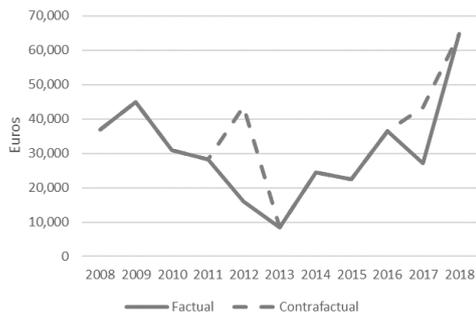
Notas: Este es el resultado de la aplicación del modelo para los datos de las explotaciones propietarias y las explotaciones arrendadas para los años 2012 y 2017. IA significa índice de alimentación de valor extremo; IP significa precipitaciones de valor extremo; CI significa coste incremental por animal; CIT significa coste incremental total. El superíndice P significa propiedad y el superíndice A significa arrendamiento.

Extrapolando los resultados a la todas las cabezas de ganado ovino de Extremadura, el coste incremental se valoró en 41,2 millones de euros en 2012 y en 12,9 millones de euros en 2017.

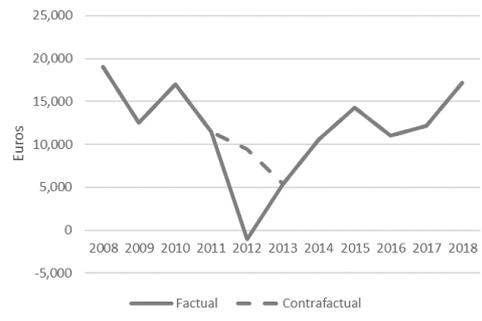
Por último, para evaluar el impacto a escala microeconómica, se han estimado los beneficios del balance de cada explotación representativa para cada periodo (Figura 7):

- En el régimen de propiedad, el beneficio estimado de 43.624 euros en 2012 se redujo a 15.974 euros, mientras que el beneficio estimado de 43.323 euros en 2017 se redujo a 27.019 euros.
- En el régimen de alquiler, el beneficio estimado de 9.425 euros de 2012 se convirtió en un resultado negativo de 1.031 euros.

Figura 7. Beneficios en euros anuales por explotación



(a) Régimen de propiedad



(b) Régimen de alquiler

1.1.4. Conclusiones.

En este apartado se presenta un estudio empírico para evaluar el impacto de la escasez de precipitaciones sobre la estructura de costes de la producción de corderos de carne en Extremadura. Las principales conclusiones pueden resumirse en tres puntos:

- i. existe una relación entre los mínimos de precipitación y los máximos de cantidad de alimento de la serie analizada.
- ii. la principal repercusión de la escasez de precipitaciones es un aumento de la suplementación alimenticia, con un impacto estimado para el sector del cordero de carne de Extremadura de 54,1 millones de euros en dos años.
- iii. hay una reducción de los beneficios en las explotaciones: reducción media del 45% en el régimen de propiedad y reducción total en el régimen de arrendamiento, con resultados negativos durante la escasez de precipitaciones de 2012.

En cuanto al punto uno, el resultado es coherente con las conclusiones de toda la bibliografía sobre la relación negativa entre la disponibilidad de agua y el potencial de pastoreo. Dadas las singularidades de la estrategia de producción, este resultado valida la estrategia de adaptación de los ganaderos de aumentar la suplementación alimenticia durante las sequías, con el fin de mantener los niveles de productividad, esto hace que en eventos de sequía los ganaderos se enfrenten al riesgo de precios del pienso. En el punto dos se muestra que el coste agregado de la suplementación alimenticia podría no ser considerable para el conjunto del sector y menos aún a escala macroeconómica. Sin embargo, en el tercer punto se muestra un enorme impacto microeconómico, estimándose una reducción de los beneficios o incluso la quiebra del régimen de arrendamiento. Este último resultado es coherente con los estudios realizados en Extremadura que muestran la escasa rentabilidad y fragilidad financiera de la actividad. En conjunto, la metodología proporcionó un primer orden de magnitud del nivel de impacto tanto a escala macro como micro, que contribuye a los debates previos sobre sostenibilidad y vulnerabilidad al cambio climático presentados en toda la bibliografía, pero en los que faltaba una evaluación monetizada del impacto.

Sin embargo, entre las limitaciones del estudio, cabe mencionar que carece de un análisis de sensibilidad. Si sólo se seleccionan los casos extremos, no se tendrán en cuenta los episodios de sequía más leves y, por tanto, podrían subestimarse los impactos. Para realizar un análisis de sensibilidad, es necesario un enfoque experimental teórico que relacione la cantidad y la calidad de los pastos con el nivel de precipitaciones y las necesidades energéticas y proteínicas de los animales en las distintas fases del ciclo reproductivo. Sin embargo, este enfoque experimental no tendrá en cuenta el comportamiento de adaptación de los ganaderos, que se incorpora al enfoque empírico presentado en este trabajo. Una segunda limitación está relacionada con los dos modelos de producción de propietario y régimen de alquiler utilizados para estimar el impacto económico: A pesar de ser representativos de la mayoría de las explotaciones de la

muestra, no es posible trazar una línea divisoria entre explotaciones con pequeño y gran stock de animales, o con explotaciones que implementan nuevas tecnologías. Ambos puntos son importantes para diferenciar los niveles de impacto según la estructura de costes y las técnicas de producción.

A pesar de sus limitaciones, las estimaciones son sólidas y directamente convertibles en impactos monetarios, lo que proporciona una base de referencia para el diseño de estrategias de adaptación al riesgo. En el siguiente apartado se desarrollará una herramienta financiera de adaptación al riesgo para los ganaderos de explotaciones de ovino cárnico en extensivo.

1.2. Diseño e implementación de una herramienta financiera de adaptación al riesgo de precios del pienso³

Una vez conocida la estimación del impacto económico de los eventos climáticos extremos en el sector, este apartado persigue la finalidad de desarrollar la estrategia de adaptación al riesgo para las ganaderías extensivas del sector ovino. Para ello, en primer lugar, se desarrolló un marco teórico para exponer cuales son las opciones que tienen los ganaderos para gestionar el riesgo en la actualidad, y para explicar por qué una herramienta de gestión del riesgo de precio es la mejor opción en el contexto de este estudio. Más tarde se generó la conceptualización del futuro sintético y las metodologías disponibles para su cálculo. A partir de los materiales disponibles, se diseñó la herramienta financiera, por último, se analizó la aplicación de la estrategia de adaptación para una explotación representativa.

³ Los resultados de este capítulo fueron publicados en el siguiente artículo:

Pérez-Franco, I., Thomasz, E.O., Rondinone, G. y García-García, G. (2022). Feed price risk management for sheep production in Spain: a composite future cross-hedging strategy. *Risk Management* 24, 137–163. DOI: 10.1057/s41283-021-00088-1

1.2.1. Estado de la cuestión

1.2.1.1. La gestión del riesgo por parte de las explotaciones ganaderas en extensivo

El apartado anterior concluye que la ganadería extensiva se enfrenta, en una primera instancia al riesgo climático por el aumento de los eventos de sequía que impactan en la disminución de pasto. Como consecuencia, los ganaderos toman como medida de adaptación el aumento de la suplementación alimenticia en los periodos de eventos extremos climáticos, enfrentándose también a un riesgo de precios del pienso. En este contexto, este apartado pretende analizar cuál es la mejor estrategia de adaptación para el sector ante el riesgo.

En la actualidad existen diversas herramientas de adaptación al riesgo para la ganadería ovina en extensiva. Podemos distinguir dos tipos: las aplicadas por una entidad externa y las aplicadas por el ganadero.

Si atendemos a las primeras, se pueden dividir en función de la procedencia pública o privada:

- La principal estrategia de adaptación al riesgo para la ganadería extensiva pública es la Política Agraria Común (PAC). De entre sus pilares está el de garantizar la seguridad alimenticia y fortalecer el tejido socioeconómico rural, así como el de contribuir a disminuir el cambio climático y a la gestión sostenible de los recursos. La PAC incide en los ingresos a las explotaciones en una ayuda a la renta por terreno y por número de cabezas de ganado (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2022).
- Por otro lado, los seguros agrarios son la principal estrategia de adaptación al riesgo climático de forma privada. Son contratos que tiene el propietario de la explotación ganadera con una entidad aseguradora. Tienen el fin de compensar la reducción de cantidad producida por daños eventuales que impactan a la explotación. Se formalizan a través de una prima definida en el contrato. Los riesgos a los que hacen frente pueden ser alteraciones en la salud de los animales, ataques de fauna salvaje o pérdidas de cantidad por adversidades climáticas (González-Blázquez *et al.*, 2016).

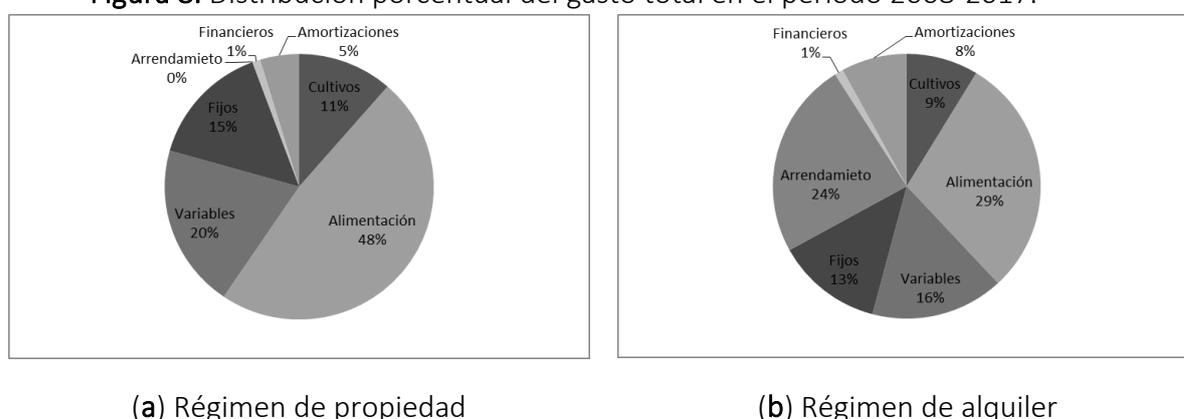
Mientras que la primera está más destinada al mantenimiento y supervivencia de las explotaciones, la segunda es la principal herramienta de gestión del riesgo climático que pone el foco en la cantidad de producción de las explotaciones, permitiendo tener un beneficio mínimo por la actividad, a pesar de un evento extremo.

En relación con las estrategias aplicadas por el ganadero, Pateiro *et al.* (2020) distingue tres: gestión de los pastos, manejo de los animales y gestión de la explotación. Las principales estrategias propuestas son optimizar los pastos, utilizando la teledetección para controlar el pastoreo mejorando la productividad de la tierra (Domínguez-Cameroni y Terra, 2014); mantenimiento de razas autóctonas que maximicen el aprovechamiento del entorno disponible (Araujo *et al.*, 2018); o almacenar pasto para utilizarlo en

momentos de impacto climático (Pateiro *et al.*, 2020). Todas estas estrategias son conocidas y aplicadas por las explotaciones.

Sin embargo, como se ha visto en el apartado anterior, la primera estrategia de adaptación que considera el ganadero ante la ausencia de pastos es la suplementación alimenticia (pienso). Por tanto, las explotaciones se enfrentan también al riesgo de precios del insumo alimenticio, que supone entre el 75% y el 90% de los costes variables de producción (entre el 29% y el 48% del total de los gastos de la explotación) (Figura 8). En la actualidad, no existe ninguna estrategia de gestión de riesgo de precio adaptada al sector ovino en extensivo, a pesar de que los componentes del pienso cotizan en los mercados de futuros.

Figura 8. Distribución porcentual del gasto total en el periodo 2008-2017.



Fuente: Elaboración propia con datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (REGRANTI, 2018).

El siguiente apartado explora el concepto de suplementación alimenticia para entender en que mercados de futuros cotizan los componentes del pienso y concluir cual es el mejor camino para generar una estrategia de gestión de riesgo de precio que maximice la utilidad de los ganaderos.

1.2.1.2. Alimentación y mercados de futuros

La suplementación se basa en el suministro de pienso, que es una mezcla de diferentes componentes diseñada para maximizar el rendimiento animal en cada fase de la alimentación. Los componentes más significativos del pienso son la cebada, el maíz, el trigo, la harina de soja y la harina de girasol (otros componentes, como los minerales, el forraje y los correctores vitamínicos, representan una proporción insignificante). Actualmente no existe un mercado futuro para los piensos y, por lo tanto, no hay herramientas financieras para gestionar directamente el riesgo del precio de los piensos. Sin embargo, casi todos los componentes de los piensos son commodities que se negocian en los mercados internacionales a través de contratos de futuros estandarizados. El cuadro 3 muestra la proporción de componentes en términos porcentuales para dos fases de alimentación de las ovejas, ya que la alimentación difiere en función del ciclo de producción animal (Boquier *et al.*, 1990).

Cuadro 3. Composición de los piensos para ovejas

Componentes	Fase de mantenimiento	Fase de producción
Cebada	38%	39%
Maíz	26%	21%
Trigo	17%	11%
Harina de soja	11%	18%
Harina de semillas de girasol	4%	7%
Otros	4%	4%

Elaboración propia a partir de datos facilitados por la cooperativa EA Group (2020). La categoría *Otros* incluye minerales, forrajes y correctores vitamínicos.

Cabe destacar que el 96% de los componentes de los piensos son commodities que se negocian diariamente en los principales mercados financieros internacionales (cuadro 4), lo que significa que los cambios en dichos mercados repercutirán en los precios de los piensos. Aunque no todas las commodities se negocian en un único mercado, la mayoría de los contratos de futuros sobre componentes de piensos pueden comprarse o venderse en la Chicago Mercantile Exchange (CME), antes conocida como Chicago Board of Trade (CBOT). A pesar de que no existen contratos de futuros de harina de girasol, sí existen contratos de semillas de girasol que pueden utilizarse como aproximación.

Cuadro 4. Mercados dónde se encuentran los contratos de futuros que componen el pienso

Contratos de futuros	Mercado en que se comercializa
Cebada	Baltic Futures Exchange (BFE), Winnipeg Commodity Exchange (WPG), Marché à Terme International de France (MATIF), Sydney Future Exchange (SFE).
Maíz	Chicago Mercantile Exchange (CME)
Trigo	Baltic Futures Exchange (BFE), Chicago Mercantile Exchange (CME), Kansas City Board of Trade (KC), MidAmerica Commodity Exchange (MCE), Winnipeg Commodity Exchange (WPG)
Harina de soja	Baltic Futures Exchange (BFE), Chicago Mercantile Exchange (CME), MidAmerica Commodity Exchange (MCE)
Semillas de girasol	Johannesburg Stock Exchange (JSE)

Elaboración propia a partir de la información de Thomson Reuters Eikon Database (2020).

En cuanto a la estructura del contrato, un futuro permite bloquear el precio de un activo subyacente o una commodity mediante un acuerdo de compra o venta dentro de un mercado estandarizado. Tienen fechas de vencimiento y precios fijos que se conocen de antemano (Lien y Tse, 2002). Por lo tanto, una de las principales características de los contratos de futuros es que se negocian en mercados regulados y, en consecuencia, tienen unas especificaciones estándar. Como ya se ha dicho, las commodities que componen los piensos no se negocian en los mismos mercados y, por lo tanto, tienen

características diferentes (Cuadro 5). Los futuros de maíz, trigo y harina de soja son similares porque se negocian en el mismo mercado. Sin embargo, los cinco contratos de componentes de piensos tienen fechas de vencimiento similares: marzo, mayo, julio, septiembre y diciembre. Esto es potencialmente útil para una cobertura compuesta que se pondrá a prueba en este documento.

Cuadro 5. Características de los distintos contratos de futuros de componentes de piensos

Commodities	Intercambio	Tamaño del contrato	Vencimiento del contrato	Última fecha de negociación del contrato
Maíz	Chicago Mercantile Exchange	5.000 fanegas	Marzo; Mayo; Julio; Septiembre; Diciembre	Último día laborable antes del día 15 del mes de contrato
Trigo	Chicago Mercantile Exchange	5.000 fanegas	Marzo; Mayo; Julio; Septiembre; Diciembre.	Último día laborable antes del día 15 del mes de contrato.
Harina de soja	Chicago Mercantile Exchange	100 toneladas cortas	Enero; Marzo; Mayo; Julio; Agosto; Septiembre; Octubre; Diciembre	Último día laborable antes del día 15 del mes de contrato.
Cebada	Sydney Future Exchange	20 toneladas	Enero; Marzo; Mayo; Julio; Septiembre; Diciembre.	12.00 horas del tercer jueves del mes de vencimiento
Semillas de girasol	Johannesburg Stock Exchange	50 toneladas	Marzo; Mayo; Julio; Septiembre; Diciembre	12.00 horas del quinto día hábil anterior al último día hábil del mes de vencimiento

Elaboración propia a partir de las especificaciones de los contratos de futuros de Thomson Reuters Eikon Database (2020).

Se puede concluir que, aunque no hay contratos de futuros sobre el precio de los piensos disponibles en el mercado, la existencia de futuros negociados en los mercados internacionales para los principales componentes de los piensos (96% de los mismos) permite probar una posible cobertura cruzada. Por lo tanto, este enfoque se analiza a continuación.

1.2.1.3. Cobertura y cobertura cruzada.

La cobertura puede definirse como el acto de adoptar una posición opuesta en el mercado de futuros en comparación con el mercado al contado (Marques *et al.*, 2006). Se trata de una estrategia mediante la cual se transfiere el riesgo de los inversores que desean proteger su posición a los especuladores dispuestos a asumir riesgos. El principal beneficio de la cobertura para el inversor o productor es proporcionar certidumbre: fija el precio o el valor de la variable crítica por adelantado, reduciendo el riesgo de precio.

Puede generar pérdidas o ganancias a corto plazo, que se espera equilibrar a medio o largo plazo.

Una cobertura directa se produce cuando el activo subyacente en un contrato de futuros coincide con el de contado (Witt *et al.*, 1987). Incluso con el mismo activo subyacente, alguna especificación particular que surge del contrato de futuros puede crear una correlación imperfecta entre las dos inversiones. Esta diferencia de precios se conoce como riesgo de base (Leuthold *et al.*, 1989). Se conocen tres ejemplos típicos de riesgo de base en los mercados de commodities: (i) base de localización, cuando un contrato no tiene el mismo punto de entrega que el vendedor de la commodity necesita; (ii) base de calidad, cuando los subyacentes coinciden, pero difieren en la calidad; y (iii) base de calendario, cuando un contrato no vence en la misma fecha que la posición que se está cubriendo. Como ilustran Spivak y Cvitanić (1999), Hobson y Penn (2005), y Flint *et al.* (2015), cualquier cobertura directa pretende minimizar el movimiento de este riesgo de base y mantenerlo lo más cerca posible de cero.

Sin embargo, no todos los productos pueden cubrirse en los mercados de futuros, ya sea porque el mercado financiero puede estar poco desarrollado o intervenido, o simplemente porque no existe tal mercado de referencia. Los productores que estén expuestos al riesgo de precios en estas circunstancias y deseen llevar a cabo un programa de gestión de riesgos tendrán que utilizar una combinación de contratos de futuros referidos a los productos básicos relacionados para cubrir su riesgo de precios (Allen y Lueck, 2003; Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo [UNCTAD], 2011). Como analizan Frechette (2000), Haigh y Holt (2000), Chang y Wong (2003) y Hudson (2006), esta cobertura indirecta se conoce en la bibliografía como cobertura cruzada.

Aunque resuelve el problema de los derivados inexistentes, la cobertura cruzada plantea varios problemas de aplicación. Rahman *et al.* (2000) sostienen que la principal dificultad es la selección de la commodity adecuada relacionada con el activo subyacente. Además, Chen y Sutcliffe (2012) identifican varios problemas con la cobertura cruzada: i) es difícil hacer un seguimiento de la operación de cobertura debido al uso de diferentes contratos; ii) la reducción del riesgo puede ser insignificante, a pesar de la introducción de un segundo instrumento; iii) podría haber un aumento de los costes de transacción, y iv) podría haber un vacío de conocimientos al ejecutar la cobertura. En consecuencia, los profesionales podrían mostrarse reacios a utilizar la herramienta.

Muchos estudios muestran cómo abordar y resolver esos problemas mediante distintas aplicaciones de la cobertura cruzada con commodity, algunas de las cuales se describen a continuación.

Wilson (1982) comparó la cobertura cruzada del trigo en Estados Unidos basada en dos o tres contratos de futuros sobre commodity agrícolas. El resultado fue que la cobertura compuesta con dos contratos de futuros es de un 1% a un 2% más eficaz que la cobertura

directa, mientras que la adición de un tercer contrato de futuros no garantiza una mayor eficacia. En este trabajo no se analizaron los costes de transacción. Un resultado mejor puede encontrarse en Braga (1990), donde la cobertura de los precios de la soja canadiense basada en contratos de futuros de soja en dólares estadounidenses y en dólares estadounidenses-canadienses consiguió cubrir el 92% del precio de la soja. En la misma línea, Braga y Martin (1990) cubrieron la harina de soja italiana con contratos de futuros de harina de soja del Chicago Board of Trade (CBOT) y contratos de futuros sobre el tipo de cambio del marco alemán⁴, descubriendo que es una mejor estrategia de cobertura utilizar ambos contratos de futuros que sólo el contrato de futuros de harina de soja. Brinker *et al.* (2009) cubrieron el grano seco de destilería, como subproducto del etanol, frente a commodities altamente correlacionadas como el maíz y la soja. Aunque este producto suele cubrirse directamente frente al maíz, el documento concluye que el uso de coberturas cruzadas reduce el riesgo. Han *et al.* (2020) analizaron la viabilidad de los contratos de futuros energéticos de cobertura cruzada (mediante futuros del petróleo WTI y contratos de futuros del gas natural NYMEX) basados en futuros de commodities agrícolas (mediante contratos de futuros de maíz, trigo y soja CBOT). Los resultados muestran una importante relación bidireccional entre la energía y los rendimientos de los futuros agrícolas, lo que permite una cobertura cruzada eficaz.

En el ámbito de las commodities ganaderas, Miller (1982) creó una cobertura del cerdo de engorde basada en dos componentes que determinan el precio de la carne de cerdo: el precio de los cerdos sacrificados y el precio del maíz utilizado para la alimentación. Se comparó la cobertura cruzada con contratos de futuros del maíz o el cerdo sacrificado por separado concluyendo que la cobertura cruzada es más eficaz que la directa.

Por último, en el caso de otras commodities, la bibliografía se ha centrado principalmente en el mercado del petróleo (Koeman y Białkowski, 2015). Cabe destacar la investigación de Neuberger (1999), que creó una cobertura cruzada del compromiso de suministro de petróleo crudo de 9 a 72 meses en el futuro, utilizando hasta tres contratos de futuros de petróleo crudo NYMEX con diferentes fechas de vencimiento más cortas que la fecha de entrega. Dado que los futuros NYMEX vencen antes que la posición al contado hubo que refinanciar el contrato de futuros, lo que, debido al riesgo de refinanciación, no es factible utilizando la cobertura directa. Se comprobó que el uso de dos o tres contratos de futuros del petróleo reduce mucho el riesgo al contado, medido como desviación estándar. Chen y Sutcliffe (2012) analizan la cobertura cruzada del índice del petróleo Amex mediante contratos de futuros del petróleo crudo NYMEX y futuros del Standard and Poor's (S&P) 500. Los resultados sugieren que la cobertura cruzada reduce la varianza mínima hasta tres veces más que la cobertura directa. Por último, Adams y Gerger (2012) investigan cómo el petróleo crudo Brent y WTI, el combustible para calefacción y el gasóleo pueden generar una cobertura cruzada para el precio del combustible para

⁴ Se utilizan futuros sobre tipos de cambio de la moneda alemana porque no existían contratos de futuros sobre tipos de cambio de la moneda italiana frente al dólar. A este respecto, Braga *et al.* (1989) demuestran la potencia y eficacia de los futuros sobre tipos de cambio de la moneda alemana frente a la italiana.

aviones. Los resultados son coherentes con los anteriores, ya que constatan que la cobertura cruzada es más eficaz que la cobertura directa. Otra conclusión importante del documento es que la eficacia de la cobertura cruzada disminuye con el tiempo.

En total, existen pruebas internacionales contrastadas de los beneficios de la cobertura cruzada, que pueden resumirse del siguiente modo: (i) la cobertura cruzada puede ser tan eficaz como la cobertura directa y, en algunos casos, los beneficios de la cobertura cruzada son mayores (por ejemplo, Miller, 1982; Braga y Martin, 1990; y Chen y Sutcliffe, 2012); y (ii) permite refinanciar varias veces el mismo contrato de futuros para cubrir el precio al contado (Neuberger, 1999); y (iii) permite cubrir con futuros de commodities que incluso son de sectores diferentes, como el agrícola y el energético (Han *et al.*, 2020). A pesar de ello, esta herramienta necesita ser diseñada y, por tanto, existe un riesgo que no se da en la cobertura directa, el riesgo operativo, que tiene que ser desarrollada por una entidad con conocimientos financieros (Chen y Sutcliffe, 2012). En consecuencia, se puede decir que no es una herramienta para operaciones puntuales, sino más bien para cooperativas o grandes empresas. Teniendo en cuenta esto, en el siguiente título se resumen diferentes técnicas de cobertura cruzada, con el fin de seleccionar el enfoque final seleccionado para este estudio.

1.2.1.4. Técnicas de cobertura cruzada.

En cuanto a las técnicas de cálculo de coberturas cruzadas, Chen *et al.* (2003) definen el cálculo de la ratio de cobertura de mínima varianza como el uso de técnicas estadísticas para obtener un ratio óptimo que minimice las fluctuaciones de los precios al contado. El rendimiento de una cobertura al contado basada en un único contrato de futuros puede definirse como se muestra en la ecuación 12

$$r_h = r_s - hr_f, \quad (12)$$

donde r_h es el rendimiento de la cobertura, r_s es el rendimiento del contrato al contado, r_f es el rendimiento del contrato de futuros y h es la ratio de cobertura. Cui y Feng (2020) amplían el rendimiento de la cobertura basándose en dos contratos de futuros, lo que puede generalizarse a un mayor número de contratos:

$$r_h = r_s - \sum_{i=1}^n h_i r_{f_i}. \quad (13)$$

Chen *et al.* (2003) y Lien y Tse (2002) revisan las metodologías de cobertura utilizadas en la literatura, los trabajos se agrupan según la función objetivo que se desee optimizar. Los primeros trabajos se centraban en minimizar el riesgo de cobertura (ejemplos notables son Ederington, 1979; Johnson, 1960; Myers y Thompson, 1989). Estas metodologías, conocidas como cobertura de mínima varianza, no tienen en cuenta el rendimiento futuro de la cobertura y, por lo tanto, no son coherentes con el marco de cobertura de media-varianza. En otro sentido, hay trabajos importantes que se proponen maximizar la función de utilidad esperada de media-varianza (Kroner y Sultan, 1993; Chin-

Wen *et al.*, 1994; Gagnon *et al.*, 1998; Brooks *et al.*, 2002; Haigh y Holt, 2002; Alizadeh *et al.*, 2008; Conlon *et al.*, 2016; Kamdem *et al.*, 2020, y Cui y Feng, 2020). Estos marcos analíticos definen una función de utilidad que condiciona el rendimiento de la cobertura. En cuanto a las formas funcionales de dichas funciones de utilidad, en la literatura se utilizan diferentes tipos, pero solo en el caso de la función de utilidad cuadrática, los rendimientos se distribuyen normalmente y la aproximación de la utilidad esperada media-varianza es consistente (Levy y Markowitz, 1979; Kroll *et al.*, 1984). En el trabajo de Kamdem *et al.* (2020) se calcula la relación de varianza mínima del cacao basada en diferentes formas funcionales y concluyen que las formas funcionales cuadrática y exponencial ofrecen la mejor cobertura con un 87,9%. Por lo tanto, la función de utilidad cuadrática puede definirse como:

$$U(r_h) = r_h - Ar_h^2, \quad (14)$$

donde A es la aversión al riesgo asumida que se utilizará en la cobertura del precio spot, y el problema de maximización de la utilidad esperada es:

$$\begin{aligned} \max_h EU(r_h) &= E(r_h) - Avar(r_h) \\ \text{s. a.} \quad r_h &= r_s - \sum_{i=1}^n h_i r_{f_i} \end{aligned} \quad (15)$$

Cui y Feng (2020) resolvieron este problema para cubrir una posición al contado basada en dos contratos de futuros, llegando al siguiente resultado para la cobertura que maximiza la utilidad esperada:

$$h_1 = \frac{\text{cov}(r_s, r_{f_1})\text{var}(r_{f_2}) - \text{cov}(r_s, r_{f_2})\text{cov}(r_{f_1}, r_{f_2})}{\text{var}(r_{f_1})\text{var}(r_{f_2}) - \text{cov}^2(r_{f_1}, r_{f_2})} + \frac{E(r_{f_2})\text{cov}(r_{f_1}, r_{f_2}) - E(r_{f_1})\text{var}(r_{f_2})}{A[\text{var}(r_{f_1})\text{var}(r_{f_2}) - \text{cov}^2(r_{f_1}, r_{f_2})]} \quad (16a)$$

$$h_2 = \frac{\text{cov}(r_s, r_{f_2})\text{var}(r_{f_1}) - \text{cov}(r_s, r_{f_1})\text{cov}(r_{f_1}, r_{f_2})}{\text{var}(r_{f_1})\text{var}(r_{f_2}) - \text{cov}^2(r_{f_1}, r_{f_2})} + \frac{E(r_{f_1})\text{cov}(r_{f_1}, r_{f_2}) - E(r_{f_2})\text{var}(r_{f_1})}{A[\text{var}(r_{f_1})\text{var}(r_{f_2}) - \text{cov}^2(r_{f_1}, r_{f_2})]} \quad (16b)$$

Si la aversión al riesgo tiende a infinito ($A \rightarrow \infty$) o los rendimientos esperados de los contratos de futuros son cero, entonces la segunda parte de la ecuación es cero. En este caso, el resultado es el mismo que para los problemas de mínima varianza (Chen *et al.*, 2003):

$$h_1 = \frac{\text{cov}(r_s, r_{f_1})\text{var}(r_{f_2}) - \text{cov}(r_s, r_{f_2})\text{cov}(r_{f_1}, r_{f_2})}{\text{var}(r_{f_1})\text{var}(r_{f_2}) - \text{cov}^2(r_{f_1}, r_{f_2})} \quad (17a)$$

$$h_2 = \frac{\text{cov}(r_s, r_{f_2})\text{var}(r_{f_1}) - \text{cov}(r_s, r_{f_1})\text{cov}(r_{f_1}, r_{f_2})}{\text{var}(r_{f_1})\text{var}(r_{f_2}) - \text{cov}^2(r_{f_1}, r_{f_2})} \quad (17b)$$

Por consiguiente, el objetivo último de la cobertura es garantizar la reducción del riesgo al contado. Para lograr este objetivo se desarrollaron coeficientes de eficacia de la cobertura. Destaca el coeficiente desarrollado por Ederington (1979):

$$HE_{variance} = \frac{var(r_s) - var(r_h)}{var(r_s)} = \rho^2 \quad (18)$$

Este coeficiente mide la variación porcentual entre la varianza no cubierta y la cubierta. Este coeficiente de cobertura también puede venir dado por el coeficiente de determinación, R^2 (Conlon *et al.*, 2016).

En resumen, se proporciona un marco sobre el que construir la cobertura del precio de los piensos y medir su eficacia. Sobre la base de este marco, la siguiente sección presenta los datos disponibles y el procedimiento metodológico aplicado para construir la cobertura óptima que maximiza la utilidad esperada para el caso de estudio abordado en este apartado.

1.2.2. Materiales y métodos

1.2.2.1. Materiales

Existen varios tipos de piensos con diferentes componentes en función de las necesidades nutricionales de los animales. Para este estudio, se utiliza el pienso de cordero de engorde porque juega un papel más importante en la estructura de costes de producción de la ganadería ovina de carne en Extremadura, como se vio en el apartado anterior. Esto no influirá en los resultados de este estudio, ya que simplemente implica cambiar las proporciones respectivas de los componentes en caso de utilizar otras variedades de pienso.

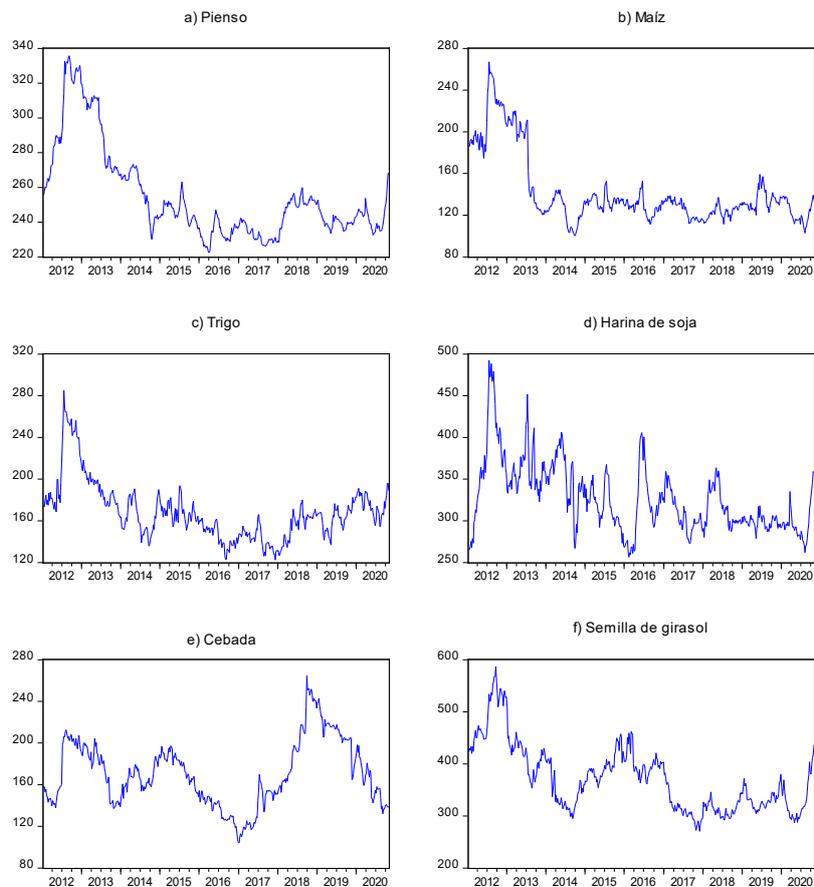
Para el precio del pienso de los corderos de cebo se ha consultado la base de datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de España (MAPAMA), cuya información ha sido facilitada por la Subdirección General de Medios de Producción Ganaderos. La serie semanal abarca desde la primera semana de 2012 (13 de enero de 2012) hasta la cuadragésima cuarta semana de 2020 (30 de octubre de 2020), es decir, un total de 434 observaciones (Ministerio de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de España, 2020). El Ministerio de Agricultura presenta los datos en euros por tonelada métrica.

En este contexto, la mayor parte de la bibliografía analizada (Miller, 1982; Wilson, 1982; Braga y Martin, 1990; Brinker *et al.*, 2009; Adams y Greger, 2012, y Cui y Feng, 2020) utiliza una frecuencia semanal, que proporciona más información que una frecuencia inferior para un programa de gestión de riesgos que cubra un ciclo de producción completo, además de permitir un análisis más detallado de los vínculos de precios entre los contratos al contado y de futuros.

Los precios de los contratos de futuros de commodities se obtuvieron de la base de datos Thomson Reuters Eikon (2020), que proporciona acceso a los precios de todos los mercados que se actualizan semanalmente: maíz, trigo y harina de soja, de la Bolsa de Chicago (CME); cebada, del Mercado de Futuros de Sydney (SFE), y semillas de girasol, de la Bolsa de Johannesburgo (JSE). Cada contrato de futuros es el más próximo al vencimiento y el primero disponible de la semana.

Todos los contratos se han convertido a euros y se han transformado de forma que, basándose en las características de cada contrato enumeradas en el Cuadro 5, cada precio refleje la información por una tonelada de la mercancía (Figura 9).

Figura 9. Precio local de los piensos y precios internacionales de los principales componentes. En euros por tonelada.



Elaboración propia a partir de la base de datos Thomson Reuters Eikon (2020).

Por último, para llevar a la práctica esta herramienta financiera, se calculó la aplicación de una cobertura cruzada a partir de los datos reales de consumo de pienso de los ganaderos. La información se obtuvo de varias fuentes como el Ministerio de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente (MAPAMA) del Gobierno de España, utilizando la metodología de Explotaciones Típicas, que proporciona información sobre la estructura financiera de la Red de Explotaciones Típicas de España (REGRANTI, 2018). Asimismo, las cantidades de alimentación se han tomado de los datos obtenidos en el apartado anterior.

1.2.2.2. Metodología

El precio de los piensos se modela mediante la especificación de una regresión lineal múltiple con los futuros de las commodities como variables independientes y el precio de los piensos como variable dependiente.

Esta primera especificación es un paso preliminar hacia modelos más complejos; sin embargo, este primer enfoque se basa en dos motivos interrelacionados. En primer lugar, no existen casos de estudio previos sobre la cobertura de compuestos para piensos de cordero. En segundo lugar, el enfoque está concebido como una herramienta práctica para la transferencia de tecnología al sector productivo. En este sentido, primarán la

sencillez y la parsimonia, teniendo en cuenta que la cobertura sólo será óptima si se adopta con eficiencia.

En cuanto a la especificación del modelo, se prueban varias combinaciones de tiempo y frecuencia en función de las distintas fechas de entrega de los contratos, seleccionando el modelo final en función de la significación estadística y el poder explicativo. Se utiliza el enfoque de maximización de la utilidad de acuerdo con las especificaciones del marco teórico.

El procedimiento para elaborar el contrato futuro compuesto que maximiza la utilidad es el siguiente:

En primer lugar, se utiliza la tasa de variación logarítmica para garantizar que las variables son estacionarias y que los resultados no son espurios:

$$r_{i,t} = \Delta \log(P_{i,t}), \quad (19)$$

donde $P_{i,t}$ es el precio del pienso o del contrato de futuros en el momento t .

Siguiendo el enfoque de maximización de la utilidad basado en los cocientes de cobertura establecidos en las ecuaciones 7a y 7b, se supone que el coeficiente de aversión al riesgo de los ganaderos tiende a infinito ($A \rightarrow \infty$) y que el objetivo es compensar el precio de los piensos para minimizar su volatilidad en lugar de obtener un beneficio⁵. En este caso, el coeficiente de cobertura sería el indicado en las ecuaciones 8a y 8b siempre que sólo hubiera dos fuentes de riesgo. Sin embargo, la cobertura del pienso se analiza en función de sus componentes. Por lo tanto, los coeficientes de cobertura serán los indicados en la ecuación 20

$$H^T = \begin{pmatrix} \text{var}(r_{f_i}) & \cdots & \text{cov}(r_{f_i}, r_{f_j}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(r_{f_i}, r_{f_j}) & \cdots & \text{var}(r_{f_j}) \end{pmatrix}_{j \neq i}^{-1} \begin{pmatrix} \text{cov}(r_p, r_{f_i}) \\ \vdots \\ \text{cov}(r_p, r_{f_j}) \end{pmatrix} \text{ para } i \neq j, \quad (20)$$

donde r_{f_i} y r_{f_j} son los tipos de cambio logarítmicos de cada uno de los contratos de futuros sobre componentes de piensos, y r_p es la tasa de variación logarítmica del precio de los piensos. Por lo tanto H^T es la matriz de los índices de cobertura de los piensos para cada uno de sus componentes.

Estas ratios de cobertura corresponden a las betas de una ecuación lineal múltiple con más de una variable explicativa. Así, las coberturas se calculan usando dicha ecuación

⁵ Musser y Patrick (2002) realizaron una revisión bibliográfica sobre el comportamiento de los ganaderos con respecto a las distintas fuentes de riesgo. Informaron de que el ganadero es conservador con respecto al riesgo y al beneficio, afirmando que, por un lado, muchos ganaderos tienen reservas de liquidez y solvencia más que suficientes y, por otro, algunas fuentes de riesgo que escapan al control de los ganaderos les hacen ser más reacios al riesgo. Una de esas fuentes potenciales son los efectos extremos del cambio climático.

(ecuación 21), dónde la variable dependiente es el rendimiento del pienso y las variables explicativas son los contratos de futuros sobre commodities:

$$r_{s,t} = \alpha + \sum_{i=1}^m h_i * r_{F_i,t} + \varepsilon_t, \quad (21)$$

donde α es la constante $r_{s,t}$ es el rendimiento de los piensos durante el período en el momento t , $r_{F_i,t}$ es el valor del rendimiento del contrato de futuros de cada uno de los componentes del pienso, ε_t es la perturbación y, por último, el parámetro h_i es la cobertura cruzada óptima de cada commodity.

Para evitar una regresión espuria, es necesario comprobar que la serie es estacionaria, realizando una prueba de raíz unitaria (Witt *et al.*, 1987). La prueba Dickey-Fuller aumentada (ADF) se utiliza para explorar la estacionariedad de la serie de acuerdo con la siguiente ecuación (Dickey y Fuller (1979)):

$$\Delta X_t = \theta_0 + \varphi_0 t + \varphi_1 X_{t-1} + \sum_{i=1}^m \theta_i \Delta X_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (22)$$

donde X_t es cada variable (precio de los piensos y contratos de futuros sobre commodities) en el momento t , ε_t es la perturbación con distribución $(0, \sigma^2)$ y m es el orden del retardo. Si es significativamente inferior a cero, se rechaza la hipótesis nula de que exista una raíz unitaria y, por tanto, la serie es, en promedio, estacionaria.

Las formas del modelo de regresión lineal múltiple se muestran en la ecuación 21 para obtener la mejor cobertura de piensos utilizando contratos de futuros de componentes de piensos. Los siguientes modelos se basan en rendimientos semanales, mensuales, trimestrales, semestrales y anuales:

$$r_{F,t}^W = \alpha + h_C * r_{F_C,t}^W + h_W * r_{F_W,t}^W + h_{SB} * r_{F_{SB},t}^W + h_B * r_{F_B,t}^W + h_{SF} * r_{F_{SF},t}^W + \varepsilon_t, \quad \text{Modelo I}$$

$$r_{F,t}^M = \alpha + h_C * r_{F_C,t}^M + h_W * r_{F_W,t}^M + h_{SB} * r_{F_{SB},t}^M + h_B * r_{F_B,t}^M + h_{SF} * r_{F_{SF},t}^M + \varepsilon_t, \quad \text{Modelo II}$$

$$r_{F,t}^Q = \alpha + h_C * r_{F_C,t}^Q + h_W * r_{F_W,t}^Q + h_{SB} * r_{F_{SB},t}^Q + h_B * r_{F_B,t}^Q + h_{SF} * r_{F_{SF},t}^Q + \varepsilon_t, \quad \text{Modelo III}$$

$$r_{F,t}^B = \alpha + h_C * r_{F_C,t}^B + h_W * r_{F_W,t}^B + h_{SB} * r_{F_{SB},t}^B + h_B * r_{F_B,t}^B + h_{SF} * r_{F_{SF},t}^B + \varepsilon_t, \quad \text{Modelo IV}$$

$$r_{F,t}^A = \alpha + h_C * r_{F_C,t}^A + h_W * r_{F_W,t}^A + h_{SB} * r_{F_{SB},t}^A + h_B * r_{F_B,t}^A + h_{SF} * r_{F_{SF},t}^A + \varepsilon_t, \quad \text{Modelo V}$$

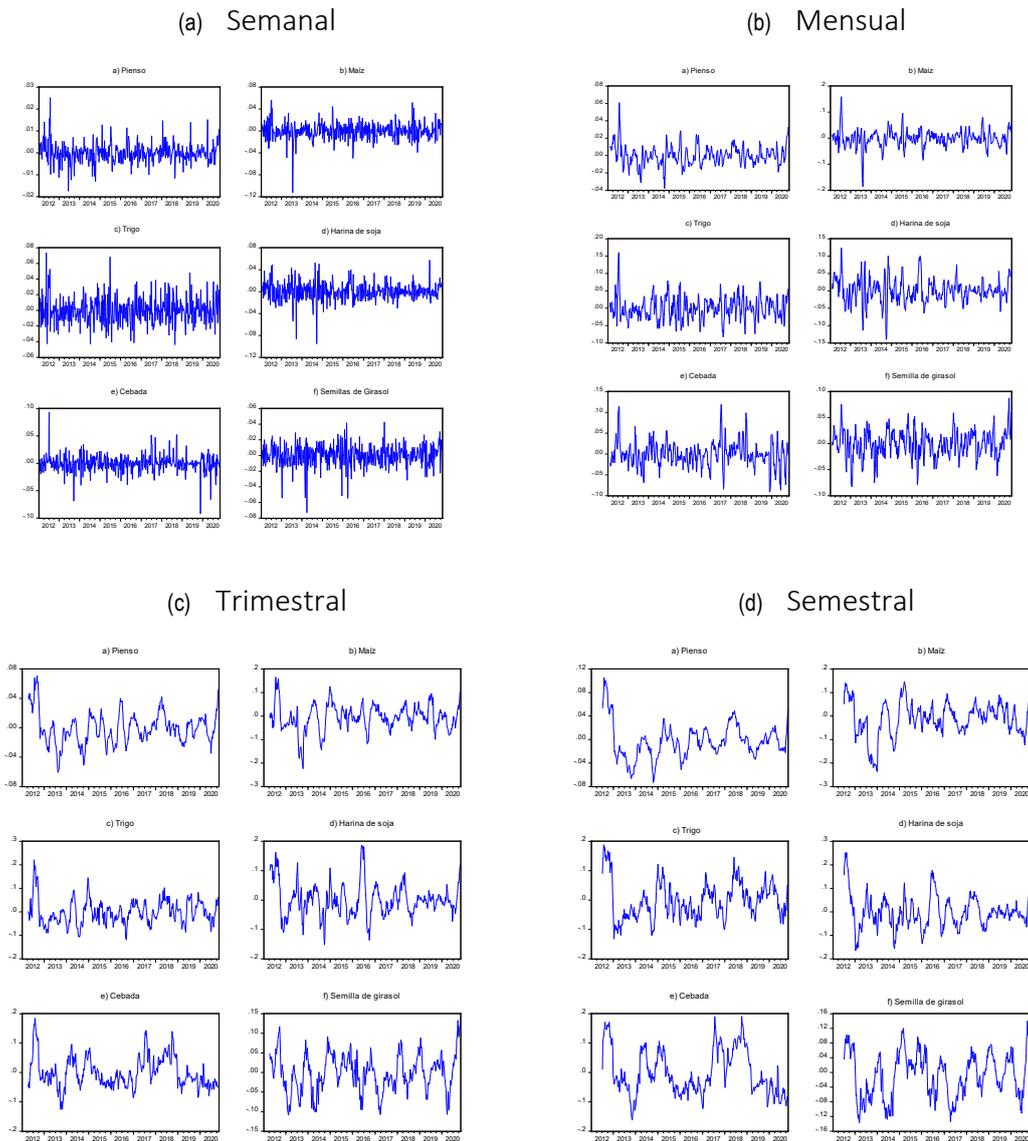
donde los modelos I, II, III, IV y V representan los rendimientos semanales, mensuales, trimestrales, semestrales y anuales, respectivamente; \mathbf{h}_C , \mathbf{h}_W , \mathbf{h}_{SB} , \mathbf{h}_B y \mathbf{h}_{SF} son las coberturas óptimas para el maíz, el trigo, la harina de soja, la cebada y las semillas de girasol, respectivamente, para esta cartera, y, por último ε_t es la perturbación.

1.2.3. Resultados

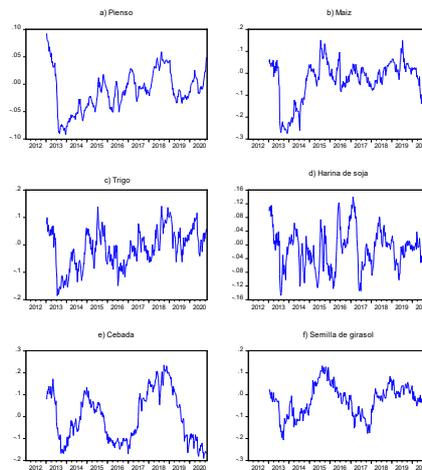
1.2.3.1. Modelo más eficiente para la cobertura

Se utilizó la prueba de Dickey-Fuller para analizar la estacionariedad de todas las variables independientes para las frecuencias temporales analizadas en el estudio: semanal, mensual, trimestral, semestral y anual (Figura 10). Los resultados muestran que todas las variables son estacionarias, excepto: los rendimientos semestrales para la cebada y las semillas de girasol; y los rendimientos anuales para el maíz, la cebada y las semillas de girasol (Cuadro 6).

Figura 10. Variación logarítmica de los precios



(e) Anual



Elaboración propia a partir de la base de datos Thomson Reuters Eikon (2020).

Cuadro 6. Prueba de Dickey-Fuller aumentada (constante y tendencia)

	Pienso	Maíz	Trigo	Harina de soja	Cebada	Semilla de girasol
Semanal	-11.464***	-19.967***	-21.496***	-20.512***	-21.362***	-22.552***
Mensualmente	-5.038***	-5.124***	-5.513***	-5.782***	-4.069***	-4.342***
Trimestral	-4.806***	-4.086***	-4.726***	-5.861***	-3.375*	-3.389*
Semestral	-3.633**	-3.768**	-3.899**	-4.638***	-2.839	-2.981
Anual	-4.253***	-2.858	-4.277***	-5.007***	-1.591	-2.854

Nota: Prueba Dickey-Fuller aumentada con constante y tendencia: * es significativo al 90%; ** es significativo al 95%; *** es significativo al 99%.

Por lo tanto, se descartan las variables semestrales y anuales, y se realizan tres modelos de regresión por mínimos cuadrados ordinarios para las frecuencias semanal, mensual y trimestral. Los resultados de la regresión muestran que hay variables que no son estadísticamente significativas en los modelos de baja frecuencia (semanal y mensual), mientras que todas las variables son significativas en el modelo de frecuencia trimestral (cuadro 7).

Cuadro 7. Regresiones de modelos semanales, mensuales y trimestrales

	Modelo I: tasa de variación logarítmica semanal	Modelo II: tasa de variación logarítmica mensual	Modelo III: tasa de variación logarítmica trimestral
β_0	2.58E-05 (1.99E-04)	-9.60E-05 (3.90E-04)	-4.51E-04 (6.29E-04)
h_{MAIZ}	0.006 (0.017)	-0.007 (0.018)	0.059 (0.018) ***
h_{TRIGO}	0.007 (0.015)	0.053 (0.016) ***	0.072 (0.018) ***
$h_{HARINA DE SOJA}$	0.075 (0.014) ***	0.166 (0.015) ***	0.181 (0.014) ***
h_{CEBADA}	0.021 (0.014)	0.039 (0.014) ***	0.043 (0.014) ***
$h_{SEMILLA DE GIRASOL}$	0.021 (0.015)	0.074 (0.016) ***	0.075 (0.075) ***
R^2	0.114	0.465	0.633
Criterio de información de Akaike	-8.069	-6.734	-5.813
Criterio de Schwarz	-8.048	-6.680	-5.758
Observaciones	459	456	447

Nota: El error estándar se indica entre paréntesis. * es significativo al 90%; ** es significativo al 95%; *** es significativo al 99%.

Considerando el único modelo en el que todos los coeficientes son significativos (modelo III - frecuencia trimestral), el 63,3% de la variación del precio de los piensos se explica por las variaciones de precios de sus principales componentes. En otras palabras, la varianza trimestral del precio de los piensos puede reducirse en un 63,3% mediante la cobertura con contratos futuros de maíz, trigo, harina de soja, cebada y semillas de girasol.

Sin embargo, como se especifica en el marco teórico, varios autores han afirmado que la dificultad principal de la cobertura cruzada es encontrar el número óptimo de contratos de futuros para armar la cobertura. A medida que aumenta el número de contratos y mercados, la parte operativa se complica mucho más. Por lo tanto, el modelo de regresión trimestral se ejecuta utilizando únicamente maíz, trigo y harina de soja, todos ellos negociados en la Bolsa de Chicago (CME). Así, se omiten los contratos de cebada y semillas de girasol. Además, se ejecuta el modelo semestral, aprovechando el hecho de que los rendimientos semestrales de los contratos negociados en la CME son estacionarios.

En ambos modelos, las tres variables son significativas y la adecuación no varía, con una R^2 del 60,4% en el caso del marco temporal trimestral y del 65,3% en el caso del modelo semestral (Cuadro 8).

Cuadro 8. Modelo de regresión trimestral y semestral en el mercado de futuros de Chicago

	Modelo III: tasa de variación logarítmica trimestral sólo para las commodities CME	Modelo IV: tasa de variación logarítmica semestral sólo para las commodities CME
β_0	-4.46E-04 (6.51E-04)	-0.001 (8.48E-04) *
h_{MAIZ}	0.088 (0.017) ***	0.103 (0.016) ***
h_{TRIGO}	0.099 (0.018) ***	0.165 (0.019) ***
$h_{HARINA DE SOJA}$	0.169 (0.014) ***	0.155 (0.015) ***
h_{CEBADA}	-	
$h_{SEMILLA DE GIRASOL}$	-	
R^2	0.604	0.653
<i>Criterio de información de Akaike</i>	-5.382	-5.263
<i>Criterio de Schwarz</i>	-5.364	-5.225
<i>Observaciones</i>	447	435

Nota: El error estándar se indica entre paréntesis. * es significativo al 90%; ** es significativo al 95%; *** es significativo al 99%.

Como resultado, y contribución clave de este documento, el modelo IV con contratos de futuros de Chicago únicamente, es el mejor de los modelos presentados, ya que tiene una R^2 mayor y una cobertura más eficaz.

Uno de los problemas que surgían de las coberturas cruzadas es que el aumento de la eficacia por añadir un contrato de futuro más es mínimo respecto a la cobertura directa (Chen y Sutcliffe, 2012). A continuación, en el cuadro 9 se presentan los resultados de una cobertura directa de las coberturas directas para los futuros de Chicago y una frecuencia semestral, ya que ha sido el modelo de mejor eficiencia:

Cuadro 9. Cobertura directa utilizando un modelo de regresión bianual con cada commodity en el mercado de futuros de Chicago

Commodities	α	h_i	R^2	Criterio de información de Akaike	Criterio de Schwarz	Observaciones
Maíz	-1.65E-7 (0.001)	0.274 (0.014)***	0.448	-4.808	-4.789	435
Trigo	-0.003 (9.97E-4)***	0.330 (0.016)***	0.499	-4.904	-4.886	435
Harina de soja	-0.003 (0.001)	0.286 (0.016)***	0.434	-4.781	-4.763	435

Nota: El error estándar se indica entre paréntesis. * es significativo al 90%; ** es significativo al 95%; *** es significativo al 99%.

Estos resultados nos ayudan a confirmar que la eficacia del modelo con las tres commodities es casi 20 puntos porcentuales superior a la cobertura individual. Además, observando los criterios de información, el modelo con los tres contratos de futuros tiene mejores criterios que cualquiera de los individuales.

Por último, el cuadro 10 muestra los futuros necesarios para confeccionar el contrato de futuros sintético que minimizaría el riesgo de variación del precio de los piensos, con la siguiente eficacia de cobertura: 63,3% en el modelo III, 60,3% en el modelo III sólo con futuros CME y 65,3% en el modelo IV sólo con futuros CME.

Cuadro 10. Proporción de contratos de futuros sobre commodities necesarios para cubrir una tonelada de pienso.

	Maíz	Trigo	Harina de soja	Cebada	Semillas de girasol	Eficacia de la cobertura
Modelo III	0.466	0.530	1.996	2.149	1.494	63.3%
Modelo III (sólo con commodities CME)	0.694	0.726	1.867	-	-	60.3%
Modelo IV (sólo con commodities CME)	0.814	1.213	1.706	-	-	65.3%

Sin embargo, a nivel de aplicación, dado que en los mercados de futuros regulados sólo pueden comprarse contratos de futuros enteros, sería necesario redondear al número entero más próximo. Entonces, es necesario evaluar la eficacia de la cobertura aproximando el porcentaje de cobertura al entero más cercano. Para poner en práctica la cobertura del precio de los piensos con la máxima eficacia, habría que comprar un contrato de futuros de maíz, uno de trigo y dos de harina de soja. En este caso, la eficacia sería del 64,98% (Cuadro 11). Cabe destacar que la eficacia de la cobertura no se ve afectada en una estrategia más sencilla.

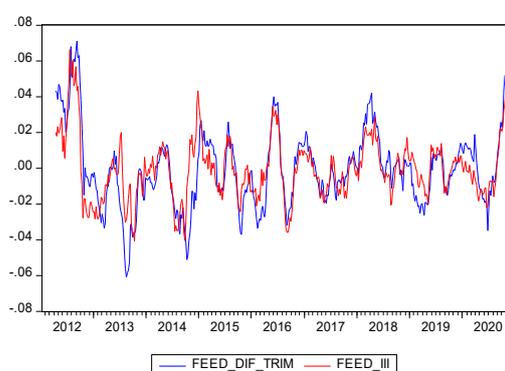
Cuadro 11. Eficacia de la cobertura con contratos completos

	Maíz	Trigo	Harina de soja	Cebada	Semillas de girasol	Eficacia de la cobertura
Modelo IV (sólo con commodities CME)	1	1	2	-	-	64.98%

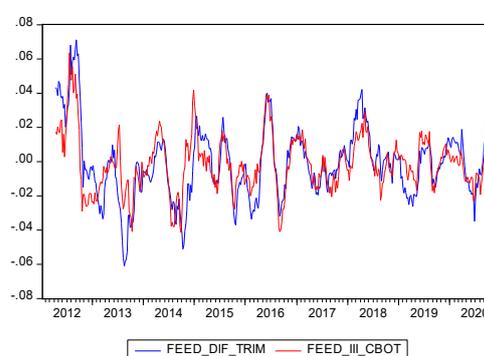
En el Figura 11 se presenta la variación de precios estimada para cada uno de los cuatro modelos y su comparación con la variación de precios observada.

Figura 11. Precios de alimentación modelizados y observados

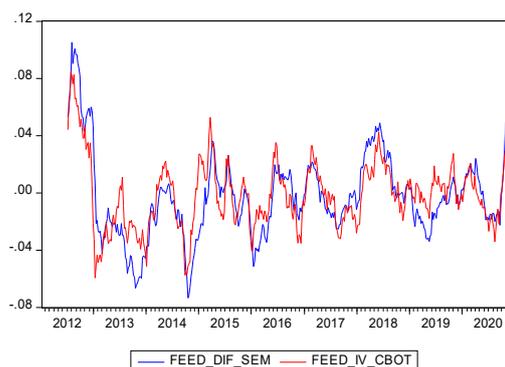
a) Modelo III



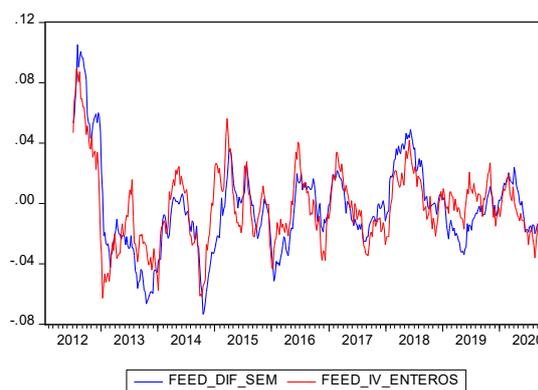
b) Modelo III (sólo con commodities CBOT)



c) Modelo IV (sólo con commodities CBOT)



d) Modelo IV (sólo con commodities CBOT, contratos completos)



En resumen, los cuatro modelos con diferentes periodos de tiempo y simplicidad operativa proporcionan una eficacia de cobertura similar. Los resultados muestran que es posible y deseable que los ganaderos de carne de cordero en España cubran sus precios de alimentación, aunque no existan mercados futuros específicos para ese producto concreto.

1.2.3.2. Puesta en práctica de la cobertura cruzada

Se ha puesto en práctica la herramienta financiera para una explotación representativa siguiendo la estrategia de cobertura cruzada del precio del pienso óptima propuesta en el apartado anterior (cuadro 8). Se ha aplicado una cobertura cruzada con vencimiento a seis meses utilizando los tres futuros negociados en CME, para cubrir el pienso entre 2012 y 2020⁶. Este resultado se ha comparado con el coste anual de alimentación para una explotación de ganadería extensiva tomada como referencia en Extremadura, que se caracterizan por operar al límite de la rentabilidad y verse afectadas significativamente por la volatilidad de los precios, como se pudo ver en el apartado anterior.

Se ha obtenido el coste por tonelada para cada año, calculando el gasto medio anual en alimentación con y sin cobertura para una mejor comparación. A continuación, se presenta como ejemplo los resultados para el caso de 2012, siendo este el que mayor volatilidad presenta el precio del pienso:

1. En primer lugar, el precio al contado mensual del pienso y el gasto total previsto para una explotación representativa el año 2012 (cuadro 12):

Cuadro 12. Gastos previstos en piensos para una explotación representativa en 2012

Día	Mercado	Cantidad de pienso prevista (tns)	€/Tn	Largo/Corto	Total (euros)
13-Ene	Efectivo	13	255.72	Corto	3,324.36
13-Feb	Efectivo	13	262.50	Corto	3,412.50
13-Mar	Efectivo	13	268.40	Corto	3,489.20
13-Abr	Efectivo	13	281.00	Corto	3,653.00
13-May	Efectivo	13	289.21	Corto	3,759.73
13-Jun	Efectivo	13	287.31	Corto	3,735.03
13-Jul	Efectivo	13	313.56	Corto	4,076.28
13-ago	Efectivo	13	331.00	Corto	4,303.00
13-Sep	Efectivo	13	330.00	Corto	4,290.00
13-Oct	Efectivo	13	320.00	Corto	4,160.00
13-Nov	Efectivo	13	327.00	Corto	4,251.00
13-Dic	Efectivo	13	326.00	Corto	4,238.00

Elaboración propia a través de datos del consumo de pienso previsto para una explotación representativa (REGRANTI, 2018) y del Ministerio de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente (2020).

⁶ Los resultados de una estrategia de cobertura deben evaluarse sobre una base plurianual, dado que las cifras de un año concreto pueden verse afectadas por numerosas razones.

2. En segundo lugar, se presenta la ejecución de la cobertura cruzada más eficiente (cuadro 13):

Cuadro 13. Ejecución de la cobertura cruzada semestral del pienso con futuros CME en 2012

Fecha de la operación	Commodities	Posición	Largo/Corto	Precio operado (€)	Precio de mercado (euros)	tns por contrato	Saldo por contrato (euros)	Saldo global (euros)
13-Ene	Maíz	WZ12	largo	186.20	242.9	127.00	56.71	2,916.63
13-Ene	Trigo	WZ12	largo	174.60	252.6	136.01	78.00	6,421.37
13-Ene	Harina de soja	WZ12	largo	265.00	439.9	90.72	174.90	13,570.90
13-Jul	Maíz	WZ12	largo	242.90	209.1	127.00	-33.76	-868.30
13-Jul	Trigo	WZ12	largo	252.60	207.8	136.08	-44.72	-1,840.63
13-Jul	Harina de soja	WZ12	largo	439.90	333.0	90.72	-106.92	-4,148.05

Elaboración propia. a través de datos de Thomson Reuters Eikon (2020).

3. Por último, se presenta el balance de la aplicación de la cobertura cruzada para una explotación representativa (cuadro 14):

Cuadro 14. Balance de cobertura cruzada para el año 2012

Coste total del pienso	€ 46,692.10
Pienso sin cobertura (Euro/Tn)	€ 299.31
Saldo con cobertura	€ 16,051.92
Total de piensos cubiertos	€ 30,640.18
Alimentación con cobertura (Euro/Tn)	€ 196.41

Si se hubiera aplicado la cobertura cruzada para el año 2012 se habría obtenido un beneficio global para una explotación típica de 16,051.92 euros. En el cuadro 15 se presenta el resultado de la aplicación de la herramienta financiera para el periodo de 2012 a 2020.

Cuadro 15. Aplicación de la cobertura cruzada

Año	Gasto total en piensos (euros)	Gasto medio anual en piensos sin cobertura (€/Tm)	Resultado de la cobertura (euros)	Gasto total en piensos con cobertura (euros)	Gasto medio anual en piensos con cobertura (€/Tm)
2012	46,692.10	299.31	16051.92	30,640.18	196.41
2013	45,409.00	291.08	196.71	45,212.29	289.82
2014	40,027.00	256.58	-523.55	40,550.55	259.94
2015	38,402.00	246.17	-1342.99	39,744.99	254.78
2016	36,288.20	232.62	5619.86	30,668.34	196.59
2017	36,277.66	232.55	-4917.79	41,195.46	264.07
2018	39,206.94	251.33	4956.66	34,250.28	219.55
2019	37,648.45	241.34	2267.01	35,381.44	226.80
2020	38,741.67	248.34	5190.78	33,550.89	215.07

Como resultado final, si las explotaciones aplican una cobertura cruzada a lo largo de todo el periodo analizado, se obtiene un beneficio global de 27.498,61 euros, lo que certifica la eficacia de la herramienta financiera.

El objetivo principal es ayudar a los ganaderos a estabilizar sus costes de alimentación y reducir la volatilidad de los precios. En el ejercicio que aquí se presenta, la volatilidad de los precios se reduce hasta un 50%.

Hay que señalar que la aplicación de estas herramientas no tiene prácticamente ningún coste particular para el productor, con beneficios financieros y de planificación demostrados, especialmente para los pequeños productores con márgenes reducidos. Sin embargo, requiere conocimientos específicos para su diseño e implementación y, por otro lado, exige una planificación a largo plazo para obtener los beneficios esperados. Por lo tanto, podemos concluir que la cobertura cruzada es una herramienta adecuada para una asociación de explotaciones como una cooperativa, que es la estructura organizativa de las explotaciones analizadas en este estudio.

Utilizando estas herramientas de reciente creación, los agricultores pueden establecer un programa de gestión de riesgos para sus necesidades de alimentación que maximice su utilidad y permita una planificación a largo plazo. Especialmente un modelo simplificado que incluya una cobertura cruzada mediante futuros de la Bolsa Mercantil de Chicago (CME) proporciona una cobertura eficaz y es una opción factible tanto en la teoría como en la práctica. Un programa de gestión de riesgos es óptimo cuando permite a los agricultores concentrarse en sus necesidades productivas más que en las financieras. Por lo tanto, un modelo simplificado como el que aquí se presenta es una estrategia óptima de reducción del riesgo para los agricultores.

1.2.4. Conclusiones.

De este apartado pueden extraerse cuatro conclusiones principales:

- El 96% de los piensos para corderos está compuesto por commodities que pueden comprarse o cubrirse en los mercados internacionales de futuros, como el maíz, la harina de soja, el trigo, las semillas de girasol y la cebada.
- Utilizando una estrategia de cobertura cruzada, la variabilidad de los precios puede reducirse hasta un 63,3%, estableciendo una cartera óptima de contratos futuros de maíz, harina de soja, trigo, semillas de girasol y cebada bajo el supuesto de maximización de la utilidad esperada y aversión al riesgo.
- Teniendo en cuenta que la primera cartera podría ser difícil de negociar y gestionar, dado que implica múltiples mercados y divisas, una versión simplificada que incluye sólo futuros de la Bolsa Mercantil de Chicago (CME) (trigo, maíz y harina de soja) proporciona una eficacia de cobertura del 65,3%.
- Se probaron varias combinaciones para distintos periodos a fin de lograr el periodo de cobertura óptimo, comprobándose que un periodo de mantenimiento de seis meses para la cartera de cobertura maximiza la eficacia. Esto se explica por el factor de que los movimientos de precios en los mercados internacionales tardan en materializarse en los precios de los piensos. Por lo tanto, una cobertura óptima debe tener en cuenta este hecho.

La primera constatación es doble. Pone de relieve la exposición de la alimentación a la volatilidad de los precios internacionales, pero al mismo tiempo abre la posibilidad de aplicar una estrategia de gestión del riesgo dada la disponibilidad de mercados futuros. El segundo resultado es coherente con los hallazgos de toda la literatura, que muestran que una estrategia de cobertura cruzada mejora la ratio de cobertura cruzada. En este estudio concreto, una cobertura compuesta de tres contratos de futuros mejora la eficacia de la cobertura en un 19,26% de media, en comparación con la cobertura única. El tercer hallazgo es clave porque pretende mejorar la transferibilidad de la tecnología a la actividad ganadera simplificando los mercados en los que se aplica la cobertura sin que ello suponga una reducción de la eficacia. El cuarto punto es coherente con la literatura que muestra que los mercados locales ajustan los precios a un ritmo más lento en comparación con las fluctuaciones internacionales, incluso en mercados altamente integrados.

La principal aportación de este apartado es proporcionar una estrategia de cobertura compuesta que puede ser ejecutada por los ganaderos, que, a pesar de su simplicidad, podría reducir hasta en un 65,3% el riesgo de variabilidad del precio del pienso, permitiendo la implantación de programas de gestión integral del riesgo de precios. De su aplicación, se puede concluir que es factible la utilización de una cobertura cruzada para la alimentación animal en Extremadura. Sin embargo, debido a la complejidad técnica de su aplicación y al hecho de que requiere un largo plazo para obtener los

rendimientos esperados, esta herramienta financiera es más apropiada para ser utilizada directamente por las cooperativas que por las pequeñas explotaciones.

En cuanto a las limitaciones del estudio que pueden explorarse en futuras líneas de investigación, cabe mencionar al menos dos: (i) la evaluación de la eficacia de un modelo dinámico que tenga en cuenta información adicional sobre los precios que pueda modificar las proporciones de la cartera y (ii) la relajación de los supuestos relativos a la aversión al riesgo y la rentabilidad esperada.

1.3. Síntesis del capítulo.

La producción de carne de cordero es una actividad económica relevante en Extremadura. Desempeña un papel importante en la mejora de los medios de vida y el estatus socioeconómico de los pequeños ganaderos sin tierras en propiedad de territorios económicamente marginales. La actividad depende en gran medida de la producción de cada año para obtener unos beneficios mínimos que le permitan vivir dentro de un sector basado en los recursos naturales y directamente afectado por el riesgo climático.

La primera parte del capítulo ha consistido en la identificación y evaluación de las sequías que impactan en la producción de carne de ovino. Se ha concluido que existe un impacto indirecto producido por las sequías ya que estas producen escasez de pasto y, para que la productividad de la explotación no disminuya, los ganaderos lo compensan con un aumento de complemento alimenticio, resultado un aumento de costes finales. Se ha estimado que la suma de las pérdidas ocasionadas por eventos climáticos extremos de todas las explotaciones extremeñas ha sido de 41,2 millones de euros en la sequía de 2012 y de 12,9 millones de euros en la sequía de 2017. Además, en promedio, cada explotación redujo en torno al 45% de sus beneficios durante los años de sequía, siendo llamativo las explotaciones en régimen arrendatario que llegaron a tener pérdidas por la sequía de 2012.

Con esto se llegó a la conclusión de que los ganaderos no sólo se enfrentan al riesgo climático, sino que, además, al aumentar las cantidades de alimento balanceado durante las sequías subyace otro riesgo fruto de la volatilidad del precio del pienso. Esto sucede porque el precio de los piensos tiene una fuerte relación con el precio de sus componentes, que cotizan en los mercados internacionales. Por lo tanto, los riesgos a los que se enfrentan los productores proceden de los riesgos climático y de precios.

La segunda parte del capítulo ha consistido en diseñar una estrategia de adaptación al riesgo para las explotaciones ganaderas. Se tomó como punto de partida la existencia de múltiples herramientas de gestión del riesgo climático, pero teniendo en cuenta la ausencia en el mercado de estrategias de adaptación al riesgo de precios para este caso de estudio. Se comenzó analizando los mercados de futuros de commodities para concluir que, a pesar de que el pienso es el principal coste de producción, no existen mercados de futuros para aplicar estrategias de cobertura de gestión del riesgo de precios. Basándose en esta limitación, este trabajo desarrolló una cobertura compuesta utilizando contratos de futuros de los componentes del pienso (harina de soja, maíz y trigo, cebada y semillas de girasol). Se elaboró una herramienta efectiva, ya que utilizando una estrategia cruzada con todas las commodities que componen el pienso, la volatilidad del precio del suplemento alimenticio se reduce un 63.3%. Utilizando solo las commodities que cotizan en el mismo mercado (Bolsa de Chicago, CME), la variabilidad del precio del pienso se reduce un 65.3%. Se llevó a cabo la aplicación de la herramienta para una explotación representativa del caso de estudio, concluyendo que su utilización

es factible. Sin embargo, debido a la complejidad técnica de su puesta en práctica y de que es una herramienta que requiere largo plazo para que sea rentable, se recomienda que se ponga en práctica en agrupaciones de explotaciones, como pueden ser las cooperativas.

Capítulo 2. Impacto macroeconómico de los eventos climáticos extremos: el caso de la producción de soja y maíz en Argentina

La dinámica de crecimiento y desarrollo de muchos países latinoamericanos está vinculada a la exportación de recursos naturales. La volatilidad de los precios internacionales de las commodities y la demanda mundial afectan a la macroeconomía a través de al menos tres canales de transmisión: la generación de reservas internacionales, la actividad económica interna y los ingresos del sector público, dado el sesgo de la fiscalidad hacia los recursos naturales (Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe, 2021; Bravo-Ortega y De Gregorio, 2007; Briguglio *et al.*, 2008; Canuto y Cavallari, 2012; Céspedes y Velasco, 2012; Ffrench-Davis, 2005; Frankel, 2011; Gala, 2008; Guillaumont, 2009; Montalbano, 2011; Ocampo, 2007; Rodrik, 2008; Seth y Ragab, 2012).

En el caso de Argentina, el sector agropecuario tiene una alta incidencia en las exportaciones netas y en la actividad económica interna: los productos primarios y la producción agropecuaria representaron el 60% del total de las exportaciones del país en 2009-2018, mientras que la agroindustria representó al menos el 12,8% del Producto Interior Bruto (PIB). Si se considera toda la cadena de suministro de la agroindustria (transporte, comercio y servicios), la incidencia en el PIB será considerablemente mayor (Massot *et al.*, 2016).

A lo largo de este capítulo se estudió el impacto de los eventos climáticos extremos en la producción de soja y maíz en Argentina. Se siguió la estructura de trabajo del capítulo anterior: (i) se identificaron las sequías para después evaluar la magnitud del problema a escala macroeconómica a través de magnitudes monetarias; (ii) se proporcionó una estrategia de adaptación ante futuros impactos de eventos climáticos extremos mediante la proyección de la producción de soja.

La importancia de poner el foco en la soja y el maíz viene de tener la mayor incidencia en las exportaciones totales. Argentina es el tercer productor mundial de soja y el primer exportador de harina y aceite de soja. Estos tres productos representan el 23% de las exportaciones totales del país. En cuanto al maíz, aunque muy por debajo del 5% de las exportaciones totales, se ha producido un aumento de su producción en los últimos años. Además, en conjunto, la soja y el maíz representan el 28% de las exportaciones totales del país, lo que supone un flujo anual de 24.253 millones de dólares (el 60% de las reservas internacionales argentinas de 2021).

El cambio climático, que aumenta la variabilidad climática (Barros *et al.*, 2015; Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2012; Magrin *et al.*, 2014; Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres, 2013; Organización Meteorológica Mundial, 2014), puede afectar a la estructura de crecimiento de los países dependientes de los productos agrícolas de exportación. La producción de toda la superficie implantada de maíz y maíz se desarrolla sin riego, es por ello que la escasez de agua afecta directamente a la producción, especialmente durante el periodo de

crecimiento en enero y febrero. Los bajos niveles de precipitaciones y las escasas reservas hídricas generan importantes pérdidas de producción. En los últimos 20 años, tres sequías extremas (2008, 2011 y 2017) y siete sequías moderadas (2003, 2005, 2007, 2010, 2012, 2013 y 2015) han afectado a las zonas agrícolas, causando pérdidas significativas en la producción de soja y maíz.

A pesar de que se han realizado varios estudios sobre el impacto del cambio climático en la agricultura argentina (Murgida *et al.*, 2014; De Zarate, 2014; Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe, 2014, 2018) y el impacto de la variabilidad climática (Bert *et al.*, 2006; Hansen *et al.*, 2004; Heinzenknecht, 2011; Letson *et al.*, 2005; Letson *et al.*, 2009; Lozanoff y Cap, 2002; Magrin *et al.*, 2014; Podestá *et al.*, 2002; Podestá *et al.*, 2013; Rajagopalan *et al.*, 2009), ninguno de ellos ha estimado las pérdidas monetarias totales sufridas por todas las zonas agrícolas durante las sequías. Sabiendo de la incidencia económica de la soja y el maíz, aún no se dispone de modelos macro para estimar el impacto de las sequías en las zonas agrícolas desde una perspectiva financiera.

Con todo lo anterior, en este apartado se presenta, en primer lugar, un modelo capaz de identificar los eventos climáticos extremos y de proporcionar una estimación de las pérdidas monetarias generadas por diferentes niveles de sequía para las zonas de producción de soja y maíz, con una perspectiva financiera que permite la estimación del flujo de caja de las ganancias y pérdidas. En segundo lugar, a partir de los resultados obtenidos, en el siguiente apartado se generó una estrategia de planificación macrofiscal para la adaptación en el contexto del cambio climático.

2.1. Identificación y evaluación de los eventos climáticos extremos en la en la producción soja y maíz en Argentina.

Este apartado tiene el objetivo de identificar los eventos de sequía que impactan en la producción de soja y maíz en Argentina para evaluar las pérdidas producidas por el evento climático. Con este fin se presenta, en primer lugar, un marco teórico con los enfoques utilizados en la literatura para estimar el impacto de los eventos climáticos en el sector agrícola. Utilizando el modelo que mejor se adapte a los objetivos, se identificó y evaluó el impacto de las sequías para proporcionar magnitudes monetarias que permiten desarrollar políticas públicas orientadas a la adaptación.

2.1.1. Estado de la cuestión

En la literatura se pueden encontrar varios métodos para determinar el impacto económico de los fenómenos climáticos en el sector agrícola. Siguiendo a Giannakopoulos *et al.* (2009) y Roudier *et al.* (2011), pueden resumirse tres enfoques principales: los modelos de simulación de cultivos, el análisis ricardiano y la modelización estadística.

En primer lugar, los modelos de simulación de cultivos estudian la relación entre la tierra cosechable, la tecnología existente y las condiciones climáticas. El objetivo principal es diseñar una estrategia de cosecha (Motha, 2011). Según Motha (2011), los modelos de simulación del crecimiento de los cultivos estudian los distintos parámetros de un cultivo para predecir lo que puede ocurrir a lo largo del tiempo cuando se produce un fenómeno climático o cuando se modifica la estrategia de cultivo. Estos modelos son muy utilizados, pero su aplicación requiere muchos datos. Para llevarlos a cabo se utiliza el software *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (Jones *et al.*, 2003). En Argentina, Aramburu Merlos *et al.* (2015) utilizaron un modelo de simulación de cultivos para analizar cómo habría variado la producción de trigo, maíz y soja simulando diferentes escenarios de disponibilidad de agua. Concluyeron que la brecha de rendimiento es mayor en años húmedos y que el agua no se utiliza de forma óptima. Por lo tanto, estos modelos están diseñados para analizar estrategias de cosecha mejoradas a nivel local y requieren amplios conjuntos de datos; no están diseñados originalmente para la valoración económica, que se tratará en este artículo.

En segundo lugar, el enfoque ricardiano se desarrolló para estudiar la adaptación a largo plazo a los impactos climáticos en la agricultura (Mendelsohn *et al.*, 1994, vía Bozzola *et al.*, 2017). Este enfoque mide cómo los fenómenos climáticos u otros factores pueden influir en el valor de la tierra (por ejemplo, Vanschoenwinkela *et al.*, 2016) o beneficiar a los agricultores (por ejemplo, Deschenes y Greenstone, 2007; Roudier *et al.*, 2011). Seo y Mendelsohn (2007) lo utilizaron para determinar cómo las variables tecnológicas o socioeconómicas, además del clima, influyen en el valor de la tierra. Deschenes y Greenstone (2007) emplearon el enfoque ricardiano para estudiar el impacto económico del cambio climático en los principales cultivos producidos por Estados Unidos. López y Hernández (2016) informaron de las principales críticas que había recibido el enfoque: (i) que es un modelo a largo plazo que no proporciona mucha información sobre cómo se realiza (Reilly, 1999) y (ii) que es un método de comparación estático y supone que las mejores condiciones se ajustan durante su estimación (Mendelsohn, 2009).

Por último, en cuanto a la modelización estadística, a diferencia de los modelos ricardianos que explican el impacto del clima en el precio de la tierra, este enfoque trata de explicar el impacto del clima en la producción, los cambios en el rendimiento de los cultivos o el PIB sectorial. Thomasz *et al.* (2017) dividieron la modelización estadística en

tres subcategorías: los enfoques macroeconómicos, estructural y de variabilidad empírica de series temporales.

El enfoque macroeconómico (Banco Interamericano de Desarrollo-Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe-Departamento Nacional de Planificación (BID-CENU-DNP), 2014) se basa en la información de las cuentas nacionales y estima el impacto del clima en cada sector de actividad en términos de PIB. A partir de un modelo estocástico de equilibrio general, se incorpora la variable climática en distintos escenarios proporcionados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático para ver cómo afecta la productividad de cada sector (Banco Interamericano de Desarrollo-Comisión Económica para América Latina y el Caribe-Departamento Nacional de Planificación, 2014). Ferreira-Filho *et al.* (2021) implementó este enfoque a través de un modelo de equilibrio general computable para dos escenarios climáticos diferentes en Brasil. Los resultados mostraron cómo tres escenarios de choque climático podrían afectar a la economía. Los principales resultados fueron que, en el escenario intermedio de emisiones de carbono, se produce una pérdida importante de superficie cultivable, y las perturbaciones climáticas afectan a las regiones más vulnerables que dependen más de la agricultura. En Argentina, Corfield *et al.* (2020) utilizaron un modelo autorregresivo vectorial para estimar funciones de impulso-respuesta que relacionaran variables agregadas, como el consumo, las exportaciones, la inversión, el PIB agrícola, el PIB total y el tipo de cambio, con cambios en los niveles de precipitación. Los resultados mostraron que las cinco primeras variables respondieron positivamente a un shock de precipitaciones, mientras que el tipo de cambio respondió negativamente, generando una apreciación de la moneda local. La fuerza del enfoque macroeconómico reside en su flexibilidad para analizar cómo varía cada sector de la economía, pero no permite analizar fenómenos climáticos más específicos ni el impacto del clima en cultivos concretos.

Por otro lado, el enfoque estructural construye modelos estadísticos más específicos que estiman los cambios en los rendimientos debidos a varios factores, como la tecnología, la calidad del suelo y cualquier evento climático (Chimeli *et al.*, 2008; Lobell y Burke, 2010; Paltasingh *et al.*, 2012; Rahman *et al.*, 2005). Estos modelos pueden adaptarse al escenario objeto de estudio en un momento determinado (Georgopoulou *et al.*, 2017). El enfoque estima la sensibilidad del rendimiento utilizando diferentes métodos (comúnmente mínimos cuadrados) sobre datos transversales para diferentes áreas. El modelo se establece generalmente con el rendimiento del cultivo en cada región para un momento determinado como variable dependiente (por ejemplo, Lobell y Burke, 2010; Paltasingh *et al.*, 2012). Las variables independientes son todas aquellas que influyen en el rendimiento de los cultivos: variables climáticas, tecnológicas o socioeconómicas. La principal ventaja del enfoque es su capacidad para analizar los casos con suficiente precisión como para estimar la sensibilidad de los rendimientos a variables climáticas específicas, aislándola de los efectos de otras variables. Este modelo, aunque permite un

análisis muy completo, se basa en supuestos susceptibles de cambiar con el tiempo, y su uso requiere muchos datos.

A pesar de las ventajas del enfoque estructural, requiere un gran conjunto de datos para estimar los parámetros de regresión y no proporciona una estimación directa de las pérdidas debidas a fenómenos climáticos ni un escenario contrafactual con fines comparativos, lo cual es necesario para las valoraciones económicas. Además, no tiene en cuenta el comportamiento adaptativo, que puede ser crítico en el contexto del cambio climático.

Dadas las limitaciones de los enfoques macroeconómico y estructural, ha surgido el enfoque empírico de la variabilidad de las series temporales. Éste supone que la producción agrícola muestra dos dinámicas a lo largo del tiempo: (i) una tendencia, que se explica principalmente por la mejora tecnológica; y (ii) una desviación de la tendencia, que se explica por shocks exógenos que afectan al cultivo, siendo el clima el principal factor de estrés. Tannura *et al.* (2008) analizaron este enfoque aplicándolo a la producción de soja y maíz en Estados Unidos y comprobaron que los rendimientos tienden a mostrar incrementos a lo largo del tiempo, lo que se conoce como rendimientos tendenciales. El estudio concluyó que el impacto potencial del clima en las explotaciones agrícolas es bastante notable, ya que las predicciones basadas en la percepción de un aumento de la tecnología pueden ser deficientes; es decir, unas condiciones meteorológicas desfavorables pueden provocar caídas inexplicables de la producción a pesar del aumento de la tecnología (Tannura *et al.*, 2008). En Argentina, Heinzenknecht (2011) aplicó el enfoque de variabilidad obteniendo la tendencia a través de un modelo de mínimos cuadrados ordinarios para determinar la probabilidad de rendimientos bajos, normales o altos durante El Niño y La Niña para localidades con datos de precipitación en Argentina. Una vez obtenida la tendencia, se calculó la diferencia porcentual con los valores observados, se clasificaron las desviaciones en las tres categorías (rendimientos bajos, normales o altos) y se relacionó cada caso con el fenómeno climático de El Niño o La Niña o con ninguno de ellos. Por último, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2017) calculó las repercusiones económicas de los fenómenos meteorológicos adversos en la agricultura calculando los rendimientos tendenciales a largo plazo para compararlos con la producción real en los años con desastres naturales (sequía, inundación, tormenta tropical, terremoto o erupción volcánica). Las pérdidas se multiplicaron por los precios para estimar los valores monetarios y obtener los impactos económicos. El estudio (realizado para países de África, Asia, América Latina y Europa del Este) concluyó que la agricultura y la ganadería absorben el 22% de los impactos económicos de los riesgos naturales y que los desastres naturales relacionados con el cambio climático, como las sequías, suponen el 25% de los daños y pérdidas en el sector agrícola.

Los principales componentes de todos los enfoques mencionados se resumen en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Resumen de los modelos de impacto en la actividad agraria usados en la literatura

Metodología	Variable independiente	Uso o resultado principal	Escala	
Simulación de cultivos	Simulación de rendimiento	Estrategias agrícolas para optimizar el rendimiento	Parcela	Motha, 2011 Jones <i>et al.</i> , 2003 Merlos <i>et al.</i> , 2015
Ricardiano	Impacto en el valor del suelo	Precio del valor del suelo, sensibilidad a cada componente	Nivel departamental/ de región	Mendelsohn <i>et al.</i> , 1994 Vanschoenwinkela <i>et al.</i> , 2016 Deschenes y Greenstone, 2007 Roudier <i>et al.</i> , 2007 Seo y Mendelsohn, 2007
Estadísticas				
• Macroeconomía	Impacto en el producto interior bruto u otras variables macroeconómicas	Efecto agregado del clima sobre las macrovariables	Sin escala, nivel macrofinanciero	BID-CENU-DNP, 2014 Ferreira-Filho <i>et al.</i> , 2021 Corfield <i>et al.</i> , 2020 Chimeli <i>et al.</i> , 2008 Lobell y Burke, 2010
• Estructural	Impacto en los rendimientos, análisis de sensibilidad	Sensibilidad de cada componente	A nivel de departamento o regional	Paltasingh <i>et al.</i> , 2012 Rahman <i>et al.</i> , 2005 Georgopoulou <i>et al.</i> , 2017
• Variabilidad empírica de las series temporales	Desviaciones de rendimiento	Análisis de sucesos desglosado; provisión de la diferencia por año	A nivel nacional/ regional/ departamental/ de regional	Tannura <i>et al.</i> , 2008 Heinzenknechtm 2011 FAO, 2017

Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica

A diferencia de la mayoría de los estudios con Argentina como escenario, que analizaron el impacto del clima sobre los rendimientos y cantidades de cultivos en casos particulares (departamentos específicos con datos suficientes, fincas experimentales o simulaciones para áreas específicas), el objetivo del presente estudio es brindar una estimación económica global de pérdidas para el total del área productiva de soja y maíz, analizando no casos específicos sino el total del territorio agrícola. Considerando la extensión y diversidad del área productiva y la limitación de datos para la aplicación de simulación de cultivos o análisis ricardiano, el enfoque más apropiado es el análisis de variabilidad empírica. Puede utilizarse fácilmente para todas las zonas de producción con información limitada, proporciona una valoración del flujo monetario basada en casos observados, permite comparaciones a lo largo del tiempo y entre países (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017) y extrapola valoraciones futuras. También puede aplicarse a otros cultivos.

2.1.2. Materiales y métodos

2.1.2.1. Materiales

El área de estudio incluyó 183 departamentos agrícolas de las cinco principales provincias agrícolas de Argentina: Buenos Aires, Chaco, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe (figura 12). Estas provincias cubrían un área geográfica con 17 millones de hectáreas dedicadas a la producción de soja y 7 millones de hectáreas dedicadas a la producción de maíz, lo que representa el 90% de todas las áreas dedicadas a la producción de los dos cultivos. El 10% restante no fue tenido en cuenta por tratarse de áreas agrícolas de reciente desarrollo y con antecedentes insuficientes para realizar un análisis estadístico robusto.

Figura 12. Área de estudio para la soja y maíz en Argentina



Elaboración propia

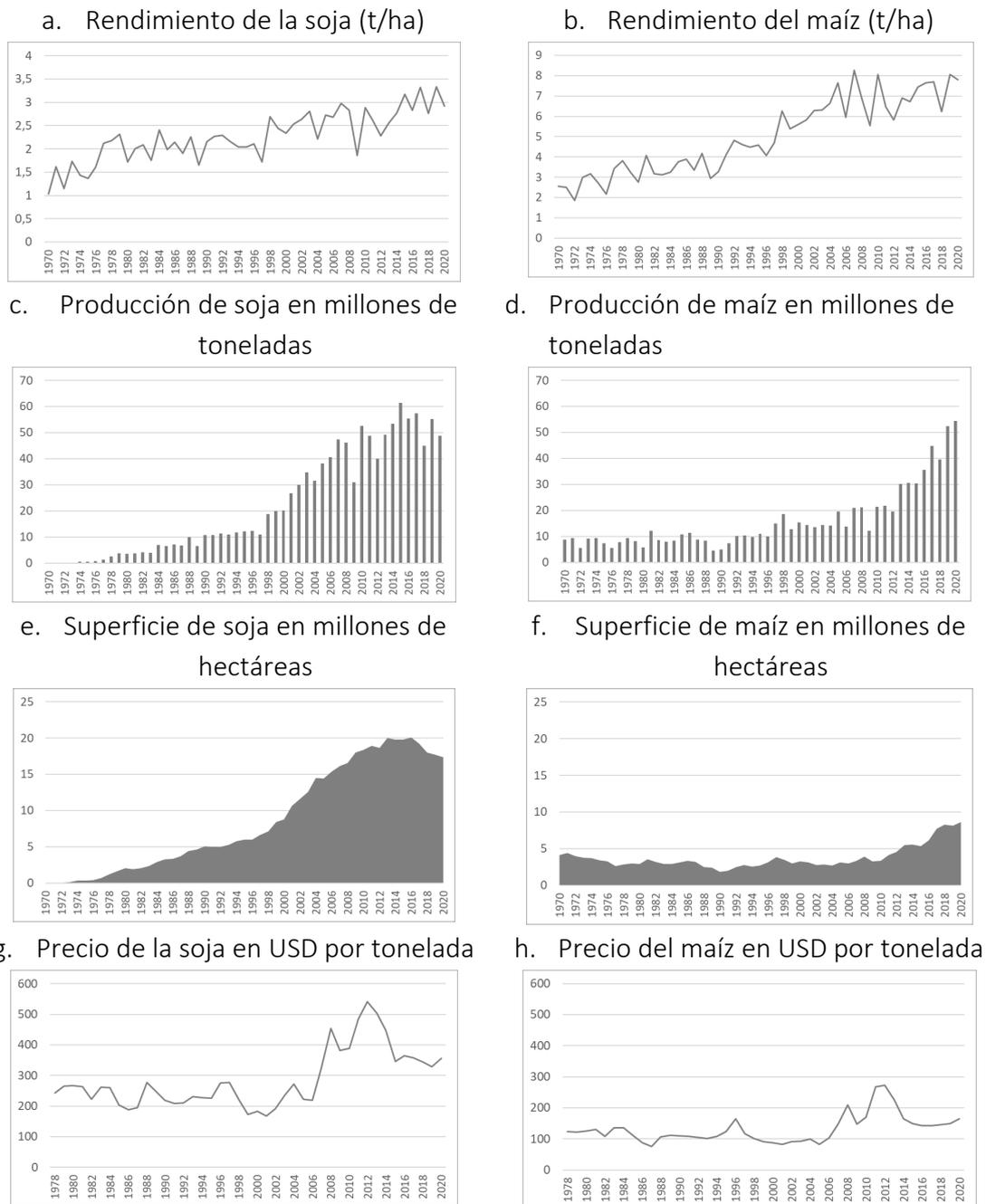
Los datos que figuran a continuación se sistematizaron a nivel departamental.

- Datos sobre cultivos: datos sobre las superficies sembradas de soja y maíz, las superficies cosechadas, la producción y los rendimientos recopilados desde 1969/1970 hasta 2019/2020 de la Secretaría de Agroindustria de Argentina (2021).
- Datos sobre precios: datos sobre los precios internacionales de la soja y el maíz recogidos de la *Chicago Mercantile Exchange* (CME). El valor del primer contrato futuro se seleccionó a partir del momento "t" del total de contratos disponibles; los valores se escalaron en USD/t, y la fuente de información fue el precio primario de las commodities del Fondo Monetario Internacional.
- Datos macroeconómicos: los datos de reservas internacionales y exportaciones, balanza comercial y balanza de pagos se tomaron de las fuentes primarias de libre acceso del Banco Central de la República Argentina y del Ministerio de Economía de Argentina (2021).

- Datos climáticos: datos tomados del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), que mide la deficiencia de humedad del suelo a través de tres variables: evapotranspiración potencial, precipitación mensual y contenido de agua útil del suelo (fuentes de datos: Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 2021); fuente secundaria: perspectiva agrícola semanal de la Bolsa de Cereales de Buenos Aires 2021, que presenta la evolución detallada de las superficies sembradas, las superficies cosechadas y los rendimientos, junto con la evolución climática durante todo el ciclo productivo.

La figura 13 presenta los datos históricos sobre rendimientos, producción, áreas sembradas y precios internacionales de la soja y el maíz para todas las zonas estudiadas. Para analizar estas variables se utilizó el método discutido en la sección siguiente para cada uno de los 183 departamentos de la muestra.

Figura 13. Evolución histórica de los rendimientos, la producción, la superficie implantada y el precio internacional de la soja y el maíz



Elaboración propia a partir de información del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina (2021).

2.1.2.2. Metodología

La variabilidad del rendimiento de la soja a lo largo del tiempo refleja la incidencia de diversos factores que pueden clasificarse en dos categorías principales: (i) variables tecnológicas, como la calidad del suelo, la genética de las semillas y las técnicas de manejo a nivel de productor; y (ii) variables climáticas, como la temperatura media y máxima y las precipitaciones acumuladas. Mientras que la tecnología genera un aumento

del rendimiento a largo plazo (la tendencia), el clima genera fluctuaciones en el rendimiento a corto plazo o actual (desviaciones de la tendencia).

La línea de base a partir de la cual se midieron las desviaciones se estimó utilizando un modelo de tendencia lineal de los rendimientos de los cultivos. Se eligió el modelo lineal en lugar del logarítmico porque, según Irwin y Good (2015), una estimación logarítmica podría ampliar el rango de la desviación de los rendimientos en toneladas a lo largo del tiempo, situación que no se pudo comprobar empíricamente. Además, la variación porcentual de los rendimientos disminuye con el paso del tiempo, propiedad que se refleja correctamente en el modelo de tendencia lineal. Esto último es históricamente consistente con los rendimientos promedio de la soja en EEUU (Irwin y Good, 2015; Tannura *et al.*, 2008), con estrategias productivas similares a las del caso argentino. En segundo lugar, Thomasz *et al.* (2016) verificaron empíricamente que el modelo lineal fue capaz de identificar todos los casos de sequías con impacto en la producción de soja en Argentina durante el período comprendido entre 1990 y 2016, mientras que el modelo logarítmico omitió dos casos.

Además, la tendencia lineal está empíricamente relacionada con el impacto positivo continuo de la tecnología en el rendimiento de los cultivos (Tannura *et al.*, 2008; Irwin y Good, 2015). Esto permite construir una serie de rendimientos sin tendencia, en la que la variabilidad se explica principalmente por las condiciones climáticas, pero también por otros factores exógenos, como las plagas. Teniendo en cuenta que las desviaciones de la tendencia no pueden explicarse completamente por las condiciones climáticas, solo se han estudiado los casos extremos. En un caso investigado (Tannura *et al.*, 2008; Thomasz *et al.*, 2017), sobre las bases empíricas, se fijó empíricamente un umbral de una desviación estándar, teniendo en cuenta la distribución observada de los rendimientos. El siguiente paso consiste en establecer un criterio de atribución para relacionar los casos que superan una desviación típica con los datos climáticos. Deben cumplirse simultáneamente dos condiciones: (i) el rendimiento observado debe estar por debajo de una desviación estándar de la tendencia lineal y (ii) debe existir un proceso de sequía en los departamentos estudiados definidos por el valor PDSI. Los procesos de sequía se clasifican en moderados, severos y extremos según los valores del PDSI. El volumen de pérdidas se estima como la diferencia entre el valor de la tendencia lineal y la producción observada sólo para los casos que cumplen las dos condiciones anteriores.

También se tiene en cuenta la pérdida de superficie. El estudio de casos antes mencionado demostró que la pérdida de superficie es, con mucho, menos variable que el rendimiento, por lo que las desviaciones de la media pueden dar lugar a sobreestimaciones o subestimaciones. Por lo tanto, en los casos seleccionados en el paso anterior se utiliza en su lugar la diferencia absoluta con respecto a la mediana.

Por último, la pérdida total se convierte en un valor monetario mediante los precios internacionales de la soja y el maíz, teniendo en cuenta que Argentina es precio aceptante y que gran parte de la producción de ambos cultivos está orientada a la exportación.

Formalización

El rendimiento actual se calculó como $Y_t = \frac{Q_t}{A_t}$ donde Q_t es la cantidad de soja en toneladas por departamento en el año t y A_t es la superficie cosechada en el año t en hectáreas. A partir de la serie de rendimiento actual, se estima un modelo lineal, con β_0 como intercepto y β_1 como la tendencia. A partir de los parámetros estimados, el rendimiento anual estimado es el siguiente:

$$\widehat{R}_t = \beta_0 + \beta_1 * t. \quad (23)$$

Rendimiento retardado \widetilde{R}_t se calcula como la diferencia entre el rendimiento observado R_t y el rendimiento estimado \widehat{R}_t de la siguiente manera:

$$\widetilde{R}_t = R_t - \widehat{R}_t. \quad (24)$$

La serie sin tendencia está centrada en cero, con valores positivos y negativos. La variabilidad de esta serie sin tendencia se toma en consideración como proxy de los impactos climáticos. Para una mejor visualización y comparación entre los departamentos, la serie se escala en el siguiente número de índice:

$$\text{Índice}(\widetilde{R}_t) = 1 + \left(\frac{\widetilde{R}_t}{\widehat{R}_t}\right). \quad (25)$$

Se estableció una función dicotómica para identificar los casos por debajo del umbral de una desviación típica, de la siguiente manera:

$$f(\text{Índice}(\widetilde{R}_t)) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{Índice}(\widetilde{R}_t) < 100\% - \sigma \text{Índice}(\widetilde{R}_t) \\ 0 & \text{if } \text{Índice}(\widetilde{R}_t) > 100\% - \sigma \text{Índice}(\widetilde{R}_t) \end{cases}. \quad (26)$$

Donde s es la desviación típica del índice de rendimientos.

Los valores de $\text{Índice}(\widetilde{R}_t) < 100\% - \sigma \text{Índice}(\widetilde{R}_t)$ representan los casos potenciales de rendimientos afectados por shocks climáticos. Estos casos se contrastan con los valores del PDSI y se vuelven a comprobar con los datos de precipitaciones y las perspectivas agrícolas semanales de la Bolsa de Cereales de Buenos Aires como fuente secundaria.

El nivel de producción tendencial estimado \widehat{Q}_t se define del siguiente modo:

$$\widehat{Q}_t = \widehat{R}_t * \text{AreaS}_t, \quad (27)$$

donde \widehat{R}_t es el rendimiento estimado a partir de la ecuación 23 y AreaS_t es la superficie sembrada en el período t .

Con \widehat{Q}_t el valor de la producción estimada \widehat{V}_t se calcula del siguiente modo:

$$\widehat{V}_t = P_t^i * \widehat{Q}_t, \quad (28)$$

donde P_t es el precio internacional de la cosecha en el año t . Con el mismo precio, el valor de la producción observada se calcula del siguiente modo:

$$V_t = P_t^i * Q_t. \quad (29)$$

El valor de la pérdida (VLt) se estima como la diferencia entre los valores de producción observados y tendenciales, de la siguiente manera:

$$VLt = P_t^i * Q_t - P_t^i * \widehat{Q}_t$$

o

$$(30)$$

$$VLt = (Q_t - \widehat{Q}_t) * P_t^i.$$

Además de las desviaciones extremas en los rendimientos, se tiene en cuenta la pérdida de superficie para valorar la pérdida total. Dado que la pérdida de superficie es relativamente estable en toda la muestra y sólo se debe a fenómenos climáticos extremos, su valor medio no es una referencia razonable. Por lo tanto, se toma como referencia su valor mediano, tal y como se indica a continuación:

$$Area C_t \% S_t = \frac{Area Cosechada_t}{Area Sembrada_t} \gamma \quad (31)$$

$$Median(Area C_t \% S_t)_{t=1}^{t=n}. \quad (32)$$

Los casos de pérdida de superficie se seleccionan mediante la siguiente función dicotómica:

$$Casos \text{ \textit{área perdida}}_t = \begin{cases} 1 & \text{if } Area C_t \% S_t < Mediana (Area C_t \% S_t)_{t=1}^{t=n} \\ 0 & \text{if } Area C_t \% S_t > Mediana (Area C_t \% S_t)_{t=1}^{t=n} \end{cases}. \quad (33)$$

En total, la pérdida total de cantidad de producción (TQL_t) disminuye los rendimientos y las superficies de la siguiente manera:

$$TQL_t = (Q_t - \widehat{Q}_t) + [Mediana (Area C_t \% S_t) - (Area C_t \% S_t)] * Area S_t * \widehat{R}_t. \quad (34)$$

Por último, la estimación del valor total de las pérdidas en dólares (TVL_t) es la siguiente:

$$TVL_t = TQL_t * P_t^i. \quad (35)$$

2.1.3. Resultados

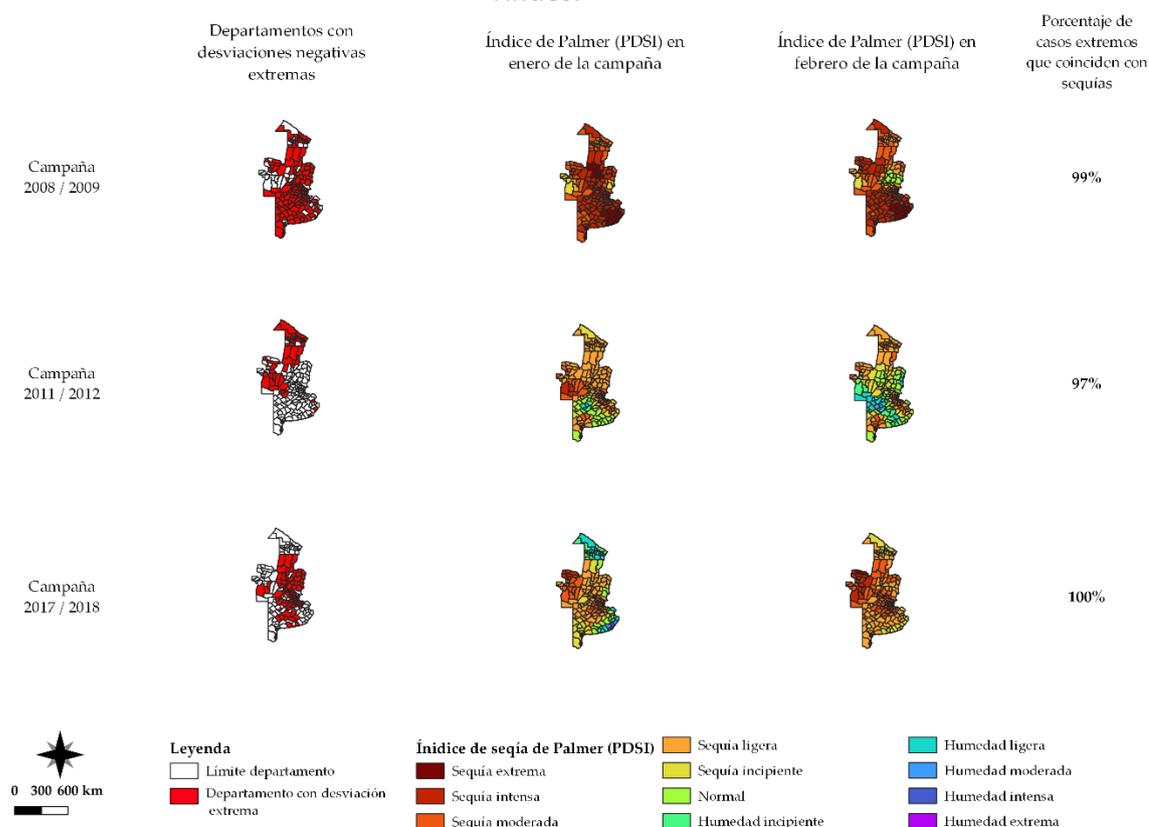
El método propuesto se aplicó a cada uno de los 183 departamentos de la muestra, y se obtuvieron 183 estimaciones diferentes para la soja y 183 para el maíz (apéndice 1) Los resultados del estudio muestran una alta concentración de desvíos extremos en los rendimientos durante las campañas 2008/2009, 2011/2012 y 2017/2018 en casi todas las áreas geográficas analizadas, y en las concentraciones regionales en provincias y años particulares, como en los casos de Chaco y Entre Ríos en 2003/2004, Córdoba en 2010/2011, y Entre Ríos y Santa Fe en 2015/2016. Los resultados que se muestran en el Cuadro 17 se resumen de la siguiente manera: (i) sólo se presentaron las estimaciones desde el año 2000 por su relevancia económica y (ii) los casos extremos de desvío de rendimiento se agregaron por provincia y se informaron como porcentaje del total de casos.

Cuadro 17. Departamentos con desviaciones negativas extremas en los rendimientos en porcentaje del total de departamentos por provincia

Campaña	Buenos Aires		Chaco		Córdoba		Entre Ríos		Santa Fe	
	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz
2000/2001	4%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	11%
2001/2002	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%
2002/2003	4%	1%	0%	0%	4%	0%	0%	0%	0%	5%
2003/2004	1%	0%	52%	0%	26%	9%	35%	0%	11%	0%
2004/2005	0%	0%	24%	0%	4%	0%	0%	0%	5%	0%
2005/2006	1%	4%	0%	0%	0%	4%	18%	12%	11%	16%
2006/2007	1%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2007/2008	6%	1%	0%	0%	0%	9%	0%	0%	16%	21%
2008/2009	86%	83%	80%	96%	35%	22%	94%	76%	74%	37%
2009/2010	4%	5%	4%	0%	4%	4%	0%	0%	0%	0%
2010/2011	6%	1%	0%	0%	9%	35%	0%	0%	0%	11%
2011/2012	8%	37%	92%	8%	48%	30%	0%	0%	42%	21%
2012/2013	1%	0%	44%	72%	17%	17%	0%	0%	0%	11%
2013/2014	11%	17%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%
2014/2015	0%	0%	12%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2015/2016	1%	1%	8%	0%	0%	0%	59%	0%	47%	0%
2016/2017	2%	1%	0%	0%	0%	4%	0%	0%	0%	0%
2017/2018	49%	29%	0%	0%	13%	30%	94%	29%	89%	42%

En cuanto a la atribución de las desviaciones extremas de los rendimientos a fenómenos climáticos, el 100% de los casos estaban relacionados con condiciones climáticas adversas según los valores del PDSI. El 98% de los casos coincidieron con sequías (de leves a severas), y el 2% de los casos estuvieron relacionados con excesos hídricos extremos. En el caso particular de las campañas con más concentración de desvíos extremos el método resulta que: en la campaña 2008/2009 el 99% de los casos estaba relacionado con un evento de sequía, en la campaña 2011/2012 el 97% y en la campaña 2017/2018 el 100% (figura 14):

Figura 14. Relación entre eventos de sequías y casos de desviación extremo de los rindes.



Elaboración propia a través de datos de Secretaría de Agroindustria de Argentina (2021) y Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (2021).

Nota: Se utilizan los meses de enero y febrero de cada campaña porque son los meses críticos de crecimiento de la soja y el maíz.

El principal resultado muestra que el método para identificar los impactos de todos los niveles de sequía en ambos cultivos fue robusto, pero sólo puede identificar los excesos hídricos extremos.

La Cuadro 18 resume los años, provincias y cultivos afectados y caracteriza el nivel de sequía según el valor del PDSI. Como se ha mencionado, sólo en los eventos 2015/2016 las desviaciones extremas negativas en los rendimientos estuvieron relacionadas con las inundaciones. Sin embargo, considerando que el método sólo identifica casos de

inundaciones extensivas, con un único registro en la historia analizada, el caso fue excluido de la valoración económica. A diferencia de las sequías, las inundaciones tienen impactos locales que no pueden ser captados a la escala departamental utilizada en este estudio. El caso 2015/2016 fue analizado por Ravelo *et al.* (2016).

Cuadro 18. Resumen de zonas y cultivos afectados y niveles de sequía

Campaña	Provincias afectadas	Cultivos	Nivel de sequía según el índice Palmer de gravedad de la sequía
2003/2004	Chaco, Entre Ríos, Córdoba y Santa Fe	Soja y maíz en Córdoba y soja en el resto de las provincias	Grave en el norte y sur de Córdoba y Santa Fe; moderada en el centro de Córdoba y Santa Fe y en Entre Ríos.
2005/2006	Santa Fe y Entre Ríos	Soja y maíz	Moderado
2007/2008	Buenos Aires y Santa Fe	Soja y maíz	Moderado
2008/2009	Todas las zonas de estudio	Soja y maíz	Extremo
2010/2011	Córdoba	Soja y maíz	Grave en el norte y sur de la provincia y moderado en el centro.
2011/2012	Buenos Aires, Chaco, Córdoba y Santa Fe	Soja y maíz	Extremo en algunos casos; moderado en el resto de las provincias
2012/2013	Chaco y Córdoba	Soja y maíz	Extrema en Chaco y Córdoba; moderada en la mayoría de las demás provincias; severa en el norte.
2013/2014	Buenos Aires	Soja y maíz	Extremo a severo en la región centro-oeste de la provincia
2015/2016	Entre Ríos y Santa Fe	Soja	Exceso hídrico
2017/2018	Buenos Aires, Entre Ríos, Córdoba y Santa Fe	Soja y maíz	Extremo; moderado en algunas zonas

Elaboración propia a través de datos del Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (2021)

Una vez confirmado que todas las desviaciones extremas negativas de los rendimientos y las pérdidas de superficie pueden atribuirse a las sequías, se presenta aquí la valoración del impacto económico. En primer lugar, se calculó el valor de las pérdidas de ingresos totales por causa de pérdidas de rendimientos y por causa de pérdida de superficie (cuadro 19 y 20):

Cuadro 19. Valor de las pérdidas totales de ingresos debidas a bajada de rendimiento por provincia en casos de sequía en USD corrientes

Campaña	Buenos Aires		Chaco		Córdoba		Entre Ríos		Santa Fe		Total	
	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz
2003/2004	15.9	0.0	125.8	-	317.6	2.5	51.2	-	80.0	-	590.6	2.5
2005/2006	4.8	6.4	-	-	-	1.9	25.8	1.2	24.8	8.7	55.5	18.1
2007/2008	56.4	2.6	-	-	-	43.8	-	-	45.4	60.1	101.8	106.5
2008/2009	2,638.2	497.1	189.7	29.8	569.5	88.5	423.2	1,06.8	674.6	75.2	4,495.3	797.5
2010/2011	179.0	0.9	-	-	154.6	245.1	-	-	-	11.4	333.6	257.4
2011/2012	172.4	796.2	254.7	5.1	1,547.9	446.3	-	-	484.2	145.3	2,459.1	1,392.8
2012/2013	8.8	0.0	121.6	56.5	351.7	47.3	-	-	-	7.9	482.1	111.6
2013/2014	188.3	210.0	-	-	-	-	-	-	176.4	-	364.7	210.0
2017/2018	989.5	49.6	-	-	440.2	701.1	667.4	67.9	1,011.6	320.6	3,108.8	1,139.2

Cuadro 20. Valor de las pérdidas totales de ingresos por disminución de superficie por provincia en caso de sequía en USD corrientes

Campaña	Buenos Aires		Chaco		Córdoba		Entre Ríos		Santa Fe		Total	
	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz
2003/2004	0.0	2.0	0.0	-	0.0	22.7	0.0	-	0.0	-	0.0	24.7
2005/2006	0.0	31.8	-	-	-	35.1	0.0	2.4	0.0	3.7	0.0	73.0
2007/2008	0.0	19.5	-	-	-	6.5	-	-	0.0	41.9	0.0	67.9
2008/2009	241.6	101.1	62.8	18.6	45.3	43.3	256.4	70.2	55.7	55.2	661.9	288.4
2010/2011	0.0	10.9	-	-	0.0	35.9	-	-	-	8.5	0.0	55.3
2011/2012	168.5	193.8	304.8	72.7	183.8	360.9	-	-	98.2	40.8	755.4	668.3
2012/2013	0.0	138.3	0.0	45.3	0.0	170.8	-	-	-	16.1	0.0	370.4
2013/2014	0.0	125.2	-	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	125.2
2017/2018	249.9	558.6	-	-	270.2	360.0	123.1	28.2	144.9	87.4	788.1	1,034.1

La suma de ambas pérdidas dará lugar al valor total de las pérdidas. Las figuras 15 y 16 muestran los departamentos que se vieron afectados económicamente por las sequías. Los conjuntos de Figuras resumen el valor de las pérdidas por cultivo y provincia.

Figura 15. Departamentos con pérdidas de soja

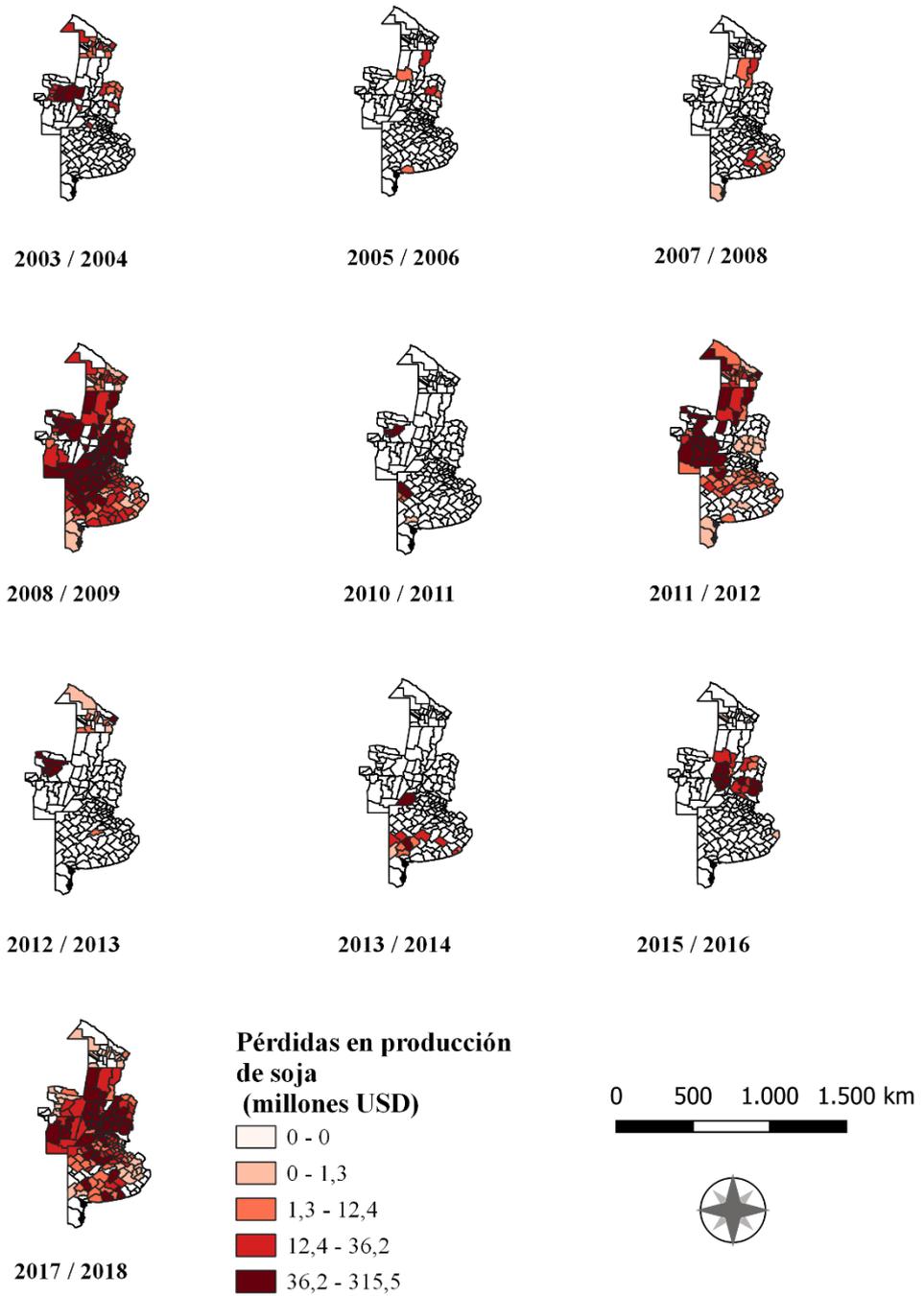
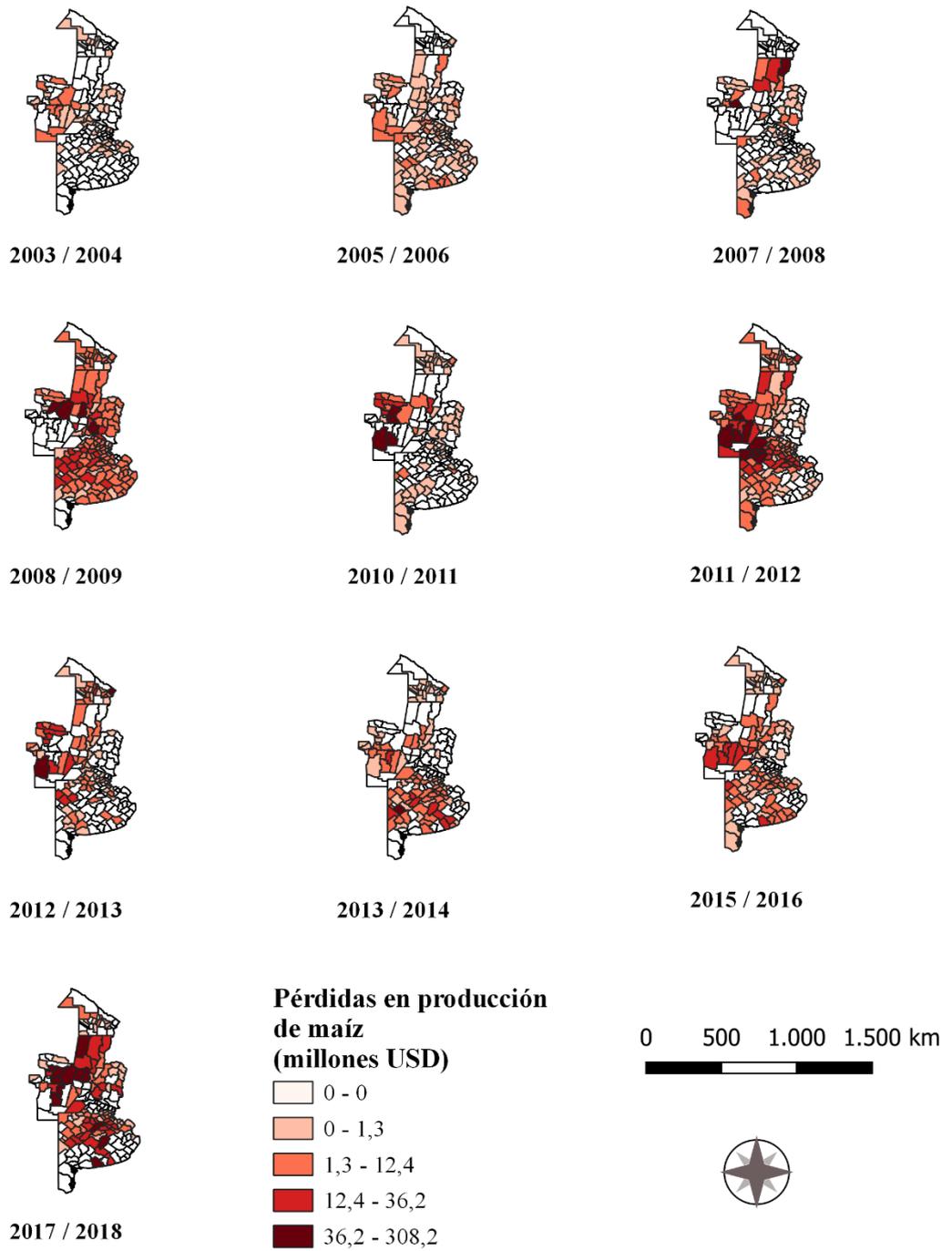


Figura 16. Departamentos con pérdidas de maíz



Mientras que las sequías graves y extremas de 2008/2009, 2011/2012 y 2017/2018 generaron pérdidas directas de entre 5.000 y 6.000 USD cada año, las sequías moderadas de 2010/2011, 2012/2013 y 2013/2014 generaron pérdidas directas de entre 600 y 800 USD en la producción de soja y maíz, valoradas en el USD corrientes (Cuadro 21).

Cuadro 21. Pérdidas totales de ingresos por provincia en actual USD corrientes por evento de sequía

Campaña	Buenos Aires		Chaco		Córdoba		Entre Ríos		Santa Fe		Total		
	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Total
2003/2004	15.9	2.0	125.8	0.3	317.6	25.2	51.2	0.6	80.0	4.5	590.6	32.6	623.2
2005/2006	4.8	38.1	-	0.2	-	37.0	25.8	3.6	24.8	12.3	55.5	91.3	146.8
2007/2008	56.4	22.1	-	-	-	50.3	-	8.1	45.4	102.0	101.8	182.5	284.3
2008/2009	2,879.8	598.2	252.6	48.4	614.8	131.9	679.7	177.0	730.4	130.4	5,157.2	1,085.9	6,243.1
2010/2011	179.0	11.8	-	10.6	154.6	281.0	-	4.1	-	19.9	333.6	327.5	661.1
2011/2012	340.8	990.0	559.5	77.8	1,731.7	807.2	2.6	3.3	582.4	186.1	3,217.0	2,064.4	5,281.4
2012/2013	8.8	138.3	121.6	101.7	351.7	218.0	-	1.0	-	24.0	482.1	483.1	965.2
2013/2014	188.3	335.2	-	5.9	-	41.8	-	0.1	176.4	20.2	364.7	403.2	767.9
2017/2018	1,239.4	608.1	5.7	16.4	710.4	1,061.0	790.4	96.1	1,156.5	408.0	3,902.5	2,189.7	6,092.2

Nota: La pérdida total de ingresos es la suma de las pérdidas de rendimiento y superficie presentadas en los cuadros 19 y 20.

La cuantificación de las pérdidas en relación con la producción de referencia mostró que las sequías graves a extremas generaron pérdidas de hasta el 35,4 % en 2008/2009, el 28,1 % en 2017/2018 y el 18,4 % en 2011/2012. Los diferentes niveles de impacto se explicaron por la gravedad y la extensión de las sequías en las zonas estudiadas. Los eventos de sequía más leves generaron pérdidas relativas de hasta el 6,2% en 2003/2004 y de al menos el 1,3% en 2007/2008. Una comparación de las pérdidas relativas de la producción de soja y maíz muestra un nivel diferente de impacto entre los cultivos: las pérdidas de la producción de maíz pueden duplicar las pérdidas de la producción de soja. Considerando el evento de mayor severidad, las pérdidas relativas de la producción de soja fueron del 33,2% de la producción de referencia, mientras que las de la producción de maíz fueron del 50,8%. La diferencia se atribuye a la mayor resistencia de la soja a la variabilidad climática en comparación con el maíz. Los resultados anteriores se resumen en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Pérdidas totales en USD corrientes y pérdidas relativas en porcentaje de la producción de referencia

Campaña	Pérdida		Producción de referencia		Pérdida relativa		Pérdida	Producción de referencia	Pérdida relativa
	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Total	Total	Total
2003/2004	590.6	32.6	8,852.4	1,175.84	6.7%	2.8%	623.2	10,028.24	6.2%
2005/2006	55.5	91.3	7,511.3	1,364.14	0.7%	6.7%	146.8	8,875.45	1.7%
2007/2008	101.8	182.5	17,268.1	4,046.89	0.6%	4.5%	284.3	21,315.04	1.3%
2008/2009	5,157.2	1,085.9	15,518.7	2,136.76	33.2%	50.8%	6,243.1	17,655.43	35.4%
2010/2011	333.6	327.5	21,210.2	5,713.64	1.6%	5.7%	661.1	26,923.86	2.5%
2011/2012	3,217.0	2,064.4	22,844.6	5,890.68	14.1%	35.0%	5,281.4	28,735.30	18.4%
2012/2013	482.1	483.1	23,879.8	6,198.98	2.0%	7.8%	965.2	30,078.74	3.2%
2013/2014	364.7	403.2	21,384.1	4,324.88	1.7%	9.3%	767.9	25,709.01	3.0%
2017/2018	3,902.5	2,189.7	15,415.1	6,282.91	25.3%	34.9%	6,092.2	21,698.04	28.1%

Las pérdidas también pueden cuantificarse en relación con las exportaciones y la balanza comercial, teniendo en cuenta que el maíz y especialmente la soja están orientados a la exportación. Las pérdidas generadas por las tres sequías más importantes (2009, 2012 y 2018) fueron del 11,2%, 6,6% y 9,9% del total de las exportaciones del país en cada año, respectivamente. Además, representaron el 37%, 44% y 159% de la balanza comercial en esos años. Incluso en el caso de la sequía moderada de 2013, las pérdidas representaron el 63,5% de la balanza comercial. En 2018, el saldo negativo de 3,823 millones de USD podría haber sido un superávit de 2,269 millones de USD en el contexto del escenario base (Cuadro 23).

Cuadro 23. Pérdidas estimadas en millones de USD e indicadores de comercio exterior

Campaña	Exportaciones totales	Balanza comercial	Pérdida total	Pérdida en % de las exportaciones	Pérdida en % de la balanza comercial	Balanza comercial sin pérdidas
2003/2004	34,576	12,130	623	1.8%	5.1%	12,754
2005/2006	46,546	12,393	147	0.3%	1.2%	12,539
2007/2008	70,019	12,556	284	0.4%	2.3%	12,841
2008/2009	55,672	16,886	6,243	11.2%	37.0%	23,129
2010/2011	82,981	9,020	661	0.8%	7.3%	9,682
2011/2012	79,982	12,008	5,281	6.6%	44.0%	17,290
2012/2013	75,963	1,521	965	1.3%	63.5%	2,486
2013/2014	68,405	2,670	768	1.1%	28.8%	3,438
2017/2018	61,620	-3,823	6,092	9.9%	159.4%	2,269

Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Economía de Argentina (2021)

Para estimar el valor global de la pérdida actualizado a 2021, puede considerarse la inflación o el valor temporal del dinero. El valor total en dólares en 2021 considerando la tasa de inflación estadounidense era de 24,170 millones de dólares, mientras que el valor en 2021 considerando el coste de oportunidad de las letras del Tesoro era de 26,948 millones de dólares (Cuadro 24).

Cuadro 24. Pérdidas estimadas actuales y ajustadas

Campaña	USD actual	2021 USD	
		(Inflación en EE.UU.)	(letras del Tesoro de EE.UU.)
2003/2004	623.2	876.7	1,013.1
2005/2006	146.8	194.5	225.4
2007/2008	284.3	354.9	412.2
2008/2009	6,243.1	7,507.3	8,798.0
2010/2011	661.1	784.6	879.8
2011/2012	5,281.4	6,077.8	6,831.0
2012/2013	965.2	1,088.1	1,213.2
2013/2014	767.9	853.2	938.0
2017/2018	6,092.2	6,432.9	6,637.7
TOTAL 2021		24,170.4	26,948.7

Ambas valoraciones mencionadas son representativas de distintos enfoques. A pesar de que el ajuste por inflación es el método estándar, el coste de oportunidad del valor

temporal del dinero en letras del Tesoro tiene sentido en un sistema macrofinanciero como el argentino, en el que las reservas internacionales y el endeudamiento público dependen de las exportaciones agrícolas. Sin embargo, para ser conservadores, se utilizó el valor más bajo para las siguientes estimaciones: se generó una pérdida total de 24.170 millones de USD en nueve eventos que abarcan 18 años: seis eventos moderados con una pérdida media de 692 millones de USD y tres eventos severos-extremos con una pérdida media de 6.672 millones de USD (Cuadro 25).

Cuadro 25. Pérdidas totales en USD en 2021 por eventos de sequía

	Pérdida total	Número de casos	Pérdida media
Sequías graves y extremas	20,018.0896	3	6,672.69655
Sequías moderadas	4,152.3295	6	692.05492
Total	24,170.4192	9	
Reservas internacionales	42,066.0000		
<i><u>Pérdidas totales</u></i>	57.45%		
<i>Reservas internacionales</i>			

Finalmente, la pérdida total estimada representó el 57,45% de las reservas internacionales del Banco Central argentino en 2021. Esta última estimación revela la magnitud del impacto del riesgo climático y, eventualmente, del cambio climático sobre la economía argentina, indicando que los eventos climáticos tienen impactos macroeconómicos sobre la economía, especialmente en el sector externo y las reservas internacionales. Cómo se traduce esto en el crecimiento, la volatilidad del tipo de cambio y la dinámica de la inflación doméstica es un campo abierto para futuras investigaciones.

2.1.4. Conclusiones

En este trabajo se propuso un método de identificación y valoración de las pérdidas de producción de soja y maíz generadas por sequías a nivel departamental en Argentina. El método demostró tener un 98% de precisión en la identificación de desvíos extremos en los rendimientos relacionados con diferentes niveles de sequía. El 2% de precisión restante correspondió a casos relacionados con inundaciones masivas, que se registraron en un solo año durante la serie estudiada. Por tanto, el método propuesto se considera suficientemente robusto para estimar las pérdidas generadas por sequías extremas, severas y, en algunos casos, moderadas. El impacto de los eventos más leves puede estar subestimado porque el enfoque no considera las disminuciones de rendimiento que no superan el umbral de una desviación estándar, que también pueden estar relacionadas con la escasez de agua. Por lo tanto, las estimaciones presentadas en este trabajo deben considerarse valores mínimos.

El modelo de evaluación del impacto de la sequía estimó una pérdida total de USD24.170 millones en la producción de soja y maíz, lo que representa el 57,45% de las reservas internacionales del Banco Central argentino en 2021. Hasta el 83% de la pérdida total (USD20.018 millones) fue generada por los tres eventos de sequía severa-extrema en 2009, 2012 y 2018, y el resto (USD4.152 millones) fue generado por los seis eventos de sequía moderada. La pérdida relativa por eventos severos ascendió al 35,4% de la producción base en 2009, representando el 11,2% del total de las exportaciones del país ese año.

La principal conclusión del presente estudio es que las sequías extensas y graves tienen repercusiones macroeconómicas, siendo el sector exterior el principal canal de transmisión en una economía con restricciones históricas en la balanza de pagos, la acumulación de reservas internacionales y el riesgo de crédito soberano.

A pesar de que los eventos de sequía no son nuevos en la historia agrícola de Argentina, la escala actual (17 millones de hectáreas sembradas) y el valor (dados los precios más altos de los productos básicos) generan pérdidas mucho mayores en valor que las del pasado, en el contexto de la dependencia de las exportaciones de productos agrícolas. Esto se ve agravado por el hecho de que Argentina es un tomador de precios, al menos en los mercados de soja y maíz. Las menores cantidades ofrecidas durante las sequías extremas no empujan los precios internacionales al alza; no hay compensación entre cantidad y precio. El contexto del cambio climático plantea la cuestión de si los episodios de sequía aumentarán en frecuencia o intensidad en los próximos 20 años. En Argentina, se han registrado tres episodios de sequía extrema y seis de sequía moderada en los últimos 20 años, con previsiones de estrés hídrico medio a bajo en un futuro próximo.

Además, el perfil multiescalar del modelo, que parte de la estimación a nivel departamental y puede añadirse homogéneamente a nivel provincial y nacional, permite que el modelo aporte datos relevantes para las medidas de adaptación tanto a nivel local

como macroeconómico. El desarrollo de vehículos financieros y fiscales, desde herramientas de cobertura a escala microeconómica hasta fondos de estabilización a escala macroeconómica, son estrategias que requieren del impacto económico climático como insumo desde una perspectiva financiera. El modelo propuesto en este apartado, si bien fue utilizado para valorar eventos pasados para determinar la importancia macroeconómica del problema para Argentina, también puede ser utilizado para calibrar proyecciones futuras de flujos de fondos y pérdidas de ingresos.

En el siguiente capítulo se trabajará en la proyección de la producción futura con el objetivo de abrir camino para la creación de una herramienta de planificación macrofiscal que permita a Argentina adaptarse al riesgo climático.

Por último, las futuras líneas de investigación a nivel de modelización son la identificación de los episodios de sequía más leves y de las pérdidas generadas por las inundaciones, que se excluyeron del análisis en el presente estudio. A nivel de aplicación, la investigación futura debe determinar la pérdida evitable y estimar la proporción del impacto que puede evitarse con medidas de adaptación.

2.2. La proyección de soja como herramienta de gestión del riesgo climático

La planificación macrofiscal es fundamental para la sostenibilidad de un país en el medio y largo plazo. Para ello es necesario, en primer lugar, identificar los riesgos que produzcan desviaciones en las variables fiscales respecto a lo previsto en el marco financiero, para después armar una estrategia de gestión de riesgo (Fainboim y Lienert, 2018).

La soja es el commodity agrícola más importante producido y exportado en Argentina: sus exportaciones generan en promedio un tercio de las divisas del país (Thomasz y Stancio, 2021). Además, en los últimos 20 años los derechos de explotación supusieron un 4% del total recaudado en Argentina, siendo la alícuota efectiva⁷ promedio en este periodo del complejo sojero un 29% sobre el total exportado por el complejo sojero en un año (Thomasz y Stancio, 2021). Este apartado se centrará solo en la soja por su importancia en las finanzas públicas argentinas.

Como se ha visto en el apartado anterior, el riesgo climático tiene una dimensión de impacto macroeconómico en Argentina. Es por ello por lo que, para conocer cuál será el ingreso fiscal del país y realizar una planificación macrofiscal, es necesario conocer la producción futura de soja⁸.

Sin embargo, aún no se ha desarrollado una evaluación adecuada del riesgo de pérdidas futuras. Esto se debe principalmente a la falta de modelos de sensibilidad calibrados para los 17 millones de hectáreas dedicadas a la producción de soja en el país.

Este apartado persigue dar el primer paso hacia un proceso de gestión del riesgo climático. Para ello, en primer lugar, se proporciona un marco teórico para mostrar cuales son las herramientas de las que disponen los países para gestionar el riesgo soberano y por qué proyectar la producción es un paso necesario en la planificación macrofiscal. Por otro lado, se muestran los diferentes enfoques utilizados para proyectar las cosechas en la literatura. Por último, a través de un modelo de sensibilidad, se relacionan los niveles de precipitación con los rendimientos agregados de soja de los últimos 20 años. A partir de ese modelo calibrado, se estimó la producción futura de soja mediante proyecciones de precipitaciones para los próximos 20 años a partir de la base de datos Copernicus para diferentes escenarios climáticos. Finalmente, se evaluó la pérdida de producción en casos de desviaciones extremas negativas en los niveles de precipitación.

⁷ Siguiendo a Thomasz y Stancio (2021), como los tres productos que componen el complejo sojero (poroto, harina y aceite) tienen alícuotas distintas, definen alícuota efectiva como el cociente entre las retenciones totales recaudadas en un determinado año entre las exportaciones totales del complejo en ese mismo año.

⁸ Argentina es precio aceptante de la soja ya que la destina la mayor parte de la producción a la producción, pero este capítulo se centrará en la gestión del riesgo climático que impacta de forma directa en la cantidad producida.

2.2.1. Estado de la cuestión

2.2.1.1. La gestión soberana del riesgo

Los fondos soberanos de riqueza (SWF por sus siglas en inglés) se definen como herramientas financieras gubernamentales que tienen el objetivo de administrar de manera eficiente y efectiva la riqueza financiera oficial del país (Lipsky, 2008). Este término fue acuñado a Rozanov (2005), ya que antes se denominaban ‘fondos de estabilización’ (Ureña y Fernández-Aguado, 2010). Siguiendo a Beck y Fidora (2008) todos los fondos tienen tres características comunes entre sí: i) son propiedad gubernamental; ii) no tienen obligaciones explícitas; iii) se gestionan por separado de las reservas oficiales de divisas. En la actualidad, todos los fondos se guían por el consenso alcanzado en los Principios de Santiago⁹.

El primer fondo soberano moderno surge en 1952 con la creación de la Autoridad de Inversión de Kuwait. Tenía el objetivo de estabilizar los ingresos nacionales que dependen de commodities con precios muy volátiles, en este caso el petróleo (Balding, 2012). Hasta finales del siglo XX se habían constituido cerca de 25 fondos soberanos (el 75% de ellos en países dependientes de commodities) con el objetivo de tener equilibrio económico: en época de superávit se incrementaba el ahorro que solo se usaba cuando existía déficit presupuestario (Stückelberger et al., 2015).

Sin embargo, los fines de los fondos soberanos han variado en función de los objetivos macrofiscales que pretenda alcanzar el país. Siguiendo a Al-Hassan *et al.* (2013) se distinguen cinco tipos de Fondos Soberanos de Riqueza:

- Los fondos de ahorro pretenden compartir la riqueza entre generaciones transformando activos no renovables, como el petróleo, en activos financieros diversificados. Tiene un perfil de riesgo- rentabilidad elevado: el 58% de media es renta variable. Destacan el Fondo de Ahorro de Panamá o el Fondo Soberano de Rusia.
- Los fondos de desarrollo tienen el objetivo de proveer recursos a proyectos socioeconómicos prioritarios. Destacan el Fondo de Desarrollo Nacional de Irán o el Fondo de Inversión Mubadala en los Emiratos Árabes Unidos.
- Los fondos de reserva de pensiones se crean para hacer frente a gastos futuros en el balance estatal relacionados con las pensiones. Una parte de la cartera está compuesta de activos de renta variable (en torno al 44%) para compensar los gastos futuros de las pensiones. Destacan el Fondo de Pensiones de Noruega, o el Fondo de Reserva de Pensiones de Chile.

⁹ Los Principios de Santiago son 24 principios de aplicación voluntaria elaborados por un grupo de trabajo constituido por 24 países con el objetivo de crear un marco que favorezca una comprensión más clara de las operaciones que se generan en los Fondos Soberanos de Riqueza (Ureña y Fernández-Aguado, 2010).

- Los fondos de inversión de reserva se proponen reducir los costes de mantenimiento de reservas u obtener una mayor rentabilidad de las reservas abundantes de un país. Tratan de conseguir mayores rentabilidades a través de la renta variable e inversiones alternativas: en promedio el 66% del fondo. Destacan China, Singapur o Corea del Sur.
- Los fondos de estabilización tratan de aislar el presupuesto público de la incertidumbre de ingresos por riesgos externos al país, destacando la volatilidad de los precios de productos básicos u otros riesgos como el climático o sanitario (Brunet *et al.*, 2020). Se tiende a invertir en activos de gran liquidez correlacionados negativamente con la fuente de riesgo. Destacan el Fondo de Estabilización Económica y Social de Chile y el Fondo de Estabilidad Fiscal de Mongolia.

Este último tipo, Fiscella *et al.* (2021) lo denomina fondos anticíclicos ya que, por un lado, tratan de aumentar sus ahorros en épocas de bonanza con el fin de asegurarse la disponibilidad de recursos durante épocas de decadencia, y por otro tiene el objetivo de evitar depreciaciones involuntarias

En este sentido, en el apartado anterior se detectó que en Argentina existe riesgo climático que impacta de forma macroeconómica a través del sector exterior. El caso de Argentina es especial porque, a diferencia de otras experiencias internacionales que se enfrentan solo al riesgo de precios, el riesgo climático impacta de forma directa en la cantidad producida de soja. De forma que, para poder armar un fondo de estabilización es necesario, en primer lugar, conocer la producción futura de soja. Ese enfoque es analizado a continuación.

2.2.1.2. Modelos de proyección de cosechas

Se pueden encontrar diferentes metodologías para proyectar los rindes agrícolas. Basso y Liu, (2019) realizan una revisión de los métodos usados en la literatura para la predicción de rindes y diferencian tres metodologías distintas: las encuestas, el uso de modelos de simulación de rindes y los modelos estadísticos.

En primer lugar, las encuestas se basan en la información que proporcionan las personas que mejor conocen las previsiones de rendimientos de los cultivos son las personas que analizan la evolución del crecimiento de los cultivos durante la campaña agrícola, los agricultores (Nandram *et al.*, 2014; Basso y Liu, 2019). Destacan dos organismos públicos que desarrollan esta metodología: i) el Servicio Nacional de Estadísticas Agrícolas del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (NASS por sus siglas en inglés), que desarrolla, por un lado, entrevistas telefónicas conocidas como Encuestas de Rendimiento Agrícola (AYS por sus siglas en inglés) y, por otro lado, encuestas de campo conocidas como Encuestas de Rendimiento Objetivo (OYS por sus siglas en inglés); ii) el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España desarrolla la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE). Los resultados de estas

encuestas son utilizados por diversos autores para analizar la proyección de los rindes, por ejemplo, Benecha *et al.* (2019) para el caso de AYS y OYS o López (2022) en el caso de la ESYRCE. Siguiendo a Basso y Liu (2019), los problemas que subyacen de esta metodología son varios: en primer lugar, cuando se hacen a gran escala puede existir incertidumbre por los métodos de muestreo; por otro lado, la previsión de rindes por encuesta consume mucho tiempo y mano de obra; por último, no suelen ser proyecciones de largo plazo. Como conclusión, esta metodología no es apropiada para estimar la producción de soja a lo largo de todo el país argentino.

En segundo lugar, los modelos de simulación de cultivos se basan en la información meteorológica, edáfica, fenológica y de gestión para simular el desarrollo y crecimiento de las plantas (Asseng *et al.*, 2014 y Basso *et al.*, 2016). Para el caso argentino, existen estudios que desarrollan la metodología utilizando el software *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT) para analizar cómo varía la cosecha en floración y proyectar rendimientos utilizando diferentes escenarios: a nivel local Confalone *et al.* (2017) analiza el impacto del cambio climático sobre los rendimientos de soja y maíz en el municipio de Azul, Buenos Aires; a nivel regional, Apipattanavis *et al.* (2010) analiza el caso del maíz en la provincia de La Pampa. La complejidad de esta metodología yace en la gran cantidad de variables que hay que usar para predecir el rendimiento del cultivo. Variables que pueden no existir (Basso y Liu, 2019), o que si no se calibran para que representen la genética del cultivo pueden dar lugar a una predicción inexacta (Kolotii *et al.*, 2015) Para lo que respecta a este trabajo, no existen datos suficientes para estimar la proyección de rindes en todo el país: de los 128 estados productores de soja, solo 28 cuentan con una estación meteorológica con suficientes datos históricos.

Por último, los modelos estadísticos son una metodología adecuada para el cálculo del rendimiento debido a su simplicidad y aplicabilidad (Basso y Liu, 2019). Utiliza datos agrometeorológicos para predecir los rendimientos. Se basan en la idea de que la acumulación de biomasa puede ser explicada por una o más variables agrometeorológicas (Murata, 1975). Como el efecto de las variables agrometeorológicos sobre la biomasa y el rendimiento varían en función del cultivo, de las fases de crecimiento o del momento de la cosecha, se puede hacer una regresión con el rendimiento histórico observado (Basso y Liu, 2019). Varios estudios de diversas partes del mundo han utilizado esta metodología para proyectar diferentes rendimientos: por ejemplo, del arroz utilizando un índice de precipitaciones de Julio en India (Raja *et al.* 2014); del trigo utilizando las precipitaciones entre la siembra y la etapa de crecimiento en Canadá (Qian *et al.* 2009); de la cebada y el trigo utilizando precipitaciones estacionales y la temperatura en Rusia (Galaktionov *et al.* 2009) entre otros.

En el caso de Argentina, Penalba *et al.* (2007) realizaron un modelo regional: analizaron la relación entre precipitaciones, temperatura y rendimientos de soja en distintas zonas de la región pampeana. Afirmaron que una parte importante de los residuos es explicada por variables climáticas en momentos fenológicos importantes del cultivo, pero que hay

una parte de información del rendimiento en los residuos que es información del suelo, de la tecnología y los plaguicidas. El coeficiente de explicación oscila entre el 0.63 en el departamento de Marcos Juárez y el 0.84 en Junín. Sin embargo, no existen modelos estadísticos que proyecten la producción de soja en toda el área cosechada en Argentina.

En este apartado, para modelizar la producción total nacional, se aplicó un modelo estadístico de regresión multivariable por pasos con datos pluviométricos del periodo crítico de la fenología del cultivo. A través de este modelo, la producción futura se proyectó utilizando predicciones de precipitaciones de 115 modelos divididos en cuatro escenarios climáticos de la base de datos Copernicus.

2.2.2. Materiales y métodos

2.2.2.1. Materiales

2.2.2.1.1. Datos agrícolas

El área de estudio abarca la principal zona productora de soja de Argentina¹⁰, con una media de 17 millones de hectáreas en los últimos 10 años como (figura 17).

Figura 17. Superficie utilizada para proyectar la soja en Argentina



Elaboración propia

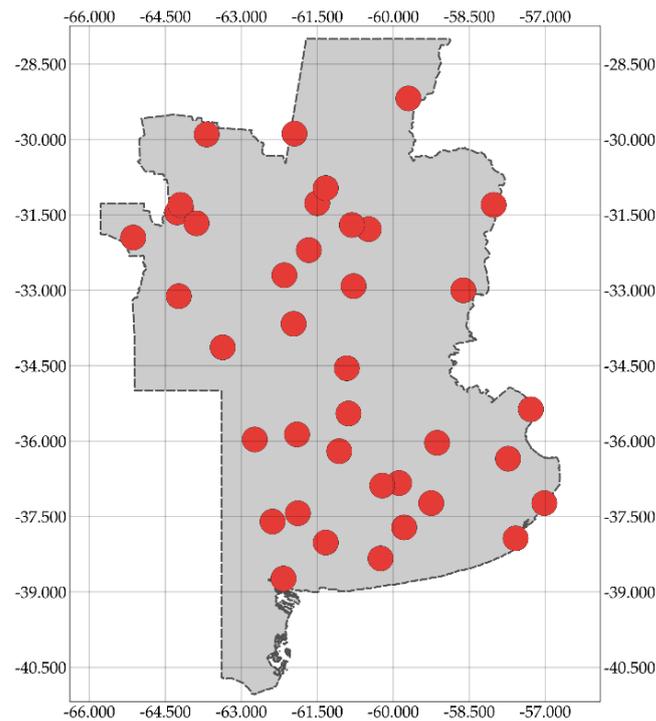
Los datos agrícolas se tomaron de la Base de Datos Abierta del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina de Argentina (2022). Como se ha visto en el apartado anterior, para calcular los rendimientos se utilizó la superficie anual de producción de soja desde 2001 hasta 2021 y la superficie sembrada cada periodo.

2.2.2.1.2. Datos pluviométricos históricos

Las observaciones diarias de precipitación se tomaron de 38 estaciones meteorológicas territoriales del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (2022), que se distribuyen a lo largo del área de siembra de soja (Figura 18).

¹⁰ A diferencia del apartado anterior, para esta parte del trabajo no se ha utilizado la provincia de Chaco porque la producción promedio de los últimos 20 años en la provincia supone un 3% de la producción nacional. El área de estudio utilizada para la proyección de soja supone un 95% de la producción total Argentina.

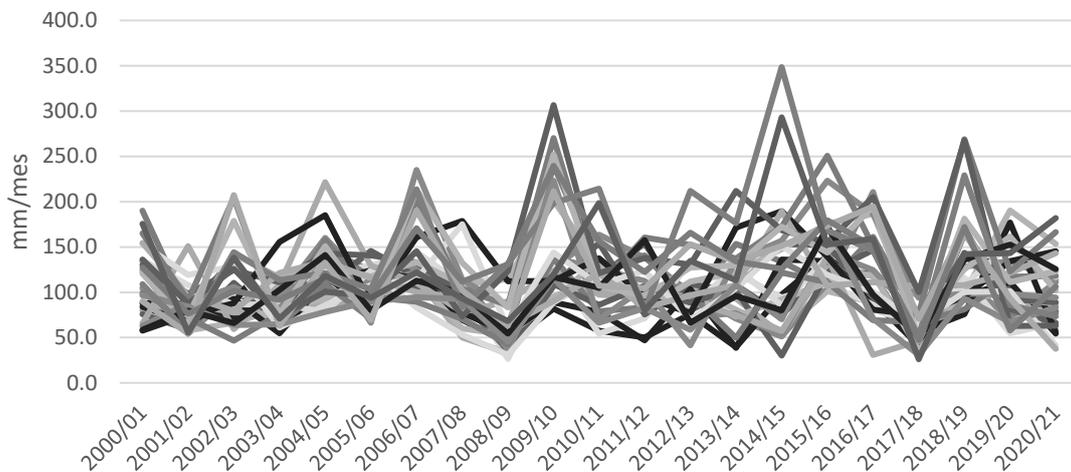
Figura 18. Estaciones meteorológicas en la zona de producción de soja



Elaboración propia sobre datos del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (2022).

Se utilizó la precipitación acumulada mensual de 2000 a 2021 como suma de los valores diarios. La unidad de medida fue en milímetros por mes. Sólo los datos de precipitación de diciembre, enero y febrero representan el periodo crítico según la fenología del cultivo (Thomasz *et al.*, 2023; Departamento de Agricultura de Estados Unidos, 2022; Oficina Argentina de Riesgo Agropecuario, 2022; Minnetti y Lamelas, 1995). La evolución de las 38 estaciones se resume en la Figura 19.

Figura 19. Precipitaciones del periodo diciembre-enero-febrero de las 38 estaciones meteorológicas



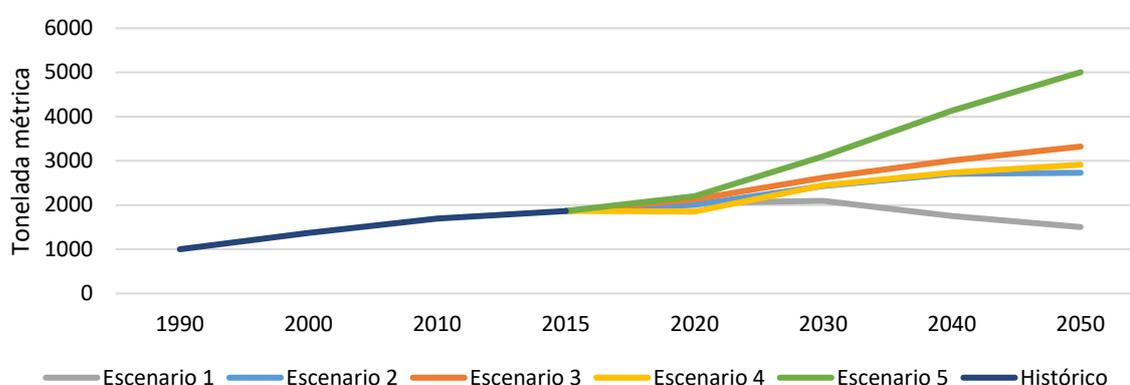
Elaboración propia sobre información del Servicio Meteorológico Nacional Argentino (2022).

2.2.2.1.3. Datos pluviométricos futuros

Los datos sobre precipitaciones futuras se tomaron de las previsiones de la base de datos Copernicus (2022). Esta base de datos proporciona proyecciones de diversas variables climáticas a partir de numerosos modelos en el marco de la sexta fase del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados (CMIP6), que se desarrolló para apoyar el 6º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

La base de datos presenta previsiones basadas en cinco escenarios, denominados vías socioeconómicas compartidas (SSP del inglés). Estas representan diferentes niveles de emisión de CO₂ (Figura 20), dadas las diferentes estructuras económicas proyectadas, el uso de la energía y los cambios en el uso del suelo (O'Neill *et al.*, 2016).

Figura 20. Niveles de CO₂ por escenario de SSP en América Latina



Elaboración propia a partir de Keywan Riahi *et al.* (2017).

Dentro de cada escenario, diferentes centros de investigación presentan diversos modelos para proyectar los niveles de precipitaciones en todo el planeta (Cuadro 26).

Cuadro 26. Número de modelos para cada escenario socioeconómico (SSP)

	Nombre de la plataforma compartida única	Número de modelos
Escenario 1	SSP 1,26	29
Escenario 2	SSP 2,45	30
Escenario 3	SSP 3,70	26
Escenario 4	SSP 4,60	4
Escenario 5	SSP 5,85	30

Elaboración propia a partir de los datos de la base de datos Copernicus (2022)

Sólo se considerarán los escenarios 1, 2, 3 y 5, ya que el escenario 4 no cuenta con suficientes modelos en comparación con el resto, lo que podría sesgar el análisis estadístico.

Una ventaja de esta base de datos es que permite obtener proyecciones de cualquier ubicación geográfica. Gracias a ello, fue posible seleccionar las coordenadas de las estaciones meteorológicas necesarias para la proyección del rendimiento de la soja. Al igual que las series empíricas utilizadas para estimar el modelo (2001-2021), se recopilieron datos de precipitaciones de 2022 a 2042 utilizando el mismo intervalo de tiempo (20 años).

La unidad de medida es en kilogramos por metro cuadrado por segundo. Para trabajar con una unidad común, las unidades de precipitación de la base de datos Copernicus (kilogramos por metro cuadrado por segundo) se convirtieron en unidades utilizadas por el Servicio Meteorológico Argentino (milímetros por mes).

2.2.2.2. Metodología

El enfoque tradicional de modelización del rendimiento, el modelo de simulación de cultivos se basa en una forma funcional que vincula el rendimiento a variables explicativas, como el nivel de precipitaciones, la temperatura, la evapotranspiración, el tipo de suelo, el nivel de carga hídrica inicial y la tecnología, entre otras (Asseng *et al.*, 2014; Basso *et al.*, 2016). La principal limitación del estudio de caso es la disponibilidad de datos: de los 198 departamentos productores de soja, sólo 28 cuentan con una estación meteorológica territorial con suficientes datos históricos, y este grupo representa sólo el 7% de la producción total. El uso de técnicas de extrapolación de variables climáticas, como las precipitaciones, podría ser inexacto teniendo en cuenta el extenso territorio de 17 millones de hectáreas, e incluso en ese caso, no se dispone de conjuntos de datos de otras variables (por ejemplo, evapotranspiración, nivel de carga hídrica inicial, tecnología) a nivel de departamento para calibrar un modelo de cultivo lo suficientemente robusto como para aislar el impacto de las precipitaciones.

Teniendo en cuenta que el objetivo de este trabajo es explicar la producción agregada, y el macro impacto de las precipitaciones, se probó una regresión entre los rendimientos agregados y el nivel de precipitaciones de todas las combinaciones posibles de estaciones meteorológicas.

2.2.2.2.1. Prueba de regresión parcial

Este enfoque pretende seleccionar las estaciones meteorológicas más relevantes mediante un modelo de regresión múltiple parcial, alcanzando una combinación óptima que maximice el poder explicativo y la capacidad de previsión.

Teniendo en cuenta que había 38 regresores y 20 periodos, se probaron diferentes combinaciones de grupos de estaciones meteorológicas para superar la escasez de grados de libertad y disminuir la potencia de la prueba. El proceso de prueba comenzó con grupos de tres, cuatro y cinco regresores y continuó hasta que hubo modelos con variables significativas y suficiente poder explicativo. La regresión estimada es la siguiente:

$$Y_t = \beta_0 + \sum_{i \in D} \beta_i R_{it} + u_t \quad (36)$$

donde Y_t son los rendimientos totales del país para el año t R_{it} son las precipitaciones anuales del departamento $i \in D$ y $u_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$.

El número de regresiones aumentó con el número de regresores incluidos en el modelo (Cuadro 27).

Cuadro 27. Combinaciones de estaciones meteorológicas

Número de regresores	Número de regresiones
3	3,654
4	23,751
5	118,755

Dado el gran número de regresiones que había que probar, se desarrolló un código de programa en R (Equipo central de R, 2020), que proporcionaba automáticamente los resultados para cada grupo de regresores.

A la vista de los resultados, se aplicó el siguiente análisis para seleccionar los modelos óptimos. Se descartaron los modelos con coeficientes de regresión insignificantes. De la muestra restante, se seleccionaron los modelos con mayor poder explicativo (mayor coeficiente de regresión). En esta última muestra se aplicaron pruebas de autocorrelación, heteroscedasticidad y normalidad. Los modelos con las propiedades estadísticas esperadas y el máximo poder explicativo se considerarán "óptimos" a efectos de este trabajo. Por último, se seleccionó el modelo o modelos con mayor capacidad de predicción. A continuación, se resume el método utilizado para comprobar la capacidad de predicción (validación cruzada leave-one-out).

2.2.2.2.2. Prueba de capacidad de predicción del modelo: Validación cruzada Leave-One-Out

Para probar la robustez de los modelos y estimar el error de predicción, se empleó la validación cruzada leave-one-out. Este método consiste en definir aleatoriamente una parte de las observaciones para ajustar el modelo y otra parte para probarlo (Hastie *et al.*, 2009). Dado que el tamaño de la muestra era pequeño, resultó conveniente definir los datos para la estimación del modelo en $t - 1$ observaciones. El último paso consistió en probar el error de predicción de la evaluación mediante la siguiente ecuación:

$$\Lambda = 1 - \frac{RMSE}{\sigma_{Y_t}} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{t=0}^T \frac{(\hat{Y}_t - Y_t)^2}{T}}}{\sigma_{Y_t}} \quad (37)$$

donde \hat{Y}_t es el rendimiento estimado para el período t , Y_t es el rendimiento observado en el período t y σ_{Y_t} es la desviación típica de los rendimientos.

Si el error de previsión se explica totalmente por la varianza de la variable a prever, el indicador Δ es igual a cero. Cuanto mayor sea el error de previsión, mayor será el coeficiente y mayor que la unidad, y menor será el indicador Δ y menor que cero.

De los modelos óptimos seleccionados en la sección anterior, se utilizó el de mayor capacidad de previsión para proyectar los rendimientos y la producción futuros con los datos de precipitaciones futuras de la base de datos Copernicus.

2.2.2.2.3. Análisis de riesgos

El análisis de riesgo de las trayectorias de rendimiento estimadas se realizó mediante dos métodos:

- i. En primer lugar, las trayectorias previstas se dividieron en producción baja, media y alta para evaluar el número de casos en cada grupo. El grupo de baja producción se consideró de alto riesgo económico.
- ii. En segundo lugar, se identificaron y evaluaron los fenómenos extremos en cada trayectoria individual. Las precipitaciones muy escasas durante el periodo evaluado suelen estar relacionadas con episodios de sequía, que generan las mayores pérdidas económicas. El número y la intensidad de los fenómenos extremos se consideraron medidas del impacto futuro.

A continuación, se resumen ambos enfoques.

Clasificación de riesgo bajo, medio y alto. Teniendo en cuenta que hay 4 escenarios con entre 26 y 30 modelos, hay un total de 115 proyecciones de precipitaciones para cada estación. Al no haber probabilidad asociada a cada modelo, no se pudieron calcular los valores esperados. Por lo tanto, se hizo una clasificación para sintetizar las proyecciones. En lugar de utilizar únicamente la media general, se propuso una clasificación por grupos para complementar el análisis: un grupo de niveles altos o máximos, un grupo central o medio y un grupo de niveles bajos o mínimos. Para ello, se consideraron dos metodologías diferentes (una paramétrica y otra no paramétrica): a) desviación media-estándar y b) metodología de conglomerados.

Metodología media-desviación estándar. El primer método probado se basaba en clasificar las series en tres grupos diferentes: uno que concentraba las trayectorias más próximas a la media total de trayectorias (\bar{x}_t), otro más próximo a la media más la desviación típica ($\bar{x}_t + \sigma_t$) y otros más próximos a la media menos la desviación típica ($\bar{x}_t - \sigma_t$). Las ecuaciones 38 y 39 muestran la media y la desviación típica de cada escenario:

$$\bar{x}_t = \frac{\sum_{i=1}^n x_{i,t}}{n} \quad (38)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_t)^2}{n}} \quad (39)$$

donde $x_{i,t}$ es el valor de la producción de soja de cada escenario.

Para asociar cada serie a la media, o al umbral superior o inferior de la desviación típica, se utilizó la distancia euclídea al cuadrado. Las ecuaciones 40 y 41 muestran la definición de la distancia y los criterios de selección:

$$d(\bar{x}_i, \bar{x}_r) = (\bar{x}_i - \bar{x}_r)^2 \quad (40)$$

$$\min_i \{d(\bar{x}_i, \bar{x}_r)\} \quad (41)$$

donde \bar{x}_i es la media del modelo i , \bar{x}_r es la media de la serie de referencia, que puede ser la media de todos los modelos, o la media más una desviación típica o la media menos una desviación típica.

Metodología Cluster. La segunda metodología analizada fue la propuesta por Vilar *et al.* (2009), cuyo objetivo era clasificar datos de series temporales basándose en un enfoque no paramétrico en dos pasos: estimación de tendencias mediante regresión polinómica local (ecuación 42) y clasificación de tendencias en grupos similares mediante un análisis de conglomerados estándar:

$$y_t = m(x_t) + \varepsilon_t, \quad t = 1, \dots, n \quad (42)$$

donde $m(x_t)$ es la función de suavizado desconocida x_t la serie temporal de cada modelo de precipitación en el periodo t en la ventana de suavizado $[x-h, x+h]$, h es el ancho de banda, y ε_t es el componente aleatorio con media 0 y varianza σ_0^2 .

Siguiendo a Vilar *et al.* (2009), los conglomerados se elaboraron mediante un método jerárquico acumulativo utilizando la distancia euclidiana al cuadrado como medida entre cada par de tendencias (ecuación 43):

$$d(\hat{m}_l, \hat{m}_s) = \sum_{t=1}^{20} [\hat{m}_l(x_t) - \hat{m}_s(x_t)]^2 \quad (43)$$

donde los subíndices $l, s \in \{1, 2, \dots, 20\}$ son las trayectorias pluviométricas de cada escenario

Eventos extremos. Thomasz *et al.* (2019) descubrieron que cuando los rendimientos eran inferiores a una desviación estándar por debajo de la media, había un 100% de coincidencia con sequías graves o extremas. Por lo tanto, se evaluó el número y la intensidad de los casos de producción extremadamente baja para medir las pérdidas

de producción. Estos casos se identificaron utilizando el umbral de desviación estándar (Ecuación 44):

$$f(x_t) = \begin{cases} 0 & \text{if } x_t > \bar{x} + \sigma \\ 1 & \text{if } x_t > \bar{x} + \sigma \end{cases} \quad (44)$$

donde x_t es el nivel de producción de cada año, \bar{x} es la producción media y σ la desviación típica de la serie.

La intensidad se mide como la diferencia porcentual entre el resultado del modelo y el resultado medio del mismo modelo (ecuación 45):

$$I(\hat{x}_t) = \frac{\hat{x}_t - \bar{x}}{\bar{x}} \quad (45)$$

donde \hat{x}_t es el caso de baja producción y \bar{x} es la producción media de la serie.

2.2.3. Resultados

2.2.3.1. Modelo óptimo

Los resultados de la regresión múltiple de todas las combinaciones posibles de las tres estaciones muestran que nueve modelos alcanzaron las propiedades estadísticas esperadas, con un poder explicativo entre el 70,2% y el 75,7% (Cuadro 28). Las combinaciones de las cuatro estaciones no aumentaron considerablemente el poder explicativo, y ninguno de los modelos de las cinco estaciones resultó estadísticamente significativo (apéndice 2).

Cuadro 28. Mejores combinaciones de tres estaciones meteorológicas

Estación meteorológica 1	Estación meteorológica 2	Estación meteorológica 3	R ²
Córdoba***	Río seco*	Paraná**	0.757
Coronel Suárez**	Río seco**	Paraná**	0.737
Coronel Suárez**	Dolores**	Río seco***	0.730
Las flores**	Córdoba***	Río seco**	0.727
Coronel Suárez***	Las flores**	Río seco***	0.719
Córdoba***	Río seco*	La Capital*	0.718
Dolores***	Río seco***	San Cristóbal**	0.717
Coronel Suárez***	Junín	Río seco*	0.716
Coronel Suárez***	Río seco**	La Capital*	0.702
Media			0.725

Nota: *Significativo al 90%, **significativo al 95%, ***significativo al 99%.

La capacidad de pronóstico se probó mediante la técnica de validación cruzada leave-one-out. Los resultados muestran que el modelo de regresión óptimo se logró con las precipitaciones de las estaciones meteorológicas de Junín, Coronel Suarez y Río Seco, con el mayor valor de RMSE/ST (Cuadro 29).

Cuadro 29. Resultados de la prueba de capacidad de previsión del modelo

Estación meteorológica 1	Estación meteorológica		RMSE	RMSE/ST	A
	2	3			
Córdoba	Río Seco	Paraná	7.8%	61.7%	38.3%
Coronel Suárez	Río seco	Paraná	8.2%	65.0%	35.0%
Coronel Suárez	Dolores	Río seco	8.0%	63.5%	36.5%
Las flores	Córdoba	Río seco	7.8%	62.2%	37.8%
Coronel Suárez	Las flores	Río seco	8.5%	67.6%	32.4%
Córdoba	Río seco	La Capital	7.6%	60.7%	39.3%
Dolores	Río seco	San Cristóbal	7.3%	58.4%	41.6%
Coronel Suárez	Junín	Río seco	9.0%	71.9%	28.1%
Coronel Suárez	Río seco	La Capital	8.6%	68.2%	31.8%

Por lo tanto, este modelo de sensibilidad se utilizará para proyectar la producción de soja, con los coeficientes de determinación resumidos en la Cuadro 30. El análisis residual del modelo óptimo alcanzó las propiedades estadísticas esperadas (apéndice 3).

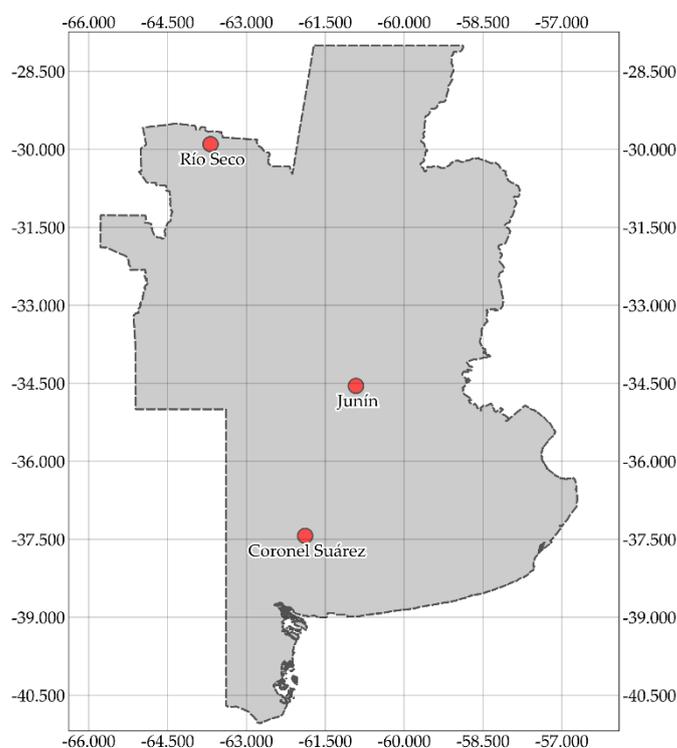
Cuadro 30. Modelo de sensibilidad óptimo para el índice de rendimiento de la soja en Argentina

	β_0	Coronel Suárez	Junín	Río Seco
Modelo óptimo para el índice de rendimiento de la soja	0.5943 (0.0655)***	0.0022 (0.0006)***	0.0011 (0.0005)*	0.0008 (0.0004)**
R2	0.716		Criterio de información de Akaike	-2.2333
Estadístico F	14.2641***		Criterio de Schwarz	-2.0348
Muestra	2001-2021			

Nota: El error estándar se indica entre paréntesis. *Significativo al 90%, **significativo al 95%, ***significativo al 99%.

Las tres estaciones se encuentran en el norte, centro y sur del área sojera (Figura 21), con las siguientes coordenadas: Junín (-34,59, -60,94), Coronel Suarez (-37,46, -61,93) y Río Seco (-29,90, -63,66).

Figura 21. Localización de las estaciones meteorológicas óptimas en la zona de estudio



2.2.3.2. Producción prevista

Con los datos pluviométricos de la base de datos Copernicus y el modelo óptimo, se proyectaron los rendimientos futuros. Los rendimientos máximos se limitaron a 4 toneladas por hectárea por coherencia con la tecnología actual. Para el cálculo de la producción se utilizó la superficie media cosechada de los últimos 10 años (17 millones de hectáreas).

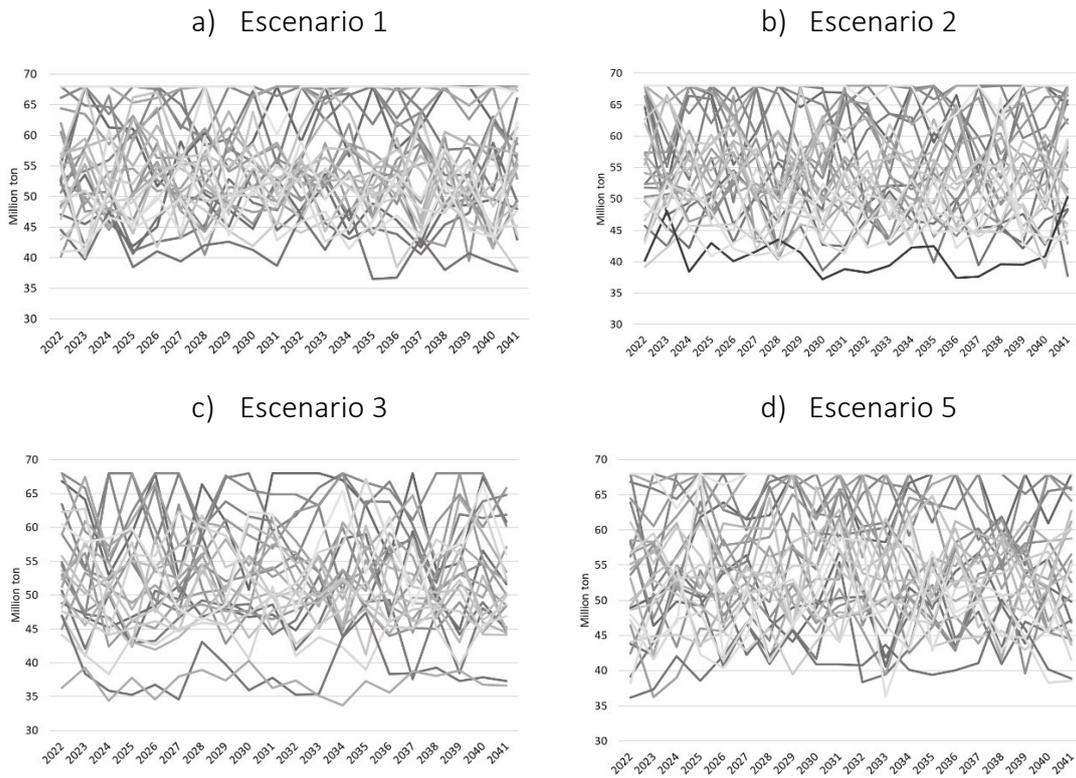
Los principales resultados de las proyecciones de producción muestran que la media general proyectada fue de 53,4 millones de toneladas, un 3,8% superior a la media actual de 51,4 millones de toneladas. Por otra parte, el valor medio mínimo proyectado fue de 35,9 millones de toneladas, superior al mínimo de la serie empírica, que fue de 31,5 millones de toneladas (sequía extrema de 2008/09). Por último, no hubo variaciones significativas en la producción entre los cuatro escenarios climáticos. El nivel medio de producción se sitúa entre 51,9 y 54 millones de toneladas y los valores mínimos oscilan entre 33,7 y 37,2 millones de toneladas. Los valores medios, máximos y mínimos por escenario, las medias generales y los datos históricos se resumen en el cuadro 31.

Cuadro 31. Valores medio, máximo y mínimo de la producción prevista por escenario en toneladas (millones)

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 5	Media general	Datos históricos
Media	54.36	54.39	52.11	54.56	53.85	51.40
Min	36.52	37.23	33.70	36.16	35.90	31.50
Max	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00	56.40

Las trayectorias individuales por escenario (Figura 22) se clasificaron en los tres grupos de nivel de riesgo de la sección siguiente.

Figura 22. Producción de soja proyectada por los modelos Copernicus

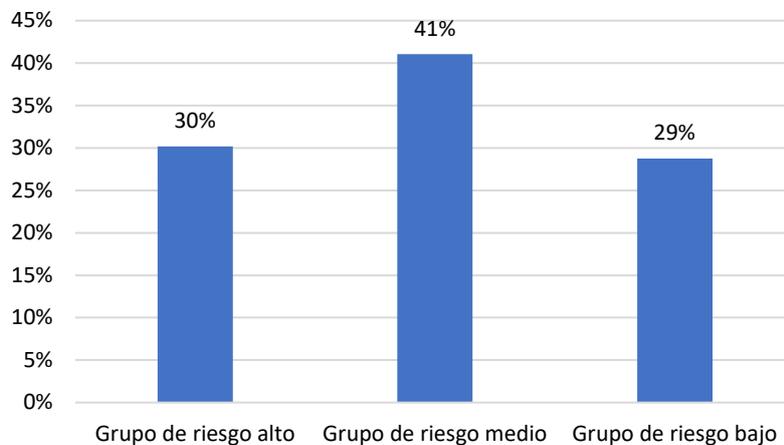


2.2.3.3. Análisis de riesgos

Para la clasificación de las trayectorias en producción alta, media y baja, la desviación media-estándar demostró ser más robusta (apéndice 4). Estos grupos de niveles de producción están asociados a los niveles de riesgo económico, ya que éste está directamente relacionado con los ingresos monetarios del país (Thomasz *et al.*, 2023).

Tomando como umbrales la media y una desviación típica positiva y otra negativa, el 30% de las trayectorias futuras pertenecían al grupo de baja producción o alto riesgo, el 41% al grupo medio y el 29% al grupo de alta producción o bajo riesgo (Figura 23).

Figura 23. Distribución de los modelos analizados



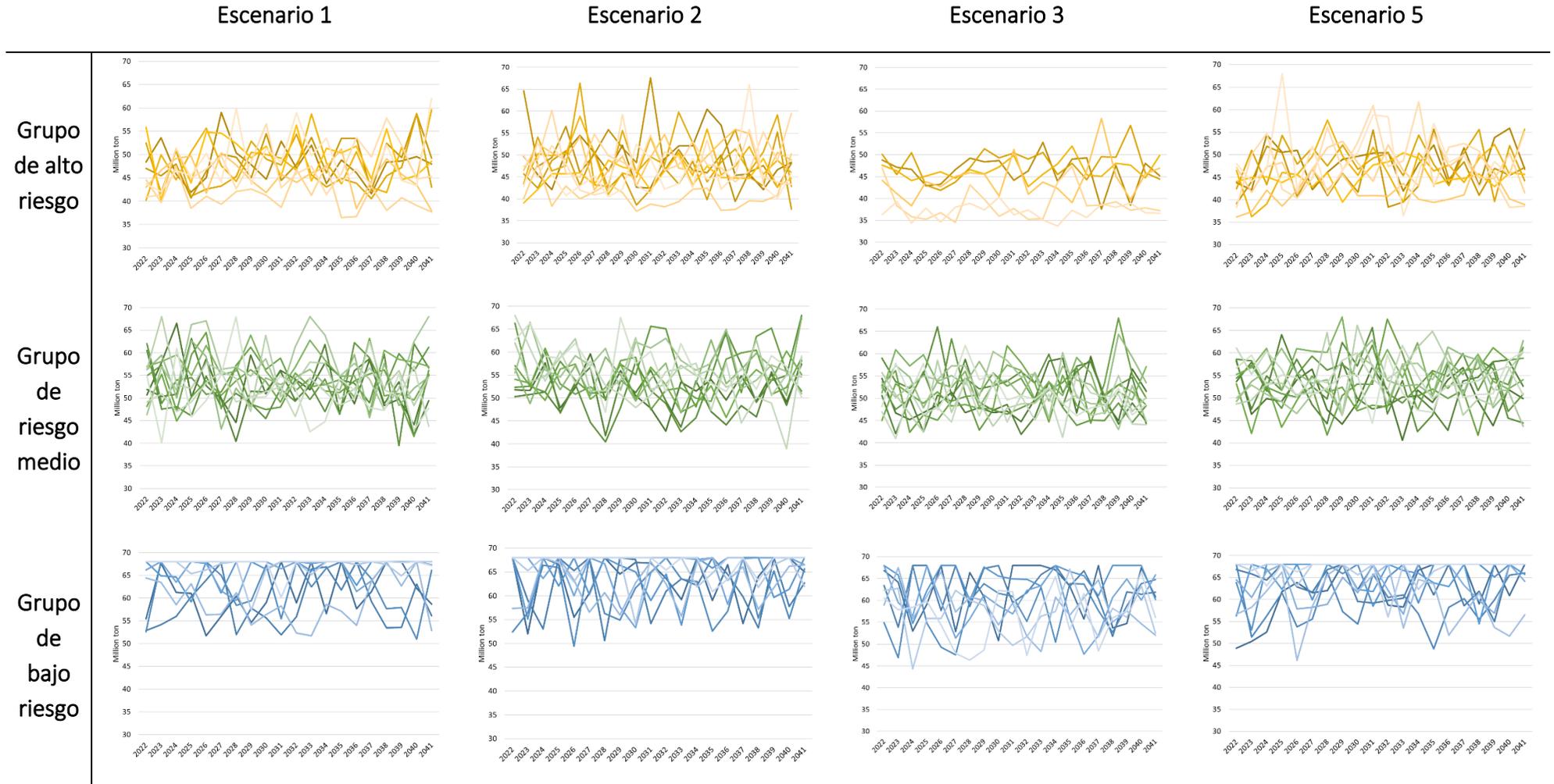
Hubo cambios en la frecuencia de casos en los distintos escenarios climáticos en comparación con la media general. El grupo de alto riesgo concentró el 37% de los casos en el escenario 2 y el 23% de los casos en el escenario 3. Estas diferencias se compensan, con menos y más casos en el grupo de riesgo medio (37% y 46%, respectivamente). El grupo de bajo riesgo mantuvo valores similares a la media general en todos los escenarios (Cuadro 32).

Cuadro 32. Distribución de los modelos por escenario

	Grupo de alto riesgo	Grupo de riesgo medio	Grupo de bajo riesgo
Escenario 1 (29 modelos)	31%	41%	28%
Escenario 2 (30 modelos)	37%	37%	27%
Escenario 3 (26 modelos)	23%	46%	31%
Escenario 5 (30 modelos)	30%	40%	30%

Todas las trayectorias individuales de la producción prevista clasificadas por grupo y por escenario se presentan en la Figura 24.

Figura 24. Niveles de producción previstos por grupo y escenario en toneladas (millones)



La producción media por grupo es de 46,52 toneladas para el riesgo alto, 53,28 toneladas para el medio y 62,74 toneladas para el bajo (cuadro 32). No hay diferencias significativas en los valores por escenario, salvo en el caso del escenario 3, que presenta los valores más bajos en los tres grupos: 43,47 toneladas, 51,27 toneladas y 59,88 toneladas en los grupos de riesgo alto, medio y bajo, respectivamente (cuadro 33). Por lo tanto, aunque el escenario 3 tenía la frecuencia más baja en el grupo de alto riesgo, presentaba los valores de producción más bajos en todos los casos-

Cuadro 33. Producción media por escenario y grupo en toneladas (millones de toneladas)

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 5	Media
Riesgo bajo	63.63	63.90	59.86	63.59	62.74
Riesgo medio	53.55	54.42	51.27	53.91	53.28
Alto riesgo	47.19	47.44	43.47	46.77	46.21

Tomando como referencia los valores empíricos, el nivel medio de producción actual es de 51 millones de toneladas, y el nivel de producción más bajo fue de 46,52 millones de toneladas (rendimientos de la campaña 2008/2009 a escala de 17 millones de hectáreas). Por tanto, el nivel medio de producción de alto riesgo coincide con el valor empírico más bajo, y todas las demás trayectorias pertenecientes a los grupos de riesgo medio y bajo, que representan el 70% de los casos, proyectan niveles superiores a la producción actual. La única excepción es el Escenario 3, que presenta valores de producción más bajos, pero que se alinea con los valores empíricos.

En conclusión, no hay ningún problema con los niveles medios de producción, ya que resultan ser superiores a los actuales y al mismo nivel en el peor de los casos (hipótesis 3). Sin embargo, todos los valores anteriores son medias de los 20 años de la muestra prevista. En la muestra siguiente se analizó la variabilidad dentro de los años centrándose en las desviaciones extremas de la media y evaluando los niveles de pérdidas.

2.2.3.4. Pérdidas y valoración monetaria

Por término medio, se produjeron 3,3 casos de fenómenos extremos durante la muestra de 20 años. La principal diferencia es el escenario 3, con 2,62 casos. El apéndice 5 muestra cómo los eventos extremos se concentran en los grupos de riesgo alto y medio. La serie empírica (2001-2021) tuvo dos eventos extremos¹¹, por lo que se produjo un aumento

¹¹ Aunque la metodología usada para detectar eventos extremos ha sido la misma que en el apartado anterior para detectarlos en la serie histórica, el resultado es diferente porque en el apartado anterior se lleva a cabo un análisis con una escala departamental, y en este se lleva a cabo con una escala nacional. De este modo en el apartado 2.1 se detectan tres eventos extremos (2008/2009; 2011/2012; y 2017/2018), mientras que en este caso se detectan dos (2008/2009 y 2017/2018). La sequía de la campaña 2011/2012 tiene un origen regional impactando de forma extrema en las provincias de Buenos Aires, Chaco, Córdoba y Santa Fe.

en la muestra proyectada. La intensidad de los casos extremos osciló, por término medio, entre un mínimo del 15,66% y un máximo del 33,35% de la producción, con una media general del 22,25%. No hay diferencias considerables entre escenarios, ni con los niveles de intensidad de la serie histórica. Todas las cifras se resumen en el cuadro 34, y los detalles de los casos por modelo y escenario se presentan en el apéndice 6.

Cuadro 34. Descripción de los fenómenos extremos previstos por escenario

	Número de eventos extremos	Intensidad de los fenómenos extremos		
		<i>Mín</i>	<i>Máx</i>	<i>Media</i>
Escenario 1	3.48	15.50%	32.82%	21.09%
Escenario 2	3.48	15.86%	31.54%	21.56%
Escenario 3	2.62	15.65%	35.34%	24.40%
Escenario 5	3.60	15.63%	33.72%	21.96%
Media	3.30	15.66%	33.35%	22.25%
Histórico	2	16.70%	30.10%	23.40%

Una de las principales aportaciones de este análisis es que permite estimar las pérdidas explicadas por el déficit extremo de precipitaciones. Tomando la producción media de cada escenario como trayectoria contrafactual, las pérdidas se evalúan en relación con la producción total y en dólares (millones). Para esto último, se utilizará el precio internacional medio de los últimos cinco años (349 USD por tonelada).

La pérdida relativa media general es del 3,71% de la producción total, con un mínimo del 3,32% en el Escenario 3 y un máximo del 3,77% en el Escenario 5. La pérdida relativa de la serie histórica fue del 2,3%. Por lo tanto, en comparación con los datos históricos, se espera un aumento de las pérdidas medias. La valoración de la pérdida absoluta en dólares estima una pérdida media en los cuatro escenarios de 12.205,38- 14.380,79 millones de USD frente a los 7.492 millones de USD de la serie histórica (Cuadro 35). Los detalles de las pérdidas para cada trayectoria en cada escenario se presentan en el apéndice 7

Cuadro 35. Descripción de las pérdidas futuras en eventos extremos por escenario

	Porcentaje de pérdidas en relación con la producción media	Valor de las pérdidas en caso extremo (en millones de USD)
Escenario 1	3.67%	\$13,673.44
Escenario 2	3.70%	\$14,368.52
Escenario 3	3.32%	\$12,205.38
Escenario 5	3.77%	\$14,380.79
Media	3.71%	\$13,657.03
Histórico	2.30%	\$7,492

En comparación con los datos históricos, se prevé un aumento de las pérdidas medias. La pérdida media total en los cuatro escenarios se situó entre 12.205,38 y 14.380,79 millones de USD, frente a los 7.492 millones de USD de la serie histórica.

2.2.4. Conclusiones

Prever la producción agregada de soja en una región de 17 millones de hectáreas con información limitada es un ejercicio complejo. Por ello, la mayoría de los estudios se han centrado en análisis en zonas con suficientes datos agroclimáticos para aplicar modelos agronómicos tradicionales (empíricos o simulados). Los modelos específicos calibrados para zonas concretas son importantes para las estrategias locales de adaptación a nivel de explotación. Sin embargo, el riesgo climático supera los límites de las explotaciones para tener un impacto macroeconómico en Argentina. Por lo tanto, la proyección y el análisis de la producción total de soja es un insumo estratégico para la gestión del riesgo macroeconómico.

Con este objetivo, este trabajo propone un enfoque simplificado para estimar y analizar la producción futura con datos disponibles de libre acceso. Mediante una regresión parcial múltiple, se estimó la relación entre los rendimientos de soja en diferentes combinaciones de estaciones pluviométricas para el período 2001-2021. Con el modelo óptimo, se proyectó la producción utilizando datos de precipitaciones futuras de modelos climáticos disponibles en la base de datos Copernicus para el período 2022-2042.

Los resultados muestran que existe una fuerte relación estadística entre el nivel de precipitaciones y el rendimiento total de la soja. Mientras que las precipitaciones no tienen suficiente poder explicativo a escala local debido a la importancia de otras variables agroclimáticas locales, explican por término medio el 72% de la variación del rendimiento en la producción total. Por lo tanto, las precipitaciones como variable única son estadísticamente relevantes a macroescala.

Este resultado coincide con el análisis realizado a través del modelo dicotómico desarrollado en el apartado anterior. Por tanto, se puede concluir que a pesar de haberse realizado dos enfoques diferentes -en el apartado anterior se desarrolla un modelo dicotómico a escala departamental y en este un enfoque de sensibilidad de los rindes a las precipitaciones-, el resultado obtenido es el mismo a escala macroeconómica.

En cuanto a las estimaciones futuras, existen 115 proyecciones de precipitaciones procedentes de distintos modelos y para cuatro escenarios climáticos distintos. Estas proyecciones tienen valores muy diferentes con distinta variabilidad, lo que genera una gran disparidad en los resultados de las proyecciones de cantidad de soja finales. Como no hay ninguna probabilidad asociada a cada modelo, no se pueden calcular los valores esperados. Por lo tanto, hay que hacer una clasificación para sintetizar las proyecciones. El enfoque paramétrico tradicional de media y varianza demostró ser el más eficaz para clasificar los distintos niveles de producción.

El análisis de la clasificación mostró que la media general de todos los modelos de los cuatro escenarios climáticos proyectaba una producción futura un 3,8% superior a los niveles actuales. Además, los valores mínimos eran superiores a los de los datos históricos. En cuanto a la frecuencia de modelos que pertenecen a cada grupo, el 30% de

las proyecciones se situaban en los grupos de producción de riesgo alto, con un valor medio de producción un 10,8% inferior a la producción actual. En el resto de los casos (70%), la producción del proyecto era superior a la producción actual. Mientras que no hubo cambios en la producción media entre los escenarios climáticos, hubo un mayor número de trayectorias de baja producción en el Escenario 2 (37%). Esto significa que el Escenario 2 es considerado el más arriesgado si se toma la frecuencia como indicador. El Escenario 2 supone que la estructura económica y las emisiones futuras seguirán con la tendencia de crecimiento actual.

El aumento de los niveles medios de producción viene acompañado de un incremento de la frecuencia de los fenómenos extremos. La serie histórica registra dos eventos extremos frente a una frecuencia media de 3,3 en las proyecciones futuras. La intensidad de los sucesos se mantiene al mismo nivel que en los datos históricos. El aumento de la frecuencia genera pérdidas agregadas que serán más elevadas que en el pasado. La pérdida relativa es, por término medio, del 3,6% de la producción (13.000 USD), frente al 2,3% de la producción en los datos históricos (7.492 USD).

La conclusión general es que, en promedio, se espera un mayor nivel de producción, pero con mayores pérdidas, considerando todos los modelos y escenarios climáticos con igual probabilidad de ocurrencia. La principal aplicación de los resultados y proyecciones es la estimación del riesgo macroeconómico y, por tanto, la incorporación del escenario climático dentro de un proceso de planificación presupuestaria y fiscal a largo plazo, como un fondo soberano de estabilización. Como se discutió en la introducción, y se vio en el apartado anterior, el riesgo climático tiene un impacto local tradicional, pero tiene una dimensión macroeconómica en Argentina que debe ser gestionada a escala macro. En futuros trabajos se seguirá con esta línea de investigación para calcular un fondo soberano que permita a Argentina reducir el riesgo climático al que se enfrenta por la producción de soja.

El estudio tiene algunas limitaciones que pueden ser futuras líneas de investigación. Entre las más importantes están el uso de modelos de precipitación con probabilidad de ocurrencia, la robustez en el tiempo del modelo de regresión con la combinatoria óptima de estaciones pluviométricas y la prueba de modelos alternativos que podrían incorporar otros indicadores agroclimáticos como el balance hídrico.

2.3. Síntesis del capítulo

La producción de soja ocupa un papel muy importante en la economía argentina. Su exportación supone más de la mitad de las reservas internacionales del país. Además, en los últimos 20 años los derechos de exportación de la commodity supusieron un 4% del total recaudado en Argentina. Sin embargo, es un sector productivo altamente impactado por las sequías, ya que las precipitaciones son la principal fuente de crecimiento de la commodity porque en toda la superficie implantada su producción se realiza sin riego. Existe un impacto directo de las sequías en la producción de soja.

Se ha llevado a cabo la identificación y evaluación de las sequías que impactan en la soja y el maíz. A pesar de que el núcleo del capítulo es la soja, se ha estudiado también el maíz por que en los últimos años ha experimentado un gran crecimiento y porque los periodos de crecimiento críticos coinciden con la soja. Con dicho análisis se puede afirmar que las sequías tienen un impacto macroeconómico en Argentina a través del sector exterior. En los 20 años de periodo estudiado se han detectado 3 sequías graves y 6 sequías moderadas que han supuesto unas pérdidas de USD24.170 millones, el 57% de las reservas internacionales argentinas.

Sin embargo, no existe una estrategia de planificación macrofiscal que genere estabilidad de ingresos al país ante nuevos eventos climáticos extremos que impacten en la producción de soja. En este sentido, la segunda parte del capítulo ha consistido en estimar la proyección futura de soja a través de un modelo de sensibilidad de la soja a las precipitaciones y de la proyección de las precipitaciones futuras de cuatro modelos climáticos proporcionados por la base de datos de Copernicus.

El modelo de sensibilidad muestra que existe una fuerte relación entre las precipitaciones y los rindes de soja a macroescala. Además, los resultados del modelo de sensibilidad coinciden a una escala macro con el modelo dicotómico utilizado para identificar y evaluar el impacto en el apartado anterior.

Respecto a la proyección de producción futura de soja, se utilizaron 115 series de precipitación futura fruto de modelos climáticos divididos en cuatro escenarios diferentes. El análisis de las trayectorias futuras de producción de soja se realizaron en dos enfoques: (i) se dividieron las trayectorias en tres grupos de alta, media o baja producción para evaluar la distribución de los modelos; (ii) se identificaron y evaluaron los eventos extremos en cada trayectoria de producción de forma individual.

Del agrupamiento de los modelos se determina que en el escenario 2, que supone un comportamiento socioeconómico actual en el futuro, se muestran la mayoría de las trayectorias (el 37%) en el grupo de baja producción. De la identificación y evaluación de eventos extremos en el futuro se concluye que existe un aumento de la frecuencia de estos que produce que las pérdidas agregadas sean mayores que en la serie histórica.

Este trabajo de análisis de la proyección de soja futura supone el comienzo para la elaboración de una estrategia de planificación macrofiscal, como es el fondo soberano

de estabilización, con el objetivo de eliminar incertidumbre en los ingresos públicos ante futuros eventos climáticos extremos.

Conclusiones finales

En la actualidad se está produciendo un incremento de estudios que analizan el impacto del cambio climático en los sectores productivos agrícola y ganadero. El análisis desarrollado en estos trabajos presenta dos enfoques alternativos de la cuestión. Por un lado, la orientación agronómica se basa en el análisis a escala de parcela, analizando el impacto del clima en la productividad a partir de variables propias de cada cosecha. Por otro lado, el enfoque económico emplea modelos que tratan de explicar el impacto del clima en la producción, los cambios en los rendimientos o en el PIB sectorial a través de la proyección de variables climáticas de diferentes escenarios futuros. Destacan los modelos de equilibrio general estocástico.

La aportación metodológica fundamental de esta tesis consiste en situarse en un punto intermedio de ambos enfoques. Se utilizan modelos robustos que aportan magnitudes monetarias de pérdidas por impacto de eventos climáticos extremos a través del análisis del flujo de fondos de la actividad productiva estudiada. Estos modelos resultan muy útiles para poder comparar el impacto en el tiempo o con otras regiones geográficas y para desarrollar herramientas de adaptación ajustadas a cada caso examinado.

Concretamente, esta tesis tiene como aporte empírico el análisis del impacto de los eventos climáticos extremos producidos en dos actividades muy diferentes entre sí: el ovino en extensivo en Extremadura, que tiene relevancia a nivel microeconómico en las explotaciones ganaderas. Y la producción de soja en Argentina, que tiene repercusiones macroeconómicas, ya que no solamente afecta a las explotaciones agrícolas, sino que también influye en las magnitudes agregadas a nivel de país. A través de la contextualización de cada una de las actividades y del estudio minucioso de cada caso, se determina que el impacto de los eventos climáticos extremos se produce de dos formas diferentes: mientras que en el ovino se produce de forma indirecta, en la soja lo hace de forma directa.

En el sector ovino cárnico en extensivo los eventos climáticos extremos tienen un impacto indirecto ya que el déficit extremo de precipitaciones tiene como consecuencia una disminución de la calidad y/o cantidad de pasto para los animales. La vía de adaptación de los ganaderos para no perder producción es aumentar la suplementación alimenticia que se ve reflejado en un incremento del coste de alimentación para las explotaciones. Se ha llevado a cabo el análisis de impacto sobre dos tipos de explotaciones representativas: una en régimen de propiedad y otra en régimen de arrendamiento. La principal conclusión que se puede extraer es que el impacto de las sequías sobre las explotaciones en régimen de propiedad produce una disminución de los beneficios en un 45% en promedio a lo largo de las dos sequías (2012 y 2017) detectadas durante el periodo temporal incluido en el estudio. Por otro lado, el análisis sobre las explotaciones en régimen arrendatario concluye que la sequía de 2012 llegó a producir pérdidas. Esto pone de manifiesto la vulnerabilidad de la actividad ante la escasez de precipitaciones, principalmente en explotaciones en régimen arrendatario, y la necesidad de utilizar herramientas de adaptación y mitigación para el mantenimiento de una actividad que

genera empleo en áreas económicamente marginales en las que se produce la actividad ovina extensiva.

En relación con el diseño de una estrategia de adaptación, se han analizado las diferentes herramientas disponibles para el ganadero, concluyendo que, a pesar de ser la suplementación alimenticia el principal insumo de la estructura de costes y de ser el aumento de cantidad de este input la principal consecuencia producida por el impacto de eventos climáticos extremos, en la actualidad aún no existe una herramienta de adaptación que reduzca la volatilidad del precio del insumo. Tras analizar los componentes del pienso, se ha llegado a la conclusión de que el 96% de los mismos se comercializan en mercados internacionales de futuros, siendo esto la oportunidad de diseñar una cobertura cruzada del precio del pienso

Se ha calculado el valor de la cobertura cruzada del precio del pienso a través de la resolución del problema de maximización de la utilidad esperada del ganadero, bajo el supuesto de que se trata de agentes aversos al riesgo. Para ello, se han utilizado los contratos de futuros de los componentes del insumo: maíz, trigo, harina de soja, cebada y semillas de girasol. La herramienta financiera obtenida podría reducir la volatilidad del precio del pienso en un 63.3%. Un problema adicional es que, mientras el maíz, trigo y la harina de soja cotizan en la Bolsa de Chicago, la cebada y la semilla de girasol lo hacen en bolsas diferentes. Esto complica la puesta en implementación de la herramienta. Con el objetivo de simplificar la cobertura para facilitar su ejecución, se ha calculado la cobertura cruzada óptima, utilizando solo las commodities que cotizan en la Bolsa de Chicago. Esta herramienta, además de más sencilla, resulta más eficiente que la cobertura del pienso utilizando todos los componentes de este ya que cubre el 65.3% del precio del pienso.

Por último, se aplicó la herramienta financiera para una explotación representativa. Los resultados del análisis permiten concluir que la herramienta es eficiente. Sin embargo, por su complejidad y porque su rentabilidad se basa en un horizonte temporal de largo plazo, se recomienda la puesta en práctica por parte de entidades que agrupen diversas explotaciones, como cooperativas.

Del análisis del impacto de los eventos climáticos extremos en la producción de soja y maíz en Argentina se extrae que existe un impacto directo de la ausencia de precipitaciones en la actividad productiva, ya que se trata de cultivos que crecen sin más riego que el procedente de las lluvias. En este sentido, a lo largo del capítulo dos, para el análisis de la producción de soja, se emplean dos metodologías diferentes: (i) por un lado, para el análisis de impactos se usa una metodología de valoración de pérdidas a través de un modelo dicotómico que identifica los casos en los que existe impacto de los eventos climáticos extremos, para después evaluar las pérdidas; (ii) por otro lado, para proyectar la producción se utiliza un modelo de análisis de sensibilidad de la soja a las precipitaciones, que concluye que la variable climática explica el 73% de la producción nacional de soja. Ambas metodologías proveen los mismos resultados para el conjunto del área sojera. Esto confirma la hipótesis que las precipitaciones son el principal insumo del que depende la soja para su producción si se analiza toda el área de producción.

Debido a la magnitud que tiene el impacto de los eventos climáticos extremos en la producción de soja y maíz a lo largo del país, las pérdidas de producción originan un impacto a nivel macroeconómico. Como la principal orientación de la producción de soja es la exportación, la vía más importante de transmisión del impacto de los eventos climáticos a la economía se produce a través del sector exterior. El análisis arroja que las pérdidas por sequías han supuesto el 57.45% de las reservas internacionales del Banco Central Argentino.

Sin embargo, a pesar de la importancia del impacto en el sector sojero para el conjunto de la economía argentina, no existe ninguna herramienta de adaptación a los eventos climáticos extremos. Esta tesis aporta la proyección de la producción de soja con el objetivo de generar una herramienta de planificación macrofiscal a largo plazo. De la estimación de la producción futura de soja se puede concluir que, en promedio de los cuatro escenarios climáticos analizados, se producirá una pérdida agregada mayor que en el pasado, producida por un incremento de la frecuencia de eventos climáticos extremos.

Por último, esta tesis constituye el punto de partida para estudios que realicen evaluaciones de impactos de eventos climáticos extremos en actividades agropecuarias. Es por ello por lo que la principal línea de investigación que se deriva de esta tesis es la encaminada a cuantificar el impacto de los eventos climáticos concretos en actividades productivas del sector primario sensibles al cambio climático, con el objetivo de proporcionar flujos de caja que permitan generar herramientas de adaptación a dichos impactos futuros.

A partir de los resultados obtenidos el caso del ovino extensivo, se hace preciso realizar la transferencia tecnológica al sector para producir la incorporación de la herramienta financiera en la gestión integral de la explotación ganadera. Para que el futuro sintético sea útil y eficaz, el ganadero tiene que integrarlo dentro de las otras herramientas de gestión de riesgo a las que se enfrenta: la gestión dentro de la explotación, la gestión de la cantidad del pienso y la gestión del precio del pienso.

Tras el análisis de la producción de soja, es necesario que los gobiernos incorporen el impacto de los eventos climáticos extremos en la contabilidad pública con el objetivo de generar una estrategia de adaptación efectiva a través de la planificación macrofiscal. Es por ello por lo que, como línea de investigación futura, se hace preciso el desarrollo del fondo soberano de estabilización a través de los resultados provistos en la proyección de producción de soja a nivel nacional. Este fondo actuaría aumentando el ahorro macrofiscal en las campañas que no se produce impacto negativo para disminuir el impacto en las campañas en las que si existen pérdidas por disminución de precipitaciones.

Bibliografía

- Adams, Z. y Gerner, M. (2012), Cross hedging jet-fuel price exposure, *Energy Economics*, 34, (5), 1301-1309, doi: 10.1016/j.eneco.2012.06.011
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2008) *Resumen Anual Climatológico 2008*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2008.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2009) *Resumen Anual Climatológico 2009*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2009.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2010) *Resumen Anual Climatológico 2010*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2010.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2011) *Resumen Anual Climatológico 2011*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2011.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2012) *Resumen Anual Climatológico 2012*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2012.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2013) *Resumen Anual Climatológico 2013*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2013.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2014) *Resumen Anual Climatológico 2014*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2014.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2015) *Resumen Anual Climatológico 2015*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2015.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2016) *Resumen Anual Climatológico 2016*. Disponible online:

http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2016.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2017) *Resumen Anual Climatológico 2017*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2017.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Agencia Estatal de Meteorología [AEMET] (2018) *Resumen Anual Climatológico 2018*. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2018.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Al-Hassan, A., Papaioannou, M. M. G., Skancke, M., y Sung, C. C. (2013). *Sovereign wealth funds: Aspects of governance structures and investment management*. Fondo Monetario Internacional. Disponible online: <https://www.elibrary.imf.org/view/journals/001/2013/231/article-A001-en.xml> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Alizadeh, A.H., Nomikos, N.K. y Poulialis, P.K. (2008) A Markov regime switching approach for hedging energy commodities, *Journal of banking and finance*, 32(9), 1970-1983. DOI: 10.1016/j.jbankfin.2007.12.020

Allen, D. y Lueck, D. (2003), *The Nature of the Farm: Contracts, Risk, and Organization in Agriculture*. The MIT Press. DOI: 10.7551/mitpress/4883.001.0001

Amblar, P.; Casado, M.J.; Pastor, A.; Ramos, P.; y Rodríguez, E. (2017). *Guía de Escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*. Agencia Estatal de Meteorología. Disponible online: http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/Guia_escenarios_AR5/Guia_escenarios_AR5.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Apipattanavis, S., Bert, F., Podestá, G., y Rajagopalan, B. (2010). Linking weather generators and crop models for assessment of climate forecast outcomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(2), 166-174. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.09.012.

Aramburu Merlos, F., Monzón, J. P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K. G., y Grassini, P. (2015). Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145-154. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.001

Araujo JP, Cerqueira JL, Pires P, Amorim I, Carneiro M, Santos-Silva J, Domínguez R, Bermúdez R, y Lorenzo JM (2018). Influencia del sistema de producción en la

calidad de la canal de cerdos de raza Bísara. *Archivos de Zootecnia* 67(260). 554-559. DOI: 10.21071/az.v0i0.3887

Asseng, S., Zhu, Y., Basso, B., Wilson, T., Cammarano, D., y van Neal, K., (2014). Simulation modeling: applications in cropping systems en *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 102–112). Academic Press, Oxford. DOI: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00233-3

Baethgen, W.E. (2010) Climate Risk Management and Adaptation to Climate Change. *Crop Science* 50 (70-76) DOI: 10.2135/cropsci2009.09.0526

Balding C. (2012) *Sovereign Wealth Funds: The New Intersection of Money and Politics*. Oxford University Press. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199842902.001.0001

Banco Interamericano de Desarrollo-Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe-Departamento Nacional de Planificación. (2014). *Impactos económicos del cambio climático en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/13867/impactos-economicos-del-cambio-climatico-en-colombia> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Banco Mundial (2017). Establishing a Fiscal Risk Management Department in the Ministry of Finance of Serbia. *Disaster Risk Financing and Insurance Program*, DOI: 10.1596/26421

Barros, V. R., Boninsegna, J. A., Camilloni, I. A., Chidiak, M., Magrín, G. O., y Rusticucci, M. (2015). Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 6(2), 151-169. DOI: 10.1002/wcc.316

Base de datos Copernicus. (2022). CMIP6 climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) [Base de datos]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.c866074c?tab=overview> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Base de datos Thomson Reuters Eikon, (2020). [Base de datos] <https://eikon.thomsonreuters.com/> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Basso, B., y Liu, L. (2019). Seasonal crop yield forecast: Methods, applications, and accuracies. *Advances in Agronomy*, 154, 201-255. DOI: 10.1016/BS.AGRON.2018.11.002

Basso, B., Liu, L., y Ritchie, J.T., (2016). A comprehensive review of the CERES-wheat, -maize and-rice models performances. *Advances in Agronomy*. 136, 27–132. DOI: 10.1016/bs.agron.2015.11.004

- Beck, R., y Fidora, M. (2008). The impact of sovereign wealth funds on global financial markets. *Intereconomics*, 43(6), 349-358. Disponible online: <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scpops/ecbocp91.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Benecha, H. K., Sartore, L., y Cruze, N. B. (2019) *Model-Based Crop Yield Forecasting: Covariate Selection and Related Issues*. JSM 2019 – Survey Research Methods Section. Disponible online: <http://www.asasrms.org/Proceedings/y2019/files/1199472.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Bert, F. E., Satorre, E. H., Toranzo, F. R., y Podestá, G. P. (2006). Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems*, 88(2-3), 180-204. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.03.007.
- Bocquier, F., Theriez, M., Prache, S. y Brelurut, A. (1990), Alimentación de ovinos. en *Alimentación de bovinos, ovinos y caprinos* (pp. 225-251) Mundi Prensa Libros.
- Bolsa de Cereales de Buenos Aires. (2021). *Informes y datos*. Disponible online: <https://www.bolsadecereales.com/estimaciones-informes> (Accedido el 18 de abril de 2023)
- Bozzola, M., Massetti, E., y Capitanio, F. (2017). A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on Italian Agriculture. *SSRN Electronic Journal*, 23. DOI: 10.2139/ssrn.2983021
- Braga, F.S. (1990), Basis Pricing, Futures-Cash Price Transmission and Appropriate Hedge Ratios: The Case of the Soybean Market in Ontario. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, 38(3), 421-438, DOI: 10.1111/j.1744-7976.1990.tb00857.x
- Braga, F.S. y Martin, L.J. (1990). Out of Sample Effectiveness of a Joint Commodity and Currency Hedge: The Case of Soybean Meal in Italy: INTRODUCTION, *The Journal of Futures Markets* (1986-1998), 10(3), 229. Disponible online: <https://www.proquest.com/docview/225484517?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Braga, F.S., Martin, L.J. y Meilke, K.D. (1989). Cross hedging the Italian Lira/US dollar exchange rate with deutsch mark futures, *The journal of futures markets*, 9(2), 87-99, DOI: 10.1002/fut.3990090202
- Bravo-Ortega, C., y De Gregorio, J. (2007). *The Relative Richness of the Poor? Natural Resources, Human Capital and Economic Growth*. The World Bank Working Paper Series N3483. Disponible online:

<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/8923/wps3484.pdf?sequence=1> (Accedido el 18 de abril de 2023).

- Briguglio, L., Cordina, G., Farrugia, N., y Vella, S. (2008). Economic Vulnerability and Resilience: Concepts and Measurements. *Oxford Development Studies*, 37(3), 229-247, DOI: 10.1080/13600810903089893.
- Brinker, A., Parcell, J., Dhuyvetter, K. y Franken, J. 2009, Cross-hedging distillers dried grains using corn and soybean meal futures contracts, *Journal of Agribusiness*, 27(1-2), 1-15, DOI: 10.22004/ag.econ.90654
- Brooks, C., Henry, ÓT. y Persaud, G. 2002, The Effect of Asymmetries on Optimal Hedge Ratios, *The Journal of Business*, 75(2), 333-352, DOI: 10.1086/338484
- Brunet, J., Cuadro Sáez, L., y Pérez García, J. J. (2020). Fondos públicos de contingencia para situaciones de emergencia: lecciones de la experiencia internacional. Documentos Ocasionales/Banco de España, 2032.
- Canuto, O., y Cavallari, M. (2012). Natural Capital and the Resource Curse. Red de Reducción de la Pobreza y Gestión Económica (PREM) número 83, Banco Mundial. Disponible online: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/eff233f2-46f3-5b44-be0b-54974ffc948b/content> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (2021) Índice Palmer de gravedad de la sequía [Base de datos] Disponible en: <https://www.crean.unc.edu.ar/> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Céspedes, L. F., y Velasco, A. (2012). Macroeconomic performance during commodity price booms and busts. *IMF Economic Review*, 60(4), 570-599. DOI: 10.1057/imfer.2012.22
- Chang, E.C. y Wong, K.P. (2003). Cross-hedging with currency options and futures, *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 38(3), 555-574, DOI: 10.2307/4126731
- Chen, F. y Sutcliffe, C. (2012). Better cross hedges with composite hedging? Hedging equity portfolios using financial and commodity futures, *The European Journal of Finance*, 18(6), 555-574, DOI: 10.1080/1351847X.2011.620253.
- Chen, S., Lee, C. y Shrestha, K. (2003). Futures hedge ratios: a review, *The Quarterly review of economics and finance*, 43(3), 433-465, DOI: 10.1016/S1062-9769(02)00191-6
- Chimeli, A. B., De Souza Filho, F. A., Holanda, M. C., y Petterini, F. C. (2008). Forecasting the impacts of climate variability: lessons from the rainfed corn market in Ceará,

Brazil. *Environment and Development Economics*, 13(2), 201-227. DOI: 10.1017/S1355770X07004172

Chin-Wen, H., Kuo, J., y Cheng-Few, L. (1994), A new measure to compare the hedging effectiveness of foreign currency futures versus options, *The Journal of Futures Markets*, 14(6), 685-707. DOI: 10.1002/fut.3990140605

Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe. (2021). *Panorama Fiscal de América Latina y el Caribe: los desafíos en la política fiscal en la recuperación pos-COVID-19*. Disponible online: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46808/S2100170_es.pdf?squence=1&disAllowed=y (Accedido el 18 de abril de 2023).

Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe. (2018). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Una visión gráfica*. Disponible online: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42228/4/S1701215A_es.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe. (2014). *La economía del cambio climático en la Argentina. Primera aproximación*. Disponible online: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/35901/1/S2012994_es.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Confalone, A. E., Vilatte, C. A., Aguas, L. M., Barufaldi, M. F., Eseiza, M. F., y Ponce, G. D. (2017). Efecto biofísico del cambio climático en los cultivos de verano. *Revista Cubana de Ciencias Agropecuarias*, 51(2). Disponible online: <http://www.cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/717> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Conlon, T., Cotter, J. y Gençay, R. (2016), Commodity futures hedging, risk aversion and the hedging horizon, *The European journal of finance*, 22(15), 1534-1560, DOI: 10.1080/1351847X.2015.1031912.

Consejo de la Unión Europea: Reglamento (CE) nº 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de enero de 2002, por el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan procedimientos relativos a la seguridad alimentaria. Disponible online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2002/178/oj>, (Accedido el 18 de abril de 2023).

Corfield, K., Vilker, A., y Thomasz, E. O. (2020). *Impacto macroeconómico de variables meteorológicas en la agricultura Argentina: Modelo VAR*. Serie de Documentos de

Trabajo Del Programa de Vulnerabilidad Socioeconómica Al Riesgo Climático, Universidad de Buenos Aires, No. 6. Disponible online: <https://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2017/10/Provul-WP-6-VAR-Corfield-Vilker-Thomasz.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Cui, Y. y Feng, Y. (2020). Composite hedge and utility maximization for optimal futures hedging, *International Review of Economics and Finance*, vol. 68, p. 15-32, doi: 10.1016/j.iref.2020.03.002

De Zarate, M. J., Ramayon, J. J., y Rolla, A. L. (2014). *Tercera Comunicación Nacional de La República Argentina a La Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Disponible online: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/3com-resumen-ejecutivo-de-la-tercera-comunicacion-nacional.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Departamento de Agricultura de Estados Unidos (2022) Soybean Explorer [Base de datos]. <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2222000> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Deschenes, O., y Greenstone, M. (2007). The economic impacts of climate change: Evidence from agricultural output and random fluctuations in weather'. *The American Economic Review*, 97(1), 354-385. Disponible online: <https://www.jstor.org/stable/30034398> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Díaz, I.; Achkar, M.; y Mazzeo, N. (2018). Drought vulnerability assessment of cattle producers in the Sierras del Este-Uruguay: Interactions between actors and agents. *Outlook on Agriculture*. 47(4), 315–325. DOI: 10.1177/0030727018808

Dickey, D.A. y Fuller, W.A. 1979, Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root, *Journal of the American statistical association*, 74(366a), 427-431, DOI: 10.1080/01621459.1979.10482531

Dieguez-Cameroni, F., y Terra, R. (2014). *Aplicación del Modelo de una Explotación Ganadera Extensiva (MEGanE) para el estudio de la sensibilidad de la producción ganadera a la amplitud de la variabilidad de la oferta de forraje*. En XLIII Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (43JAIIO)-VI Congreso Argentino de AgroInformática (CAI), Buenos Aires, Argentina. Disponible online: <https://core.ac.uk/download/pdf/76479718.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Dirección General de Productos y Mercados Agrarios (2020), *Informe trimestral sobre el sector ovino de carne, marzo de 2021*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Gobierno de España Disponible en:

<https://www.mapa.gob.es/fr/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/sectores-ganaderos/ovino-caprino/informacion-del-sector/default.aspx> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Estudio de Costes y Rentas de las Explotaciones Agrarias [ECREA] (2015). *Resultados técnico-económicos del Ganado Ovino de carne en 2015. Estudios de Costes y rentas de las Explotaciones Agrarias*. Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística, Subsecretaría. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Gobierno de España. Disponible online: https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/ganadoovinodecarne_tcm30-482451.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Ederington, L. (1979), The hedging performance of the new futures markets, *The journal of finance*, 34(1), 157-170, DOI: 10.2307/2327150

Equipo central de R. (2020). *R: Un lenguaje y entorno para la computación estadística*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Escarcha, J.F.; Lassa, J.A.; y Zander, K.K. (2018). Livestock Under Climate Change: A Systematic Review of Impacts and Adaptation. *Climate*, 6(54), DOI:10.3390/cli6030054.

Eurostat (octubre de 2022) Agricultural production - livestock and meat [Base de datos] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?oldid=427096#Livestock_population (Accedido el 18 de abril de 2023).

Extremadura21 El Cordero Extremeño Mira Hacia La Meca. (21 de enero de 2017). Disponible online: <https://extremadura21.com/2017/01/20/el-cordero-extremeno-mira-hacia-la-meca/> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Fainboim, I., y Lienert, I. (2018). *The Macroeconomic Function and its Organizational Arrangements. Technical Notes and Manuals*. Fondo Monetario Internacional, Disponible online: <https://www.imf.org/en/Publications/TNM/Issues/2018/12/27/The-Macroeconomic-Function-and-its-Organizational-Arrangements-46497> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Ferreira-Filho, J., Vieira dos Santos, C., y Fortes de Oliveira, A. (2021). *Climate change in agriculture: an analysis of the potential socioeconomic impacts in different Brazilian regions*. Disponible online: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/10867.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).

- Ffrench-Davis, R. (2005). *Reformas para América Latina después del fundamentalismo neoliberal*. Siglo XXI Editores Argentina. Disponible online: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/1888> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Fiscella, M. P., Manzi, S., y López, F. (2021) Desarrollo económico e innovación: fondos anticíclicos. Instituto Ideas, instituto de economía aplicada y sociedad. Disponible online: <https://www.institutoideas.com.ar/wp-content/uploads/2021/07/ODEI-IDEAS-Fondos-Anticiclicos.pdf> (Accedido 18 de abril de 2023).
- Flint, E.J., Seymour, A. y Chikurunhe, F. (2015), In Search of the Perfect Hedge Underlying, *Peregrine Securities*, DOI: 10.2139/ssrn.2767532.
- Fondo Monetario Internacional (2016). *Analyzing and Managing Fiscal Risks - Best Practices*. Documentos sobre políticas. DOI: 10.5089/9781498345668.007
- Frankel, J. (2011). The Natural Resource Curse: A Survey en *Beyond the Resource Curse* editado por Shaffer, B. y Ziyadov, T: University of Pennsylvania Press. DOI: 10.9783/9780812206173.17
- Frechette, D.L. (2000), The Demand for Hedging and the Value of Hedging Opportunities, *American Journal of Agricultural Economics*, 82(4), 897-907, doi: 10.1111/0002-9092.00089
- Gagnon, L., Lypny, G.J. y McCurdy, T.H. (1998). Hedging foreign currency portfolios, *Journal of Empirical Finance*, 5(3), 197-220, doi: 10.1016/S0927-5398(97)00018-2
- Gala, P. (2008). Real exchange rate levels and economic development: theoretical analysis and econometric evidence. *Cambridge Journal of Economics*, 32(2), 273-288. DOI: 10.1093/cje/bem042
- Galaktionov, Y. K., Ashmarina, L. F., y Galaktionova, T. A. (2009). Wheat yield prediction from winter temperature and precipitation. *Russian Agricultural Sciences*, 35(3), 147. DOI: 10.3103/S1068367409030045
- Gaspar, P.; Mesías, F.J.; Escribano, M.; y Pulido, F. (2009) Sustainability in Spanish Extensive Farms (Dehesas): An Economic and Management Indicator-Based Evaluation. *Rangeland Ecology & Management.*, 62(2), 153–162. DOI: 10.2111/07-135.1
- Gaspar, P.; Mesías, F.J.; Escribano, M.; Rodriguez de Ledesma, A.; Pulido, F. (2007) Economic and management characterization of dehesa farms: Implications for their sustainability. *Agroforestry Systems*, 71, 151–162, DOI: 10.1007/s10457-007-9081-6

- Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., y Goodess, C. M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 C global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209-224. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.06.001
- González-Blázquez, J.M., María, J., & Pérez, G. (2016). Los seguros agrarios y su presencia en el marco agrario extremeño en *La agricultura y la ganadería extremeñas 2015* (editorial Fundación Caja Badajoz, pp. 119–138).
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (2022): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, DOI: 10.1017/9781009325844.001.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (2019). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. DOI: 10.1017/9781009157988.001
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (2018): *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA DOI: 10.1017/9781009157940.001.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2012). '*Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*': Informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático' (Ed.) Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9781139177245.009

- Guidry, K.M. y Pruitt, J.R. (2012) Damages to Louisiana agriculture from natural disasters. *Agricultural & Applied Economics Association*. 27(3), 1–6. Disponible online: <https://www.jstor.org/stable/10.2307/choices.27.3.09> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Guillaumont, P. (2009). An Economic Vulnerability Index: Its Design and Use for International Development Policy. *Oxford Development Studies*, 37(3), 193-228. DOI: 10.1080/13600810903089901
- Haigh, M.S. y Holt, M.T. (2002). Hedging foreign currency, freight, and commodity futures portfolios-A note. *The journal of futures markets*, 22(12), 1205-1221, DOI: 10.1002/fut.10050
- Haigh, M.S. y Holt, M.T. (2000). Hedging multiple price uncertainty in international grain trade. *American Journal of Agricultural Economics*, 82(4), 881-896, Disponible online: <https://www.jstor.org/stable/1244527> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Han, L., Jin, J., Wu, L. y Zeng, H. (2020). The volatility linkage between energy and agricultural futures markets with external shocks, *International Review of Financial Analysis*, 68, 101317, DOI: 10.1016/j.irfa.2019.01.011.
- Hansen, J. W., y Indeje, M. (2004). Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125(1-2), 143-157. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.02.006
- Hansen, J. W., Dilley, M., Goddard, L., Ebrahimian, E., y Ericksen, P. (2004). *Climate variability and the millennium development goal hunger target*. Instituto Internacional de Investigación para la Predicción del Clima. DOI: <https://doi.org/10.7916/D8DV1RPT>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). Model Assessment and Selection en *The elements of statistical learning* (pp. 219-259). New York, NY: Springer. Disponible online: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-0-387-84858-7_7.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Heinzenknecht, G. M. (2011). *Proyecto riesgo y seguro agropecuario*. Informe Oficina de Riesgo Agropecuario: Disponible online: <http://www.ora.gov.ar/informes/enso.pdf> (consultado el 18 de abril de 2023).
- Herrera, P.M. (2020). *Ganadería y cambio climático: Un acercamiento en profundidad*. Fundación Entretantos Y Plataforma Por La Ganadería Extensiva Y El Pastoralismo. Disponible online: http://www.ganaderiaextensiva.org/wp-content/uploads/2020/03/CuadernoEntretantos6_GanaderiaCC.pdf (Accedido 18 de abril de 2023).

- Hobson, D. y Penn, J. (2005), Maximizing the probability of a perfect hedge using an imperfectly correlated instrument, *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 8(6), 763-789, DOI: 10.1142/S0219024905003220
- Hudson, D. (2006), *Agricultural markets and prices*, Wiley-Blackwell. Disponible online: <https://www.wiley.com/en-us/Agricultural+Markets+and+Prices-p-9781405136679> (Accedido 18 de abril de 2023).
- Instituto de Estadística de Extremadura (2022), Atlas Socioeconómico de Extremadura 2021. [Base de datos] <https://ciudadano.gobex.es/web/ieex/atlas2021> (Accedido 18 de abril de 2023).
- Irwin, S., y Good, D. (2015). Forming Expectations for the 2015 U.S. Average Corn Yield: What Does History Teach Us? *Farmdoc Daily*, 5(36). Disponible online: <https://farmdocdaily.illinois.edu/wp-content/uploads/2016/03/fdd260215.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Johnson, L.L. 1960, The Theory of Hedging and Speculation in Commodity Futures, *Review of Economic Studies*, 27(3), 139-151, DOI: 10.2307/2296076
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., y Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7
- Jorio, P. (2006). *Valor en riesgo: La nueva referencia para la gestión del riesgo financiero*. 3rd ed. McGraw Hill.
- Juana, J.S.; Makepe, P.M.; Mangadi, K.T. y Narayana, N. (2004). The Socio-economic Impact of Drought in Botswana. *International Journal of Environment and Development*, 11(1), 43–60.
- Kachergis, E.; Derner, J.D.; Cutts, B.B.; Roche, L.M.; Eviner, V.T.; Lubell, M.N. y Tate, K.W. (2014). Increasing flexibility in rangeland management during drought. *Ecosphere*, 5(6), 1-14, DOI:10.1890/ES13-00402.1.
- Kamdem, W., Kamdem, D., Kamdem S., J. y Fono, L.A. (2020), Risk Aversion and Optimal Hedge Ratio in Commodities Futures Markets, *Economics bulletin*, 40(1), 587-600. KAL id: hal-02922890
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., . . . y Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions

- implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-DOI: 168. 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Koeman, J. y Bialkowski, J. (2015). Cross-Hedging on the Milk-Derived Product Market, Disponible en SSRN 2639958, DOI: 10.2139/ssrn.2639958
- Kolotii, A., Kussul, N., Shelestov, A., Skakun, S., Yailymov, B., Basarab, R., Lavreniuk, M., Ollinyk, T., y Ostapenko, V., (2015). *Comparison of biophysical and satellite predictors for wheat yield forecasting in Ukraine*. In: Schreier, G., Skrovseth, P.E., Staudenrausch, H. (Eds.), 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment. vol. 47., pp. 39–44.
- Kroll, Y., Levy, H. y Markowitz, H.M. (1984). Mean-variance versus direct utility maximization, *The Journal of Finance*, 39(1), 47-61, DOI: 10.1111/j.1540-6261.1984.tb03859.x
- Kroner, K.F. y Sultan, J. (1993). Time-Varying Distributions and Dynamic Hedging with Foreign Currency Futures, *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 28(4), 535-551, DOI:10.2307/2331164
- Letson, D., Laciara, C. E., Bert, F. E., Weber, E. U., Katz, R. W., Gonzalez, X. I., y Podestá, G. P. (2009). Value of perfect ENSO phase predictions for agriculture: Evaluating the impact of land tenure and decision objectives. *Climatic Change*, 97(1), 145-170. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9600-8>.
- Letson, D., Podestá, G. P., Messina, C. D., y Ferreyra, R. A. (2005). The uncertain value of perfect ENSO phase forecasts: Stochastic agricultural prices and intra-phase climatic variations. *Climatic Change*, 69(2-3), 163-196. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-1814-9>
- Leuthold, R.M., Junkus, J.C. y Cordier, J.E. (1989). *The theory and practice of futures markets*, Lexington Books, Lexington, Mass. [EE.UU.]
- Levy, H. y Markowitz, H.M. (1979), Approximating expected utility by a function of mean and variance, *The American Economic Review*, 69, (3), pp. 308-317. Disponible online: <https://www.jstor.org/stable/1807366> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Lien, D. y Tse, Y.K. (2002). Some Recent Developments in Futures Hedging. *Journal of economic surveys*, 16(3), 357-396, DOI:10.1111/1467-6419.00172
- Lipsky, J. (2008) Fondos soberanos de riqueza: su papel y significado: un discurso de John Lipsky, primer subdirector gerente, Fondo Monetario Internacional. Disponible en: <https://www.imf.org/en/News/Articles/2015/09/28/04/53/sp090308> (consultado el 21 de febrero de 2023).
- Lipsky, J. (3 de septiembre de 2008). *Sovereign wealth funds: their role and significance*. In Speech at the Seminar, Sovereign Funds: Responsibility with Our Future, organized by the Ministry of Finance of Chile, Santiago. Disponible online:

<https://www.imf.org/en/News/Articles/2015/09/28/04/53/sp090308> (Accedido el 18 de abril de 2023).

- Lobell, D. B., y Burke, M. B. (2010). On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (11), 1443-1452. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.07.008
- Loizou, E., Karelakis, C., Galanopoulos, K., & Mattas, K. (2019). The role of agriculture as a development tool for a regional economy. *Agricultural Systems*, 173, 482-490. DOI: 10.1016/j.agsy.2019.04.002
- López, A. (2022). La masa vegetal vitícola recogida en la Esysrc volvió a reducirse en 2021 por tercer año consecutivo. *La Semana vitivinícola*, (3606), 27-30.
- Lozanoff, J., y Cap, E. (2002). Impact of climate change over Argentine agriculture: An economic study. *Documento de trabajo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina*.
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F.R., & Vicuña, S. (2014). América Central y del Sur. En V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (eds.). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Parte B: Aspectos regionales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (pp. 1499-1566). Cambridge University Press.
- Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, y S. Vicuña, (2014): 'América Central y del Sur'. En: Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Parte B: Aspectos regionales'. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE.UU., pp. 1499-1566.
- Marques, P.V., Mello, P.d. y Martines Filho, J.G. (2006), *Mercados futuros e de opções agropecuárias*, Piracicaba, SP.Departamento de Economia, Administração e Sociologia da Esalq-USP, nº D-129.
- Massot, J., Baez, G., Prieto, K., Petri, G., Argüero, L., Thomasz, E., Gayá, R., & Fusco, M. (2016). *Agroindustria, innovación y crecimiento económico en la Argentina*. EDICON

(Ed.). Disponible online:
https://archivo.consejo.org.ar/noticias16/edicon_2408.html (Accedido el 18 de abril de 2023).

Mendelsohn, R. (2009). The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(1), pp. 5-19. DOI: 10.1080/19390450802495882

Mendelsohn, B. R., Nordhaus, W. D., y Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: A Ricardian analysis. *The American Economic Review*, 84(4), 753-771. Disponible online: <https://www.jstor.org/stable/2118029> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Miler, S. (1982), Forward pricing feeder pigs, Agricultural. *The Journal of Future Markets*, 2(4), 333-340. DOI: 10.1002/fut.3990020404

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina (2022) Datos de Agricultura, Ganadería y Pesca [base de datos]. <https://datos.magyp.gob.ar/> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca del Gobierno de Argentina. (2021). Datos abiertos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. [Base de datos] <https://www.magyp.gob.ar/datosabiertos> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España (2022). El Plan Estratégico de la PAC en España (2023 - 2027). Disponible online: <https://www.mapa.gob.es/es/pac/post-2020/default.aspx> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Ministerio de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de España (MAPAMA) 2020, Precios pienso. [Base de datos] <https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/alimentacion-animal/acceso-publico/precios.aspx> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Ministerio de Economía de Argentina. (2021). Datos del sector exterior. [Base de datos]: <https://datos.gob.ar/dataset?tags=Sector+Externo> (Accedido el 18 de abril de 2023).

Minnetti, J. L., y Lamelas, C. M. (1995). Respuesta regional de la soja en Tucumán a la variabilidad climática. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 72, 63-68.

- Montalbano, P. (2011). Trade Openness and Developing Countries' Vulnerability: Concepts, Misconceptions, and Directions for Research. *World Development*, 39(9), 1489-1502. DOI: 10.1016/j.worlddev.2011.02.009
- Moore, A.; y Ghahramani, A (2013). Climate change and broadacre livestock production across southern Australia. Impacts of climate change on pasture and livestock productivity, and on sustainable levels of profitability. *Global. Change. Biology*, 19(5), 1440–1455. DOI:10.1111/gcb.12150
- Morales-Reyes, Z.; Navarro-Ríos, M.; Moleón, M.; Mateo-Tomás, P.; Blanco, G.; Botella, F.; Donázar, J.A.; Margalida, A.; Pérez, I.; Valverde, M.; y Sánchez-Zapata, J.A. (2017). *Percepción de los ganaderos sobre la sostenibilidad de los sistemas agroganaderos tradicionales en España en un contexto de cambio global*. En Actas XXVI Jornadas Técnicas SEAE X Seminario Agroecológico de Cambio Climático Y Agroturismo (pp. 169-174). Orihuela (España). Disponible online: <http://hdl.handle.net/10261/179061> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Motha, R. P. (2011). Use of Crop Models for Drought Analysis. Índices de sequía en la agricultura: Actas de una reunión de expertos, 2-4 de junio de 2010 en Murcia (España), pp. 138-148. Disponible online: <https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/58/> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Murata, Y. (1975). Estimation and simulation of rice yield from climatic factors. *Agricultural Meteorology*, 15(1), 117-131. DOI: 0.1016/0002-1571(75)90023-0
- Murgida, A. M., González, M. H., & Tiessen, H. (2014). Rainfall trends, land use change and adaptation in the Chaco salteño region of Argentina. *Regional Environmental Change*, 14(4), 1387-1394. DOI: 10.1007/s10113-013-0581-9
- Murgida, A., Travasso, M., González, S., y Rodríguez, G. (2014). *Evaluación de impactos del cambio climático sobre la producción agrícola en la Argentina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe - Serie Medio Ambiente y Desarrollo, Vol. 155 No. 70. Disponible online: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37197-evaluacion-impactos-cambio-climatico-la-produccion-agricola-la-argentina> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Musser, W.N. y Patrick, G.F. (2002). How Much does Risk Really Matter to Farmers? En *A Comprehensive Assessment of the Role of Risk in U.S. Agriculture* (Editorial Springer, pp. 537-556) DOI:10.1007/978-1-4757-3583-3_24
- Myers, R.J. y Thompson, S.R. (1989), Generalized optimal hedge ratio estimation, *American Journal of Agricultural Economics*, 71, (4), 858-868. DOI: 10.2307/1242663

- Nandram, B., Berg, E., y Barboza, W. (2014). A hierarchical Bayesian model for forecasting state-level corn yield. *Environmental and Ecological Statistics*, 21, 507–530. DOI: 10.1007/s10651-013-0266-z
- Neuberger, A. (1999), Hedging long-term exposures with multiple short-term futures contracts, *The Review of Financial Studies*, 12(3), 429-459, DOI: 10.1093/revfin/12.3.0429
- Ocampo, J. A. (2007). The Instability and Inequities of the Global Reserve System. *International Journal of Political Economy*, 36(4), 71-96. DOI: 10.2753/IJP0891-1916360405
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres. (2013). *Annual report 2013: final report on 2012-2013 biennium work programme*. UNISDR, the United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Disponible online: <https://digitallibrary.un.org/record/771463> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Oficina Argentina de Riesgo Agropecuario. (2022). Fenología de los cultivos monitoreados: Soja. Disponible online: http://www.ora.gob.ar/feno_soja.php (Accedido el 18 de abril de 2023).
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., y Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geoscientific Model Development*, 9, 3461-3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- Ordaz, J. L., Ramírez, D., Mora, J., Acosta, A., y Serna, B. (2010). *Costa Rica: Efectos del cambio climático sobre la agricultura*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Vol. 76. Disponible online: <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/25921/1/lcmexl972.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2017). The impact of disasters and crises on agriculture and food security. Disponible online: <https://www.fao.org/3/i8656en/i8656en.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Organización Meteorológica Mundial. (2014). 'Scientific assessment of ozone depletion: 2014', Organización Meteorológica Mundial, Proyecto mundial de investigación y vigilancia del ozono -Informe n.º 55. Disponible online: <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2014/citations.html> (Accedido el 18 de abril de 2023).

- Paltasingh, K. R., Goyari, P., y Mishra, R. K. (2012). Measuring Weather Impact on Crop Yield Using Aridity Index: Evidence from Odisha. *Agricultural Economics Research Review*, 25(2), 205-216. DOI: 10.22004/ag.econ.137373
- Pateiro M, Munekata PES, Domínguez R, y Lorenzo JM (2020). Ganadería extensiva frente al cambio climático en España. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 116(5), 444-460. DOI: 10.12706/itea.2020.024
- Penalba, O. C., Bettolli, M. L., y Vargas, W. M. (2007). The impact of climate variability on soybean yields in Argentina. Multivariate regression. *Meteorological Applications*, 14(1), 3-14. DOI: 10.1002/met.1.
- Pinzón A., Robins N., McLuckie M. y Thoumi G. (2020). *The sovereign transition to sustainability. Understanding the dependence of sovereign debt on nature.* (Ed.) Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science, y Planet Tracker. Disponible online: <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/the-sovereign-transition-to-sustainability-understanding-the-dependence-of-sovereign-debt-on-nature/> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Podestá, G., Bert, F., Rajagopalan, B., Apipattanavis, S., Laciana, C., Weber, E., Easterling, W., Katz, R., Letson, D., y Menendez, A. (2009). Decadal climate variability in the Argentine Pampas: regional impacts of plausible climate scenarios on agricultural systems. *Climate Research*, 40, 199-210. DOI: 10.3354/cr00807.
- Podestá, G., Letson, D., Messina, C., Royce, F., Ferreyra, R. A., Jones, J., Hansen, J., Llovet, I., Grondona, M., y O'Brien, J. J. (2002). Use of ENSO-related climate information in agricultural decision making in Argentina: A pilot experience. *Agricultural Systems*, 74(3), 371-392. DOI: 10.1016/S0308-521X(02)00046-X
- Podestá, G., Natenzon, C. E., Hidalgo, C., y Ruiz Toranzo, F. (2013). Interdisciplinary production of knowledge with participation of stakeholders: A case study of a collaborative project on climate variability, human decisions and agricultural ecosystems in the Argentine Pampas. *Environmental Science & Policy*, 26, 40-48. DOI: 10.1016/j.envsci.2012.07.008
- Qian, B., De Jong, R., Warren, R., Chipanshi, A., y Hill, H. (2009). Statistical spring wheat yield forecasting for the Canadian prairie provinces. *Agricultural and forest meteorology*, 149(6-7), DOI: 1022-1031. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.12.006
- Rahman, M.S., Sumi, A., Mostafa, M.G, y Raqué, M. (2005). Statistical analysis of crop-weather regression model for forecasting production impact of Aus rice in Bangladesh. *International Journal of Statistical Sciences*, 4, 57-77.

- Rahman, S.M., Turner, S.C. y Costa, E. (2000). *Cross-hedging Cottonseed Meal*. No 21769, Annual meeting, July 30-August 2, Tampa, FL, American Agricultural Economics Association (New Name 2008: Agricultural and Applied Economics Association), DOI: 10.22004/ag.econ.21769
- Raja, R., Nayak, A. K., Panda, B. B., Lal, B., Tripathi, R., Shahid, M., Kumar, A., Mohanty, S., Samal, P., Gautam, P., y Rao, K. S. (2014). Monitoring of meteorological drought and its impact on rice (*Oryza sativa* L.) productivity in Odisha using standardized precipitation index. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(12), 1701-1715. DOI: 10.1080/03650340.2014.912033
- Rajagopalan, B., Nowak, K., Prairie, J., Hoerling, M., Harding, B., Barsugli, J., Ray, A., y Udall, B. (2009). Water supply risk on the Colorado River: Can management mitigate? *Water Resources Research*, 45(8), 1-7. DOI: 10.1029/2008WR007652
- Ravelo, A. C., Planchuelo, A. M., Aroche, R., Cárdenas, J. C., Hallack, M., Jiménez, R., Maureira, H., Peña, T., Tiscornia, G., Zanvettor, R., y Zimmermann, R. (2016). *Monitoreo y evaluación de las Sequías en América Central. Estudio de caso: Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua* (Serie de E). Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. Disponible online: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC102117/lbna27974_esn.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Red Extremeña de Desarrollo Rural [REDEX] (2022), *El territorio rural extremeño 2021. Indicadores básicos*. Disponible online: https://redex.org/ficheros/archivos/2022_05/informe-tr-2021.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Red Nacional De Granjas Típicas [REGRANTI] (2018), *Informe de resultados económicos ovino de carne: REGRANTI 2018*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Rodrik, D. (2008). The Real Exchange Rate and Economic Growth. *Brookings Papers on Economic Activity* 39(2), 365-412. DOI: 10.1353/eca.0.0020
- Rondinone, G. y Thomasz, E.O. (2016). rice risk in commodities: Sensitivity of agricultural commodities to interest rate shocks. *Contaduría y Administración*, 61(4), 746-761. DOI: 10.1016/j.cya.2016.02.002
- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., y Berg, A. (2011). The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global Environmental Change*, 21(3), 1073-1083. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007

- Rozanov, A. (2005). Who Holds the Wealth Nations? *International Journal of Central Banking*, 15(4), 52-57.
- Rubio, A.; Roig, S. (2017). *Impactos, Vulnerabilidad Y Adaptación En Los Sistemas Extensivos De Producción Ganadera En España*. Oficina Española De Cambio Climático. Ministerio De Agricultura Y Pesca, Alimentación Y Medio Ambiente. Disponible online: https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/informe_ganaderia_extensiva_cambio_climatico.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Ruiz, J.; Herrera, P.M.; Barba, R.; Busqué, J. (2017) *Definición y caracterización de la extensividad de las explotaciones ganaderas en España*. Fundación Entretantos Y Ministerio De Agricultura Y Pesca, Alimentación Y Medio Ambiente. Disponible online: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/informesobreganaderiaextensivaenespanaoctubre2017nipo_tcm30-428264.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Schnabel, S., Pulido, M. y Lavado, J. F. (2009). The availability of water in ranches of mediterranean type climate. En: A. Romero Díaz, F. Belmonte Serrato, F. Alonso Sarria y F. López Bermúdez. *Avances en estudios sobre desertificación*. Murcia, Editum: 729-732.
- Secretaría de Agroindustria de Argentina. (2021). Estimaciones agrícolas. [Base de datos] <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., y Nendel, C. (2015). The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, 153(8), 1394-1411. DOI:10.1017/S0021859615000313.
- Seo, S. (2008). Assessing Relative Performance of Econometric Models in Measuring the Impact of Climate Change on Agriculture Using Spatial Autoregression. *Review of Regional Studies*, 38(2), 195-209. DOI: 10.52324/001c.8263
- Seo, S., y Mendelsohn, R. O. (2007). *A Ricardian analysis of the impact of climate change on Latin American farms*. Policy Research Working Paper; No. 4163. World Bank, Washington, DC. Disponible online: <http://hdl.handle.net/10986/7193> (Accedido el 18 de abril de 2023)
- Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (2022) Estadísticas climáticas [base de datos]. <https://www.smn.gob.ar/estadisticas> (Accedido el 18 de abril de 2023).

- Seth, A., y Ragab, A. (2012). *Macroeconomic vulnerability in developing countries: Approaches and issues*. Working paper no. 94, Centro Internacional de Políticas para el Crecimiento Inclusivo, Brasilia. Econstor: Disponible online: <https://www.ipc-undp.org/pub/IPCWorkingPaper94.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Sgroi, L. C., Lovino, M. A., Berbery, E. H., y Müller, G. V. (2021) Characteristics of droughts in Argentina's core crop region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2475-2490, DOI: 10.5194/hess-25-2475-2021.
- Spivak, G. y Cvitanić, J. (1999). Maximizing the probability of a perfect hedge, *Annals of Applied Probability*, 9(4), 1303-1328. DOI: 10.1214/aoap/1029962873
- Stückelberger, C., Rossouw, D., Geerts, S., Chavaz, P., y Xinwa, N. (2015). *Sovereign Wealth Funds: An ethical perspective*. Globethics. net.
- Subdirección General de Productos Ganaderos (2018). *El Sector Ovino Y Caprino De Carne En Cifras; Principales Indicadores Económicos*. Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de España. Disponible online: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/publicaciones/indicadoreseconomicosovinoycaprinocarne2018_tcm30-428265.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Tannura, M. A., Irwin, S. H., y Good, D. L. (2008). *Weather, technology, and corn and soybean yields in the U.S. corn belt'*: Marketing and outlook research report, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign. DOI: 10.22004/ag.econ.37501
- Thomasz, E. O., Corfield, K., Vilker, A. S., y Osman, M. (2023) Forecasting soybean production to enhance climate services for Agriculture in Argentina *Climate Services*, 30, 100341. DOI: 10.1016/j.cliser.2023.100341
- Thomasz, E. O., y Stancio, N. (2021) *Riesgo climático, sostenibilidad de la deuda pública y planeamiento macro-fiscal*. Serie de Documentos de Trabajo del Programa de Vulnerabilidad Socioeconómica al Riesgo Climático N°7. Disponible online: <https://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2017/10/Provul-WP-7-Riesgo-clim%a1tico-y-deuda-soberana-Thomasz-Stancio.pdf> (Accedido el 18 de abril de 2023).
- Thomasz, E. O., Vilker, A. S., y Rondinone, G. (2019). The economic cost of extreme and severe droughts in soybean production in Argentina. *Contaduría y administración*, 64(1) DOI: 10.22201/fca.24488410e.2018.1422.
- Thomasz, E. O., Rondinone, G., Vilker, A., y Eriz, M. (2017). *El impacto económico de los eventos climáticos extremos en Argentina. El caso de la soja en la zona núcleo*

¿Riesgo climático o déficit de infraestructura? Documento de trabajo Facultad de Ciencias Económicas. Universidad de Buenos Aires. Disponible online: http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/libros/Thomasz-Rondinone-Vilker-Eriz_El-impacto-economico-de-los-eventos-climaticos-extremos-en-Argentina-2017.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Thomasz, E. O., Casparri, M. T., Vilker, A. S., Rondinone, G., y Fusco, M. (2016). Medición económica de eventos climáticos extremos en el sector agrícola: El caso de la soja en Argentina. *Revista de Investigación En Modelos Financieros*, 4(2), 30-57.

Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo [UNCTAD] (2011). *Price formation in financialized commodity markets: The role information*. UNCTAD, Nueva York.

Ureña, A. P., y Fernández-Aguado, M. P. G. (2010). El papel de los fondos de riqueza soberana en los mercados financieros. *Cuadernos de Información económica*, (214), 157-162. Disponible online: https://www.funcas.es/wp-content/uploads/Migracion/Articulos/FUNCAS_CIE/214art16.pdf (Accedido el 18 de abril de 2023).

Vanschoenwinkel, J., Mendelsohn, R., y Van Passel, S. (2016). Do Western and Eastern Europe have the same agricultural climate response? Taking adaptive capacity into account. *Global Environmental Change*, 41, 74-87. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.09.003

Vilar, J. M., Vilar, J. A., & Pértega, S. (2009). Clasificación de datos de series temporales: A nonparametric approach. *Journal of Classification*, 26(1), 3-28. DOI: 10.1007/s00357-009-9030-3

Wilson, W.W. (1982), *Hedging effectiveness of US wheat futures markets*. Agricultural Economics Report No. 165. DOI: 10.22004/ag.econ.23215

Witt, H.J., Schroeder, T.C. y Hayenga, M.L. (1987). Comparison of analytical approaches for estimating hedge ratios for agricultural commodities, *The journal of futures markets*, 7(2), 135-146, DOI: 10.1002/fut.3990070204

Ziolkowska, J.R. (2016) Socio-Economic Implications of Drought in the Agricultural Sector and the State Economy. *Economies* 4(4), 19, DOI:10.3390/economies4030019.

Apéndice

Apéndice 1: Valores de los parámetros estimados por cultivo y provincia.

Cuadro A.1: Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Buenos Aires

Buenos Aires	Pendiente	Intercepto	Pendiente	Intercepto
	Maíz		Soja	
25 de mayo	0,137	2,159	0,040	1,327
9 de julio	0,129	2,668	0,051	1,164
Adolfo Alsina	0,054	1,846	0,018	1,124
Adolfo Gonzales chaves	0,081	1,321	0,006	1,341
Alberti	0,125	2,841	0,044	1,256
arrecifes	0,123	2,755	0,045	1,404
Ayacucho	0,109	1,403	0,039	1,276
Azul	0,097	1,974	-0,002	1,990
Bahía blanca	0,379	-1,700		
Balcarce	0,086	2,461	0,005	1,827
Baradero	0,118	2,569	0,045	1,440
Benito Juárez	0,110	1,307	0,013	1,569
Bolívar	0,111	2,333	0,036	1,322
bragado	0,126	2,757	0,047	1,271
Brandsen	0,115	1,778	0,036	1,257
campana	0,131	1,961	0,057	0,989
Cañuelas	0,130	1,822	0,041	1,418
Capitán sarmiento	0,128	2,691	0,049	1,254
Carlos casares	0,129	2,597	0,042	1,178
Carlos tejedor	0,139	1,745	0,042	1,029
Carmen de Areco	0,125	2,928	0,051	1,453
Castelli	0,099	1,565	0,056	1,638
Chacabuco	0,130	3,225	0,052	1,434
Chascomús	0,139	1,551	0,046	1,386
Chivilcoy	0,121	2,889	0,045	1,215
Colon	0,148	2,915	0,059	1,256
Coronel Dorrego	0,086	0,867	0,007	1,042
Coronel Pringles	0,082	1,053	-0,006	1,490

Coronel Suarez	0,074	2,146	0,024	1,224
Daireaux	0,137	1,706	0,036	1,252
Dolores	0,087	1,720	0,038	1,658
Exaltación de la cruz	0,128	2,215	0,053	1,206
Florentino Ameghino	0,081	6,526	0,034	2,251
General Alvarado	0,080	2,621	0,007	1,728
General Alvear	0,129	1,734	0,026	1,658
General arenales	0,150	2,852	0,060	1,220
General Belgrano	0,127	2,044	0,040	1,377
General guido	0,085	1,955	-0,190	2,519
General juan Madariaga	0,110	1,597	0,063	1,331
General la Madrid	0,087	1,692	0,018	1,419
General las Heras	0,130	2,050	0,056	1,745
General Lavalle	0,102	1,509	0,025	2,617
General paz	0,123	1,814	0,040	1,288
General pinto	0,161	1,888	0,051	1,141
General Pueyrredón	0,077	2,661	0,013	1,544
General Rodríguez	0,141	1,756	0,062	1,410
General Viamonte	0,141	2,819	0,051	1,276
general Villegas	0,155	1,862	0,045	1,154
Guamaní	0,110	1,446	0,038	0,967
Hipólito Yrigoyen	0,120	2,207	0,030	1,483
Junín	0,132	3,006	0,050	1,305
Laprida	0,107	0,924	-0,007	1,746
Las flores	0,150	1,177	0,045	1,231
Leandro n. Alem	0,147	2,834	0,053	1,282
Lincoln	0,148	2,372	0,050	1,113
Lobería	0,087	2,291	0,002	1,727
Lobos	0,124	2,221	0,044	1,259
Lujan	0,136	1,991	0,055	1,331
Magdalena	0,111	1,846	0,036	1,442
Maipú	0,109	1,446	0,032	1,516
Mar chiquita	0,098	1,707	0,052	1,933
Marcos paz	0,148	1,549	0,071	1,214
Mercedes	0,078	2,877	0,033	1,526

Monte	0,129	2,025	0,040	1,224
Navarro	0,124	2,293	0,046	1,326
Necochea	0,159	0,975	0,024	1,244
Olavarría	0,120	1,863	0,020	1,535
Patagones	0,139	0,269	-0,002	1,773
Pehuajó	0,141	2,082	0,038	1,262
Pellegrini	0,088	1,673	0,027	1,205
Pergamino	0,144	2,882	0,054	1,353
Pila	0,086	1,721	0,025	1,604
Pilar	0,132	2,084	0,051	1,337
Púan	0,062	1,139	0,005	1,171
Punta indio	1,380	6,920		
Ramallo	0,122	2,542	0,049	1,402
Rauch	0,108	1,337	0,031	0,939
Rivadavia	0,149	1,819	0,041	1,220
Rojas	0,147	2,870	0,054	1,237
Roque Pérez	0,131	2,037	0,048	1,061
Saavedra	0,067	1,667	0,015	1,294
Saladillo	0,137	1,933	0,045	1,181
Salliquelo	0,078	1,814	0,022	1,272
Salto	0,141	2,986	0,053	1,368
San Andrés de giles	0,130	2,376	0,053	1,181
San Antonio de Areco	0,124	2,641	0,049	1,315
San cayetano	0,144	0,628	0,019	0,915
San Nicolás	0,122	2,446	0,050	1,355
San pedro	0,123	2,474	0,047	1,346
San Vicente	0,119	1,766	0,043	1,357
Suipacha	0,082	2,986	0,030	1,337
Tandil	0,092	2,351	0,018	1,498
Tapalqué	0,124	1,462	0,007	1,988
Tordillo	0,086	1,783	-0,150	2,517
Tornquist	0,068	0,996	0,009	1,225
Trenque lauquen	0,133	2,016	0,055	1,320
Tres arroyos	0,151	0,737	0,022	0,995
Tres lomas	-0,111	3,812	0,029	1,845

Villarino	0,134	0,668	0,016	1,184
Zárate	0,129	2,108	0,047	1,300

Cuadro A.2. Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Córdoba

Córdoba	Maíz		Soja	
	Pendiente	Intercepto	Pendiente	Intercepto
Calamuchita	0,118	1,142	0,031	1,750
Capital	0,143	1,175		
Colon	0,133	1,244	0,036	1,793
General Roca	0,147	0,703	0,040	1,418
General San Martin	0,148	0,875	0,030	1,406
Ischilin	0,129	0,682		
Juárez Celman	0,112	1,367	0,025	1,493
Marcos Juárez	0,192	1,544	0,051	1,485
Pocho	0,113	0,770		
Presidente Roque Sáenz Peña	0,154	0,709	0,040	1,415
Rio Cuarto	0,111	1,387	0,023	1,530
Rio Primero	0,141	0,912	0,026	1,770
Rio Seco	0,135	0,707	0,006	1,914
Rio Segundo	0,128	1,291	0,027	1,531
San Alberto	0,117	0,981		
San Javier	0,148	0,592		
San Justo	0,144	0,893	0,027	1,697
Santa María	0,140	0,866	0,025	1,542
Sobremonte	0,133	0,664		
Tercero Arriba	0,144	0,948	0,031	1,412
Totoral	0,137	1,089	0,027	1,920
Tulumba	0,124	0,964	-0,012	2,127
Unión	0,184	1,141	0,042	1,482

Cuadro A.3. Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Chaco

Chaco	Pendiente	Intercepto	Pendiente	Intercepto
	Maíz		Soja	
12 de Octubre	0,053	0,750	0,026	0,650
2 de Abril	0,072	0,707	0,024	1,172
25 de Mayo	0,307	1,295	-0,003	1,895
9 de Julio	0,053	0,866	0,018	1,038
Almirante Brown	0,078	0,518	0,026	1,055
Bermejo	0,074	0,506	0,024	1,240
Chacabuco	0,036	1,601	0,023	1,044
Comandante Fernández	0,077	0,675	0,026	1,086
Fray Justo Santa María de Oro	0,057	0,942	0,018	1,101
General Belgrano	0,068	0,570	0,016	1,339
General Donovan	0,072	0,690	0,026	1,055
General Guemes	0,043	1,194	0,018	1,053
Independencia	0,057	0,676	0,010	1,244
Libertad	0,063	0,855	0,022	1,045
Libertador General San Martín	0,046	1,064	0,013	1,252
Maipú	0,035	1,696	0,021	1,067
Mayor Luis J. Fontana	0,058	0,793	0,014	1,137
O'Higgins	0,069	0,575	0,024	0,898
Presidencia de la Plaza	0,075	0,514	0,027	0,850
Primero de Mayo	0,053	0,703	0,011	1,266
Quitilipi	0,055	0,897	0,020	0,968
San Fernando	0,048	1,175	0,014	1,216
San Lorenzo	0,068	0,531	0,029	0,824
Sargento Cabral	0,068	0,924	0,029	1,044
Tapenga	0,036	0,947		

Cuadro A.4. Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Entre Ríos

Entre Ríos	Maíz		Soja	
	Pendiente	Intercepto	Pendiente	Intercepto
Colon	0,110	0,645	0,024	1,809
Concordia	0,130	0,409	0,018	2,140
Diamante	0,157	0,902	0,030	2,213
Federación	0,121	0,450	0,023	1,999
Federal	0,151	0,585	0,028	2,002
Feliciano	0,127	0,351	0,041	1,769
Gualeguay	0,136	0,899	0,027	2,126
Gualeguaychu	0,118	0,731	0,038	1,817
La Paz	0,149	0,427	0,033	2,108
Nogoya	0,127	0,830	0,037	1,774
Paraná	0,151	0,724	0,035	2,119
San Salvador	0,068	4,824	0,050	1,809
Tala	0,110	0,703	0,032	1,750
Uruguay	0,115	0,763	0,036	1,835
Victoria	0,152	1,044	0,030	2,170
Villaguay	0,113	0,733	0,023	1,848

Cuadro A.5. Valores de los parámetros estimados por cultivo en la Provincia de Santa

Fe				
Santa Fe	Pendiente	Intercepto	Pendiente	Intercepto
	Maíz		Soja	
9 de Julio	0,086	1,195	0,021	1,367
Belgrano	0,159	2,099	0,042	1,593
Caseros	0,149	2,275	0,046	1,444
Castellanos	0,148	0,835	0,042	1,350
Constitución	0,137	2,432	0,043	1,527
Garay	0,122	0,867		
General López	0,168	2,359	0,048	1,367
General Obligado	0,064	0,955	0,009	1,441
Iriondo	0,154	2,187	0,046	1,465
La Capital	0,121	1,202	0,031	1,482
Las Colonias	0,138	1,092	0,036	1,490
Rosario	0,141	2,171	0,040	1,532
San Cristóbal	0,113	1,058	0,031	1,353
San Javier	0,051	1,214	0,011	1,458
San Jerónimo	0,144	1,847	0,042	1,512
San Justo	0,103	1,640	0,020	1,755
San Lorenzo	0,147	2,151	0,045	1,452
San Martín	0,165	1,463	0,052	1,304
Vera	0,092	0,709	0,019	1,292

Apéndice 2: Correlación parcial de cuatro regresores

Cuadro A.6. Mejores combinaciones de cuatro estaciones meteorológicas

Estación meteorológica 1	Estación meteorológica 2	Estación meteorológica 3	Estación meteorológica 4	r ²
`Cnel Suárez**	Dolores**	Río seco***	San Cristóbal	0,787
`Las flores**	Río seco***	Río segundo**	Paraná**	0,763
T. Lauquen**	Río seco***	R segundo***	La Capital***	0,761
Dolores**	`Río seco**	`Río segundo*	Paraná**	0,753
Dolores**	`Las flores**	`Río seco***	`Río segundo**	0,746
`T. Lauquen*	`Río seco***	`R segundo**	Paraná***	0,746
`Las flores*	`Río seco***	`R segundo***	`La Capital**	0,741
Dolores*	`Río seco**	`Río segundo**	`La Capital*	0,741
Dolores*	Tandil*	`Río seco**	Paraná**	0,741
Azul	`Río seco**	`Río segundo**	Paraná***	0,732
Dolores**	Pehuajo*	`Río seco***	`Río segundo*	0,728
Azul	`Río seco**	`Río segundo**	`La Capital***	0,726
`T. Lauquen**	`Río seco***	`La Capital**	San Cristóbal	0,706
Media				0,749

Nota: *Significativo al 90%, **significativo al 95%, ***significativo al 99%.

Apéndice 3: Análisis de residuos

El cuadro A.7 retoma la prueba de Jarque-Bera, el cuadro A.8 muestra la prueba de heteroscedasticidad de Breusch-Pagan-Godfrey y el cuadro A.9 muestra la prueba de correlación serial de Breusch-Godfrey.

Cuadro A.7. Prueba de Jarque-Bera para la distribución de normalidad

Prueba Jarque-Bera	1.0321
Probabilidad	0.5968

Nota: H_0 : la distribución de los residuos es normal.

Cuadro A.8 Prueba de heteroscedasticidad: Breusch-Pagan-Godfrey

Estadístico F	0.839312	Probabilidad F(3,17)	0.4909
Obs*R-cuadrado	2.709132	Prob. Chi-cuadrado(3)	0.4387
Escala explicada SS	0.969692	Prob. Chi-cuadrado(3)	0.8086

Nota: H_0 : los residuos son homocedásticos.

Cuadro A.9. Prueba de correlación serial de Breusch-Godfrey

Estadístico F	0.263231
Obs*R-cuadrado	0.339899

Nota: H_0 : no existe correlación serial.

Apéndice 4: Elección de la metodología de distribución de los modelos en los grupos

Se seleccionó la metodología de desviación media-estándar porque los modelos tienen una distribución más homogénea que la metodología de conglomerados (cuadro A.10) y constituye un enfoque mucho más sencillo.

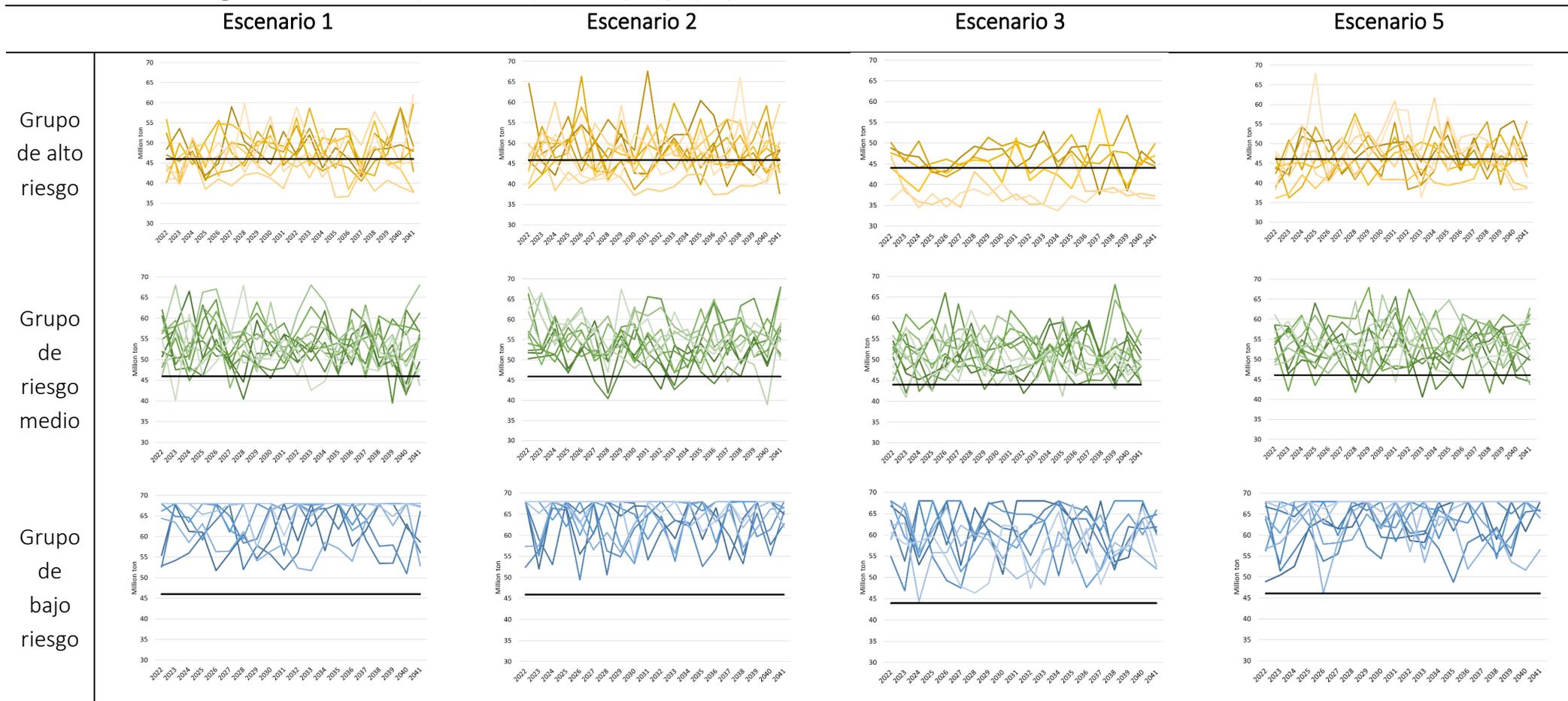
Cuadro A.10. Distribución de los modelos por metodología y escenario en los tres grupos

	Grupo 1 (Límite inferior)		Grupo 2 (Media)		Grupo 3 (Límite superior)	
	<i>Desviación media-estándar</i>	<i>Grupo</i>	<i>Desviación media-estándar</i>	<i>Grupo</i>	<i>Desviación media-estándar</i>	<i>Grupo</i>
Escenario 1 (29 modelos)	9	10	12	13	8	6
Escenario 2 (30 modelos*)	9	12	13	10	8	7
Escenario 3 (26 modelos)	7	2	11	12	8	12
Escenario 5 (30 modelos)	10	10	12	13	8	7

Nota: *En este caso hay 29 modelos para la metodología de conglomerados porque el modelo TaiESM1 forma un grupo en sí mismo, por lo que se eliminó para generar coherencia entre todos los modelos.

Apéndice 5: Clasificación de los modelos en grupos y asociaciones con el riesgo de fenómenos extremos

Figura A.1. Niveles de producción previstos por grupo y escenario con límite de desviación estándar en millones de toneladas



Nota: La línea negra corresponde a una desviación típica por debajo de la media, los casos por debajo de este límite son eventos de producción extrema.

Apéndice 6. Casos por debajo de una desviación típica en cada modelo

Cuadro A.11. Casos por debajo de una desviación típica en cada modelo

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 5
ACCESO_CM2	0	0	0	0
AWI_CM_1_1_MR	9	9	2	9
BCC_CSM2_MR	8	8	5	8
CAMS_CSM1_0	14	15	6	18
CanESM5_CanOE	0	0	0	0
CESM2	0	0	0	0
CMCC_CM2_SR5	0	0	0	0
CMCC_ESM2	0	0	-	0
CNRM_CM6_1	3	1	2	2
CNRM_CM6_1_HR	4	6	2	9
CNRM_ESM2_1	3	5	0	6
EC_Earth3_CC	-	0	-	0
EC_Earth3_Veg_LR	0	0	1	1
FGOALS_f3_L	11	11	0	12
FGOALS_g3	0	0	0	0
FIO_ESM_2_0	0	0	-	0
GFDL_ESM4	1	1	0	4
IITM_ESM	2	0	0	2
INM_CM4_8	0	0	5	0
INM_CM5_0	2	1	1	1
IPSL_CM6A_LR	10	12	2	5
MCM_UA_1_0	0	2	5	2
MIROC6	0	1	0	0
MIROC_ES2L	18	18	4	21
MPI_ESM1_2_LR	4	4	1	3
MRI_ESM2_0	24	26	16	26
NESM3	5	4	-	9
NorESM2_LM	16	14	25	9
NorESM2_MM	11	17	28	9
TaiESM1	0	0	0	0
Media	5.00	5.17	4.04	5.20

Nota: Si un escenario no tiene plantilla, existe un guion en la celda.

Apéndice 7. Valoración de pérdidas extremas de producción por escenario y por modelo, pérdidas en USD (millones)

Cuadro A.12. Escenario 1 (SSP 1.26)

Year	AWI_CM_1_1_MR	BCC_CSM2_MR	CAMS_CSM1_0	CNRM_CM6_1	CNRM_CM6_1_HR	CNRM_ESM2_1	FGOALS_f3_L	GFDL_ESM4	IITM_ESM	INM_CM5_0	IPSL_CM6A_LR	MIROC_ES2L	MPI_ESM1_2_LR	MRI_ESM2_0	NESM3	NorESM2_LM	NorESM2_MM
2022							-4,943.19					-3,957.49		-3,418.36		-4,679.77	-3,711.35
2023		-3,097.77	-4,376.13								-4,927.94			-5,101.08	-4,970.10	-4,563.31	-4,297.77
2024	-2,964.84						-3,419.22		-3,290.57								
2025	-4,340.36	-4,773.92	-4,634.60								-3,632.43			-5,543.42	-2,975.12	-3,300.47	-3,095.73
2026	-3,254.80		-4,107.28									-4,401.93		-4,637.72			
2027			-3,860.64							-3,909.83				-5,234.74			-3,569.73
2028			-3,153.03	-3,418.60	-4,849.65		-3,522.55							-4,286.00		-4,086.96	
2029		-3,254.07										-3,467.08		-4,095.72			-3,754.79
2030	-3,373.20							-3,097.05				-4,345.21		-4,553.60			
2031		-3,459.68									-3,126.94	-2,990.25		-5,461.88		-4,014.58	
2032												-3,583.91	-2,942.39			-2,947.27	
2033			-3,048.14								-3,509.60			-4,560.22	-4,106.38		
2034	-3,675.09		-3,936.40												-3,346.35	-4,506.02	
2035			-3,324.86				-3,713.24							-6,225.64		-2,941.06	-3,546.50
2036			-3,658.21									-5,559.55		-6,159.39			
2037	-4,439.72	-4,225.26	-4,818.63				-3,978.06			-3,024.25	-3,345.00	-3,494.57		-3,924.03			-3,812.01
2038			-3,116.19				-4,354.16							-5,706.70			
2039						-5,186.04					-3,410.44	-2,993.70		-4,746.97			-3,462.34
2040				-3,578.63	-4,405.71		-3,291.82	-4,481.99			-3,075.51	-3,769.76		-5,329.98	-3,972.57	-3,328.47	-3,843.81
2041			-3,969.51									-5,728.71	-3,698.56	-5,807.30		-3,162.72	
Total	-22,048.01	-18,810.70	-46,003.62	-6,997.24	-9,255.37	-8,283.09	-27,222.24	-4,481.99	-3,290.57	-6,934.08	-25,027.85	-44,292.14	-6,640.94	-84,792.74	-19,370.52	-37,530.63	-33,094.03

Cuadro A.13. Escenario 2 (SSP 2.45)

Year	AWI_CM_1_1	BCC_CSM2	CAMS_CSM1	CNRM_CM6	CNRM_CM6_1	CNRM_ESM2	FGOALS_f3_L	GFDL_ESM4	IPSL_CM6A_L	MCM_UA_1	MIROC_ES2L	MPI_ESM1_2	MRI_ESM2_0	NESM3	NorESM2_LM	NorESM2_MN
2022			-3,023.11				-3,806.73		-3,845.18		-5,320.99		-4,973.35			-4,013.68
2023	-3,075.54		-4,152.75								-4,238.04				-3,307.24	
2024	-4,262.08										-3,023.45		-5,578.90			-3,065.23
2025											-3,014.92		-3,986.58			-4,729.21
2026			-3,940.65										-4,994.44	-3,281.67	-4,305.07	-3,995.63
2027						-3,374.98	-3,898.45				-3,897.08	-4,292.79	-4,461.83		-4,683.84	-3,190.05
2028			-4,179.39		-4,396.11	-4,885.20	-4,016.48		-4,638.26				-3,793.90		-4,417.81	-4,834.68
2029			-3,036.23										-4,507.26			-4,231.60
2030	-4,087.30		-5,496.56						-3,281.64			-3,940.07	-5,986.94		-3,929.96	
2031	-4,145.88		-4,275.61								-4,291.47		-5,420.14		-4,577.56	
2032				-4,052.92									-5,633.30			-4,229.96
2033			-3,812.23		-3,739.55	-4,092.96							-5,229.12			-3,804.62
2034									-3,126.63		-3,902.90		-4,235.27		-4,085.23	
2035			-5,069.10				-3,646.57						-4,149.32			-3,446.98
2036					-3,582.48			-3,016.42	-3,095.18		-3,290.26		-5,927.18		-4,244.00	-3,231.28
2037	-3,144.43	-5,217.51								-3,426.30	-3,340.36		-5,837.39	-3,647.46	-3,084.63	
2038	-3,009.56		-3,262.55								-3,376.15		-5,161.26			
2039	-4,273.95		-3,992.06						-3,047.22			-3,617.22	-5,180.82		-3,245.90	-4,013.48
2040		-4,073.94								-5,390.76	-4,021.60		-4,732.52		-3,675.95	-4,948.48
2041			-5,835.98				-4,015.42				-3,379.81				-3,835.93	
Total	-25,998.74	-9,291.45	-50,076.23	-4,052.92	-11,718.14	-15,391.87	-19,383.64	-3,016.42	-21,034.11	-8,817.06	-45,097.03	-11,850.08	-89,789.54	-6,929.13	-47,393.12	-51,734.88

Cuadro A.14. Escenario 3 (SSP 3.70)

Year	BCC_CSM2_M	CAMS_CSM1	CNRM_CM6_1	EC_Earth3_Veg	INM_CM4_g	INM_CM5_C	IAP_FGOALS_G16A	MCM-UA_1	MIROC_ES2	MRI_ESM2_0	NorESM2_LM	NorESM2_MM
2022												-5,529.19
2023	-3,507.14							-3,883.25		-3,821.82	-4,793.25	-4,470.19
2024				-3,389.29						-4,803.00	-5,665.84	-6,179.51
2025	-3,382.87	-3,202.78			-3,148.90		-3,363.38			-2,900.13	-5,877.10	-4,996.84
2026		-3,089.31			-3,556.08					-3,289.05	-5,362.05	-6,106.31
2027					-2,918.15						-6,119.93	-4,920.89
2028											-3,139.64	-4,607.18
2029			-3,236.67								-4,302.52	-5,135.57
2030							-2,931.09			-4,036.40	-5,639.24	-4,130.38
2031											-5,007.55	-5,522.53
2032	-3,563.12							-3,270.89	-3,872.53	-5,883.48	-5,883.48	-5,148.77
2033									-2,909.54	-5,836.63	-5,836.63	-5,935.09
2034		-2,865.18							-3,429.94	-2,920.83	-2,920.83	-6,427.24
2035							-3,804.92		-4,567.66			-5,173.51
2036			-2,846.80								-4,804.97	-5,750.15
2037		-5,075.77									-4,752.14	-4,675.90
2038											-4,483.81	-4,914.36
2039		-4,761.85				-3,173.56			-4,326.42	-5,155.31	-5,155.31	-4,618.08
2040											-4,966.98	-5,348.01
2041											-5,176.18	-5,404.73
Total	-10,453.12	-18,994.89	-6,083.47	-3,389.29	-9,623.12	-3,173.56	-6,294.47	-7,688.17	-3,270.89	-37,956.50	-89,887.44	-104,994.41

Cuadro A.15. Escenario 5 (SSP 5.85)

Year	AWI_CM_1_1	BCC_CSM2_M	CAMS_CSM1	CNRM_CM6	CNRM_CM6_1	CNRM_ESM2	FGOALS_f3_L	GFDL_ESM4	IITM_ESM	IPSL_CM6A	MIROC_ES2L	MPI_ESM1_2	MRI_ESM2_0	NESM3	NorESM2_LM	NorESM2_MH
2022		-3,752.92	-5,374.68		-4,215.44						-3,661.35		-6,421.21		-5,682.75	
2023		-4,322.36	-3,664.53				-6,394.16		-4,358.05		-3,361.87		-6,001.68	-4,516.15		-3,663.50
2024					-3,914.18		-5,418.99				-3,309.36		-4,349.81			
2025							-2,975.73		-3,875.42		-3,746.16		-5,570.91		-4,277.89	
2026			-4,850.96				-3,130.13				-3,136.26		-4,329.88	-4,576.95	-4,941.43	-4,335.43
2027		-4,303.34									-4,080.65				-3,414.62	
2028			-4,746.65	-3,602.76				-4,464.85			-2,984.72		-4,317.38			-4,634.73
2029	-3,635.31		-3,029.95								-5,257.54		-3,095.26			
2030			-4,494.41				-3,187.24				-3,636.80		-4,776.62			
2031												-3,550.32	-4,765.65	-3,652.08		
2032			-5,646.94				-3,067.07						-4,812.38			
2033	-4,881.52	-4,425.60	-5,259.72		-3,221.45		-5,286.42						-3,802.48			-6,356.41
2034			-4,003.51			-4,211.65							-5,042.02	-4,034.15		-3,025.54
2035											-3,880.23		-5,284.41		-4,087.17	
2036		-3,904.81	-3,510.23	-4,098.03	-3,973.50						-3,522.76		-5,055.47			
2037							-3,738.37				-3,421.77		-4,695.96			
2038		-4,008.18	-4,738.24					-4,491.90			-3,090.21			-3,346.47		-4,095.26
2039	-3,735.50				-5,212.30						-4,053.69		-2,996.96	-3,459.11	-3,488.56	
2040			-3,189.01			-3,155.50	-3,143.69				-2,989.87		-5,021.05		-5,669.70	-3,201.56
2041					-3,617.79	-3,518.47				-3,788.32	-3,100.86		-5,455.48	-4,537.58	-5,582.68	
Total	-12,252.33	-24,717.22	-52,508.82	-7,700.79	-24,154.66	-10,885.62	-36,341.80	-8,956.75	-8,233.48	-3,788.32	-57,234.11	-3,550.32	-85,794.63	-28,122.49	-37,144.79	-29,312.43