

## **Instrumentos financieros para la gestión del riesgo climático de cultivos de avena, sorgo, frijol y maíz: Análisis de la viabilidad de un mercado de derivados en México**

Financial Instruments for Managing Climate Risk in Oat, Sorghum, Bean, and Maize Crops: A Feasibility Analysis of a Derivatives Market in Mexico

Elías Arévalo Vargas<sup>1</sup>

María de la Luz Martín Carbajal<sup>2\*</sup>

### **Resumen**

Este estudio evalúa la viabilidad de desarrollar un mercado de derivados climáticos para la gestión del riesgo agroclimático en México, enfocado en los cultivos de maíz, frijol, sorgo y avena. A partir de información histórica del SIACON (2003–2023), se aplicó una metodología cuantitativa basada en indicadores de siniestralidad, análisis de sensibilidad, simulación Monte Carlo simplificada y modelación econométrica, para identificar perfiles regionales de riesgo y asignar instrumentos financieros diferenciados. Los resultados evidencian una marcada heterogeneidad territorial en frecuencia, severidad y volatilidad de pérdidas agrícolas, lo que permite proponer swaps climáticos, futuros y opciones según las características de cada región. Se concluye que México presenta condiciones técnicas iniciales para implementar esquemas piloto; sin embargo, su consolidación requiere fortalecer la infraestructura meteorológica, reducir el basis risk y promover alfabetización financiera rural.

**Palabras clave:** derivados climáticos, riesgo agroclimático, agricultura, gestión financiera, cambio climático.

**Clasificación JEL:** G13, G22, Q14, Q54.

### **Abstract**

This study evaluates the feasibility of developing a climate derivatives market for agroclimatic risk management in Mexico, focusing on corn, beans, sorghum, and oats. Using historical SIACON data (2003–2023), a quantitative methodology based on agricultural loss indicators, sensitivity analysis, simplified Monte Carlo simulation, and econometric modelling was applied to identify regional risk profiles and assign differentiated

<sup>1</sup> Egresado de la Licenciatura en Economía. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán, México. Correo electrónico: 2139185f@umich.mx. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5785-7934>

<sup>2</sup> Profesora e investigadora de tiempo completo en la Facultad de Economía de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Correo electrónico: maria.martin@umich.mx. ORCID ID: 0000-0001-5758-8368.

\* Autor de correspondencia: maria.martin@umich.mx

financial instruments. Results reveal significant territorial heterogeneity in the frequency, severity, and volatility of agricultural losses, supporting the use of climate swaps, futures, and options according to regional characteristics. The study concludes that Mexico has initial technical conditions to implement pilot schemes; however, consolidation requires stronger meteorological infrastructure, basis risk reduction, and improved rural financial literacy.

**Keywords:** climate derivatives, agroclimatic risk, agriculture, financial risk management, climate change.

**JEL Classification:** G13, G22, Q14, Q54.

## 1. Introducción

El cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de eventos meteorológicos extremos que influyen directamente en sectores clave como la agricultura. En México, esta actividad económica depende principalmente de sistemas de temporal, por lo que se encuentra particularmente expuesta a estas variaciones, generando inestabilidad productiva y riesgos sociales importantes.

Ante este panorama, los derivados surgen como instrumentos que podrían reducir los efectos adversos mediante esquemas de transferencia de riesgo. A diferencia de los seguros agrícolas tradicionales, estos contratos se activan automáticamente una vez que se supera un umbral climático predefinido, sin necesidad de verificar daños físicos en campo.

El objetivo de este trabajo es analizar la viabilidad de establecer un mercado nacional de derivados climáticos en México centrado en cuatro cultivos estratégicos: maíz, frijol, avena y sorgo. En particular, la investigación busca responder la siguiente pregunta: ¿qué tipo de derivado climático resulta más adecuado para gestionar el riesgo agroclimático de los principales cultivos en México según la frecuencia, severidad y volatilidad de la siniestralidad observada a nivel regional?

La viabilidad del mercado se evalúa a partir de cuatro criterios principales: i) recurrencia estadística de eventos climáticos capaces de activar coberturas; ii) magnitud promedio de las pérdidas agrícolas observadas; iii) disponibilidad de información climática e histórica para construir índices confiables; y, iv) capacidad de regionalización de instrumentos financieros de acuerdo con el perfil de riesgo de cada entidad y cultivo.

Para desarrollar el análisis se utilizó información histórica del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) para el periodo 2003–2023, y climatología regional de largo plazo. Además, se seleccionaron diez entidades federativas —Zacatecas, San Luis Potosí, Tamaulipas, Guanajuato, Puebla, Oaxaca, Sinaloa, Veracruz, Jalisco y Chihuahua— debido a que concentraron los mayores niveles acumulados de superficie agrícola siniestrada durante el periodo de tiempo analizado, y porque representan los distintos perfiles agroclimáticos del país y diversos tipos de exposición a sequías, heladas, lluvias irregulares y exceso de precipitación pluvial.

Los resultados preliminares muestran que existen diferencias significativas en la estructura del riesgo climático entre regiones y cultivos. Mientras entidades como San Luis Potosí y Zacatecas presentan riesgos recurrentes asociados principalmente a sequías estructurales, estados como Chihuahua tienen eventos menos frecuentes; pero, más severos. Estos patrones permiten identificar instrumentos financieros diferenciados — como swaps climáticos, futuros u opciones barrera — según las características estadísticas del riesgo observado.

Se plantea como hipótesis que las regiones agrícolas con alta frecuencia y baja volatilidad relativa de siniestralidad presentan mayor adecuación para instrumentos tipo swap o futuros climáticos, mientras que regiones con baja frecuencia y alta severidad relativa muestran mayor compatibilidad con instrumentos opcionales.

Para cumplir con el objetivo propuesto, el trabajo se organiza en las siguientes secciones: i) introducción; ii) fundamentos teóricos; iii) definición y funcionamiento de los derivados climáticos; iv) revisión de experiencias internacionales y antecedentes en México; v) análisis empírico del riesgo agroclimático por cultivo y entidad. Finalmente se incluyen las conclusiones y recomendaciones para el desarrollo de un mercado nacional de derivados climáticos en México.

## **2. Fundamentos teóricos**

El análisis de los derivados climáticos puede sustentarse en distintos enfoques económicos y financieros que explican su utilidad como mecanismos de cobertura frente a riesgos agroclimáticos. En particular, este estudio retoma tres perspectivas complementarias: la teoría del riesgo financiero, la economía del comportamiento y la teoría de la adaptación climática. Estos enfoques permiten comprender tanto la racionalidad económica detrás de los derivados climáticos como las limitaciones institucionales y sociales que condicionan su adopción en el sector agrícola.

### *2.1 Teoría del riesgo financiero*

De acuerdo con esta teoría, los agentes económicos buscan reducir su exposición a eventos inciertos que puedan afectar negativamente sus ingresos y estabilidad patrimonial. Hull (2012) sostiene que los instrumentos derivados permiten transferir riesgos específicos hacia mercados financieros especializados mediante contratos cuyo valor depende de variables subyacentes previamente definidas.

En el caso del sector agrícola, los derivados climáticos funcionan como mecanismos de cobertura frente a fenómenos meteorológicos adversos tales como sequías, heladas, lluvias extremas o variaciones abruptas de temperatura. Su principal ventaja consiste en estabilizar parcialmente los ingresos de los productores mediante pagos automáticos vinculados al comportamiento de índices climáticos.

Por otra parte, la teoría de utilidad esperada desarrollada por Von Neumann y Morgenstern (1944) explica que los agentes aversos al riesgo prefieren escenarios estables incluso si ello implica sacrificar parte del rendimiento esperado. En este sentido, la reducción de la volatilidad de ingresos derivada de los instrumentos de cobertura incrementa la utilidad esperada de los productores agrícolas en contextos de alta incertidumbre climática.

Además de disminuir la exposición financiera, estos instrumentos pueden mejorar el perfil crediticio de los productores al reducir el riesgo operativo asociado con pérdidas recurrentes, lo cual facilita el acceso futuro al financiamiento agrícola y mejora la capacidad de inversión en tecnologías de adaptación climática.

### *2.2 Economía del comportamiento y barreras de adopción*

A pesar de sus ventajas teóricas, la adopción de derivados climáticos en contextos rurales ha sido limitada. La economía del comportamiento explica parcialmente este fenómeno al señalar que las decisiones económicas reales no siempre responden a criterios plenamente racionales, sino también a sesgos cognitivos, percepciones subjetivas de riesgo y niveles diferenciados de alfabetización financiera.

Thaler (1993) argumentó que la complejidad de ciertos instrumentos financieros puede generar desconfianza y resistencia entre agentes económicos con limitada experiencia en mercados financieros. En el sector agrícola mexicano, estas barreras adquieren especial relevancia debido a la heterogeneidad productiva, la informalidad financiera y la limitada cobertura institucional en regiones rurales.

Diversos estudios sobre seguros indexados agrícolas han identificado múltiples factores asociados con su baja adopción entre pequeños productores rurales. Entre los principales obstáculos destacan: i) el limitado conocimiento sobre el funcionamiento de los contratos (Giné, Townsend y Vickery, 2008; Cole et al., 2013); ii) la desconfianza hacia instituciones financieras y aseguradoras (Karlan et al., 2014); iii) las dificultades para comprender los índices climáticos utilizados como referencia (Miranda y Farrin, 2012); iv) la percepción de que las indemnizaciones no compensan adecuadamente las pérdidas reales debido al denominado *basis risk* (Barnett y Mahul, 2007; Clarke, 2016); y, v) los costos de transacción y acceso asociados a este tipo de instrumentos financieros (Hill, Hoddinott y Kumar, 2013).

En consecuencia, el desarrollo de un mercado nacional de derivados climáticos requiere no sólo infraestructura financiera y meteorológica, sino también programas de educación financiera rural y mecanismos institucionales que fortalezcan la confianza de los productores.

### *2.3 Resiliencia climática y sostenibilidad agrícola*

Desde una perspectiva socioecológica, la teoría de la resiliencia climática señala que los sistemas productivos deben ser capaces de absorber perturbaciones externas, reorganizarse y continuar operando frente a eventos extremos (Folke, 2006). Aplicado al sector agropecuario, este enfoque implica que los productores deben desarrollar mecanismos que les permitan mantener la continuidad de sus actividades productivas pese a sequías, inundaciones, heladas o variaciones climáticas persistentes.

En este contexto, los derivados climáticos contribuyen a fortalecer la adaptación agrícola mediante tres mecanismos principales: compensación parcial de pérdidas económicas; reducción del riesgo de descapitalización; y, mejora de la capacidad de planificación productiva.

Además, estos instrumentos pueden facilitar procesos de adaptación al cambio climático ya que dan certidumbre financiera en entornos altamente volátiles. Esto resulta particularmente importante en economías emergentes donde una proporción considerable de la producción agrícola depende de sistemas de temporal.

Desde este punto de vista, los derivados climáticos no deben entenderse únicamente como instrumentos financieros, sino también como herramientas potenciales de adaptación y sostenibilidad productiva frente al cambio climático.

### *2.4 Alcances y limitaciones teóricas*

Aunque los derivados climáticos ofrecen ventajas importantes como instrumentos de cobertura, la literatura también reconoce limitaciones significativas relacionadas con problemas de información, infraestructura meteorológica y diseño contractual.

Uno de los principales desafíos es el denominado *basis risk*, entendido como la diferencia entre el comportamiento del índice climático utilizado para activar pagos y las pérdidas reales observadas por los productores. Giné, Townsend y Vickery (2008) mostraron que este problema reduce significativamente la disposición de los agricultores a contratar seguros indexados cuando los índices no reflejan adecuadamente las condiciones locales.

En la misma línea, Clarke (2016) sostuvo que incluso contratos actuarialmente eficientes pueden presentar baja aceptación si los productores perciben que las compensaciones no corresponden a sus pérdidas reales. Estas limitaciones resultan particularmente relevantes en países con infraestructura meteorológica limitada, elevada heterogeneidad climática y baja densidad de estaciones de observación, como ocurre en diversas regiones agrícolas de México. De ahí que la viabilidad de los derivados climáticos depende no sólo de su diseño financiero, sino también de la disponibilidad de información confiable, capacidades institucionales y mecanismos que reduzcan el basis risk.

### 3. Derivados climáticos y modelación financiera

Como ya se ha mencionado, los derivados climáticos son instrumentos financieros diseñados para transferir riesgos asociados a variables meteorológicas observables como precipitación, temperatura, humedad del suelo o velocidad del viento. A diferencia de los seguros agrícolas tradicionales, estos contratos se activan automáticamente cuando una variable climática supera —o no alcanza— determinados umbrales previamente establecidos, sin necesidad de verificar daños físicos en campo (Jewson y Brix, 2005).

Su desarrollo ha crecido en las últimas décadas como respuesta a la mayor frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos asociados al cambio climático, particularmente en sectores sensibles como agricultura, energía y turismo.

#### 3.1 Funcionamiento general de los derivados climáticos

Los derivados climáticos pueden negociarse tanto en mercados organizados como en mercados extrabursátiles (Over The Counter, OTC). Su valor depende de índices construidos a partir de series meteorológicas históricas y variables climáticas objetivamente observables. A diferencia de otros derivados financieros vinculados a activos comerciables, los derivados climáticos utilizan índices meteorológicos como activos subyacentes. Entre los indicadores más utilizados destacan cinco: precipitación acumulada; temperatura promedio; grados-día de calor o frío; humedad del suelo; y, velocidad del viento.

La principal ventaja de estos instrumentos es la rapidez de activación y pago, ya que las indemnizaciones dependen del comportamiento del índice y no de inspecciones físicas posteriores al evento climático. La tabla 1 resume las principales modalidades de derivados climáticos y sus aplicaciones agrícolas.

**Tabla 1.**

Características de los derivados climáticos

Tipo de derivado	Definición	Variable climática subyacente	Aplicación agrícola típica
Weather Futures (Futuros climáticos)	Contratos estandarizados negociados en bolsas como CME Group	Temperatura, precipitación	Cobertura frente a pérdidas por precipitaciones o temperaturas anómalas
Weather Options (Opciones climáticas)	Contratos que otorgan derecho, no obligación, de ejecutar cobertura	Temperatura, precipitación	Protección ante sequías, heladas o lluvias extremas
Weather Swaps	Intercambio de flujos de efectivo según índice climático	Temperatura promedio, precipitación	Transferencia bilateral de riesgo climático

Collars climáticos	Combinación de opciones para limitar exposición	Temperaturas extremas	Protección ante variabilidad térmica
Insurance-Linked Securities (ILS) y Cat Bonds	Instrumentos vinculados a riesgos catastróficos	Sequías, heladas, inundaciones	Cobertura ante eventos extremos severos
Opción Knock-in	Contrato activado sólo al alcanzarse un umbral	Precipitación acumulada	Protección contra eventos climáticos severos

Fuente: Elaboración propia con base en Jewson y Brix (2005).

### 3.2 Principales instrumentos utilizados en agricultura

Los instrumentos derivados (futuros, opciones, swaps, y knock-in) utilizados en agricultura presentan características diferenciadas según la frecuencia, severidad y volatilidad del riesgo climático. Los futuros climáticos son más adecuados para riesgos recurrentes y relativamente predecibles, ya que permiten fijar condiciones financieras frente a variaciones esperadas de temperatura o precipitación. Por su parte, las opciones climáticas resultan más apropiadas para eventos extremos de baja frecuencia; pero, alto impacto, debido a que sólo generan pagos cuando se alcanza un umbral crítico previamente definido.

El tercer instrumento, swaps climáticos, permite intercambiar pagos variables asociados a indicadores meteorológicos por pagos fijos, con lo cual se reduce la incertidumbre en regiones con riesgos persistentes. Finalmente, los instrumentos tipo knock-in son particularmente útiles cuando se busca proteger actividades agrícolas frente a eventos severos poco frecuentes, como heladas extremas o lluvias extraordinarias.

La selección de cualquiera de los instrumentos mencionados depende de factores como la frecuencia del evento climático; la magnitud potencial de las pérdidas; la disponibilidad de información meteorológica; la capacidad financiera del productor; y, los costos de cobertura.

### 3.3 Modelación financiera y estimación de primas

La literatura especializada ha desarrollado diversos modelos cuantitativos para estimar precios y primas de derivados climáticos. Uno de los trabajos pioneros es el de Alaton, Djehiche y Stillberger (2002), quienes propusieron modelos estocásticos de reversión a la media para representar el comportamiento de variables meteorológicas. Posteriormente, Benth y Šaltytė-Benth (2005) incorporaron componentes estacionales y procesos autoregresivos para modelar dinámicas climáticas de mayor complejidad.

A diferencia de los derivados financieros convencionales, los derivados climáticos presentan dificultades particulares de valuación debido a que las variables meteorológicas no son activos comerciables; presentan fuerte estacionalidad; exhiben alta dependencia espacial; y pueden generar eventos extremos difíciles de modelar.

En consecuencia, la estimación de primas requiere series históricas suficientemente largas; calidad estadística de información meteorológica; identificación adecuada de eventos extremos; y reducción del basis risk. Diversos estudios empíricos muestran que los derivados climáticos pueden reducir significativamente la volatilidad de ingresos agrícolas cuando existe alta correlación entre el índice climático y las pérdidas reales observadas.

### *3.4 Basis risk y limitaciones operativas*

Uno de los principales problemas asociados a los derivados climáticos es el denominado *basis risk*. Este concepto se refiere a la diferencia entre las pérdidas efectivamente sufridas por el productor y el comportamiento del índice utilizado para activar el contrato. Este derivado puede originarse por varios factores como heterogeneidad climática intraestatal; diferencias microclimáticas; escasa densidad de estaciones meteorológicas; errores de medición; o, limitada resolución espacial de los índices.

Este problema resulta especialmente relevante en regiones rurales donde las condiciones meteorológicas pueden variar considerablemente entre municipios o incluso entre parcelas cercanas. La literatura reciente señala que estas limitaciones pueden reducirse parcialmente mediante el uso de sensores remotos, imágenes satelitales, índices de humedad del suelo y sistemas híbridos de información climática que mejoran la resolución espacial y la precisión de los índices utilizados para activar coberturas (Greatrex et al., 2015; Jensen et al., 2016; Miranda y Farrin, 2012). No obstante, el *basis risk* continúa siendo uno de los principales desafíos para el desarrollo de mercados climáticos en economías emergentes, debido a la persistencia de discrepancias entre los índices paramétricos y las pérdidas efectivamente experimentadas por los productores (Barnett y Mahul, 2007; Clarke, 2016; Giné et al., 2008).

En este contexto, la experiencia internacional resulta particularmente útil para identificar mecanismos institucionales y financieros que permitan adaptar estos instrumentos a contextos agrícolas heterogéneos como el mexicano, tal como se analiza en la siguiente sección.

## **4. Experiencias internacionales y antecedentes institucionales en México**

La experiencia internacional muestra que el desarrollo de mercados de derivados climáticos depende de tres condiciones fundamentales: infraestructura de información meteorológica, regulación financiera adecuada y mecanismos efectivos de adopción por parte de los productores.

### *4.1 Experiencias internacionales comparadas*

En el ámbito mundial, diversos países han implementado estos instrumentos con resultados significativos. En Estados Unidos, el Chicago Mercantile Exchange (CME) ha sido pionero en la comercialización de derivados basados en índices como Heating Degree Days (HDD) y Cooling Degree Days (CDD), beneficiando cultivos como la vid, las nueces y el maíz (Auer, 2003; Salerno, 2017). En Europa, países como Alemania y Reino Unido integraron derivados climáticos en sus seguros agrícolas, con lo cual se redujeron los costos administrativos y se mejoró la aceptación del productor (Jewson y Brix, 2005).

En Brasil, con apoyo del Banco Mundial, se utilizaron estos instrumentos para mejorar el acceso al crédito y reducir riesgos en las cadenas de café y caña de azúcar (Banco Mundial, 2015). Por su parte, Chile ha promovido su uso en el sector vitivinícola, mientras que Uzbekistán ha comenzado a aplicarlos en cultivos estratégicos como el trigo (Rasulov et al., 2024). Estas experiencias globales muestran tres elementos clave: la existencia de bases de datos climáticas precisas, un marco normativo transparente y programas efectivos de educación financiera.

#### 4.2 Antecedentes institucionales en México

En México, la historia del seguro agrícola puede dividirse en tres etapas: mutualista (1926–1961), estatal (1963–1988) y público-privada (desde 1990). La primera se caracterizó por esquemas cooperativos con fuerte participación de los productores. Durante la segunda etapa, estatal, la Aseguradora Nacional Agrícola y Ganadera (ANAGSA) monopolizó la protección agrícola, alcanzando 7.5 millones de hectáreas aseguradas en 1987, aunque con importantes ineficiencias y pérdidas financieras. Desde 1990, AGROASEMEX lidera la tercera etapa público-privada, promoviendo seguros comerciales, catastróficos y mecanismos de reaseguro.

Ya en el siglo XXI surgieron mecanismos de aseguramiento basados en índices meteorológicos. En 2003, AGROASEMEX y la Secretaría de Agricultura lanzaron un programa piloto de seguro indexado por precipitación. Paralelamente, el Fondo de Aseguramiento para Riesgos Catastróficos Climáticos (FARPRACC) fue creado para adquirir coberturas paramétricas con pagos automáticos ante eventos extremos. Estos productos utilizan series históricas y modelos de rendimiento para establecer umbrales por cultivo y región, cubriendo más de 1.9 millones de hectáreas para 2008 (Fuchs, 2014).

Recientemente se han probado seguros agrícolas modernos que usan imágenes y datos satelitales muy precisos para detectar automáticamente sequías, exceso de lluvia o falta de humedad en el suelo, y así activar pagos sin necesidad de inspecciones físicas. Lo cual contribuye a que los pagos sean más rápidos, haya menos costos administrativos y se pueda asegurar incluso zonas rurales donde no hay muchas estaciones climáticas.

Estos avances representan una transición hacia productos más precisos y adaptados a la realidad del campo mexicano. Aunque aún no existe un mercado formal de derivados climáticos en México, las bases técnicas e institucionales ya han sido parcialmente establecidas.

#### 4.3 Limitaciones y desafíos

Diversos estudios han evaluado el uso de derivados climáticos en México. Juárez-Torres (2013) examinó su aplicación en un distrito de riego en Guanajuato, y concluyó que estos instrumentos facilitan la asignación eficiente del recurso hídrico y promueven políticas de adaptación. En trabajos posteriores, Juárez-Torres, Sánchez-Aragón y Vedenov (2017) confirmaron que los derivados permiten una mejor gestión inter estacional del agua, mientras que Juárez-Torres y Sánchez-Aragón (2012) constataron beneficios similares en Guanajuato y Lambayeque (Perú). Recientemente, Cruz-Aké et. al. (2023) propusieron los derivados como alternativa a políticas de precios garantizados, resaltando su capacidad para reducir la dependencia estatal y promover la autonomía financiera.

Desde una perspectiva crítica, Cruz (2014) evaluó la viabilidad del sistema cap-and-trade en México como herramienta para reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque técnicamente viable, el autor advierte sobre limitaciones institucionales. A nivel macroeconómico, Lalot y Lamichhane (2023) advierten sobre los riesgos financieros derivados del retraso en la transición energética y los efectos físicos del cambio climático sobre el sistema financiero.

En conjunto, estos estudios coinciden en que los derivados climáticos son herramientas eficaces para enfrentar la variabilidad climática, incluso en contextos sin mercados formales. También resaltan su capacidad para promover una planificación adaptativa. Sin embargo, existen desacuerdos respecto al grado de intervención estatal deseable. Mientras algunos enfoques promueven soluciones de mercado, otros destacan

la necesidad de regulación fuerte para evitar que estos instrumentos profundicen desigualdades estructurales (Muñoz Martínez, 2016).

Así, los derivados climáticos podrían ser una herramienta financiera con gran potencial para enfrentar los desafíos del cambio climático en México. Su implementación efectiva requerirá superar obstáculos técnicos, sociales y políticos, al mismo tiempo que se consolidan estructuras institucionales capaces de garantizar su acceso equitativo.

#### *4.4 Lecciones comparadas para la adopción institucional*

La evidencia internacional muestra que la viabilidad de los instrumentos climáticos no depende exclusivamente de su sofisticación financiera, sino también de la capacidad institucional para generar confianza, reducir asimetrías de información y facilitar procesos de adopción entre los productores.

Diversas experiencias en economías emergentes ilustran este punto. En India, la expansión de seguros agrícolas indexados estuvo acompañada por campañas de alfabetización financiera, capacitación comunitaria y mecanismos de difusión adaptados al contexto rural, lo cual contribuyó a mejorar comprensión contractual y aceptación por parte de los productores (Sibiko, et. al, 2018; Giné, Townsend, y Vickery, 2008; Government of India, 2020; Cole, et. al, 2013).

En Kenia, también los programas de aseguramiento climático dirigidos al sector pecuario incorporaron estrategias de formación local, intermediación comunitaria y comunicación simplificada de los criterios de activación. Estas medidas permitieron reducir la desconfianza de las organizaciones gubernamentales y las instituciones para fortalecer la adopción inicial (World Bank, 2015; Jensen, Barrett, y Mude, 2016).

En América Latina, Brasil y Chile muestran que la coordinación entre organismos públicos, instituciones financieras y sistemas de información meteorológica constituye un elemento central para la consolidación de coberturas paramétricas sostenibles. Estas experiencias evidencian que la infraestructura técnica debe complementarse con arreglos institucionales capaces de garantizar transparencia operativa.

En el caso mexicano, programas como CADENA, AGROASEMEX y los esquemas de educación financiera impulsados por FIRA representan antecedentes relevantes. Aunque estos mecanismos no constituyen un mercado formal de derivados climáticos, han contribuido al desarrollo de capacidades técnicas y operativas que podrían facilitar esquemas piloto más sofisticados.

En conjunto, estas experiencias permiten identificar tres lecciones centrales para México. Primero, la adopción de instrumentos climáticos requiere procesos graduales de aprendizaje institucional y financiero. Segundo, la disponibilidad de información meteorológica confiable constituye condición necesaria para reducir incertidumbre contractual. Tercero, la participación coordinada entre actores públicos y privados resulta indispensable para construir credibilidad y sostenibilidad operativa. Estas lecciones refuerzan la pertinencia de una estrategia gradual y territorialmente diferenciada para el desarrollo de derivados climáticos en México, priorizando regiones con mejores capacidades técnicas y condiciones institucionales más favorables para su implementación inicial.

## 5. Metodología

Con el propósito de evaluar la viabilidad de un mercado de derivados climáticos en México, se desarrolló una metodología cuantitativa sustentada en el análisis histórico de siniestralidad agrícola y variables climatológicas regionales. El enfoque integró estadísticas descriptivas, análisis de frecuencia de activación climática y criterios cuantitativos orientados a la asignación de instrumentos financieros conforme a perfiles regionales de riesgo.

La metodología se estructuró en seis etapas: i) recopilación y depuración de datos; ii) identificación de entidades y cultivos estratégicos; iii) construcción de indicadores de siniestralidad; iv) definición del umbral de activación climática; v) clasificación cuantitativa del riesgo; y vi) determinación del derivado climático más adecuado (figura 1).

### 5.1 Fuentes de información y selección de la muestra

Para el análisis se empleó información proveniente del SIACON correspondiente al periodo 2003–2023, base de datos que contiene registros de superficie sembrada, cosechada y siniestrada por cultivo y entidad federativa.

De manera complementaria, se incorporó información climatológica regional relativo a los periodos 1971–2000 y 1981–2010, con la finalidad de contextualizar los patrones agroclimáticos predominantes en las regiones analizadas.

Asimismo, la investigación se concentró en cuatro cultivos estratégicos para México: maíz, frijol, sorgo y avena. La selección consideró su relevancia para la seguridad alimentaria nacional, su extensión territorial cultivada, su exposición histórica a riesgos climáticos y su importancia económica regional.

También, se seleccionaron diez entidades federativas: Zacatecas, San Luis Potosí, Tamaulipas, Guanajuato, Puebla, Oaxaca, Sinaloa, Veracruz, Jalisco y Chihuahua, las cuales concentraron los mayores niveles acumulados de superficie agrícola siniestrada durante el periodo analizado y representaron distintos perfiles agroclimáticos asociados con sequías, heladas, exceso de precipitación y lluvias irregulares.

### 5.2 Construcción de indicadores de siniestralidad

Para cada combinación estado – cultivo se calcularon seis indicadores estadísticos: i) promedio anual de superficie siniestrada; ii) valor mínimo observado; iii) valor máximo registrado; iv) desviación estándar; v) frecuencia de activación climática; y, vi) magnitud promedio del exceso sobre el umbral. La proporción anual de siniestralidad se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$PS_{it} = \frac{SA_{it}}{SS_{it}}$$

donde  $PS_{it}$  representa la proporción de superficie siniestrada para la combinación estado – cultivo  $i$  en el año  $t$ ;  $SA_{it}$  se refiere a la superficie afectada; y,  $SS_{it}$  a la superficie sembrada. La desviación estándar se utilizó como aproximación de volatilidad climática, mientras que la frecuencia de activación permitió identificar recurrencia de eventos extremos.

### 5.3 Umbral de activación climática y análisis de sensibilidad

Con el fin de identificar eventos agroclimáticos suficientemente severos para activar mecanismos de cobertura, se estableció un umbral de afectación equivalente al 15% de la superficie sembrada. La elección de este umbral se sustentó en criterios actuariales empleados en seguros agrícolas indexados y programas paramétricos implementados en América Latina, donde niveles inferiores suelen asociarse con fluctuaciones normales de producción, mientras que niveles superiores representan pérdidas con impacto económico significativo sobre la viabilidad productiva.

Para reducir arbitrariedad metodológica, se realizó un análisis de sensibilidad utilizando umbrales alternativos de 10% y 20%, con el objetivo de contrastar cambios en el número de activaciones, la severidad promedio y la estabilidad de resultados.

La frecuencia de activación climática se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$F_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T I(S_{ijt} > u)$$

donde  $F_{ij}$  representa la frecuencia de activación para el cultivo  $j$  en la entidad  $i$ ;  $S_{ijt}$  es la proporción de superficie siniestrada observada en el año  $t$ ;  $u$  es el umbral de activación climática; e  $I(\cdot)$  es una función indicadora que toma valor de 1 cuando la siniestralidad supera el umbral y 0 en caso contrario.

Asimismo, la magnitud promedio del exceso sobre el umbral se determinó como:

$$E_{ij} = \frac{1}{A_{ij}} \sum_{t=1}^T \max(S_{ijt} - u, 0)$$

donde  $E_{ij}$  representa el exceso promedio observado; y,  $A_{ij}$  se refiere al número de años en que la siniestralidad superó el umbral establecido.

### 5.4 Modelación estocástica de activación climática mediante simulación Monte Carlo

En cuanto a la incorporación de incertidumbre estadística en la estimación de pérdidas y la aproximación de la viabilidad financiera de los instrumentos propuestos, se desarrolló una modelación estocástica simplificada basada en simulación Monte Carlo. Aunque el presente estudio no implementa procesos multivariados ni modelación actuarial avanzada de dependencia espacial, esta aproximación permite representar de forma probabilística la ocurrencia de eventos extremos y estimar primas teóricas preliminares asociadas a los derivados climáticos.

Así, la ocurrencia anual de activación climática para cada combinación entidad – cultivo se modeló mediante una variable aleatoria Bernoulli:

$$X_{ijt} \sim \text{Bernoulli}(p_{ij})$$

donde  $X_{ijt}$  toma valor de 1 cuando la proporción de superficie siniestrada supera el umbral de activación  $u$ , y 0 en caso contrario. La probabilidad histórica de activación se estimó como:

$$\hat{p}_{ij} = \frac{A_{ij}}{T}$$

donde  $\hat{p}_{ij}$  representa la probabilidad histórica de activación para la combinación entidad–cultivo,  $A_{ij}$  corresponde al número de años en que la siniestralidad superó el umbral establecido y  $T$  es el número total de años observados.

A fin de incorporar variabilidad paramétrica en la estimación de dicha probabilidad, se asumió una distribución Beta conjugada:

$$p_{ij} \sim \text{Beta}(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$$

con parámetros definidos como:

$$\alpha_{ij} = A_{ij} + 1$$

$$\beta_{ij} = T - A_{ij} + 1$$

Esta especificación permite modelar incertidumbre alrededor de la frecuencia observada, preservando coherencia con la evidencia histórica disponible.

Luego, la pérdida condicionada a la activación climática se definió como el exceso de siniestralidad sobre el umbral:

$$L_{ijt} = \max(S_{ijt} - u, 0)$$

donde  $L_{ijt}$  equivale a la pérdida excedente observada;  $S_{ijt}$  corresponde a la proporción de superficie siniestrada registrada en el año  $t$ ; y,  $u$  es el umbral de activación climática.

A partir de  $M$  iteraciones Monte Carlo, la pérdida esperada simulada se estimó mediante:

$$E(L_{ij}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M p_{ij}^{(m)} L_{ij}^{(m)}$$

donde  $p_{ij}^{(m)}$  equivale a la probabilidad simulada de activación en la iteración  $m$ ; y,  $L_{ij}^{(m)}$  la pérdida correspondiente.

Con base en esta estimación, la prima pura se calculó como:

$$PP_{ij} = E(L_{ij})$$

Posteriormente, la prima comercial se obtuvo incorporando una carga administrativa y de riesgo:

$$PC_{ij} = PP_{ij}(1 + \lambda)$$

donde  $PC_{ij}$  describe la prima comercial y  $\lambda$  corresponde al factor de carga destinado a cubrir costos administrativos, margen de riesgo y requerimientos potenciales de reaseguro.

Para efectos del presente análisis, se asumió un valor de:

$$\lambda=0.25$$

equivalente a una sobreprima de 25%, consistente con aproximaciones exploratorias utilizadas en estudios actuariales preliminares para instrumentos paramétricos.

Los resultados derivados de esta simulación deben interpretarse como aproximaciones exploratorias orientadas a evaluar viabilidad relativa entre regiones y no como estimaciones actuariales definitivas. Su principal utilidad radica en que podría ofrecer una referencia comparativa para identificar perfiles territoriales con mayor factibilidad financiera para la implementación inicial de esquemas piloto de derivados climáticos.

### 5.5 Clasificación cuantitativa del riesgo y asignación de derivados

Con el propósito de reducir discrecionalidad en la asignación de instrumentos financieros, también se establecieron criterios cuantitativos basados en la frecuencia de activación, la severidad del exceso y la volatilidad de la siniestralidad (tabla 2). Esta clasificación permitió vincular el comportamiento estadístico de la siniestralidad con instrumentos financieros específicos, reduciendo el componente subjetivo de asignación.

**Tabla 2.**

Criterios cuantitativos de asignación de derivados

Condición estadística	Interpretación	Derivado sugerido
Frecuencia >70%	Riesgo estructural recurrente	Swap climático
Frecuencia <30% + severidad >25%	Evento extremo esporádico	Opción knock-in
Desviación estándar <0.10	Riesgo relativamente estable	Futuro climático
Desviación estándar >0.18	Alta volatilidad climática	Opciones climáticas
Frecuencia y severidad moderadas	Riesgo recurrente intermedio	Swap simple

Fuente: Elaboración propia.

### 5.6 Índice compuesto de riesgo climático

También para sintetizar las distintas dimensiones del riesgo agroclimático, se construyó un índice compuesto normalizado entre 0 y 1. Cada variable se normalizó mediante el método min - max:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X}$$

Posteriormente, el índice compuesto se calculó como:

$$IRC_i = \frac{1}{4} (S_i + F_i + A_i + E_i)$$

donde:  $IRC_i$  representa el índice de riesgo climático;  $S_i$  corresponde a siniestralidad histórica;  $F_i$  representa frecuencia de siniestros;  $A_i$  frecuencia de activaciones; y,  $E_i$  es la magnitud promedio del exceso. Este índice permitió comparar de forma sintética los perfiles de riesgo entre entidades y cultivos.

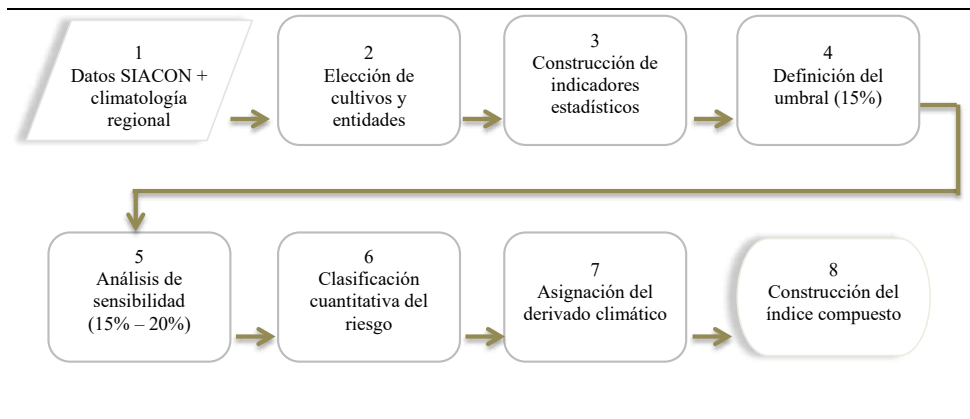
5.7 Limitaciones metodológicas y calidad de los datos

La metodología presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, los datos del SIACON podrían contener inconsistencias derivadas de diferencias regionales en los mecanismos de reporte, subregistro de pérdidas, variaciones metodológicas entre años y heterogeneidad en la calidad estadística estatal. En segundo término, en el análisis se utilizó información agregada a nivel estatal, lo cual pudo ocultar diferencias microclimáticas relevantes entre municipios o regiones productivas.

Adicionalmente, el estudio no incorporó modelación actuarial avanzada ni estimación formal de primas mediante simulaciones Monte Carlo de alta complejidad; por tanto, los resultados deben interpretarse como aproximaciones exploratorias de viabilidad. Finalmente, persiste la posibilidad de basis risk, entendido como la discrepancia entre el comportamiento del índice climático utilizado y las pérdidas efectivamente experimentadas por los productores.

Figura 1.

Diagrama general del procedimiento metodológico



Fuente: Elaboración propia.

6. Resultados y discusión

El análisis empírico realizado permitió identificar diferencias significativas en la estructura del riesgo agroclimático entre entidades federativas y cultivos estratégicos en México. Los resultados muestran que la frecuencia, severidad y volatilidad de la siniestralidad presentan comportamientos territorialmente heterogéneos, lo cual tiene implicaciones directas sobre la selección del instrumento financiero más adecuado para cada región.

A diferencia de esquemas homogéneos de aseguramiento agrícola, los hallazgos sugieren que la viabilidad de un mercado de derivados climáticos en México depende de la capacidad de regionalizar instrumentos financieros según perfiles específicos de riesgo agroclimático.

### 6.1 Estadísticas de siniestralidad y perfiles regionales de riesgo

Según los resultados existen tres perfiles regionales diferenciados de riesgo agroclimático. En primer lugar, entidades como San Luis Potosí presentan un patrón de riesgo estructural persistente caracterizado por alta frecuencia de activación y elevada siniestralidad promedio. Este comportamiento refleja condiciones recurrentes de sequía y pérdidas sistemáticas, lo cual sugiere mayor compatibilidad con instrumentos tipo swap climático.

En segundo lugar, entidades como Chihuahua y Sinaloa tienen eventos menos frecuentes; pero, considerablemente más severos y volátiles. La elevada desviación estándar y magnitud promedio del exceso indican perfiles compatibles con instrumentos opcionales diseñados para eventos extremos, particularmente opciones tipo knock-in.

Finalmente, Veracruz, Jalisco y Tamaulipas muestran niveles relativamente bajos y estables de siniestralidad. En estos casos, los riesgos observados son más previsibles y compatibles con contratos tipo futuros climáticos. La tabla 3 presenta los principales indicadores estadísticos de siniestralidad para los cultivos y entidades analizadas durante el periodo 2003–2023.

**Tabla 3.**

Indicadores de siniestralidad agrícola por estado y cultivo

Estado	Cultivo	Promedio	Máximo	Desviación estándar	Activaciones (>15%)	Exceso promedio (%)
San Luis Potosí	Maíz	0.3259	0.6856	0.1478	20	18.54
Zacatecas	Frijol	0.1375	0.5576	0.1695	7	18.41
Guanajuato	Maíz	0.1304	0.5259	0.1602	6	18.57
Chihuahua	Avena	0.1205	0.7021	0.2008	6	24.75
Puebla	Maíz	0.0868	0.4859	0.1161	3	16.88
Tamaulipas	Sorgo	0.0668	0.3070	0.0801	2	13.53
Oaxaca	Maíz	0.0710	0.2281	0.0655	4	2.45
Jalisco	Maíz	0.0419	0.1975	0.0549	2	3.59
Veracruz	Maíz	0.0590	0.1698	0.0484	1	1.98
Sinaloa	Maíz	0.0551	0.4976	0.1080	1	34.76

Fuente: Elaboración propia con datos de SIACON.

### 6.2 Resultados del análisis de sensibilidad

Para evaluar la robustez del umbral de activación climática, se realizó un análisis de sensibilidad utilizando umbrales alternativos de 10%, 15% y 20% (tabla 4). Según los resultados un umbral de 10% genera activaciones excesivamente frecuentes, lo cual incrementaría potencialmente el costo de primas y reduciría la capacidad discriminatoria de los instrumentos. Por el contrario, el umbral de 20% disminuye considerablemente el número de activaciones y podría subestimar riesgos recurrentes de intensidad media.

En términos comparativos, el umbral de 15% representa un punto intermedio consistente entre frecuencia y severidad del riesgo, lo que permite identificar eventos climáticos con impacto económico significativo sin sobreestimar fluctuaciones normales de producción.

Tabla 4.

Sensibilidad de activaciones según umbral climático

Estado	Cultivo	Activaciones 10%	Activaciones 15%	Activaciones 20%
San Luis Potosí	Maíz	21	20	17
Zacatecas	Frijol	12	7	4
Chihuahua	Avena	9	6	3
Guanajuato	Maíz	10	6	4
Puebla	Maíz	6	3	1
Tamaulipas	Sorgo	5	2	1

Fuente: Elaboración propia.

## 6.3 Modelo econométrico de determinantes de la activación climática

Asimismo, para fortalecer la fundamentación cuantitativa de la clasificación regional de instrumentos financieros, se estimó un modelo econométrico lineal transversal para identificar los principales determinantes de la frecuencia de activación climática observada en las combinaciones estado–cultivo analizadas.

La variable dependiente corresponde a la frecuencia de activación climática, definida como la proporción de años en que la superficie siniestrada superó el umbral de activación del 15% durante el periodo 2003 – 2023. Como variables explicativas se incorporaron tres indicadores representativos de la estructura del riesgo agroclimático: i) la severidad promedio del exceso sobre el umbral; ii) la volatilidad histórica de la siniestralidad, aproximada mediante la desviación estándar; y iii) el promedio histórico de superficie siniestrada.

La especificación econométrica adoptada fue la siguiente:

$$FA_{i,c} = \beta_0 + \beta_1 SEV_{i,c} + \beta_2 VOL_{i,c} + \beta_3 PROM_{i,c} + \varepsilon_{i,c}$$

donde:  $FA_{i,c}$  representa la frecuencia de activación climática de la combinación estado–cultivo  $i,c$ ;  $SEV_{i,c}$  corresponde a la severidad promedio del exceso sobre el umbral;  $VOL_{i,c}$  representa la desviación estándar de la siniestralidad;  $PROM_{i,c}$  es el promedio histórico de superficie siniestrada; y,  $\varepsilon_{i,c}$  es el término de error aleatorio. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.

Tabla 5.

Resultados del modelo econométrico de frecuencia de activación climática

Variable explicativa	Coefficiente estimado	Error estándar	Valor p
Constante	-0.082	—	—
Severidad del exceso	-0.183	0.181	0.350
Volatilidad histórica	0.017	0.415	0.970
Promedio histórico de siniestralidad	3.249	0.200	<0.001

Fuente: Elaboración propia.

Los indicadores globales del modelo son los siguiente:  $R^2=0.985$ ;  $R^2_{ajustado} = 0.977$ . Los resultados muestran que el promedio histórico de siniestralidad constituye el principal determinante estadísticamente significativo de la frecuencia de activación climática. El coeficiente positivo estimado ( $\beta_3 = 3.249$ ) indica que las regiones con mayores pérdidas agrícolas persistentes presentan una probabilidad significativamente superior de superar el umbral de activación, lo cual respalda empíricamente la asignación de instrumentos tipo swap climático y futuros en contextos de riesgo estructural recurrente.

En contraste, la severidad promedio del exceso y la volatilidad histórica no presentan significancia estadística en esta especificación. Este resultado puede atribuirse tanto al tamaño limitado de la muestra como a la posible colinealidad existente entre indicadores de riesgo, lo cual reduce la capacidad de distinguir efectos marginales individuales.

A pesar de estas limitaciones, el elevado coeficiente de determinación sugiere que el modelo captura adecuadamente la variabilidad observada en la frecuencia de activación. Los hallazgos confirman que la persistencia histórica de la siniestralidad constituye un criterio cuantitativo robusto para sustentar la regionalización de derivados climáticos.

Estos resultados fortalecen la clasificación presentada en la sección siguiente, al proporcionar evidencia econométrica que respalda la asignación diferenciada de instrumentos financieros según perfiles regionales de riesgo agroclimático.

Finalmente, debido al tamaño reducido de la muestra —limitada a diez combinaciones estado-cultivo— los resultados deben interpretarse como evidencia exploratoria. Investigaciones futuras podrían ampliar la muestra mediante información municipal o series temporales más desagregadas, permitiendo especificaciones de datos panel y estimaciones econométricas de mayor robustez.

#### 6.4 Clasificación cuantitativa y asignación de derivados

Con base en los criterios metodológicos definidos previamente y en la evidencia econométrica presentada en la sección 6.3 se estableció una clasificación cuantitativa para la asignación de derivados climáticos.

**Tabla 6.**

Clasificación cuantitativa de derivados climáticos por perfil regional

Estado	Cultivo	Perfil de riesgo	Derivado sugerido
San Luis Potosí	Maíz	Alta frecuencia y severidad moderada	Swap climático
Zacatecas	Frijol	Riesgo recurrente intermedio	Swap simple
Guanajuato	Maíz	Riesgo recurrente moderado	Futuro climático
Chihuahua	Avena	Alta volatilidad y severidad extrema	Opción knock-in
Puebla	Maíz	Variabilidad intermedia	Opción climática
Tamaulipas	Sorgo	Baja frecuencia y estabilidad relativa	Futuro climático
Oaxaca	Maíz	Riesgo moderado	Swap simple
Jalisco	Maíz	Baja volatilidad	Futuro climático
Veracruz	Maíz	Activaciones poco frecuentes	Futuro climático
Sinaloa	Maíz	Eventos extremos esporádicos	Opción barrera

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación confirma que la selección óptima del derivado depende de la interacción entre frecuencia; severidad; volatilidad; y persistencia histórica del riesgo. Esto permite reducir la arbitrariedad metodológica y fortalece la viabilidad técnica de un mercado diferenciado de derivados climáticos.

### 6.5 Estimación preliminar de primas y viabilidad financiera

Ahora bien, con base en el modelo estocástico descrito en la sección 5.4, se estimaron las primas puras y comerciales de los derivados climáticos propuestos, calculándose además una prima actuarial simplificada para cada combinación estado-cultivo. La estimación se basó en el valor esperado de pérdida, definido como el producto entre la probabilidad histórica de activación y la magnitud promedio del exceso sobre el umbral climático. Posteriormente, se incorporó una carga adicional equivalente a 25%, destinada a representar costos administrativos, margen de riesgo y requerimientos potenciales de reaseguro.

$$\pi_{i,c} = p_{i,c} \times E(L_{i,c} | L_{i,c} > u)$$

$$p_{i,c} = \frac{n_{i,c}}{T}$$

$$\pi_{i,c}^{\text{comercial}} = \pi_{i,c}(1 + \alpha + \rho)$$

con:  $\alpha=0.10$ ,  $\rho=0.15$

donde:  $\pi_{i,c}$  es la prima pura;  $p_{i,c}$  representa la probabilidad histórica de activación;  $L_{i,c}$  es la pérdida observada;  $u$  es el umbral de activación;  $\alpha$  es el costo administrativo; y,  $\rho$  es el margen de riesgo.

**Tabla 7.**

Estimación actuarial simplificada de primas

Estado	Cultivo	Probabilidad histórica	Exceso promedio (%)	Prima pura (%)	Prima comercial (%)
San Luis Potosí	Maíz	0.95	18.54	17.65	22.06
Zacatecas	Frijol	0.33	18.41	6.08	7.60
Chihuahua	Avena	0.29	24.75	7.18	8.98
Tamaulipas	Sorgo	0.10	13.53	1.35	1.69
Veracruz	Maíz	0.05	1.98	0.10	0.12

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados anteriores existe una heterogeneidad significativa en los costos estimados de cobertura. Las regiones con alta recurrencia y severidad, como San Luis Potosí, presentan primas considerablemente más elevadas, lo que sugiere la necesidad de subsidios parciales o esquemas complementarios de reaseguro para garantizar accesibilidad financiera. En contraste, lugares con menor frecuencia de activación, como Veracruz y Tamaulipas, presentan primas relativamente bajas, lo cual los convierte en candidatos idóneos para programas piloto de implementación inicial.

La estimación actuarial simplificada sugiere que la viabilidad financiera del mercado es territorialmente diferenciada, ya que mientras algunas regiones requerirían mecanismos compensatorios para hacer sostenibles las coberturas, otras presentan condiciones favorables para esquemas piloto con costos relativamente bajos.

### *6.6 Basis risk y limitaciones operativas*

Uno de los principales desafíos para la implementación de derivados climáticos en México es la presencia potencial de basis risk, entendido como la discrepancia entre las pérdidas reales experimentadas por los productores y la activación del pago determinada por el índice climático contractual.

Este problema surge cuando el comportamiento del índice utilizado no refleja adecuadamente las condiciones específicas enfrentadas por los productores asegurados. Su magnitud depende principalmente de la resolución espacial de la información climática, la densidad de estaciones meteorológicas y la heterogeneidad microclimática regional.

En entidades con elevada variabilidad territorial, como Oaxaca o Puebla, esta limitación podría generar discrepancias significativas entre daño efectivo y compensación contractual, reduciendo confianza y adopción.

Los avances recientes en sensores remotos, imágenes satelitales y monitoreo geoespacial han contribuido a reducir parcialmente este problema al mejorar precisión y frecuencia de observación. Sin embargo, estas herramientas no eliminan completamente el riesgo de desalineación entre índice y pérdida real.

En consecuencia, la reducción del basis risk requiere fortalecer infraestructura meteorológica, desarrollar índices territorialmente más específicos y combinar múltiples fuentes de información climática. Desde una perspectiva operativa, este factor constituye una restricción crítica para la viabilidad de un mercado nacional de derivados climáticos, particularmente en regiones con limitada infraestructura técnica.

### *6.7 Discusión general*

Los resultados obtenidos sugieren que la viabilidad de un mercado de derivados climáticos en México depende fundamentalmente de la heterogeneidad territorial del riesgo agroclimático. En efecto, el análisis empírico muestra que la frecuencia, severidad y volatilidad de la siniestralidad presentan patrones diferenciados entre entidades y cultivos, lo que impide la adopción de esquemas homogéneos de cobertura.

En particular, las regiones con elevada recurrencia de pérdidas (San Luis Potosí), presentan condiciones compatibles con instrumentos orientados a riesgos estructurales persistentes, tales como swaps climáticos. En contraste, lugares con eventos menos frecuentes pero de mayor severidad relativa, como Chihuahua y Sinaloa, muestran mayor adecuación para instrumentos opcionales diseñados para activaciones contingentes. Por su parte, regiones con menor frecuencia de activación (Veracruz y Tamaulipas), ofrecen condiciones favorables para programas piloto mediante futuros climáticos de menor costo actuarial.

Estos hallazgos coinciden con la evidencia internacional que señala que la eficacia de los mercados climáticos depende de la capacidad de adaptar los instrumentos financieros a perfiles específicos de exposición. En este sentido, la regionalización propuesta en el presente estudio constituye un criterio técnicamente consistente para aproximar esquemas de cobertura diferenciados.

Desde una perspectiva institucional, los resultados apuntan a que una estrategia gradual de implementación resultaría más viable que la creación inmediata de un mercado nacional plenamente integrado. Estados con infraestructura agroindustrial relativamente consolidada podrían funcionar como espacios iniciales de experimentación, lo cual permitiría validar mecanismos de cobertura y fortalecer capacidades operativas antes de una expansión territorial más amplia.

No obstante, persisten restricciones importantes. La presencia potencial de *basis risk*, las limitaciones en cobertura meteorológica y la necesidad de fortalecer capacidades de alfabetización financiera rural constituyen desafíos relevantes para la implementación efectiva de estos instrumentos.

En conjunto, los hallazgos señalan que México cuenta con condiciones técnicas iniciales para desarrollar esquemas piloto de derivados climáticos, aunque su consolidación requerirá fortalecimiento institucional, mejora de infraestructura de información climática y mecanismos de adopción gradual orientados a reducir incertidumbre operativa.

## **Conclusión**

En el presente estudio se evaluó la viabilidad de desarrollar un mercado de derivados climáticos orientado a la gestión del riesgo agroclimático en México, tomando como referencia los cultivos de maíz, frijol, sorgo y avena en diez entidades federativas con alta incidencia histórica de siniestralidad.

Los resultados conseguidos confirman que la exposición agroclimática presenta una marcada heterogeneidad territorial, expresada en diferencias significativas en frecuencia de activación, severidad de pérdidas y volatilidad de la siniestralidad. Esta diversidad de perfiles impide la implementación de esquemas homogéneos de cobertura y respalda la necesidad de diseñar instrumentos diferenciados según las características específicas de riesgo observadas en cada región.

El análisis econométrico mostró que la persistencia histórica de la siniestralidad constituye el principal determinante de la frecuencia de activación climática, lo que proporciona sustento cuantitativo para la regionalización de instrumentos financieros. Asimismo, la modelación estocástica y la estimación actuarial simplificada permitieron calcular costos relativos de cobertura, lo cual evidencia que la viabilidad financiera del mercado es territorialmente diferenciada.

En regiones con alta recurrencia de pérdidas estructurales, como San Luis Potosí, los instrumentos tipo swap climático presentan mayor pertinencia técnica, aunque su implementación requeriría mecanismos complementarios de subsidio o reaseguro para garantizar accesibilidad financiera. En contraste, entidades con menor frecuencia de activación y primas estimadas relativamente bajas ofrecen condiciones más favorables para el desarrollo inicial de programas piloto.

No obstante, la consolidación de un mercado nacional de derivados climáticos enfrenta restricciones relevantes. La presencia potencial de *basis risk*, la cobertura meteorológica insuficiente, la limitada alfabetización financiera rural y la necesidad de fortalecer marcos regulatorios especializados constituyen desafíos que deben atenderse de manera prioritaria.

En este sentido, la evidencia presentada sugiere que México presenta condiciones técnicas preliminares para avanzar hacia esquemas piloto de cobertura climática, siempre que su implementación se desarrolle de forma gradual, territorialmente focalizada y respaldada por inversión en infraestructura de información climática.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran el tamaño reducido de la muestra, el uso de información agregada a nivel estatal y el carácter exploratorio de la modelación econométrica y actuarial empleada. Investigaciones futuras podrían incorporar información municipal, modelos de datos panel, simulaciones multivariadas y estimaciones actuariales de mayor sofisticación, lo que permitiría evaluar con mayor precisión la dinámica espacial del riesgo agroclimático y la estructura óptima de primas.

En conjunto, según la evidencia obtenida los derivados climáticos constituyen una alternativa técnicamente prometedora para fortalecer la adaptación financiera del sector agrícola mexicano frente al cambio climático. No obstante, su viabilidad operativa depende de la consolidación de infraestructura meteorológica especializada, del fortalecimiento regulatorio, de la reducción del basis risk y de procesos graduales de adopción institucional y financiera por parte de los productores rurales.

## **Bibliografía**

- Agroasemex. (2025). 28 aniversario AGROASEMEX. <https://www.gob.mx>
- Agroasemex-SHCP. (2013). Experiencias de aseguramiento agropecuario en México. <https://www.cac.int>
- Akter, S., Krupnik, T. J., Rossi, F., y Khanam, F. (2016). The influence of gender and product design on farmers' preferences for weather-indexed crop insurance. *Global Environmental Change*, 38, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.03.010>
- Alaton, P., Djehiche, B., y Stillberger, D. (2002). On modelling and pricing weather derivatives. *Applied Mathematical Finance*, 9(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/13504860210132897>
- Auer, J. (2003). Weather derivatives heading for sunny times. Deutsche Bank Research.
- Banco de México. (2021). Inclusión financiera rural en México. Banco de México. <https://www.cnbv.gob.mx>
- Barnett, B. J., Barrett, C. B., y Skees, J. R. (2008). Poverty traps and index-based risk transfer products. *World Development*, 36(10), 1766–1785. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2007.10.016>
- Barnett, B. J., y Mahul, O. (2007). Weather index insurance for agriculture and rural areas in lower-income countries. *American Journal of Agricultural Economics*, 89(5), 1241–1247.
- Benth, F., y Šaltytė-Benth, J. (2005). Stochastic modelling of temperature variations with a view toward weather derivatives. *Applied Mathematical Finance*, 12(1), 53–85.
- Cai, H., de Janvry, A., y Sadoulet, E. (2015). Social networks and the decision to insure. *American Economic Journal: Applied Economics*, 7(2), 81–108.
- Cao, M., y Wei, J. (2000). Weather derivatives: A new class of financial instruments. *Financial Analysts Journal*, 56(5), 71–84.
- Carter, M., de Janvry, A., Sadoulet, E., y Sarris, A. (2017). Index insurance for developing country agriculture: A reassessment. *Annual Review of Resource Economics*, 9, 421–438.
- Clarke, D. J. (2016). A theory of rational demand for index insurance. *American Economic Journal: Microeconomics*, 8(1), 283–306. <https://doi.org/10.1257/mic.20140103>
- Cole, S., Giné, X., Tobacman, J., Topalova, P., Townsend, R., y Vickery, J. (2013). Barriers to household risk management: Evidence from India. *American Economic Journal: Applied Economics*, 5(1), 104–135.
- Comisión Nacional Bancaria y de Valores. (2023). Reporte nacional de inclusión financiera. CNBV.
- Cruz, J. L. (2014). Instrumentos de mercado para mitigar el cambio climático: Análisis de factibilidad del sistema cap-and-trade en México [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey].

- Cruz-Aké, S., García-Ruiz, R. S., y Venegas-Martínez, F. (2023). Climate derivatives strategies as an alternative to set up guaranteed prices for agricultural producers in Mexico. *Applied Economics Letters*, 30(3), 302–318.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2022). Programas de educación financiera y administración de riesgos agropecuarios.
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253–267.
- Fuchs, A. (2014). Evidence from a large-scale rainfall-indexed insurance program in Mexico. World Bank.
- Giné, X., Townsend, R., y Vickery, J. (2008). Patterns of rainfall insurance participation in rural India. *The World Bank Economic Review*, 22(3), 539–566.
- Government of India. (2020). Pradhan Mantri Fasal Bima Yojana operational guidelines. Ministry of Agriculture and Farmers Welfare.
- Greatrex, H., Hansen, J. W., Garvin, S., Diro, R., Blakeley, S., Le Guen, M., Rao, K. N., y Osgood, D. E. (2015). *Scaling up index insurance for smallholder farmers: Recent evidence and insights*. CGIAR.
- Henríquez, P. (2012). Derivados climáticos: Valorización de opciones sobre precipitaciones. Universidad de Chile.
- Hess, U., y Hazell, P. (2016). Innovations and emerging trends in agricultural insurance. In P. Hazell y S. Hess (Eds.), *New directions for smallholder agriculture* (pp. 271–290). Oxford University Press.
- Hill, R., Hoddinott, J., y Kumar, N. (2013). Adoption of weather index insurance. ESSP II Working Paper.
- Hull, J. C. (2012). *Risk management and financial institutions* (4th ed.). Wiley.
- IFC. (2018). Inclusive insurance and financial literacy programs in Bangladesh. International Finance Corporation.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Jensen, N., Barrett, C., y Mude, A. (2016). Index insurance quality and basis risk: Evidence from northern Kenya. *American Journal of Agricultural Economics*, 98(5), 1450–1469. <https://doi.org/10.1093/ajae/aaw046>
- Jewson, S., y Brix, A. (2005). *Weather derivative valuation*. Cambridge University Press.
- Juárez-Torres, M. (2013). Effectiveness of weather derivatives as a cross-hedging instrument against climate change. Inter-American Development Bank.
- Juárez-Torres, M., Sánchez-Aragón, L., y Vedenov, D. (2017). Weather derivatives and water management in developing countries. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 42(2), 146–163.
- Juárez-Torres, M., y Sánchez-Aragón, L. (2012). Effectiveness of weather derivatives as a cross-hedging instrument against climate change. Inter-American Development Bank.
- Karlan, D., Osei, R., Osei-Akoto, I., y Udry, C. (2014). Agricultural decisions after relaxing credit and risk constraints. *The Quarterly Journal of Economics*, 129(2), 597–652.
- Laliotis, M. D., y Lamichhane, S. (2023). Delays in climate transition can increase financial tail risks. International Monetary Fund.
- Mahul, O., y Stutley, C. J. (2010). *Government support to agricultural insurance: Challenges and options for developing countries*. World Bank.
- Miranda, M. J., y Farrin, K. (2012). Index insurance for developing countries. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 34(3), 391–427. <https://doi.org/10.1093/aep/pps031>

- Muñoz-Martínez, H. (2016). Hedging neoliberalism: Derivatives as state policy in Mexico. *New Political Economy*, 21(3), 291–304.
- Rasulov, A., Abdulakimova, M., Kurbonov, S., y Rakhmatov, M. (2024). The role of weather derivatives in agricultural risk management of Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*, 590, 06001.
- Rodríguez, A. (2024). Derivados climáticos: Una nueva herramienta de cobertura de riesgos en el sector agrícola. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 12(2), 45–60.
- Salerno, T. (2017). Cargill's corporate growth in times of crises. *Agriculture and Human Values*, 34(1), 211–222.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Programa de desarrollo rural.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2012). El sector agropecuario ante el desafío del cambio climático.
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos. (2018). Normatividad estadística 2017.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). Programa especial de cambio climático 2014–2018.
- Sibiko, K. W., Veetil, P. C., y Qaim, M. (2018). Small farmers' preferences for weather index insurance. *World Development*, 105, 132–145.
- Solano-Alonso, R., Altamirano-Cárdenas, R., Santoyo-Cortés, V., y Muñoz-Rodríguez, M. (2021). El seguro agropecuario como instrumento para la gestión de riesgos en México. *Región y Sociedad*, 31, 1–25.
- Thaler, R. H. (1993). *Advances in behavioural finance*. Russell Sage Foundation.
- Trevor, A., Fleege, T., Richards, J., Mark, M., y Dwight, R. (2024). The performance of weather derivatives in managing risks of specialty crops. NCR-134 Conference.
- Von Neumann, J., y Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press.
- World Bank. (2015). Kenya livestock insurance (KLIP).