

INFORME

INA - SCIRSA

Análisis de riesgo por sequía en cuencas
seleccionadas de Argentina

Becaria: Ing. **Marianela Montes Quinteros**
Directora: Dra. Ing. **Leticia Vicario**

Agosto de 2026

Subgerencia
Centro de la Región Semiárida

Área de Hidrología



ANÁLISIS DE RIESGO POR SEQUÍA EN CUENCAS SELECCIONADAS DE ARGENTINA

RESUMEN

La sequía constituye uno de los fenómenos climáticos extremos con mayor impacto sobre los sistemas socioeconómicos y ambientales en Argentina. Si bien existen sistemas de monitoreo operativos a escala nacional, persiste un vacío metodológico en la integración de dicha información con evaluaciones territoriales de riesgo. El presente trabajo desarrolla y aplica una metodología de evaluación del riesgo por sequía a escala departamental, integrando un índice de amenaza construido a partir de los informes mensuales de la Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías con índices de vulnerabilidad global previamente desarrollados. El índice de amenaza incorpora la frecuencia de ocurrencia y la intensidad de los eventos mediante un esquema de ponderación lineal por categoría de severidad. La metodología fue aplicada en tres cuencas hidrográficas con características socioeconómicas y ambientales contrastantes: Carcarañá, Limay y Bermejo. Los resultados evidencian que la vulnerabilidad modifica de manera significativa el patrón espacial de la amenaza, determinando que el riesgo más elevado no coincide necesariamente con los sectores de mayor frecuencia de sequía. La metodología demostró ser viable, reproducible y replicable en otras cuencas de interés, constituyendo un aporte concreto hacia la evaluación operativa del riesgo por sequía en Argentina.

Descriptores temáticos: Sequía. Evaluación del riesgo. Amenaza

Descriptores geográficos: Cuenca del río Carcarañá. Cuenca del río Limay. Cuenca alta del río Bermejo.

ÍNDICE

ANÁLISIS SOBRE EL RIESGO POR SEQUÍA: ENFOQUES, ANTECEDENTES Y DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN EN ARGENTINA	2
1. INTRODUCCIÓN	4
2. RIESGO POR SEQUÍA.....	5
2.1 La Sequía como fenómeno complejo	5
2.2 Riesgo, Amenaza/Peligro y Vulnerabilidad.....	6
2.3 Escala espacial y temporal	6
3. ANTECEDENTES EN EL ANÁLISIS DEL RIESGO POR SEQUÍA.....	7
3.1 Antecedentes internacionales	7
3.2 Antecedentes nacionales.....	11
4. METODOLOGÍA ADOPTADA Y PROPUESTA	12
4.1 Análisis de la amenaza/peligro por sequía.....	12
4.1.1 Unidad espacial y temporal de análisis	13
4.1.2 Fuente de datos y procesamiento de la información	13
4.1.3 Asignación de ponderación por severidad. Aporte metodológico INA.....	14
4.1.4 Índice de Amenaza	14
4.1.5 Escalamiento del índice.....	14
4.1.6 Clasificación	14
4.1.7 Mapeo de los índices de peligro por sequía	15
4.2 Análisis del riesgo por sequía.....	15
4.2.1 Cálculo de los índices de riesgo a nivel departamental.....	15
4.2.2 Ajuste de los índices a una función de distribución probabilística.	15
4.2.3 Clasificación de los índices de riesgo	15
4.2.4 Mapeo de los índices de riesgo por sequía	15
4.3 Limitaciones y supuestos metodológicos	15
5 RESULTADOS: MAPAS DE AMENAZA Y RIESGO EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO	16
5.1 Cuenca del río Carcarañá.....	16
5.2 Cuenca del río Limay.....	18
5.3 Cuenca del río Bermejo	20
6 CONCLUSIONES	22
7 BIBLIOGRAFÍA	23

1. INTRODUCCIÓN

La sequía representa uno de los fenómenos climáticos extremos con mayor impacto sobre los sistemas socioeconómicos y ambientales.

Se considera que el análisis de riesgo por sequía no puede ser analizada únicamente desde la perspectiva de fenómeno físico, sino también, requiere de integrar las dimensiones sociales, económicas y ambientales para determinar la vulnerabilidad de un espacio frente a las sequías. Consecuentemente, el riesgo se construye a partir de la interacción entre una amenaza y la vulnerabilidad de los sistemas mencionados, ambos condicionados por la escala espacial y temporal, la disponibilidad y calidad de la información.

Actualmente en Argentina existen diversos productos e informes oficiales orientados al monitoreo de la sequía; sin embargo, no existe una integración operativa con evaluaciones territoriales de riesgo.

En este contexto, el siguiente informe analiza y compara diversos enfoques conceptuales y metodológicos utilizados para el estudio del riesgo por sequía a nivel internacional, considerando sus requerimientos de información, escalas de análisis y niveles de complejidad. A partir de la revisión, se evalúa la disponibilidad y calidad de información oficial existente en Argentina, con el fin de definir una metodología de evaluación de riesgo por sequía que resulte viable, replicable y compatible con evaluaciones previas de vulnerabilidad desarrolladas por este centro.

Posteriormente se aplica dicha metodología en los estudios anteriormente realizados para las cuencas del río Carcarañá, Limay y cuenca alta del río Bermejo (Montes Quinteros y Vicario, 2026).

2. RIESGO POR SEQUÍA

2.1 La Sequía como fenómeno complejo

La escasez de precipitaciones (valores observados menores a los esperados o medios) en un área y en un periodo de tiempo determinado constituye un proceso hidrológico extremo denominado “sequía” (Vicario *et al.*, 2015).

En la literatura se reconocen distintos tipos de sequía, las cuales se presentan de manera encadenada a lo largo del tiempo, con retardos temporales y respuesta diferentes según las características del entorno afectado por la sequía (UNDRR, 2025):

- Sequía meteorológica: asociada a déficit de precipitación con respecto al promedio histórico.
- Sequía agrícola: vinculada a la disponibilidad de humedad en el suelo y los impactos sobre los cultivos.
- Sequía hidrológica: asociada a la disminución de caudales, volúmenes o niveles de aguas superficiales y/o subterráneas.
- Sequía socioeconómica: relacionada con la escasez de agua, afectando el consumo y por consiguiente generando daños económicos y/o personales en una comunidad.

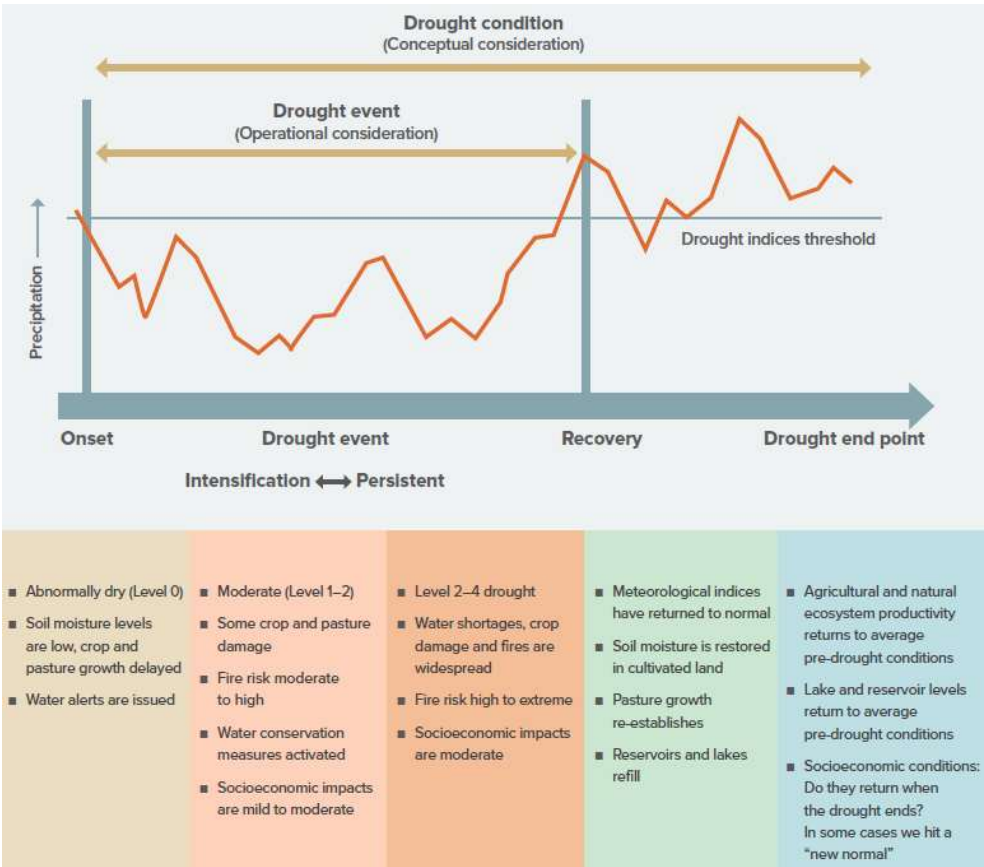


Fig. 1 Estadios de un evento de sequías e impactos observados. (Fuente: World Bank, 2024)

2.2 Riesgo, Amenaza/Peligro y Vulnerabilidad

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) define al riesgo como el potencial de que se produzcan consecuencias adversas por las cuales algo de valor está en peligro y en las cuales un desenlace o la magnitud del desenlace son inciertos. En el marco de la evaluación de los impactos del clima, el término riesgo suele utilizarse para hacer referencia al potencial de consecuencias adversas de un peligro relacionado con el clima, o de las respuestas de adaptación o mitigación a dicho peligro, en la vida, los medios de subsistencia, la salud y el bienestar, los ecosistemas y las especies, los bienes económicos, sociales y culturales, los servicios (incluidos los servicios ecosistémicos), y la infraestructura. Los riesgos resultan de la interacción entre la vulnerabilidad del sistema afectado, la exposición al peligro a lo largo del tiempo, así como a la probabilidad de que dicho peligro ocurra (IPCC, 2018).

Matemáticamente se define al riesgo como: $Riesgo = Amenaza \times Vulnerabilidad$

En el caso del riesgo por sequías, la amenaza es la probabilidad de ocurrencia de un evento de sequía en un espacio y tiempo con suficiente intensidad como para generar daños y depende de la variabilidad climática; la vulnerabilidad es el grado de susceptibilidad de un sistema para hacer frente a los efectos adversos del fenómeno en cuestión, la cual está condicionada por factores sociales, económicos y ambientales, que pueden ser gestionados para mejorar la adaptación y la capacidad de respuesta.

En el caso particular de la sequía, la estimación de la amenaza presenta desafíos específicos debido a su carácter de inicio lento, evolución progresiva y delimitación espacial difusa, lo que requiere del uso de indicadores e índices estandarizados (WMO y GWP, 2016; World Bank, 2024).

La evaluación de riesgo por sequía proporcionaría información de gran utilidad para que las autoridades enfoquen los esfuerzos en prevenir, mitigar y adaptar ante crisis en comunidades vulnerables y en sitios donde las características de sequía son o se esperan que sean graves.

2.3 Escala espacial y temporal

Un aspecto importante a la hora de analizar el riesgo frente a las sequías es la elección de la escala espacial y temporal, ya que condiciona tanto la caracterización de la amenaza como la evaluación de la vulnerabilidad (UNDRR, 2025).

La selección de las escalas temporales e indicadores debe ajustarse al tipo de sequía a evaluar y los impactos que se desean representar (World Bank, 2019). Asimismo, la elección dependerá de la disponibilidad, resolución y consistencia de los datos disponibles.

3. ANTECEDENTES EN EL ANÁLISIS DEL RIESGO POR SEQUÍA

3.1 Antecedentes internacionales

Diversos organismos internacionales han desarrollado marcos metodológicos para la evaluación del riesgo por sequía. Entre ellos, el Banco Mundial, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) proponen enfoques estructurados que integran la caracterización del peligro, la exposición y la vulnerabilidad.

Las guías metodológicas recientes plantean procesos de evaluación por etapas, que incluyen: una fase de alcance, orientada a la definición del problema, objetivos, sectores y escalas de análisis; una fase de inicio, centrada en la recopilación de antecedentes e identificación de indicadores relevantes; una fase de evaluación detallada del peligro y la vulnerabilidad; y finalmente una fase de implementación, vinculada a medidas de reducción y gestión del riesgo.

Estos marcos coinciden en la recomendación de utilizar múltiples indicadores de sequía, combinar fuentes de datos y **adaptar la metodología** a la disponibilidad de información y a la escala del estudio, priorizando enfoques reproducibles y transparentes.

Existe una *Guía de Implementación de Evaluación de Riesgo de sequía* desarrollada por la Instalación Global para la Reducción y Recuperación ante desastres, la cual describe las siguientes etapas (World Bank Group, 2024):

1. Fase de alcance (definición del problema)

- 1.1 ¿Cuál es el problema y el contexto?
- 1.2 ¿Cuál es el objetivo de la evaluación?
- 1.3 ¿Qué sectores deben ser incluidos?
- 1.4 ¿Cuál es la escala espacial? Local, (sub)nacional, regional, global
- 1.5 ¿Qué horizonte temporal? Corto plazo (actual), prevalecen condiciones de sequía en el momento del estudio (en curso), largo plazo (futuro)
- 1.6 Identificar posibles acciones y medidas de implementación y los resultados necesarios

2. Fase de inicio (evaluación preliminar)

- 2.1 Recopilar información básica sobre el impacto histórico de las sequías para los sectores identificados.
- 2.2 Identificar índices relevantes de peligro, exposición y vulnerabilidad ante la sequía y la escala de tiempo apropiada.
- 2.3 Evaluar si la sequía en el área de estudio está relacionada con patrones globales como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).
- 2.4 Si el horizonte temporal es de largo plazo, evaluar el cambio climático y las predicciones/proyecciones socioeconómicas para el área de estudio.
- 2.5 Recopilar y analizar los datos disponibles a nivel global y/o local sobre el peligro de sequía, la exposición y a vulnerabilidad, en la escala espacial y temporal adecuada

3. Fase de evaluación (evaluación detallada, en caso de que la información recopilada y analizada en la fase de inicio no son suficientes para cumplir con los objetivos de la evaluación de sequías definidas).

- 3.1 Caracterización detallada del peligro de sequía actual y/o en curso y la evaluación detallada de la exposición y vulnerabilidad.
- 3.2 Evaluación futura del peligro de sequía y la evaluación detallada de la futura exposición y vulnerabilidad
- 3.3 Combinar el actual y/o futuro peligro de sequía con la exposición y vulnerabilidad para obtener la evaluación general del riesgo de sequía.

4. Fase de implementación (acciones a tomar)

- 4.1 Identificar a tiempo las acciones para mitigar el impacto de una sequía (pronosticada) y activar los *Procedimientos de operación estándar*.
- 4.2 Diseñar medidas de reducción del riesgo de sequías (por ejemplo, sistemas de protección social, aumento del almacenamiento de agua superficial y subterránea, sistemas de riego eficientes, etc.).
- 4.3 Diseñar medidas de preparación (monitoreo de sequías, sistemas de detección/pronóstico de sequías, sistema de alerta temprana, establecer procedimientos operativos estándar).
- 4.4 Definir e implementar plan de manejo de la sequía y normas operacionales

Enfoques, datos de herramientas y modelos que dan soporte a la evaluación de la sequía:

- Catálogo e inventario de sequías: contiene una visión general de las plataformas, boletines y conjuntos de datos de sequías a nivel mundial o regional, con información sobre el peligro, la exposición y vulnerabilidad (droughtcatalogue.com).
- Índices de riesgo, exposición y vulnerabilidad a la sequía.
- Patrones climáticos globales: imágenes globales que muestran áreas con teleconexiones de El Niño y La Niña, y teleconexiones de precipitación de ENSO.
- Cambio climático y predicciones/proyecciones socioeconómicas: Informes de evaluación del IPCC.
- Datos locales sobre el impacto de la sequía: los ministros locales y agencias gubernamentales, los servicios hidrometeorológicos y/o las ONG proporcionan datos locales sobre la exposición y vulnerabilidad, así también sobre pérdidas y daños a los sectores afectados por sequías pasadas y en curso.
- Información detallada sobre los peligros: los productos satelitales proporcionan información para caracterizar sequías pasadas y en curso. Las variables meteorológicas y/o hidrológicas modeladas proporcionan información para caracterizar sequías pasadas, en curso y futuras.
- Software o herramientas de modelado: el inventario de sequías (que a la fecha de presentación del siguiente informe no se encuentra disponible) ofrece una visión general del software y las herramientas de modelado para la evaluación de sequías. Un modelo adoptado a la evaluación proporcionará resultados de simulación de variables apropiadas para caracterizar la sequía.
- Índices específicos de sequía para la caracterización del peligro: los índices específicos de sequía de cada caso se calculan para caracterizar sequías actuales/en curso/futuras basándose en conjuntos de datos en línea fácilmente disponibles. Variables medidas o modeladas.

Actualmente en Europa, uno de los marcos metodológicos más completos que existen para cuantificar el riesgo a sequía a escala continental es el proyecto EDORA (*European Drought Risk Assessment*), validado recientemente por el Banco Mundial (2024). El enfoque fue desarrollado e implementado para evaluar los riesgos de sequía para sectores y sistemas individuales (agricultura, abastecimiento de agua, energía, transporte fluvial y ecosistemas terrestres y de agua dulce), cada uno caracterizado por sus propios impulsores subyacentes de exposición y vulnerabilidad.

El enfoque se basa en dos componentes complementarios principales (Fig. 2). En primer lugar, se desarrollan modelos conceptuales sectoriales, denominados como “cadenas de impacto” que representan visualmente la interacción de los factores de riesgo producir un determinado riesgo. Dichas cadenas organizan los impulsores del riesgo (amenaza, exposición y vulnerabilidad), incorporando además impactos intermedios que permiten explicar como un déficit climático se traduce progresivamente en consecuencias sociales, económicas y ambientales. Las cadenas de impacto se construyen mediante revisión de literatura científica, procesos de consulta y

validación con expertos en cada sector, con el objetivo de identificar los principales mecanismos causales que explican los impactos de la sequía en cada sistema analizado.

El segundo componente corresponde a la evaluación cuantitativa basada en datos del riesgo de sequía sectorial mediante modelos de aprendizaje automático y los datos disponibles. A partir de la información aportada por las cadenas de datos se seleccionan los indicadores representativos de las componentes del riesgo y los impactos observados. Las regiones europeas se agrupan según características similares de vulnerabilidad, asumiendo que territorios con condiciones comparables presentan relaciones semejantes entre sequía e impactos. Sobre estos grupos se entrenan modelos de “machine learning”, los cuales aprenden estadísticamente la relación entre los indicadores de sequía y la ocurrencia de impactos observados. De esta manera, el riesgo se estima como la probabilidad de experimentar determinados impactos bajo condiciones de sequía específicas.

El resultado principal de este proceso es una caracterización del riesgo basada en impactos, expresada mediante métricas como la pérdida media anual asociada a sequías, calculada como porcentaje relativo de la producción regional afectada. Este enfoque permite identificar puntos críticos espaciales y dinámicas temporales del riesgo, complementando la interpretación conceptual proporcionada por las cadenas de impacto. Asimismo, el método puede aplicarse a escenarios climáticos futuros recalibrando la relación entre amenaza e impactos mediante proyecciones climáticas regionales, aunque manteniendo constantes las condiciones actuales de exposición y vulnerabilidad.

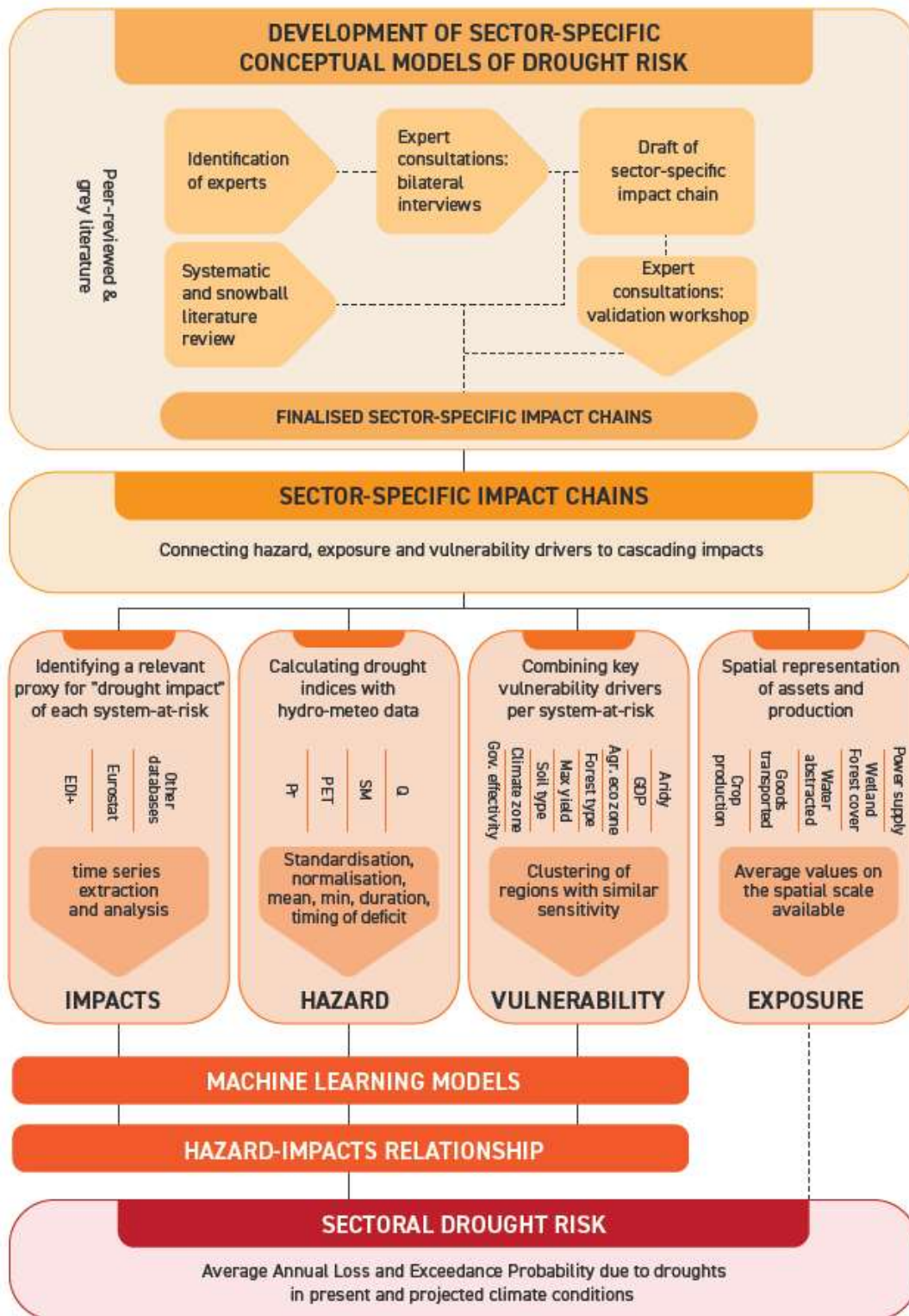


Fig. 2 Enfoque EDORA para la evaluación del riesgo de sequía (Fuente: Rossi et al., 2023)

En resumen, el enfoque EDORA representa una transición desde evaluaciones tradicionales centradas en indicadores climáticos hacia un análisis integrado y orientado a impactos reales, donde el riesgo de sequía se entiende como el resultado de la interacción entre condiciones hidro-meteorológicas, características territoriales y evidencia empírica de daños observados. Se destaca el enfoque EDORA ya que su implementación establece una integración y estandarización de datos, capacidad computacional para procesamiento lo que representa una fortaleza institucional.

Dicho enfoque dado los requerimientos de datos e infraestructura actualmente podría exceder las condiciones disponibles para evaluar regionalmente en Argentina.

3.2 Antecedentes nacionales

Argentina integra y adhiere al Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, el cual es un instrumento internacional que establece cuatro prioridades de acción:

1. Comprender el riesgo de desastres
2. Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionarlo
3. Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia
4. Aumentar la preparación para casos de desastre

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) expone que, si bien Argentina posee capacidades consolidadas de monitoreo hidrometeorológico, persisten limitaciones en la generación de evaluaciones basadas en impactos y riesgo. En este contexto, resulta necesario desarrollar metodologías que integren información de monitoreo con análisis de vulnerabilidad territorial, permitiendo avanzar hacia evaluaciones operativas de riesgo.

Con respecto al fenómeno de sequías en el país, el abordaje institucional se ha fortalecido en los últimos años mediante la implementación de sistemas de monitoreo coordinados, como la Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías (MNMS), integrada por diversos organismos públicos científico- técnicos (Instituto Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, etc.).

El Plan Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (PNRRD 2025–2029) incorpora la sequía dentro de los fenómenos prioritarios de gestión del riesgo. Sin embargo, la aplicación de metodologías integradas de evaluación de riesgo por sequía continúa siendo limitada, lo que evidencia una oportunidad de desarrollo metodológico.

4. METODOLOGÍA ADOPTADA Y PROPUESTA

La evaluación del riesgo por sequía ha evolucionado desde enfoques estadísticos hacia modelos híbridos que integran la severidad física con la susceptibilidad socioeconómica y ambiental.

Con respecto a la vulnerabilidad a las sequías se identificó y evaluó cuencas de distintas regiones de Argentina, aplicando una metodología desarrollada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (Ortega *et al.*, 2018). Se empleó un enfoque multifactorial, para lo cual se desarrollaron indicadores sociales, económicos y ambientales. Mediante dichos indicadores, se obtuvieron los índices de vulnerabilidad pertinentes. Posteriormente se confeccionaron mapas de los índices obtenidos para complementar el trabajo con información gráfica (Montes Quinteros y Vicario, 2026). En este sentido, la integración de la amenaza para construir los mapas de riesgo quedó como trabajo pendiente.

Las sequías suelen caracterizarse por su severidad, duración, momento y extensión espacial. Para evaluar el peligro/amenaza que representa dicho evento, se acepta como buena práctica el uso de diferentes índices o indicadores de sequía según los distintos tipos de sequías. Se recomienda trabajar con múltiples índices y fuentes de datos, ya que esto mejora la comprensión de los posibles niveles de sequías y la frecuencia y ocurrencia de los riesgos asociados (Banco Mundial, 2019). Entre los índices más utilizados se encuentran el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el Índice Estandarizado de Precipitación–Evapotranspiración (SPEI) y diversos indicadores de información satelital. Además, existen plataformas globales de monitoreo, como el Global Drought Information System (GDIS), que integran múltiples indicadores. No obstante, para estudios aplicados a escala nacional o de cuenca, las guías metodológicas recomiendan priorizar productos oficiales y datos locales cuando están disponibles (World Bank, 2024).

Algunos estudios, estiman la amenaza representando la severidad de la sequía a través del índice SPI (Nasrollahi *et al.*, 2018), por otro lado, se basan en el cálculo de probabilidad de ocurrencia a partir de registros históricos oficiales (Ortega *et al.*, 2018).

Considerando la disponibilidad de información oficial integrada (véase apartado 3.2) y la escala de análisis resulta metodológicamente consistente adoptar un enfoque basado en la frecuencia de ocurrencia del fenómeno, en lugar de reconstruir índices climáticos desde datos primarios.

4.1 Análisis de la amenaza/peligro por sequía

Como se mencionó anteriormente, la evaluación de la amenaza de sequía es caracterizada a través de diversos índices. Además de los índices basados en variables climáticas, en los últimos años se han desarrollado enfoques multivariado para dicha evaluación. Estos métodos integran múltiples variables como precipitación, evapotranspiración, humedad del suelo, caudales, etc. con el fin de representar la complejidad del fenómeno. Entre las metodologías empleadas se encuentran los modelos de cúpulas (Chang *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2025), que permiten analizar la dependencia estadística entre diferentes indicadores de sequías y evaluar conjuntamente las características como la duración y severidad de los eventos. De igual manera, se desarrollaron modelos probabilísticos basados en teoría de valores extremos para estimar la probabilidad de ocurrencia de sequías extremas (Domínguez *et al.*, 2019; Piwowar y Kuźmiński, 2023). Como se señaló en el apartado 3.1, algunos estudios incorporaron técnicas de aprendizaje automático “*machine learning*” (World Bank, 2025) y análisis mediante teledetección, lo que permite procesar grandes volúmenes de datos y mejorar la caracterización espacial y temporal de las sequías. Sin embargo, la aplicación de estos enfoques suele requerir series de datos extensas, integración de múltiples bases de información y una elevada capacidad computacional.

En síntesis, la literatura científica presenta una gran variedad de metodologías para la evaluación de la amenaza por sequía, que van desde enfoques basados en índices climáticos estandarizados hasta modelos probabilísticos avanzados, métodos multivariados y técnicas de aprendizaje automático. Si bien estos enfoques permiten analizar en detalle las características estadísticas y físicas de los eventos de sequía, su aplicación suele requerir series extensas de datos hidroclimáticos, integración de múltiples variables y capacidades de modelado estadístico o computacional avanzadas. En contextos de evaluación territorial del riesgo, diversos estudios y organismos internacionales recomiendan adaptar las metodologías a la disponibilidad de información y a la escala de análisis. En este sentido, el presente trabajo adopta un enfoque probabilístico basado en la frecuencia y severidad de las condiciones de sequía registradas en productos oficiales de monitoreo, lo que permite aprovechar información previamente integrada por organismos especializados y construir un índice de amenaza compatible con la evaluación de vulnerabilidad existente.

Se propone utilizar como fuente de información los informes mensuales de la Mesa Nacional de Monitoreo sequía, los cuales presentan mapas sobre la condición de sequías meteorológicas y agropecuarias en el país. Se decidió adoptar dicho producto ya que, sintetizan múltiples variables climáticas, hidrológicas y satelitales procesadas por organismos oficiales del país como el SMN, INTA, INA, CONAE, etc. De esta manera, en lugar de reconstruir índices climáticos desde datos primarios, se aprovecha una base de información previamente validada y consistente a escala nacional, lo que permite desarrollar una evaluación de la amenaza compatible con la escala territorial del estudio y con la disponibilidad real de datos.

Por otra parte, la metodología a desarrollar integra las etapas del análisis del peligro empleada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), basada en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno (Ortega *et al.*, 2018), con recomendaciones internacionales (Banco Mundial, IPCC) que sugieren incorporar la severidad del evento mediante una ponderación. Consecuentemente, para que la probabilidad de ocurrencia caracterice la presión hídrica sobre el territorio, se integra la lógica de ponderación (Nasrollahi *et al.*, 2018). Este enfoque postula que la simple frecuencia de eventos es insuficiente si no se cuantifica la magnitud del déficit; por consiguiente, se incorpora la asignación de pesos diferenciales a las categorías de severidad que adopta la Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías (leve, moderada y severa).

4.1.1 Unidad espacial y temporal de análisis

La evaluación de la amenaza se realizará por departamento dentro de la cuenca de estudio. La elección de la escala departamental responde a la necesidad de compatibilizar posteriormente la amenaza con los índices de Vulnerabilidad ya desarrollados en esa escala (Montes Quinteros y Vicario, 2026).

El periodo de análisis, será la serie completa disponible de los informes mensuales de la Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías, que corresponde al periodo 2020-2025.

4.1.2 Fuente de datos y procesamiento de la información

Debido a que los mapas oficiales no proveen capas descargables se sugiere la siguiente estimación cualitativa:

1. A partir del mapa, se observa la presencia de alguna categoría de sequía (sin sequía, sequía leve, moderada, severa) que afecte más del 40% del departamento (Ortega *et al.*, 2018).
2. En caso de que exista más de una, se le asigna aquella severidad que compone más del 50% del departamento. Si este criterio no es claro, se le asigna la de mayor severidad como criterio de precaución frente al riesgo.
3. Se registra la categoría mensual en el departamento sobre una matriz temporal departamental. De esta forma, se obtiene las frecuencias absolutas correspondientes a cada tipo de severidad de sequía por departamento.

4.1.3 Asignación de ponderación por severidad. Aporte metodológico INA

Con el fin de alinearse a los marcos internacionales, los cuales sugieren considerar no solo la ocurrencia de la sequía, sino también su intensidad en la estimación de la amenaza, se asignan ponderaciones numéricas a cada categoría:

Tabla 1. Esquema de asignación de peso por cada categoría de sequía.

Categoría	Peso
Sin sequía	0
Sequía Leve	1
Sequía Moderada	2
Sequía Severa	3

Las ponderaciones asignadas a las categorías de severidad (0, 1, 2 y 3) responden a un criterio lineal simple que permite reflejar diferencias relativas entre los niveles de intensidad de la sequía.

Dado que el presente trabajo constituye un análisis preliminar orientado al desarrollo de un índice de amenaza compatible con la información disponible, se optó por asignar dichos valores luego de realizar un análisis de sensibilidad del índice frente a distintos esquemas de ponderación (0; 1; 2; 3 - 0; 1; 1,5; 2 - 0; 1; 3; 5), con el fin de analizar cómo varían los patrones espaciales de amenaza.

Se obtuvieron clasificaciones relativamente estables para la mayoría de los departamentos, independientemente del esquema de ponderación adoptado. Los cambios más significativos se concentran en la cuenca del río Carcarañá, donde la distribución entre categorías de severidad es más heterogénea. La escala 1-3-5 amplifica el diferencial entre departamentos con alta frecuencia de eventos severos respecto de aquellos con predominio de eventos moderados. Por lo cual, se definió el uso del esquema de ponderación de la Tabla 1.

4.1.4 Índice de Amenaza

Por cada departamento dentro de la cuenca se calcula un índice de amenaza de sequía como frecuencia relativa ponderada según su nivel de intensidad:

$$Ia_j = \frac{\sum(P_i * A_i)}{N}$$

Siendo: la índice de amenaza del departamento j; A_i el número de meses con severidad i, P el peso ponderado según severidad i, N el número total de meses bajo análisis.

4.1.5 Escalamiento del índice

Este procedimiento permite obtener un índice en un rango de [0, 1], mediante la división por el valor máximo teórico: $IA_j = \frac{Ia_j}{P_{máx}}$

Siendo: IA_j índice de amenaza del departamento j escalado, la índice de amenaza del departamento j y $P_{máx}$ es el valor peso máximo posible.

Este paso facilita el posterior ajuste a una función de distribución probabilística y su integración con el índice de vulnerabilidad, siguiendo los lineamientos metodológicos del IMTA.

4.1.6 Clasificación

Los valores oscilan en un rango cerrado de [0, 1]. Para clasificar estas probabilidades en percentiles con categorías de igual tamaño, se ajustaron estos valores a una distribución normal y el resultado se multiplicó por 100 para expresar porcentajes.

Al ser 5 categorías de clasificación de probabilidad de la sequía, cada rango de percentil obedece el 20%, como se señala en la Tabla 2.

Tabla 2. Categorías de clasificación de probabilidad de sequía

Clasificación de probabilidad	Valor del percentil
Muy Baja	$0 < P \leq 20$
Baja	$20 < P \leq 40$
Media	$40 < P \leq 60$
Alta	$60 < P \leq 80$
Muy Alta	$80 < P \leq 100$

4.1.7 Mapeo de los índices de peligro por sequía

4.2 Análisis del riesgo por sequía

Para la evaluación del riesgo por sequía se tomarán las etapas desarrolladas por el IMTA que se describen a continuación:

4.2.1 Cálculo de los índices de riesgo a nivel departamental

$$IR = P \times IVG$$

Siendo: IR es el índice de riesgo por sequía; P es la probabilidad de ocurrencia de sequía; e IVG es el índice de vulnerabilidad global ante la sequía.

4.2.2 Ajuste de los índices a una función de distribución probabilística.

Los valores de los índices de riesgo oscilan en un rango cerrado de [0,1]. Para clasificar en categorías estos índices se ajustan a una distribución probabilística normal y el resultado se multiplica por 100 para expresarlos en porcentaje.

4.2.3 Clasificación de los índices de riesgo

Similar a lo realizado con los índices de peligro y vulnerabilidad. Se agrupan en cinco categorías donde cada una de ellas corresponde a un rango de percentil del 20%.

4.2.4 Mapeo de los índices de riesgo por sequía

4.3 Limitaciones y supuestos metodológicos

El presente estudio adopta un enfoque metodológico orientado a la aplicabilidad territorial, priorizando el uso de información oficial disponible a escala nacional y regional. En este sentido, la metodología propuesta se sustenta en una serie de supuestos y presenta determinadas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados.

La incorporación de la severidad mediante ponderaciones lineales constituye una simplificación metodológica destinada a reflejar diferencias relativas entre categorías de sequía sin introducir juicios expertos adicionales. Si bien este esquema permite mantener transparencia y reproducibilidad, no captura posibles relaciones no lineales entre intensidad del evento e impacto territorial.

Otra limitación de la metodología propuesta radica en que, el índice de amenaza no incorpora explícitamente la duración ni la persistencia de los eventos de sequía, sino únicamente su frecuencia e intensidad relativa. Eventos prolongados no pueden ser completamente diferenciados de eventos más breves pero recurrentes, lo que podría subestimar ciertas dinámicas del fenómeno. Se sugiere en el futuro estudiar sobre el peso que se le puede atribuir a la extensión temporal del fenómeno.

Finalmente, el índice de riesgo obtenido debe interpretarse como una herramienta comparativa relativa, útil para identificar patrones espaciales en el periodo de análisis de mayor o menor exposición y vulnerabilidad frente a sequías; siendo recomendable avanzar en el conocimiento de la temática en base a información sistemática y evaluando las particularidades locales de cada caso.

5 RESULTADOS: MAPAS DE AMENAZA Y RIESGO EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO

5. 1 Cuenca del río Carcarañá

El análisis de la amenaza frente a las sequías en la cuenca del río Carcarañá (Fig. 3) revela un patrón espacial con valores más elevados hacia el sector centro-este de la cuenca; con grado Muy alto se encuentran los departamentos de Iriondo, Caseros, San Lorenzo y San Jerónimo, pertenecientes a la provincia de Santa Fe. Los departamentos cordobeses de Gral. San Martín y Marcos Juárez presentan grado Alto, mientras que Calamuchita y Tercero Arriba se ubican en la categoría Moderada. Los valores más bajos se encuentran en el sector sur-oeste, en los departamentos pertenecientes a Córdoba.

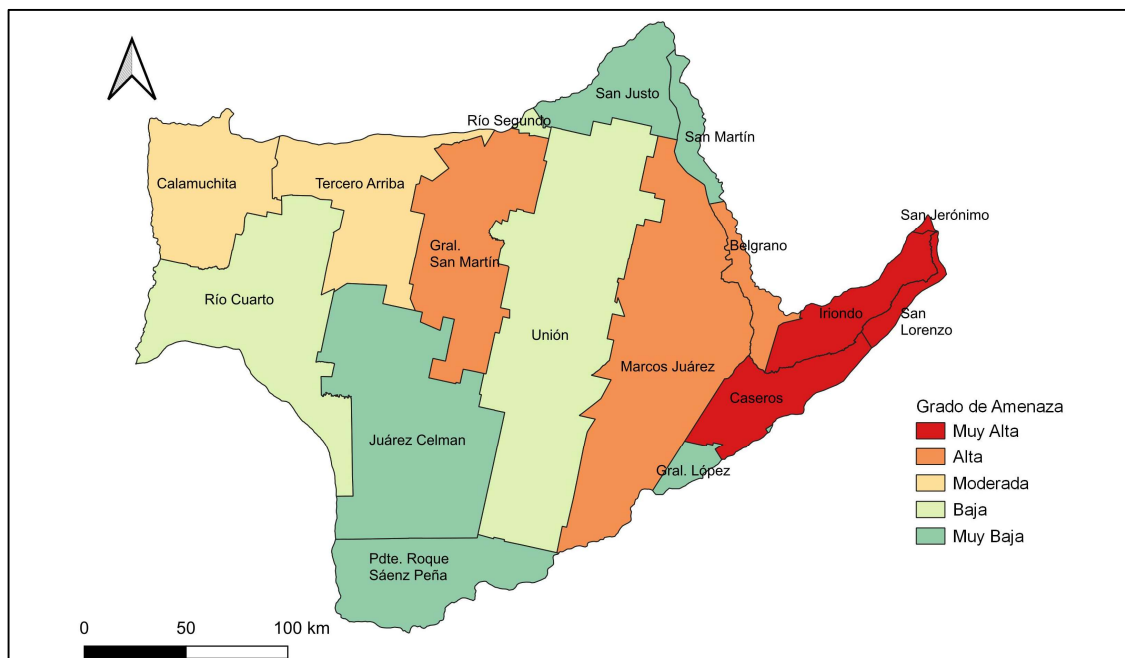


Fig. 3 Grado de Amenaza frente a las sequías en la cuenca del río Carcarañá

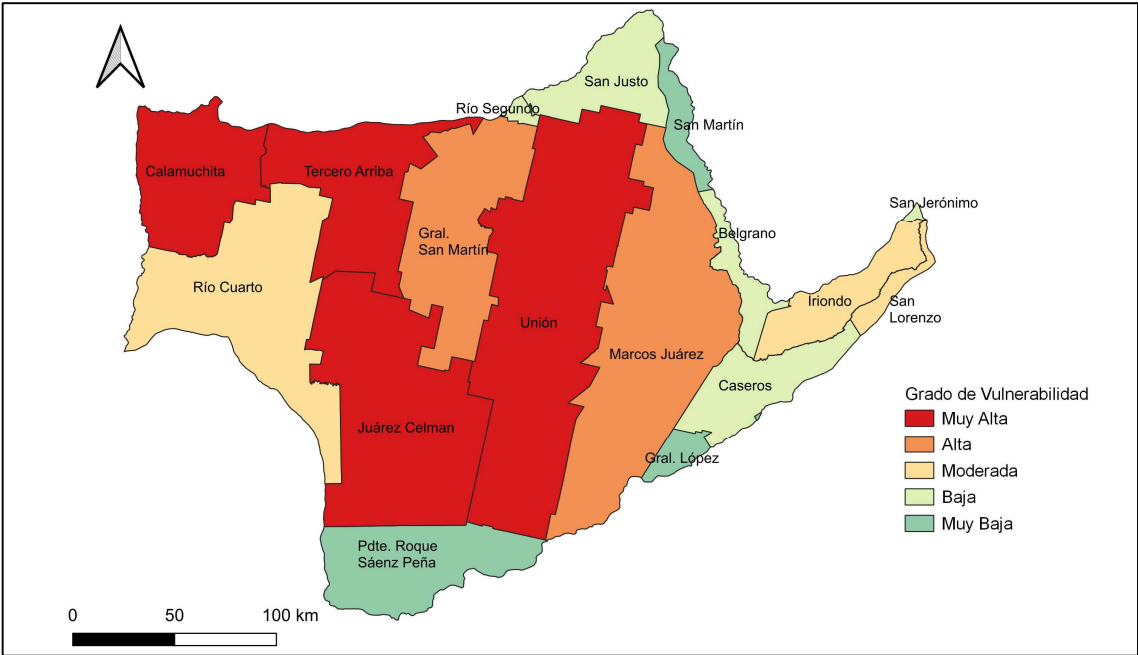


Fig. 4 Grado de Vulnerabilidad Global frente a las sequías en la cuenca del río Carcarañá (Fuente: Montes Quinteros y Vicario, 2026)

Al integrar la amenaza con el índice de Vulnerabilidad Global (Fig. 4), el patrón espacial del riesgo se modifica de manera notable (Fig. 5), evidenciando el factor determinante de la vulnerabilidad en la configuración territorial del riesgo.

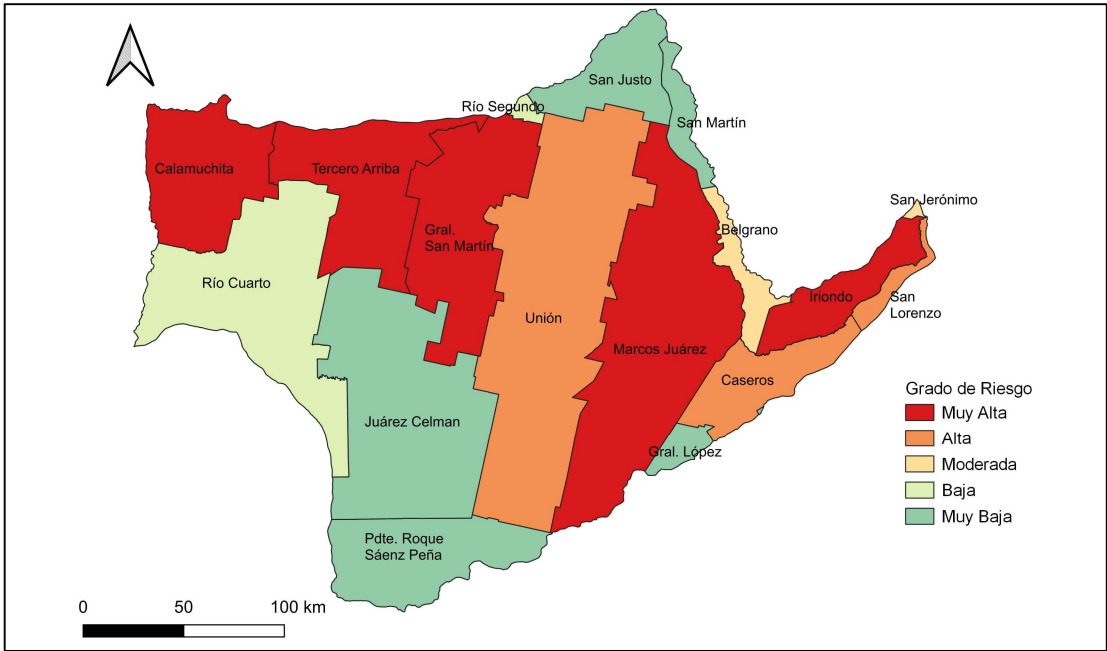


Fig. 5 Grado de Riesgo frente a las sequías en la cuenca del río Carcarañá

Los departamentos de Calamuchita y Tercero Arriba, que presentan amenaza Moderada, alcanzan el grado de riesgo Muy Alto debido a su elevada vulnerabilidad, constituyéndose como los sectores de mayor riesgo relativo de la cuenca. En el mismo nivel se ubican Marcos Juárez e Iriondo. Por su parte, departamentos santafesinos con amenaza Muy Alta como San Jerónimo y Belgrano descienden a categoría Moderada de riesgo, reflejando su menor vulnerabilidad frente al fenómeno. Caseros, también con amenaza Muy Alta, se clasifica igualmente como Moderada. Los departamentos del sector sur de Córdoba y el extremo este de Santa Fe mantienen los valores más bajos de riesgo, con grados Bajo y Muy Bajo.

5.2 Cuenca del río Limay

El análisis de la amenaza frente a las sequías en la cuenca del río Limay (Fig. 6) presenta un patrón espacial con los mayores grados concentrados en el sector cordillerano de la cuenca. El sector noreste de la cuenca presenta los valores más bajos, pertenecientes a los departamentos de El Cuy, Confluencia, Picunches, Picún Leufú y Zapala.

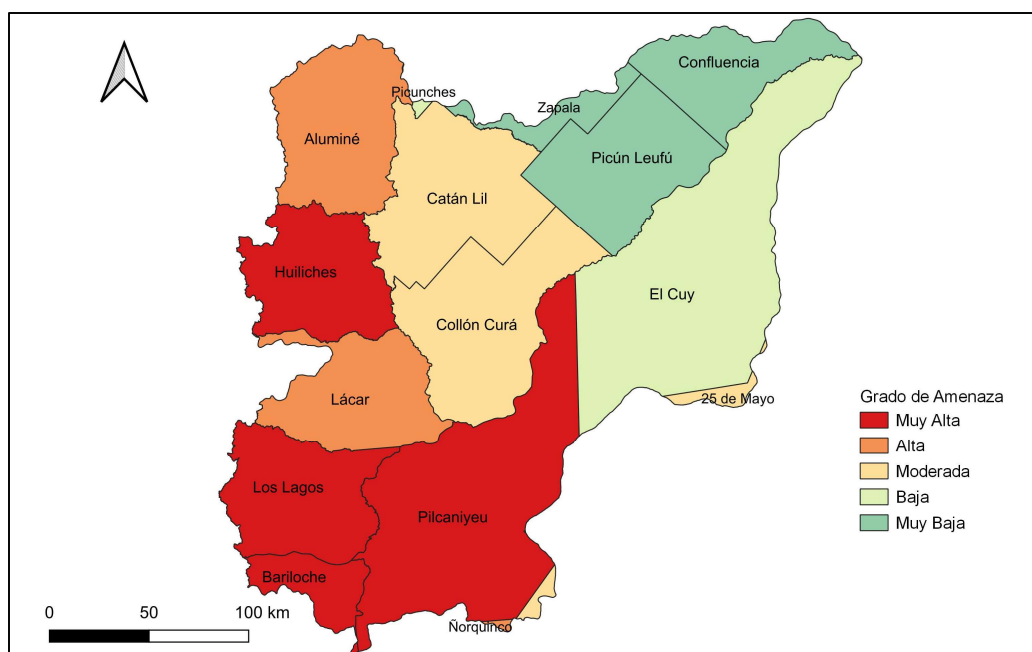


Fig. 6 Grado de Amenaza frente a las sequías en la cuenca del río Limay

La integración de la amenaza con el índice de vulnerabilidad global (Fig. 7) modifica el patrón espacial del riesgo (Fig. 8). Los departamentos de Bariloche, Huiliches y Pilcaniyeu conservan un nivel Muy Alto. Sin embargo, Lácar y Los Lagos descienden de categoría considerablemente. El sector noreste de la cuenca mantiene los grados más bajos, con Picún Leufú y Zapala conservando la categoría Muy Baja.

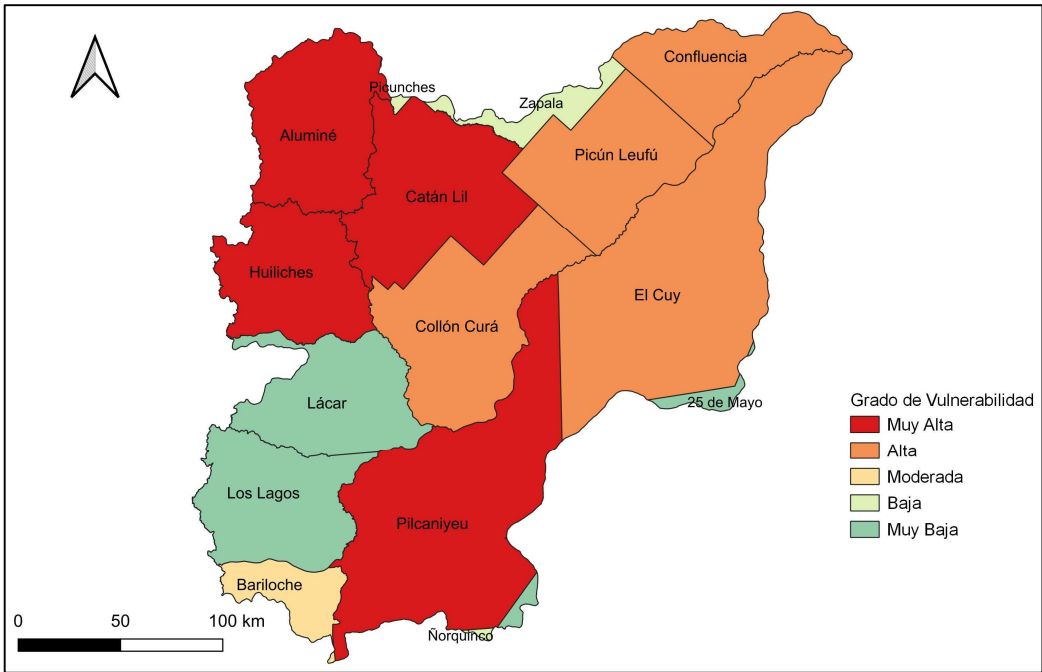


Fig. 7 Grado de Vulnerabilidad Global frente a las sequías en la cuenca del río Limay (Fuente: Montes Quinteros y Vicario, 2026)

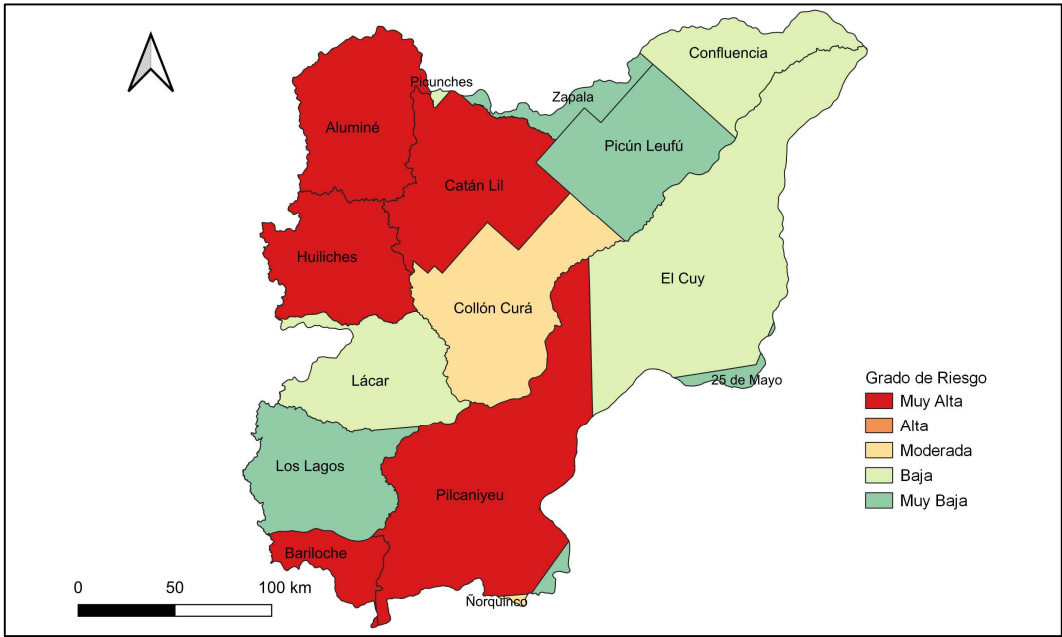


Fig. 8 Grado de Riesgo frente a las sequías en la cuenca del río Limay

5.3 Cuenca del río Bermejo

El análisis de la amenaza frente a las sequías en la cuenca alta del río Bermejo muestra un patrón espacial con los valores más elevados al este de la cuenca, correspondiente a los departamentos de Gral. José de San Martín, Orán, Ledesma, Santa Bárbara y San Pedro. Al oeste de la cuenca se encuentran los niveles más bajos.

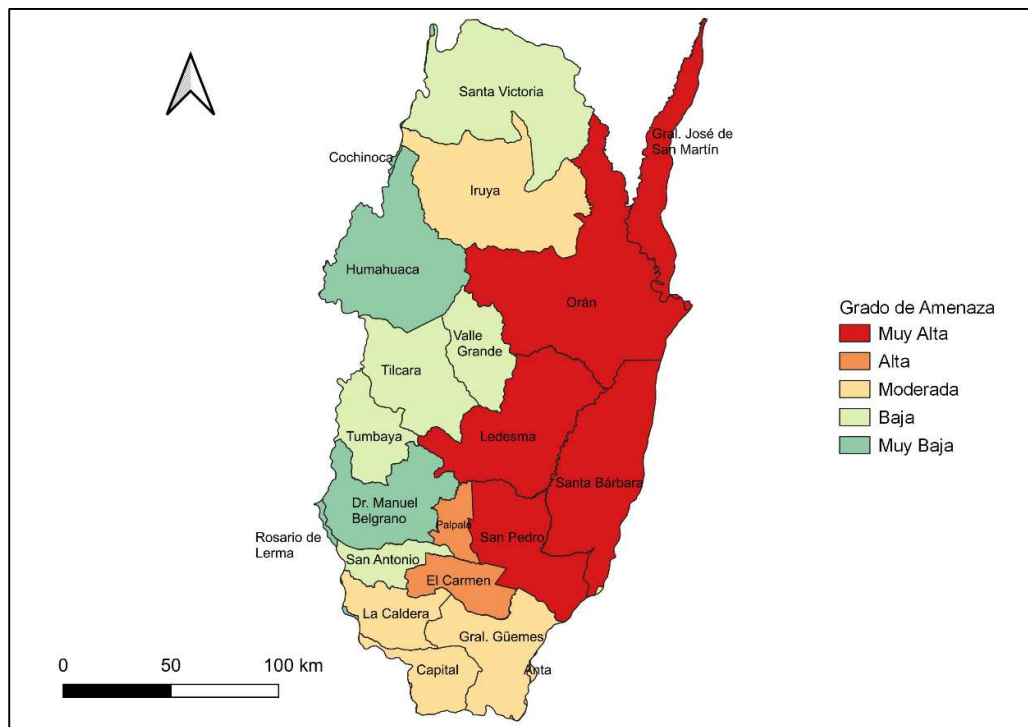


Fig. 9 Grado de Amenaza frente a las sequías en la cuenca alta del río Bermejo

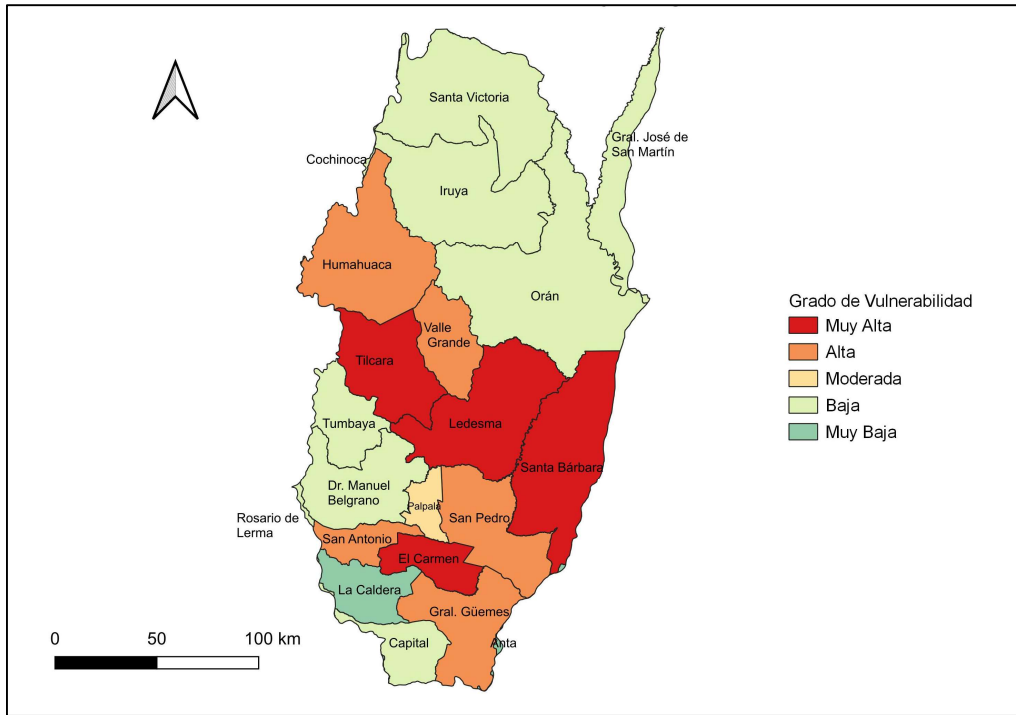


Fig. 10 Grado de Vulnerabilidad Global frente a las sequías en la cuenca alta del río Bermejo (Fuente: Montes Quinteros y Vicario, 2026)

Al integrar la amenaza con el índice de vulnerabilidad global (Fig. 10), se observa que el sector oeste de la cuenca conserva altos niveles de riesgo (Fig.). Los departamentos de Ledesma, Santa Barbara, San Pedro y El Carmen alcanzan el grado Muy Alto de riesgo, destacándose por encima del resto de los departamentos con alta amenaza. Orán, Palpalá y Gral. José de San Martín descienden al grado Alto, evidenciando una vulnerabilidad relativa menor que los anteriores. Tilcara, Capital y Gral. Güemes se clasifican en grado Moderado. Al oeste de la cuenca se mantienen ciertos departamentos con grado bajo de riesgo, lo que refleja que, pese a sus condiciones de aridez estructural, su vulnerabilidad en el contexto metodológico adoptado no se traduce en un riesgo elevado frente a las sequías en el período analizado.

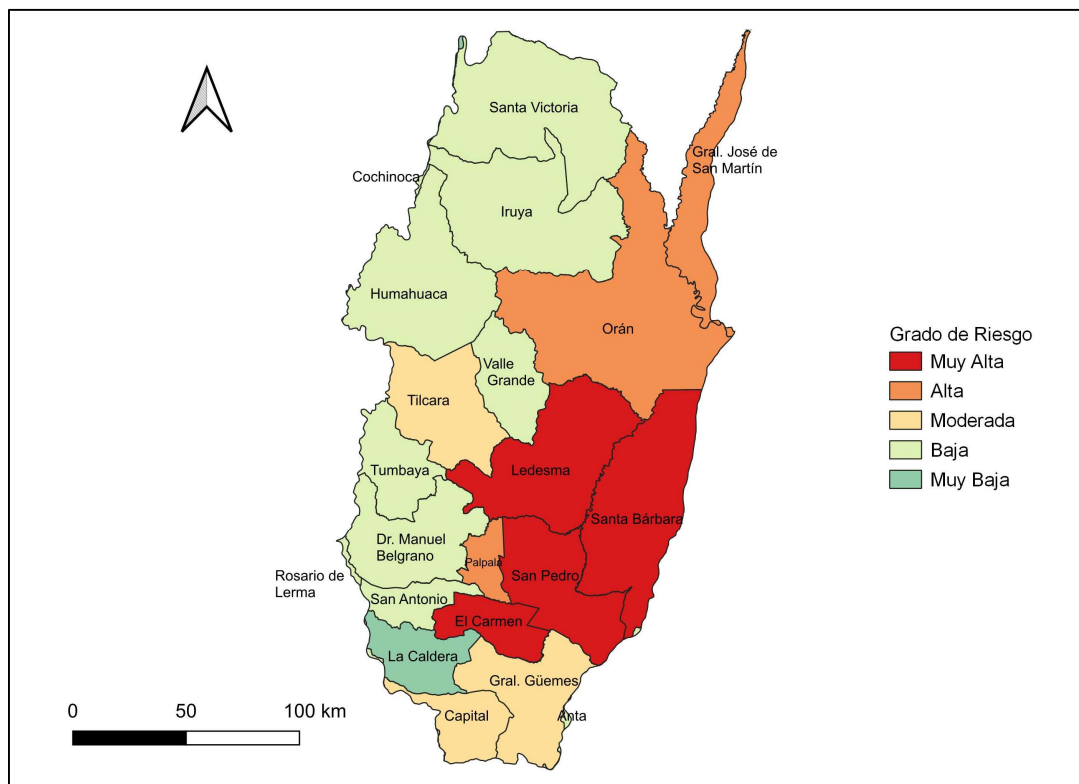


Fig. 11 Grado de Riesgo frente a las sequías en la cuenca alta del río Bermejo

6 CONCLUSIONES

El presente trabajo desarrolló una metodología de evaluación del riesgo por sequía aplicable a escala de cuenca hidrográfica en Argentina, integrando el análisis de la amenaza con evaluaciones de vulnerabilidad preexistentes. Se considera que el aporte metodológico contribuye al vacío existente entre los sistemas de monitoreo operativo y la evaluación territorial del riesgo.

La aplicación de la metodología en tres cuencas con características climáticas, geográficas y socioeconómicas contrastantes, Carcarañá, Limay y Bermejo, permitió obtener patrones espaciales de amenaza y riesgo diferenciados y territorialmente relevantes. En los tres casos, la integración de la vulnerabilidad modificó de manera significativa el patrón espacial de la amenaza, evidenciando que el riesgo no es una función directa de la frecuencia e intensidad de las sequías, sino que está fuertemente condicionado por las características socioeconómicas y ambientales de cada departamento.

En cuanto a la metodología, el análisis de sensibilidad realizado frente a distintos esquemas de ponderación confirmó la robustez general del índice de amenaza adoptado, con clasificaciones estables para la mayoría de los departamentos en las tres cuencas. Los departamentos sensibles al esquema de pesos corresponden genuinamente a situaciones de borde entre categorías, lo que refuerza la validez de la ponderación lineal seleccionada.

Asimismo, cabe destacar que el procesamiento de la información a partir de los mapas mensuales de la MNMS requirió una extracción manual que, si bien es viable para series acotadas, representa una limitación operativa para su aplicación sistemática. En este sentido, se identifica

como una necesidad el desarrollo de una integración digital entre los productos de monitoreo de la MNMS y las herramientas de evaluación territorial, ya sea mediante capas SIG descargables o una plataforma que automatice la extracción de categorías de sequía por unidad espacial, lo que potenciaría considerablemente la escalabilidad de la metodología propuesta.

Se espera que, la metodología desarrollada resulte replicable en otras cuencas de interés nacional, en la medida en que se disponga de los índices de vulnerabilidad correspondientes. Se recomienda avanzar en la incorporación de la persistencia temporal de los eventos de sequía como variable adicional, así como en la validación de los resultados mediante datos instrumentales independientes, con el fin de consolidar una herramienta operativa de evaluación de riesgo por sequía en Argentina.

7 BIBLIOGRAFÍA

Domínguez-Castro, F., Vicente-Serrano, SM, Tomás-Burguera, M., Peña-Gallardo, M., Beguería, S., El Kenawy, A., Luna, Y. y Morata, A. (2019). *Mapas de probabilidad de alta resolución espacial de la duración y magnitud de la sequía en España*. Nat. Peligros Sistema Tierra Ciencia, 19, 611–628, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-611-2019>.

Jianxia Chang, Yunyun Li, Yimin Wang, Meng Yuan. (2016). *Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River Basin, China*. Journal of Hydrology, Volume 540, 2016, Pages 824-834. ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.064>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416304267>)

Ministerio de Economía. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP). (2015). *Protocolo Interinstitucional de gestión de información ante la amenaza de Sequías meteorológicas y agrícolas en el Territorio argentino. Etapa: Preparación para la emergencia*. Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías. https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/d_edda/sequia/2022_protocolo_sequias.pdf

Montes Quinteros Marianela. (2025). *Análisis de vulnerabilidad a las sequías en tres cuencas hidrográficas de Argentina*. Prácticas Supervisadas carreras Ingeniería Civil y Ambiental. Facultad de Ciencia Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Acceso en sitio web: <http://hdl.handle.net/11086/559720>

Montes Quinteros, M. y Vicario, L. (2026). *Actualización del análisis de Vulnerabilidad a las sequías en tres cuencas hidrográficas de Argentina: cuenca del río Carcarañá, Limay y cuenca alta del río Bermejo*. Informe científico-técnico. Instituto Nacional del Agua (INA). Subgerencia Centro de la Región Semiárida. Sitio web: <https://www.ina.gov.ar/cirsa/index.php?seccion=20>

Nasrollahi, M., Khosravi, H., Moghaddamnia, A. et al. (2018). *Evaluación del índice de riesgo de sequía utilizando los índices de riesgo y vulnerabilidad a sequía*. Arab J Geosci 11, 606. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3971-y>

Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) y Consejo Internacional de Ciencia (ISC). (2025). *Perfiles de Información sobre Riesgos del UNDRR-ISC – Actualización 2025: MH0401* Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres sobre Sequías; Consejo Internacional de Ciencia. <https://www.undrr.org/terms/hips/MH0401>

Ortega-Gaucin, David; Cruz, Jesús & Castellano Bahena, Heidy. (2018). *Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/2192>

Piwowar, Arkadiusz & Kuźmiński, Łukasz. (2023). *Drought risk probabilistic models based on extreme value theory*. Environmental Science and Pollution Research. 30. 10.1007/s11356-023-29093-5.

Rossi, L., Wens, M., De Moel, H., Cotti, D., Sabino Siemons, A.-S., Toreti, A., Maetens, W., Masante, D., Van Loon, A., Hagenlocher, M., Rudari, R., Meroni, M., Isabellon, M., Avanzi, F., Naumann, G., Barbosa P. (2023). *European Drought Risk Atlas*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/608737, JRC135215.

Vicario, Leticia y Montes Quinteros, Marianela. (2025). *Avances en temática de vulnerabilidad a las sequías en Argentina*. Informe expeditivo. Instituto Nacional del Agua (INA). Subgerencia Centro de la Región Semiárida. Sitio web: <https://www.ina.gob.ar/cirsa/index.php?seccion=20>

Vicario, Leticia. (2025). *Análisis de distintos tipos de sequías a nivel regional en el territorio argentino (2020-2024)*. Informe científico-técnico. Instituto Nacional del Agua (INA). Subgerencia Centro de la Región Semiárida. Sitio web: <https://www.ina.gob.ar/cirsa/index.php?seccion=20>

World Bank. (2019). *Assessing Drought Hazard and Risk: Principles and Implementation Guidance*. Washington, DC: World Bank. Assessing Drought Hazard and Risk: Principles and Implementation Guidance.

World Bank Group. (2024). *Drought Risk and Resilience Assessment Methodology a Proactive Approach to Managing Drought Risk*.

World Bank. (2025). *Romania Drought Risk Assessment*. <http://hdl.handle.net/10986/42904>

World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP). (2016). *Handbook of Drought Indicators and Indices* (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva. http://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf

World Meteorological Organization (WMO). (2026). *Early Warnings for All Dashboard. Early Warnings for All Initiative*. <https://earlywarningsforall.org/site/early-warnings-all/dashboards/early-warnings-all-dashboard>. Fecha de acceso el 19 de febrero de 2026.

Xiangyang Zhang, Zening Wu, Huiliang Wang, Zhilei Yu, Yifan Chen. (2025). *A hydrological drought risk assessment method based on a four-dimensional Copula function model integrating development and recovery speed characteristics*. Ecological Indicators, Volume 177, 2025, 113751. ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113751>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X25006818>)