



Universidad de la República
Facultad de Ciencias
Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales

**Problemas de acceso al agua y vulnerabilidad a la sequía en el
espacio agrario de Canelones**

Thiago Sum Sologaistoa
(tsum@fcien.edu.uy)

Orientador:
Dr. Ismael Díaz

Tribunal:
Dra. Inés Gazzano, Dr. Feline Schön y Dra. Ofelia Gutiérrez

2025
Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales

Resumen

Las actividades agropecuarias han definido la historia económica, cultural y ecológica del Uruguay, y actualmente afrontan múltiples desafíos ante la creciente presión del cambio ambiental global y la intensificación agraria. En el espacio agrario de Canelones, donde las actividades de base ganadera concentran la mayor superficie productiva y predominan como fuente de ingreso, la sucesión de sequías durante la última década ha comprometido seriamente la producción agropecuaria. Esta tesis tiene como objetivo general contribuir al estudio de la vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera en Canelones entre 2015 y 2023. La primera etapa de la investigación consistió en identificar y caracterizar los eventos de sequía del departamento de Canelones, evaluar los patrones espacio-temporales de la exposición y sensibilidad, y analizar la respuesta de la vegetación durante los eventos de sequías identificados. Luego, se seleccionaron cuencas con alta exposición y sensibilidad a la sequía, y se analizó la vulnerabilidad a escala predial. La segunda etapa consistió en evaluar las estrategias de respuesta a la sequía y sus impactos, identificar las variables determinantes de la vulnerabilidad y construir grupos de productores. Los principales resultados de la tesis muestran la existencia de cinco eventos de sequía en el período 01/2015-05/2022, una concentración de altos niveles de exposición y sensibilidad al este-sureste de Canelones, y una tendencia al aumento de la sensibilidad a la sequía en el departamento. A escala predial, se identificó que dentro de las estrategias de respuesta a la sequía en la producción de base ganadera se prioriza asegurar el acceso al agua y alimentos para el ganado, aunque existen diferencias entre productores. Los productores empresariales combinan respuestas coyunturales y de preparación a la sequía, y en los familiares predominan las acciones coyunturales. Se diferenciaron cuatro grupos de productores según los niveles de vulnerabilidad a la sequía y se identificó que 5 de los 17 productores son altamente vulnerables debido a condiciones estructurales y de manejo productivo. El abordaje de vulnerabilidad presenta un amplio potencial para realizar diagnósticos ambientales a escala departamental y predial, paso inicial para avanzar en un ordenamiento ambiental del territorio y en una reconversión productiva apoyada en políticas estructurales de acceso al agua, tierra y capital.

Palabras Claves: sistemas ambientales; intensificación agraria; cambio ambiental; sequías; vulnerabilidad; producción ganadera; teledetección.

Agradecimientos

A la Universidad de la República que permitió continuar mi formación, y al equipo docente de la Maestría en Ciencias Ambientales.

A la Comisión Académica de Posgrado, por el respaldo económico a través de la beca de “Apoyo a docentes para estudios de posgrado”.

A los compañeros del Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio - IECA por el apoyo y entusiasmo durante el proceso de formación e investigación. Particularmente a Ismael Díaz, por su dedicación y trabajo para orientar la tesis y los desafíos de esta etapa.

A Bernardo y Rodrigo, por la compañía durante las salidas de campo, y a cada productor/a, trabajador/a, vecino/a que se mostró a disposición para realizar las entrevistas.

A las integrantes del tribunal, Dra. Inés Gazzano, Dr. Feline Schön y Dra. Ofelia Gutiérrez. Gracias por su lectura detenida, los comentarios y sugerencias, conceptuales y prácticas, sobre la tesis.

A cada investigador/a del área de las Ciencias Ambientales a quien se consultó para la implementación del Análisis Jerárquico Ponderado.

A INUMET e INIA por los datos brindados para el análisis de sequías meteorológicas.

A los amigos que me dio la Geografía y la vida, por la camaradería.

A mi familia, por su apoyo constante.

A Pía, por su cariño y compañía, gracias a la cuál pude culminar una etapa y con quien comenzaremos otra, junto a Manuel.

Índice

1. CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN GENERAL.....	6
1.1 Cambio Ambiental Global: Sequías e Intensificación Agraria	6
1.2 Vulnerabilidad de productores agropecuarios desde un enfoque ambiental	7
1.3 Contexto agropecuario de Uruguay y producción ganadera en Canelones	8
1.4 Objetivos de la tesis.....	10
1.5 Estrategia de investigación	11
1.6 Área de estudio	12
1.7 Organización de la tesis.....	14
2. CAPÍTULO II - AMENAZA METEOROLÓGICA, EXPOSICIÓN BIOFÍSICA Y SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA A LA SEQUÍA EN EL ESPACIO AGRARIO CANARIO	15
2.1 Introducción	15
2.2 Metodología	17
2.2.1 Identificación y caracterización de los eventos de sequía	18
2.2.2 Construcción de índices de exposición y sensibilidad	19
2.2.3 Índices de vegetación para el monitoreo de sequías.....	23
2.2.4 Técnicas de análisis espacial.....	24
2.3 Resultados y discusión	25
2.3.1 Sequías en Canelones	25
2.3.2 Relevancia de los factores biofísicos y socio-ecológicos	26
2.3.3 Características y dinámicas espacio-temporales de la exposición biofísica y sensibilidad socio-ecológica en el espacio agrario de Canelones	28
2.3.4 Comportamiento de índices de vegetación durante eventos de sequía	37
2.4 Conclusiones	49
3 CAPÍTULO III – VULNERABILIDAD A LA SEQUÍA DE PRODUCTORES DE BASE GANADERA EN LAS CUENCAS DE LOS ARROYOS SARANDÍ, EL BAGRE Y MOSQUITOS	51
3.1 Introducción	51
3.2 Metodología	54
3.2.1 Área de estudio.....	54
3.2.2 Relevamiento de productores y procesamiento de información biofísica	55
3.2.3 Identificación de variables determinantes de la vulnerabilidad.....	56
3.2.4 Agrupamiento de productores según vulnerabilidad a la sequía	57
3.3 Resultados y discusión	57
3.3.1 Variables explicativas de la vulnerabilidad	57
3.3.2 Grupos de productores según situación de vulnerabilidad a la sequía	60

3.3.3 Estrategias de respuesta a la sequía y resultados alcanzados	64
3.3.4 Implicancias prácticas y posibilidades para revertir la situación de vulnerabilidad	66
3.3.5 Percepción del impacto, estrategias implementadas y relevancia de las sequías	69
3.4 Conclusiones	70
4. Conclusiones generales de la tesis y perspectivas	73
Bibliografía	76
Anexo 1.1	91
Anexo 1.2	92
Anexo 1.3.....	93

1. CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Cambio Ambiental Global: Sequías e Intensificación Agraria

El cambio climático y los cambios en el uso del suelo representan las principales forzantes del cambio ambiental global (Foley et al., 2005; Meyfroidt et al., 2024; Vitousek, 1994) y del ciclo del agua en particular (Rockström et al., 2014). Estas forzantes se vinculan al aumento de la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos (Collins y Sutherland, 2022; Vicente-Serrano et al., 2020), y al reemplazo, fragmentación y pérdida de conectividad de los ecosistemas naturales ligado a la expansión e intensificación del modelo agrícola y silvícola industrial (Matson et al., 1997; Philpott, 2013; Tilman et al., 2001). Este escenario redundante en situaciones problemáticas, al favorecer la disminución de la capacidad de los (agro)ecosistemas para afrontar eventos de perturbación (Laliberté et al., 2010; Oliver et al., 2015) y el aumento de conflictos sociales por la apropiación diferencial, las formas de uso y valoración social del agua (Ribeiro et al., 2019).

En los espacios agrarios, los cambios en el uso del suelo impulsan transformaciones del sistema ambiental en dos dimensiones: horizontal, al expandir la frontera agropecuaria; y vertical, al incrementar la remoción de biomasa y el uso de insumos agrícolas por unidad de superficie (Achkar, 2017). La categoría *intensificación agraria* (IA) entendida como el proceso de “(auto)transformación del sistema ambiental, a través de una mayor presión sobre sus atributos estructurales y/o funcionales en la dimensión biofísica; configurando sistemas más simples, homogéneos y especializados” (Gazzano y Achkar, 2014)” permite abordar estas transformaciones, sus impactos biofísicos y repercusiones sociales. El proceso de IA estructura agroecosistemas altamente dependientes de insumos externos para regular las funciones ecosistémicas degradadas (Perfecto y Vandermeer, 2012; Vandermeer, 2011) debido a la homogeneización genética, de especies y paisajística (Sarandón, 2021). A su vez, la IA se sustenta en el incremento del consumo de agua, con lo cual aumenta la presión sobre ecosistemas acuáticos y terrestres, resultando en conflictos sociales (Falkenmark y Rockström, 2004; Zikos y Hagedorn, 2017).

Los eventos de sequía inciden fuertemente sobre el funcionamiento ambiental global (Zhao y Running, 2010) y representan un grave riesgo para las sociedades, situación condicionada por la probabilidad de ocurrencia de sequías en la región, la vulnerabilidad de la sociedad ante estos eventos y su capacidad de amortiguar los impactos (Wilhite y Pulwarty, 2017). La construcción de propuestas proactivas ante las sequías cumple un papel clave, dado que las poblaciones con poca preparación y capacidad de respuesta tienen mayor probabilidad de sufrir daños (Cunha et al., 2019; Wilhite, 2000). En este sentido, se asume el rol determinante de las acciones antrópicas en el desarrollo e impacto de las sequías (Van Loon et al., 2016).

Las sequías se originan a partir de un déficit en las precipitaciones (Wilhite y Glantz, 1985) y pueden diferenciarse, siguiendo un orden de incremento en intensidad y duración, en:

meteorológicas, cuando las precipitaciones son inferiores a la media climatológica; agronómicas, determinadas por la reducción del agua disponible en el suelo para cualquier fase de desarrollo de un cultivo; hidrológicas, en función de la disminución de los caudales de los ríos y acuíferos; y socioeconómicas, cuando la reducción de la oferta hídrica ocasiona daños en distintos grupos de la sociedad. El efecto de las sequías repercute en la oferta y flujo de servicios ecosistémicos que aseguran el bienestar del conjunto de la sociedad (Latterra et al., 2015; MEA, 2005). Particularmente, afecta servicios ecosistémicos hidrológicos fundamentales para la reproducción del sistema ambiental, donde destaca el soporte para el mantenimiento funcional de ecosistemas, la provisión de agua para consumo humano y usos productivos, la regulación de los flujos de agua y reducción del riesgo de inundaciones, y diversos servicios culturales (Smith et al., 2006).

1.2 Vulnerabilidad de productores agropecuarios desde un enfoque ambiental

Ante el desafío que supone analizar y comprender sistemas complejos como el ambiental, el abordaje de vulnerabilidad ofrece un marco teórico-conceptual operativo para evaluar el estado de situación de un sistema frente a una amenaza/forzante determinada (Latterra et al., 2015). El concepto de vulnerabilidad ha sido integrado en el estudio de sistemas ambientales consolidándose como un marco sólido para abordar el cambio ambiental global (Chapin et al., 2009; McCarthy et al., 2001) y los eventos de sequía en particular (González Tánago et al., 2016; Knutson et al., 1998). Desde un enfoque ambiental, la vulnerabilidad se define como la probabilidad de que un sistema acoplado en un contexto histórico-geográfico concreto sufra daños debido a la exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta¹ ante amenazas que inciden sobre la sociedad y su ambiente (Schröter et al., 2005).

El impacto de las sequías sobre los agroecosistemas depende de factores externos e internos al manejo de los bienes naturales (Nicholls et al., 2015). A nivel externo, la disminución de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración potencial son determinantes climáticas de la intensidad del evento, mientras que el tipo de suelo, la pendiente, los tipos de cobertura vegetal y usos del suelo regulan el efecto concreto de la sequía sobre el agroecosistema (Carminati y Javaux, 2020; Vicente-Serrano et al., 2013).

Dentro de la línea teórica-conceptual de la vulnerabilidad, existe un amplio desarrollo acerca del impacto de las sequías sobre productores agropecuarios (Liverman, 1993; Panda, 2017; Zarafshani et al., 2012). La exposición, primer componente de la vulnerabilidad, se define como el “nivel donde ecosistemas, población, infraestructuras y sistemas de producción se encuentran en zonas de incidencia potencial de las amenazas consideradas en el análisis” (Vera Rodríguez y Albarracín Calderón, 2017). La exposición a la sequía representa un

¹ Se utilizará este término en lugar del de “adaptación”, asumiendo que la acción antrópica cumple un rol activo en el desarrollo e impacto de las sequías (Van Loon et al., 2016).

componente estructural, y desde un enfoque ambiental está ligada a la regulación hidrológica según los atributos biofísicos del suelo (Weil y Brady, 2017). Complementan los componentes de la vulnerabilidad la sensibilidad (Knutson et al., 1998) y la capacidad de respuesta, las cuales dependen de la acción/intervención de la sociedad dentro del sistema ambiental (Díaz et al., 2019). La sensibilidad es definida como las condiciones que hacen al sistema más propenso a experimentar daños y ser afectado adversamente por la amenaza (Birkmann, 2006). Desde un enfoque ambiental, la sensibilidad a la sequía se vinculará a distintas características de la interacción socio-ecológica, como el estado de la vegetación natural, los usos y gestión del suelo, y por lo tanto a las dinámicas de intensificación agraria (Gazzano y Achkar, 2014). Finalmente, la capacidad de respuesta refiere a la movilización de recursos por parte de personas y/o grupos ante una determinada forzante externa, mediante estrategias individuales, colectivas y/o institucionales (Díaz et al., 2017). De esta manera, la capacidad de respuesta se encuentra fuertemente relacionada con las condiciones económicas, institucionales y socioculturales de cada productor agropecuario (Díaz et al., 2017).

Actualmente existe consenso en que la vulnerabilidad de productores rurales a eventos de sequías se vincula con aspectos biofísicos, productivos, económicos y culturales (Díaz et al., 2017; Gbetibouo y Ringler, 2009). Sin embargo, continúa en discusión la importancia de cada variable, adquiriendo fundamental importancia los controles locales de estos procesos que se definen por las interrelaciones entre las condiciones biofísicas del suelo del predio y las estrategias productivas de manejo del agroecosistema (Gbetibouo y Ringler, 2009; González Tánago et al., 2016). Por otro lado, los análisis de vulnerabilidad en general no incluyen las relaciones de poder entre agentes territoriales y su incidencia en el acceso diferencial a los bienes naturales (tierra y agua). La creciente preocupación por la apropiación desigual del agua con fines agropecuarios (Allan et al., 2014; Dell'Angelo et al., 2018; Rulli et al., 2013), que se desarrolla en paralelo a la concentración de la tierra e intensificación en el uso del suelo (Mehta et al., 2012; Rulli et al., 2013), visibiliza un proceso tradicionalmente excluido de los análisis de vulnerabilidad que podría determinar y/o potenciar los impactos de las sequías sobre los productores agropecuarios.

1.3 Contexto agropecuario de Uruguay y producción ganadera en Canelones

En Uruguay, los cambios en el uso del suelo y la intensificación agraria acaecida en las últimas tres décadas han incrementado la presión sobre la estructura y el funcionamiento del sistema ambiental al alterar, reemplazar y modificar la cobertura vegetal natural (Achkar et al., 2011; Díaz et al., 2018b; Gazzano et al., 2019; Gazzano y Achkar, 2014). Estas transformaciones han sido impulsadas por la territorialización de actores empresariales vinculados a la lógica del agronegocio (Achkar et al., 2008; Arbeletche et al., 2012; Díaz y Sum, 2024), que consolidan procesos de acaparamiento de tierras y agravan las desigualdades históricas en el control de los bienes naturales (Díaz et al., 2023; Oyhançabal y Narbono, 2019; Piñeiro, 2014).

Luego del ciclo de expansión de sistemas agrarios intensivistas (Achkar, 2017) finalizado en 2015, el espacio agrario uruguayo registró un ciclo de retracción de la agricultura industrial hasta 2019 marcada por la disminución del precio de los commodities agrícolas, el alto precio de la tierra y la aplicación de la nueva normativa de planes de uso y manejo del suelo² (Bianco et al., 2021; Figueredo et al., 2019). El plan de acción impulsado por el gobierno nacional para superar estas condicionantes se acopla a las recomendaciones políticas, económicas y técnicas de instituciones financieras internacionales de potenciar el riego agropecuario para incrementar la productividad y la competitividad (BM y MGAP, 2015; Kennedy Freeman et al., 2015). Esta estrategia marca una continuidad en la cual la expansión del agronegocio se sustenta en el “subsidio ambiental” del uso y contaminación del agua, transfiriendo las externalidades negativas hacia el conjunto de la población uruguaya (Santos et al., 2022). Situación que, desde 2017³, se concede por vías legales mediante el derecho al control directo vía privatización (Márquez et al., 2022). Así, desde el marco interpretativo del paradigma de “intensificación sostenible”, los gobiernos nacionales han optado atender a los problemas ambientales, agrarios y alimentarios abriendo paso a la mercantilización del agua por parte del agronegocio (Santos, 2020).

A nivel nacional, la problemática de las sequías está presente dentro de la agenda pública debido a sus impactos sobre el sector agropecuario (MGAP y FAO, 2013), y presenta el desafío de generar herramientas de planificación territorial y productiva que disminuyan la vulnerabilidad de los productores de base ganadera (Díaz, 2018), al ser actores claves en la economía nacional. En Canelones, distintos organismos del gobierno departamental han avanzado en un diagnóstico e instrumentación de políticas para atender los impactos de los eventos de sequía sobre la producción agropecuaria familiar (DDR, 2020; IC, 2018; PNUMA – IC, 2011). A su vez, el Plan de Ordenamiento Rural Ruralidades Canarias establece un conjunto de prioridades y restricciones para los usos agropecuarios del departamento en función del estado ambiental, las características socio-culturales y productivas de cada región (IC, 2018).

El departamento de Canelones presenta particularidades que le otorgan un rasgo diferencial dentro del contexto agropecuario del Uruguay. En el medio rural de Canelones vive el 28% de la población rural uruguaya (INE, 2011), y es caracterizado por la fuerte presencia de productores pequeños-medianos, mucho de ellos familiares⁴, orientados a la producción de alimentos (MGAP, 2014). La proximidad al principal mercado consumidor de alimentos del país, las propiedades biofísicas del suelo y la cultura productiva de su población rural han consolidado territorios de la soberanía alimentaria (Sum y Díaz, 2023). A su vez, a partir del trabajo de la población rural y programas desarrollados a nivel institucional y científico-tecnológico, se han impulsado distintos proyectos orientados a maximizar la potencialidad de

² <https://www.impo.com.uy/bases/otras-normas-originales/397-2018>

³ <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/19553-2017>

⁴ En la tesis se plantea esta categoría en términos socio-económicos, según la predominancia de trabajo familiar o asalariado, y no en términos de la normativa del MGAP.

estos territorios promoviendo la función social de la agricultura, la autonomía y sustentabilidad (DDR, 2020; INIA, 2019).

Tras una larga historia productiva y ante el deterioro del sistema ambiental ocasionado por procesos de intensificación agraria durante las últimas tres décadas, el espacio rural canario ha sido escenario de disputas entre distintos actores locales, fundamentalmente en torno a la degradación de la calidad del agua (Ferreira, 2019; La Diaria, 2019; Presidencia de la República Oriental del Uruguay, 2017; Sassano et al., 2019; Sum, 2021), lo cual se torna más complejo durante eventos de sequía. Debido al rol central que tiene el acceso a agua de calidad y en cantidad para sostener la actividad agropecuaria, y la creciente presión asociada a la intensificación agraria y al cambio climático, resulta necesario avanzar en el estudio de las múltiples causas que explican la vulnerabilidad de los productores rurales frente a eventos de sequía. En este marco, la hipótesis orientadora de la investigación plantea que la intensificación del espacio agrario de Canelones es un factor determinante de la vulnerabilidad a la sequía de los productores de base ganadera. Las preguntas a responder son: (1) ¿qué relación mantienen las sequías, las condiciones biofísicas y el estado del sistema ambiental en el espacio agrario de Canelones? (2) ¿cómo es el comportamiento espacial de la exposición biofísica, sensibilidad socio-ecológica y la respuesta del sistema ambiental a la sequía en el espacio agrario de Canelones? (3) ¿qué variables determinan la vulnerabilidad a la sequía? (4) ¿cómo incide la escala espacial en las determinantes de la vulnerabilidad a la sequía? (5) ¿qué estrategias de respuesta a la sequía implementan los productores de base ganadera? (6) ¿cómo incide el acceso, control y uso del agua en la vulnerabilidad a la sequía de estos productores?

1.4 Objetivos de la tesis

El objetivo general de la tesis es contribuir al estudio de la vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera en Canelones entre 2015 y 2023.

En este contexto, los objetivos específicos son:

- a) Caracterizar la amenaza meteorológica generada por los eventos de sequía en el espacio agrario de Canelones.
- b) Caracterizar y evaluar la exposición biofísica y la sensibilidad socio-ecológica del espacio agrario de Canelones.
- c) Analizar las estrategias de respuesta a la sequía implementadas por productores de base ganadera localizados en zonas de alta exposición y/o sensibilidad a la sequía.
- d) Evaluar los factores que determinan la vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera localizados en zonas de alta exposición biofísica y/o sensibilidad a la sequía.

1.5 Estrategia de investigación

La estrategia de investigación integró un abordaje multiescalar y multidimensional estructurado en dos etapas complementarias para evaluar la vulnerabilidad desde un enfoque ambiental (Figura 1.1). Para ello, se abordó la dimensión meteorológica, biofísica y socio-ecológica para todo el departamento de Canelones. Posteriormente, se abordó la vulnerabilidad a escala de predio agropecuario en una zona caracterizada por la alta exposición y sensibilidad a la sequía.

En primer lugar, se analizó la vulnerabilidad del departamento de Canelones durante el período 01/2015-05/2022. El período de estudio definido se sustenta en la disponibilidad de imágenes satelitales y en la serie temporal de datos meteorológicos de INUMET e INIA, la cual se solicitó y accedió en el primer semestre de 2022 para dar comienzo a esta primera etapa de la investigación. Para ello, se identificaron y caracterizaron los eventos de sequía (amenaza), y se identificó el conjunto de variables que permite definir la exposición y sensibilidad a la sequía. A continuación, se procedió a ponderar estas variables que componen la vulnerabilidad y construir índices espacialmente explícitos dentro de Canelones, para evaluar las dinámicas espacio-temporales de la amenaza, la exposición y la sensibilidad. Luego, para culminar la primera etapa de la investigación, se analizó el vínculo entre la sensibilidad a la sequía y la respuesta del sistema ambiental, mediante la aplicación de índices espectrales. A partir de la caracterización espacial y temporal de la amenaza, exposición y sensibilidad dentro de Canelones se definieron cuencas que, al ser unidades funcionales de los procesos hidrológicos, permitieron trabajar en la segunda etapa en el estudio de la vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera.

En la segunda etapa se evaluó la vulnerabilidad a la sequía a escala predial en zonas de alta exposición y sensibilidad a la sequía. Para ello se relevó información de la estructura agraria, prácticas productivas, estrategias de respuesta e impactos de las sequías de 17 productores de base ganadera. Mediante técnicas de análisis multivariado se identificaron las variables determinantes de la vulnerabilidad a la sequía, y se construyeron grupos de productores en función de su situación de vulnerabilidad y estructuras agrarias. Por último, se evaluó la diversidad de estrategias de respuesta e impactos de acuerdo a los grupos generados. Esto permitió construir un modelo de vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera ubicados en zonas de alta exposición y sensibilidad a la sequía.

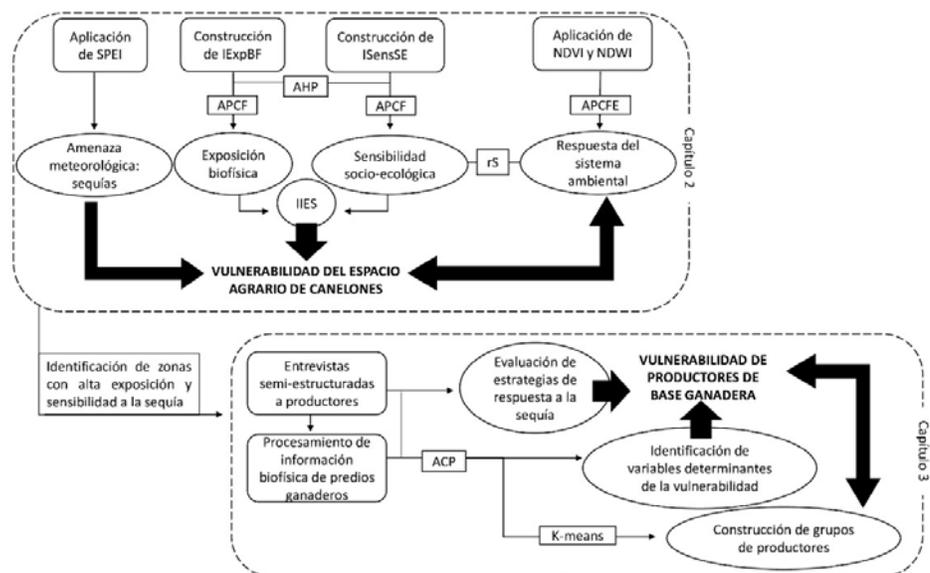


Figura 1.1 Estrategia general de investigación. SPEI: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, IexpBF: Índice de Exposición Biofísica, ISensSE: Índice de Sensibilidad Socio-Ecológica, IIES: Índice Integrado de Exposición y Sensibilidad, NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, NDWI: Normalized Difference Water Index, AHP: Análisis Jerárquico Ponderado, ACPF: Análisis de Puntos Calientes/Fríos, APCFE: Análisis de Puntos Calientes/Fríos Emergentes, rS: correlación de Spearman, ACP: Análisis de Componentes Principales y análisis clúster método K-means: K-means.

1.6 Área de estudio

El departamento de Canelones se ubica al sur de Uruguay, tiene una superficie de 4.536 km² y limita con los departamentos de Montevideo, San José, Florida, Lavalleja y Maldonado. La temperatura media anual es de 16,8 °C y cuenta con una precipitación acumulada anual media de 1.163 mm⁵. Dentro de los tipos de suelos del departamento predominan Vertisoles y Brunosoles, de textura franca-arcillo-limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados, que se caracterizan por una historia de uso intensiva al ser la primera región en incorporar la agricultura en el país (CONEAT, 1979). El 88,7% de la superficie del departamento es destinada a usos agropecuarios, 6% lo ocupan humedales y bosques ribereños, 5% residencias urbanas e infraestructura, y la superficie restante es ocupada por cuerpos de agua (DINACEA, 2022). De las 520.173 personas que viven en Canelones, el 90,5% reside en zonas urbanas y 9,5% en zonas rurales (INE, 2011).

El espacio agrario de Canelones, que abarca el 2% de la superficie agropecuaria nacional, se caracteriza por concentrar el 28% de la población rural y el 17% de las explotaciones agropecuarias del país (INE, 2011; MGAP, 2014). Dentro de este 17% predominan las unidades

⁵ <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>

productivas menores de 100 hectáreas (MGAP, 2014), siendo el 91% del total de las explotaciones. Los vacunos de carne representan la principal fuente de ingreso de las explotaciones agropecuarias comerciales (29,8% del total de explotaciones), seguido de la horticultura (en 20,3% de las explotaciones) (IC, 2024).

Ante el escenario de intensificación agraria acaecido desde comienzos del siglo XXI (Achkar et al., 2011b; Bianco et al., 2021; Domínguez et al., 2018), los agroecosistemas de base ganadera uruguayos registran cambios en sus distintos componentes (Picasso et al., 2014). Dentro de la diversidad agropecuaria de Canelones, la ganadería vacuna concentra la mayor superficie productiva (49,6 % del total), con un promedio de cabezas de ganado por hectárea que supera la media nacional (0,94 frente a 0,72) (DDR, 2020). Canelones se acopla al patrón nacional de evolución del número de cabezas de ganado vacuno, ocurrido desde comienzos del siglo XXI, con una tasa de crecimiento mayor a la tendencia nacional (Figura 1.2). A escala nacional, la superficie mejoramientos forrajeros⁶ se mantiene por debajo del 20% de la superficie pastoreada en el período 2000-2020, mientras que en Canelones esta proporción es casi el doble (Figura 1.3).

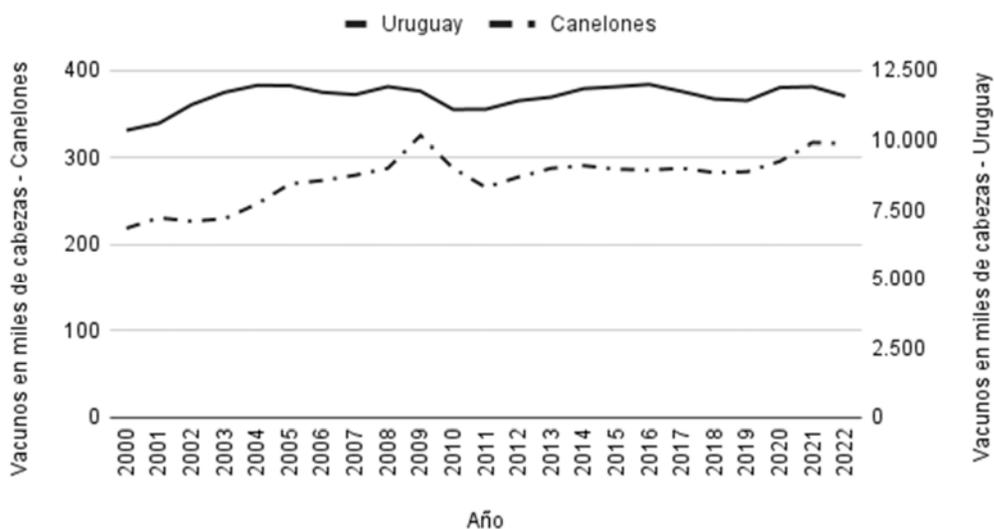


Figura 1.2 Total de vacunos en miles de cabezas. Eje vertical izquierdo corresponde a Canelones y el derecho a Uruguay. Fuente DIEA (2003, 2007, 2012, 2017, 2023).

⁶ Incluye: Praderas artificiales, campo mejorado, campo fertilizado y cultivos forrajeros anuales.

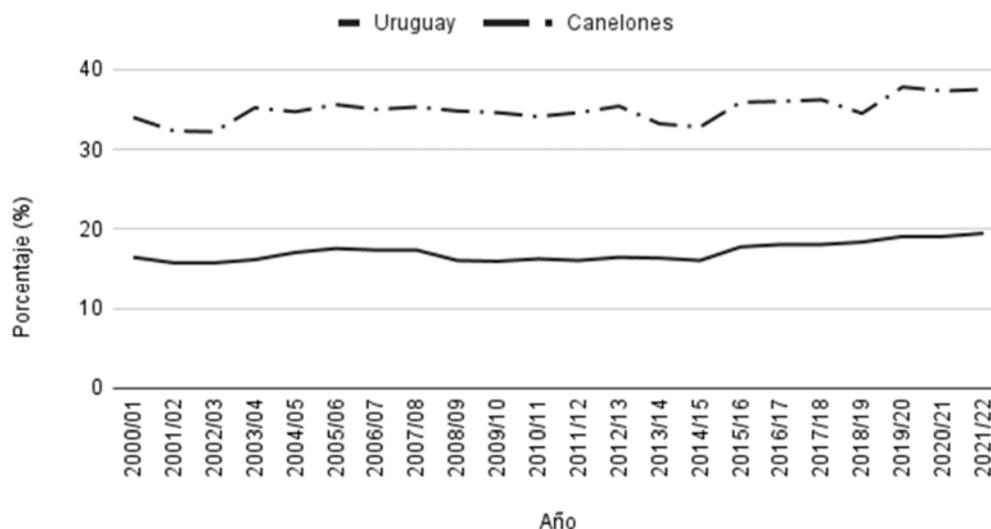


Figura 1.3 Proporción de la superficie total con mejoramiento forrajeros (en porcentaje). Fuente DIEA (2003, 2007, 2012, 2017, 2023).

La prolongación de condiciones de sequía meteorológica en Canelones durante 2019-2022 generó niveles de sequía agronómica e hidrológica, lo cual determinó un escenario complejo para la población y producción rural del departamento. Ante esta situación, se generaron distintas acciones de respuesta desde el ámbito institucional para afrontar los impactos económico-productivos y sociales de la sequía, destacándose la construcción y limpieza de aguadas, la entrega de agua y bebederos para consumo animal, la limpieza de pozos de brocal, y la entrega de bombas y tanques de agua para uso doméstico (IC, 2024).

1.7 Organización de la tesis

La tesis se organiza en cuatro capítulos. El capítulo I contiene la introducción general y los objetivos de la tesis. En el capítulo II se abordan los dos primeros objetivos específicos, analizando en el departamento de Canelones las sequías como principal amenaza meteorológica, y la distribución espacial de la exposición biofísica y la sensibilidad socio-ecológica a la sequía. En el capítulo III se abordan los objetivos específicos tres y cuatro, analizando a escala de predio la vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera ubicados en zonas de alta exposición biofísica y sensibilidad socio-ecológica a la sequía (identificadas en el capítulo II). Finalmente, en el capítulo IV se presentan las conclusiones generales y las principales perspectivas que surgen de la tesis.

2. CAPÍTULO II - AMENAZA METEOROLÓGICA, EXPOSICIÓN BIOFÍSICA Y SENSIBILIDAD SOCIOECOLÓGICA A LA SEQUÍA EN EL ESPACIO AGRARIO CANARIO

2.1 Introducción

En el escenario actual de cambio ambiental global, las sequías representan una forzante determinante sobre sistemas socio-económicos basados en la producción agropecuaria (Vicente-Serrano et al., 2020). El sector agropecuario mantiene una fuerte dependencia de las condiciones climáticas y biofísicas, y es el sector económico más afectado por las sequías (Wilhite et al., 2014). Los impactos de las sequías se encuentran regulados en primera instancia por las características de las amenazas y las condiciones biofísicas, socio-económicas y productivas de cada región (Wilhelmi y Wilhite, 2002), y posteriormente por la capacidad de implementar estrategias colectivas e institucionales para amortiguar sus efectos (Turner et al., 2003).

Los índices de sequía meteorológica son una herramienta útil para delimitar y caracterizar con precisión la amenaza que representan las sequías (Gupta et al., 2011; Gupta y Jain, 2018). Los índices de sequía meteorológica más usados han sido el Palmer Drought Severity Index (PDSI; Alley, 1984) y el Standardised Precipitation Index (SPI; Mckee et al., 1993). El SPI permite trabajar a múltiples escalas temporales según la variabilidad de la precipitación, mientras que, el PDSI calcula el balance hídrico del suelo incorporando además el efecto de la temperatura a una escala temporal de 9-12 meses. Por lo tanto, el SPI no capta la creciente demanda hídrica dada por el incremento de la temperatura media global que lleva al aumento de la evapotranspiración durante las sequías (Zhao et al., 2022), y el PDSI no permite estudiar sequías a distintas escalas temporales. El Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) supera las limitantes de estos dos índices e integra sus potencialidades, al basarse en el balance hídrico mensual entre la precipitación y evapotranspiración potencial y mantener un carácter multi-temporal. Así, el SPEI incorpora el efecto del calentamiento global y permite discutir la propagación de la sequía meteorológica a nivel agronómico, hidrológico y socio-económico.

El abordaje de vulnerabilidad ofrece un marco operativo para estudiar los impactos y las capacidades del sector agropecuario para afrontar las sequías (González Tánago et al., 2016). La exposición, primer componente de la vulnerabilidad, se define como el “nivel donde ecosistemas, población, infraestructuras y sistemas de producción se encuentran en zonas de incidencia potencial de las amenazas consideradas en el análisis” (Vera Rodríguez y Albarracín Calderón, 2017). La sensibilidad, segundo componente de la vulnerabilidad, aborda las condiciones que vuelven al sistema más propenso a experimentar daños y ser afectado adversamente por la amenaza (Birkmann, 2006). En este sentido, a diferencia de la

exposición, la sensibilidad se encuentra ligada a la (auto) transformación de la naturaleza mediante el trabajo humano. La capacidad de respuesta, tercer componente de la vulnerabilidad, se asocia a las acciones (individuales, colectivas y/o institucionales) implementadas con el fin de amortiguar el impacto negativo de la amenaza (Díaz et al., 2017). En este sentido, la capacidad de respuesta al igual que la sensibilidad se vincula a la acción antrópica, pero enmarca acciones de respuesta específicas ante una amenaza concreta.

La intensificación agraria representa un componente estructurante del funcionamiento de los sistemas ambientales al aumentar los niveles de remoción de biomasa, aplicar un uso intensivo de insumos agrícolas y degradar los ecosistemas naturales (de Graaff et al., 2019; Tschardt et al., 2005). La intensificación agraria compromete seriamente la capacidad de las sociedades de captar servicios ecosistémicos (Rasmussen et al., 2018). Desde una perspectiva crítica, distintos autores jerarquizan que la intensificación agraria se vincula con el aumento de la desigualdad en el control y uso de la tierra y el agua (Dell'Angelo et al., 2018; Mehta et al., 2012; Rulli et al., 2013). Durante las últimas tres décadas se registra una creciente intensificación agraria en Uruguay, asociada a la implantación del modelo agrícola industrial y forestal, que configuran agroecosistemas más simples, homogéneos y especializados (Díaz et al., 2018b; Gazzano y Achkar, 2014). Estas transformaciones se vinculan con la territorialización del agronegocio (Achkar et al., 2008; Arbeletche et al., 2012; Díaz y Sum, 2024) y el consecuente agravamiento de las desigualdades en el control de la tierra (Díaz et al., 2023; Oyhançabal y Narbondo, 2019; Piñeiro, 2014).

Pese a los avances realizados en la construcción de un cuerpo teórico-metodológico específico para el estudio de la vulnerabilidad a la sequía, se requieren mayores avances en relación al diseño de modelos operativos que permitan su aplicación y, de esta forma, proponer alternativas para revertir los puntos débiles (Vargas y Paneque, 2017). A su vez, se afronta el desafío de jerarquizar los factores geofísicos, productivos, económicos y culturales que determinan la vulnerabilidad a las sequías (Díaz et al., 2017; Gbetibouo y Ringler, 2009). En este marco, técnicas para evaluar el peso de distintas variables, como el análisis jerárquico ponderado (AHP) (Saaty, 1980), han sido puestos a prueba para la construcción de modelos de vulnerabilidad aplicado a sujetos y contextos concretos (por ejemplo: Alharbi et al 2022; Ekrami et al 2016; Palchaudhuri y Biswas, 2016). A su vez, los avances en el desarrollo de geotecnologías, técnicas de sensoramiento remoto e índices de vegetación han fortalecido el uso de herramientas para identificar y monitorear las actividades agropecuarias (Chen et al., 2008), siendo particularmente útiles para monitorear las sequías (Peters et al., 2002; Szymula, 2014). Los índices de vegetación son complementarios a los índices de sequía meteorológica, ya que permiten analizar el comportamiento espacio-temporal de la vegetación.

La ocurrencia de múltiples sequías durante el último quinquenio comprometió seriamente el consumo de agua humano y la producción agropecuaria en Canelones, espacio agrario destacado por su historia productiva, densidad de población rural y productores familiares y su rol la producción de alimentos para consumo interno (IC, 2024). Considerando que la

vulnerabilidad de productores rurales a eventos de sequías se vincula con aspectos biofísicos, productivos, económicos y culturales (Díaz et al., 2017; Gbetibouo y Ringler, 2009), abordar las condicionantes meteorológicas, biofísicas y socio-ecológicas del espacio agrario de Canelones ante las sequías representa un paso fundamental para afrontar el impacto de esta amenaza en un departamento clave dentro del contexto agrario nacional, y que actualmente no cuenta con información específica sobre su situación de vulnerabilidad.

El objetivo de este capítulo es evaluar la amenaza meteorológica, la exposición biofísica, la sensibilidad socio-ecológica y el comportamiento del espacio agrario de Canelones ante las sequías en el período 01/2015-05/2022. En este capítulo se abordan los objetivos específicos i y ii de la tesis mediante una estrategia que integra el uso de datos de precipitación, evapotranspiración potencial, tipos de suelo, pendientes, y de usos del suelo/coberturas vegetales. Las preguntas que orientaron este capítulo fueron: ¿qué frecuencia y magnitud han tenido los eventos de sequía meteorológica en Canelones en el período 01/2015-05/2022?, ¿qué características presenta el contexto biofísico y socio-ecológico del espacio agrario de Canelones?, ¿cuáles son las variables determinantes de la vulnerabilidad dentro de este espacio agrario?, y ¿cómo se vinculan la exposición biofísica y sensibilidad socio-ecológica con la evolución de índices de vegetación durante los eventos de sequía?

2.2 Metodología

La estrategia metodológica de este capítulo consistió en la construcción y aplicación de índices para evaluar los componentes determinantes de la vulnerabilidad a la sequía dentro de Canelones: la amenaza meteorológica, exposición biofísica, sensibilidad socio-ecológica y respuesta del sistema ambiental (Figura 2.1). El relevamiento de datos se basó en la sistematización de información biofísica de los suelos, el uso de técnicas de teledetección y consultas a académicos. Se implementaron índices de sequía, análisis jerárquico ponderado y análisis geoestadísticos. Este abordaje permitió identificar y caracterizar la evolución temporal de las sequías, considerando cambios en las precipitaciones y la evapotranspiración potencial; analizar la distribución espacial de la exposición biofísica en base a información de los suelos e identificar patrones espacio-temporales de la sensibilidad en base a clasificaciones de usos/coberturas vegetales; y evaluar la respuesta del sistema ambiental durante eventos de sequía mediante el uso de índices de vegetación estimados por sensoramiento remoto. Esta información fue recopilada a partir del desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

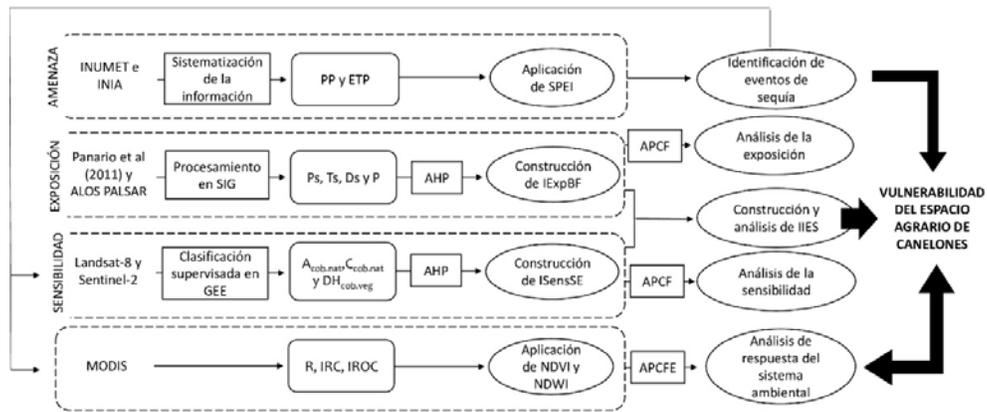


Figura 2.1 Estrategia de investigación del capítulo II. Precipitación: PP, evapotranspiración potencial: ETP, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), profundidad del suelo: Ps, textura del suelo: Ts y drenaje del suelo: Ds, pendiente del terreno: P, Análisis Jerárquico Ponderado: AHP, Índice de Exposición Biofísica: IExpBF, Análisis de Puntos Calientes/Fríos: ACPF, área ocupada por vegetación natural: Acob.nat, conectividad de la cobertura vegetal natural: Ccob.nat, demanda hídrica de la vegetación: DHcob.veg, Índice de Sensibilidad Socio-Ecológica: ISensSE, Índice Integrado de Exposición y Sensibilidad: IIES, reflectancia de las bandas espectrales del Rojo: R, Infrarrojo Cercano: IRC e Infrarrojo de Onda Corta: IROC, Normalized Difference Vegetation Index: NDVI, Normalized Difference Water Index: NDWI, Análisis de Puntos Calientes/Fríos Emergentes (PCFE).

2.2.1 Identificación y caracterización de los eventos de sequía

Para identificar y caracterizar los eventos de sequía se utilizó el Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010). El SPEI es un índice ampliamente utilizado a nivel internacional para el análisis de sequías meteorológicas, destacándose por permitir trabajar con distintas escalas temporales e incorporar la incidencia del calentamiento global en la capacidad evaporativa de la atmósfera (Beguería et al., 2014; Kamruzzaman et al., 2022; Raja y Gopikrishnan, 2022; Vicente-Serrano et al., 2010). Se basa en el cálculo del balance hídrico mensual (precipitación menos evapotranspiración potencial) que se ajusta mediante una distribución log-logística de tres parámetros y se convierten en desviaciones estándar con respecto a los valores medios, y se representa en la escala temporal mensual seleccionada. Los valores resultantes del SPEI se interpretan como una medida relativa del exceso ($SPEI > 1$) o déficit ($SPEI < -1$) hídrico respecto a las condiciones climáticas normales de la región y periodo bajo estudio. Se jerarquizó la intensidad de la sequía de acuerdo a la propuesta de Wang et al (2014) (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Niveles de sequía propuesto por Wang et al (2014).

Valores	Nivel de sequía
$-1,5 < SPEI \leq -1$	moderada
$-2 < SPEI \leq -1,5$	severa
$SPEI \leq -2$	extrema

Se obtuvieron datos históricos de precipitación y evapotranspiración potencial generados por INUMET^{7,8} (Estaciones: San Antonio, San Jacinto y Soca) e INIA⁹ (Estación Las Brujas) para el departamento de Canelones, correspondientes al período comprendido entre enero de 2015 y mayo de 2022. La influencia de cada estación meteorológica dentro del espacio agrario de Canelones se estimó por medio del método de “polígonos de Thiessen” (Maderrey, 2005) trabajando en ambiente SIG. Luego, se identificaron los eventos de sequía a escala temporal de 4 meses, considerando que la propagación de sequías meteorológicas en sequías agronómicas se vincula a escalas temporales del SPEI mayores a 3 meses (Chen et al., 2024; Díaz, 2018; Peña-Gallardo et al., 2019; Yao et al., 2022). Para ello, se utilizó el paquete “spei” versión 1.8.1¹⁰ en el programa Rstudio (Beguería y Vicente-Serrano, 2023). Posteriormente, se caracterizó la intensidad y duración de cada evento a partir de la categorización de sequías realizada por Wang et al (2014), considerando el inicio de un evento cuando el valor del SPEI es menor a -1 y el fin cuando retorna a un valor superior a -1.

Para evaluar tendencias del SPEI en el espacio agrario de Canelones, se recurrió al test de Mann–Kendall (Kendall, 1975) modificado (MMK) (Hamed y Ramachandra Rao 1998) a nivel departamental y en las estaciones meteorológicas. Esta modificación permite trabajar con series de datos que no cumplan el supuesto de independencia. Aplicar el MK tradicional en series de datos temporales con autocorrelación, como es el caso de los hidrometeorológicos, aumenta la probabilidad de detectar tendencias cuando no las hay (o viceversa). En cambio, el MMK incorpora un factor corrector en el estadístico Z para evaluar la tendencia de datos que presentan autocorrelación temporal en la serie de datos. El MMK ha sido aplicado en numerosas investigaciones para detectar tendencias en datos hidrometeorológicos (Kamruzzaman et al., 2022; Khanmohammadi et al., 2022; Raja y Gopikrishnan, 2022).

2.2.2 Construcción de índices de exposición y sensibilidad

Con el objetivo de evaluar la composición interna de los factores de exposición y sensibilidad, y de evaluar el peso de cada componente en la vulnerabilidad a la sequía a escala de espacio agrario, inicialmente se realizó una sistematización de las variables que inciden en la sequía de acuerdo a antecedentes nacionales e internacionales. Posteriormente, se recurrió a un AHP basado en consultas vía mail a investigadores de las áreas de agronomía, geografía, ecología e ingeniería ambiental. Finalmente, un total de ocho expertos respondieron la encuesta, compuesta por un formulario explicativo y una tabla donde asignar el peso de cada factor. Se aplicó el AHP debido a su potencial para asignar la relevancia de una variable dependiente sobre otra variable dependiente del modelo; en este caso, los factores que definen la vulnerabilidad a la sequía. Los datos fueron procesados en una calculadora de

⁷ <https://www.inumet.gub.uy/institucional/transparencia/solicitud-informacion-meteorologica>

⁸ Se descartó la información proveniente de la base de Carrasco, dado que representó un 8% del departamento de Canelones y su área de influencia se centra en áreas urbanas y suburbanas.

⁹ <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>

¹⁰ <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html>

prioridades¹¹ y se consideraron las respuestas con un ratio de consistencia mayor al 90%. Los siete factores puestos a consideración fueron: profundidad, textura y drenaje del suelo, pendiente del terreno, área ocupada por cobertura vegetal natural, conectividad entre parches de cobertura vegetal natural y demanda hídrica de la vegetación. Se aplicó el AHP para ponderar de manera específica los factores vinculados a la exposición biofísica y sensibilidad socio-ecológica, y luego se construyó un índice espacialmente explícito para cada uno de estos dos componentes de la vulnerabilidad. Finalmente se integró la información de las variables ponderadas sin diferenciar el componente al cual corresponde cada factor para generar un índice integrador de la exposición y sensibilidad.

2.2.2.1 Estimación de la exposición biofísica: tipos de suelos y pendientes

Se construyó un índice de exposición biofísica (I_{Exp}) espacialmente explícito para Canelones con una resolución espacial de 1x1km¹². Se ordenaron las subclases de los factores biofísicos (textura, profundidad y drenaje del suelo, y pendiente del terreno), en función del rol que ejercen sobre la escorrentía y el almacenamiento de agua en el suelo, considerando que los suelos livianos, de menor profundidad y con mayor drenaje y pendiente son más propensos a sufrir los efectos de la sequía (Weil y Brady, 2017). Debido a que estos factores están ligados a atributos estructurales, con poca variación a corto-mediano plazo, la exposición biofísica será constante en el período de estudio.

La información edafológica fue obtenida de las capas vectoriales de Panario et al (2011), mientras que el dato de pendientes se generó mediante el uso de un Modelo Digital de Elevación (ALOS PALSAR, resolución: 12,5m). Los rangos de las pendientes fueron divididos en subclases de acuerdo a los criterios del MGAP-RENARE (2014). Luego, se normalizaron los valores en una escala de 1 a 5, donde 5 representa la mayor exposición (suelos livianos, superficiales, con drenaje excesivo y alta pendiente) (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Nivel de exposición a las sequías según subclases de drenaje, textura, profundidad del suelo y pendiente del terreno.

Factor/Exposición	Baja = 1	Media-baja = 2	Media = 3	Media-alta = 4	Alta = 5
Textura del suelo	pesada	-	media	-	liviana
Profundidad del suelo	profundo	-	medio	-	superficial
Drenaje del suelo	nulo	lento	moderado	rápido	excesivo
Pendiente del terreno	<0,5%	0,5 – 1,5%	1,5 – 2,5%	2,5 – 3,5%	>3,5

¹¹ <https://bpmmsg.com/ahp/ahp-calc.php>

¹² La resolución espacial se definió teniendo como objetivo principal identificar patrones en un espacio agrario heterogéneo, como es el caso de Canelones.

Los valores asignados para cada celda corresponden a la proporción de la celda ocupada por cada subclase multiplicado por el valor de exposición correspondiente (Ec. 2.1).

$$\text{Ec.2.1 } \text{Exp}_i = \sum((\text{Sebf}_i/\text{Sc}_i) * \text{Nebf}.s_i) * \text{Pf}$$

Siendo: Exp_i = Nivel de exposición biofísica en la celda i

Sebf_i = Superficie de la subclase de exposición biofísica ebf para la celda i

Sc_i = Superficie total de la celda i

$\text{Nebf}.s_i$ = Nivel de exposición biofísica ebf de cada subclase s en la celda i

Pf = Ponderador del nivel de exposición biofísica del factor f

2.2.2.2 Estimación de la sensibilidad socio-ecológica: estado de la cobertura vegetal natural e intensificación agraria

La sensibilidad a la sequía, al estar sujeta a los cambios que realizan los productores agropecuarios en el espacio agrario, varía espacial y temporalmente. Se realizaron cinco clasificaciones de coberturas vegetales/ usos del suelo, asociadas a los cinco eventos de sequía identificados. Se realizaron clasificaciones supervisadas (Chuvieco, 2016) utilizando la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017) con el método “smileCart” (Clasificación and Regression Trees; Breiman et al., 1984) para discriminar las distintas coberturas vegetales/ usos del suelo en función de su reflectancia en distintas bandas del espectro electromagnético. Las categorías discriminadas fueron: bañados/humedales, bosque nativo, campo natural, pradera mejorada, agricultura, suelo desnudo, canteras, roca, arena, caminería, zona urbana, agua, forestación de especies exóticas y fruticultura. Para los dos eventos de sequía registrados en 2015 se utilizó una colección de imágenes Landsat-8 (resolución geométrica de 30x30m), y para los tres eventos restantes, dos correspondientes a 2020 y uno a 2021, se utilizaron colecciones de imágenes Sentinel-2 (resolución geométrica de 10x10m, no disponibles en 2015). A los efectos de diferenciar pastizales, praderas artificiales y cultivos agrícolas, se recurrió al uso de imágenes correspondientes a los meses de pre-siembra y pos-cosecha de los cultivos de verano o invierno.

Una vez identificados los usos/coberturas vegetales, en primer lugar, se relevó a escala de celda el estado de la vegetación natural a través de la representatividad y conectividad. Para evaluar la representatividad, se calculó la proporción de superficie ocupada por coberturas vegetales naturales mediante la relación entre la sumatoria de la superficie de bosque nativo, humedales y campo natural y la superficie total de la celda. Luego, se aplicó el índice de Vogelmann (Vogelmann, 1995) para evaluar la conectividad en función de la relación área-perímetro de los parches de coberturas vegetales naturales. Los valores de dicho índice varían entre 1 y 5, donde valores altos se asocian a niveles elevados de conectividad, y valores bajos corresponden a una mayor discontinuidad entre los parches naturales remanentes. Las

subclases de ambos factores – representatividad y conectividad de los parches de cobertura vegetal natural – se ordenaron siguiendo el criterio de que a menor superficie y conectividad mayor es el nivel de sensibilidad (Tabla 2.3).

Luego de estimar la representatividad y conectividad de la cobertura vegetal, se construyó un índice que vincula las coberturas vegetales/ usos del suelo con la intensidad agraria y demanda hídrica. En términos empíricos, el grado de intensidad agraria de determinada unidad del paisaje (celda de 1x1km en este caso) puede evaluarse en función de la superficie ocupada por cada cobertura vegetal/ usos del suelo y el nivel de intensidad agraria (Díaz et al., 2018b) o demanda hídrica asociada a cada cobertura/ uso. De acuerdo a Martínez Faira (2013), la evapotranspiración total de la cobertura forestal de especies exóticas se ubica entre 829 y 1318 mm año⁻¹, mientras que, los valores correspondientes a los pastizales varían entre 670 y 1220 mm año⁻¹. En un estudio realizado por Giménez y Petillo (2011) para los principales cultivos de secano de verano de Uruguay (soja, maíz, girasol y sorgo), identificaron que la evapotranspiración de los cultivos muestra un rango de variación de 455 a 836 mm año⁻¹. El trigo, principal cultivo agrícola de invierno, mantiene un comportamiento similar al de la soja¹³ (Allen et al., 2006). Por otro lado, las praderas plantadas en Uruguay presentan un menor consumo hídrico que los cultivos agrícolas de secano (Sawchik, 2012). A diferencia de los pastizales y la forestación exótica, los cultivos agrícolas presentan un consumo hídrico relativamente alto durante el desarrollo del cultivo, y suele estar asociado a una rotación con pradera o a un doble cultivo, lo cual determina que tanto durante el periodo de crecimiento como a nivel anual supere la demanda hídrica de coberturas de campo natural y de praderas plantadas. Por estos motivos, se ordenaron los usos/coberturas en un sentido donde la forestación de especies exóticas y frutales comprende el grupo de mayor demanda hídrica, seguido de la agricultura (Tabla 2.3); las praderas mejoradas, ligadas a la modificación del ecosistema (potencialmente predominante) de pastizales naturales, se ubican en un nivel intermedio; luego, el campo natural/pastizales, que puede estar influenciado por pastoreo, se asocia a un nivel de intensidad medio-bajo. Por último, el nivel de intensidad más bajo comprende a coberturas vegetales naturales, que suponen un nivel de influencia antrópica baja, como ser humedales y bosque nativo.

Tabla 2.3 Valores asignados a las subclases de representatividad y conectividad de la vegetación natural, y demanda hídrica de la vegetación.

Factor/Sensibilidad	Baja = 1	Media-baja = 2	Media = 3	Media-alta = 4	Alta = 5
Representatividad	>80%	60-80%	40-60%	20-40%	<20%
Conectividad	>4,5	3,5-4,5	2,5-3,5	1,5-2,5	<1,5
Demanda hídrica	Humedales y bosque nativo	Campo natural	Praderas mejoradas	Agricultura de secano	Forestación de especies exóticas y frutales

¹³ Pero resulta en una menor demanda total dado que durante el invierno los niveles de evapotranspiración potencial son menores a los del verano.

El cálculo del índice de sensibilidad se expresa en la ecuación 2.2:

$$\text{Ec.2.2 } \text{Sens}_i = \sum((\text{Sse}_i/\text{Sc}_i) * \text{Nse.s}_i) * \text{Pf}$$

Siendo: Sens_i = Nivel de sensibilidad socio-ecológica en la celda i

Sse_i = Superficie de la subclase de sensibilidad socio-ecológica se para la celda i

Sc_i = Superficie total de la celda i

Nse.s_i = Nivel de sensibilidad socio-ecológica se de cada subclase s en la celda i

Pf = Ponderador del nivel de sensibilidad socio-ecológica del factor f

2.2.3 Índices de vegetación para el monitoreo de sequías

Para estudiar la respuesta del sistema ambiental ante los eventos de sequía se utilizaron dos índices de vegetación (IV), el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y Normalized Difference Water Index (NDWI). Estos IV informan sobre distintos aspectos del estado de la vegetación. El NDVI (Ec. 2.3) es un índice espectral, que combina las bandas del infrarrojo cercano (IRC) y el rojo (R) (Sellers, 1985; Tucker, 1979), ampliamente utilizado como indicador de la productividad primaria neta aérea al estar relacionado positivamente con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el tejido verde (Gamon et al., 1995; Huang et al., 2021; Sellers et al., 1992). Los valores altos de NDVI expresan un mayor vigor y capacidad fotosintética de la vegetación, y bajos valores expresan la ausencia de vegetación vigorosa o la presencia de enfermedades, estrés hídrico u otros problemas. Paralelamente al uso predominante del NDVI como indicador espectral del comportamiento vegetal, se ha propuesto el NDWI (Gao, 1996) (Ec. 2.4) como indicador independiente para monitorear específicamente el estado hídrico de la vegetación. El NDWI combina las bandas del IRC e infrarrojo de onda corta (IROC), siendo sensible a cambios en las moléculas de agua líquida del dosel vegetal que interactúan con la radiación solar incidente. El NDWI muestra gran potencial, ya que varía ante cambios en la cantidad total de agua líquida en las hojas apiladas, por lo cual se ha expandido su uso (Bolton y Friedl, 2013; Gao et al., 2015; Ji et al., 2009). Si bien el NDWI surge como alternativa al NDVI, ambos IV son complementarios y no se sustituyen entre sí, ya que el primero es un indicador robusto del contenido de agua en la vegetación y el segundo de la capacidad fotosintética. La interdependencia entre ambos IV se debe a que gran parte de los procesos fisiológicos de las plantas, como la germinación de la semilla, absorción de minerales, transpiración, fotosíntesis, respiración y crecimiento, dependen del agua (Chavarria y Pessoa, 2012; levinsh, 2023). De esta manera, el NDVI y NDWI permiten monitorear la productividad vegetal y estimar el contenido de agua de la vegetación, en respuesta al clima local y las propiedades del suelo que controlan la disponibilidad de agua (Sánchez-Ruiz et al., 2014).

$$\text{Ec.2.3 NDVI} = (\text{IRC-R}) / (\text{IRC+R})$$

$$\text{Ec 2.4 NDWI} = (\text{IRC-IROC}) / (\text{IRC+IROC})$$

Se obtuvieron los valores medios mensuales del NDVI y NDWI mediante el procesamiento de colecciones de imágenes satelitales MODIS^{14,15} en la plataforma GEE. Se generaron datos para cada evento de sequía, considerando los tres meses anteriores al primer mes con SPEI-4 meses < -1. La información fue sistematizada a escala de celda de 1x1km para todo Canelones. Posteriormente, se procedió a realizar una caracterización y discusión del comportamiento de los IV durante cada evento de acuerdo a los grupos de sensibilidad socio-ecológica. Para relacionar el índice de sensibilidad socio-ecológica y el comportamiento del NDVI y NDWI se recurrió al análisis de correlación no-paramétrica de Spearman (rS). Se trabajó con celdas donde la superficie ocupada por cobertura vegetal era mayor al 75% de la celda, para minimizar el error generado por la reflectancia de infraestructuras y residencias urbanas.

2.2.4 Técnicas de análisis espacial

Se aplicaron un conjunto de técnicas de análisis espacial complementarias en el software ArcGIS 10.8 (Scott y Janikas, 2010), con el objetivo de identificar patrones en la distribución de los índices de exposición, sensibilidad y exposición-sensibilidad (IIES). En una primera instancia se recurrió a análisis de autocorrelación espacial (Moran, 1950) para evaluar la existencia de patrones espaciales en los niveles de los tres índices dentro del área de estudio. Al constatarse autocorrelación espacial, se aplicó en análisis G General de Getis-Ord (Getis y Ord, 1992) para evaluar si la intensidad de agrupamiento espacial corresponde a la concentración de valores altos o bajos (z-score mayor o menor a cero, respectivamente).

Luego, se aplicó el estadístico Getis-Ord G_i^* (Getis y Ord, 1992) como herramienta para identificar aglomeraciones espaciales estadísticamente significativas de valores altos y valores bajos. Los puntos calientes señalan unidades espaciales (UE, celdas en este caso) con valores altos rodeadas de UE con valores altos, mientras que UE con valores bajos rodeadas de UE con valores bajos determinan la existencia de puntos fríos. Para identificar UE con condiciones similares de sensibilidad y exposición-sensibilidad se generaron grupos de celdas dentro del espacio agrario de Canelones en función de clústeres espaciales (Anselin, 1995; Long et al., 2010). Este método permite agrupar UE de acuerdo a la similitud en el comportamiento de una determinada variable numérica, en este caso los niveles de sensibilidad y del IIES. El número de grupos a construir debe captar la heterogeneidad de las UE y evitar disgregarse en un número excesivo de grupos, por lo cual se consideró el número óptimo sugerido. Por último, se analizó el patrón espacio-temporal del NDVI y NDWI en el

¹⁴ <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

¹⁵ De acuerdo a la propuesta original de Gao (1996), el NDWI se define a partir de la ecuación $(\rho(0.86 \mu m) - \rho(1.24 \mu m)) / (\rho(0.86 \mu m) + \rho(1.24 \mu m))$, que en MODIS se corresponde a la diferencia normalizada de las bandas 2 y 5.

departamento de Canelones durante los meses con sequía mediante el análisis de puntos calientes/fríos emergentes (ESRI, 2021). Este método integra el estadístico Getis-Ord G_i^* para identificar la ubicación y significancia de puntos calientes/fríos, y el test Mann–Kendall para detectar tendencias temporales en cada ubicación.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Sequías en Canelones

Entre enero de 2015 y mayo de 2022 se registraron cinco eventos de sequía (inicio: SPEI < -1, finalización: SPEI > -1) que difieren en su duración, intensidad y magnitud (Figura 2.1). El evento de mayor magnitud se registró en 2015, cuando el SPEI-4 meses alcanzó valores menores a -1 desde abril hasta julio y, de acuerdo a la categorización de los niveles de sequía realizada por Wang et al (2014), durante los últimos tres meses se registraron niveles de sequía severa (Tabla 2.4). Dichas características concuerdan con la descripción de Cruz et al (2018), que categorizan este evento como una sequía agronómica ocurrida durante el otoño e invierno. En noviembre de 2020 se registró el evento de mayor intensidad, el cual corresponde a la categoría de sequía extrema.

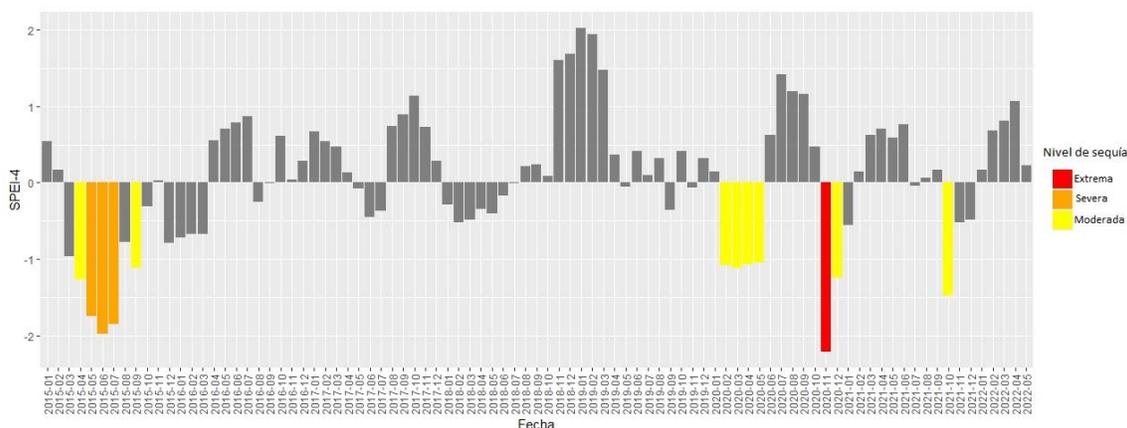


Figura 2.1 Evolución mensual de SPEI-4 meses en Canelones entre enero de 2015 y mayo de 2022.

Tabla 2.4 Meses con eventos de sequía en Canelones entre enero de 2015 y mayo de 2022.

SPEI	-1,26	-1,74	-1,97	-1,84	-1,11	-1,08	-1,11	-1,06	-1,03	-2,20	-1,24	-1,48
año/mes	2015/ 4	2015/ 5	2015/ 6	2015/ 7	2015/ 9	2020/ 2	2020/ 3	2020/ 4	2020/ 5	2020/ 11	2020/ 12	2021/ 10
evento	1	1	1	1	2	3	3	3	3	4	4	5

Durante el período estudiado no se registró una tendencia significativa (MMK, p-valor > 0,05) de la serie temporal del SPEI. Esto se comprueba con la media departamental, así como en las distintas estaciones meteorológicas del departamento. A su vez, tampoco se identificó una tendencia significativa de los valores absolutos de la serie temporal del SPEI. Por lo tanto, se desprende que en el período analizado no existen tendencias hacia el déficit o estrés hídrico

ni hacia la intensificación de eventos extremos, tanto a nivel departamental como en las estaciones meteorológicas ubicadas en Canelones.

La escala temporal seleccionada para el análisis de las sequías, de cuatro meses, permite captar la ocurrencia de eventos con una duración temporal suficiente para impactar sobre distintos ecosistemas y agroecosistemas. Particularmente coincide con la identificación de uno de los eventos de sequía agronómica más significativos sobre agroecosistemas ganaderos, de acuerdo Cruz et al (2018). En un estudio acotado a cultivos y/o tipos de sistema (secano o con riego), la escala de análisis debe ajustarse a los períodos donde se torna crítico el déficit hídrico.

La ausencia de tendencias en el conjunto de estaciones meteorológicas reafirma la pertinencia de trabajar con una escala de análisis departamental para el caso de Canelones durante el período bajo estudio. Contar con series temporales de mayor duración para las distintas estaciones meteorológicas puede habilitar un análisis espacio-temporal de los eventos hidrometeorológicos extremos dentro de su espacio agrario.

2.3.2 Relevancia de los factores biofísicos y socio-ecológicos

El factor con mayor incidencia en el potencial impacto de las sequías, obtenidos con el AHP, resultó ser el área ocupada por cobertura vegetal natural, seguida de la pendiente del terreno (Tabla 2.5). La conectividad entre parches de cobertura vegetal natural fue identificada como el factor de menor relevancia (cerca del 4%), con una gran diferencia respecto al siguiente factor de menor significancia, la profundidad del suelo (13,6%).

Tabla 2.5 Peso de los factores que componen la exposición biofísica y sensibilidad socio-ecológica.

Factor	Peso
Profundidad del suelo (P_s)	0,1366
Textura del suelo (T_s)	0,1159
Drenaje del suelo (D_s)	0,1606
Pendiente del terreno (P)	0,1876
Área ocupada por cobertura vegetal natural ($A_{cob.nat}$)	0,1921
Conectividad entre parches de cobertura vegetal natural ($C_{cob.nat}$)	0,0394
Demanda hídrica de la vegetación (DH_{veg})	0,1676

La sumatoria del peso de los factores asociados a la exposición (profundidad, textura y drenaje del suelo, y pendiente del terreno) tiene mayor relevancia que los de sensibilidad (área ocupada y conectividad de vegetación natural, y demanda hídrica de la vegetación), con un 60% frente a 40% del total. El índice integrado de exposición y sensibilidad (IIES), resultante de los factores ponderados mediante el AHP, se expresa en la ecuación 2.5:

$$\text{Ec.2.5 } \text{IIESi} = (P_s * 0,1366) + (T_s * 0,1159) + (D_s * 0,1606) + (P * 0,1876) + (A_{\text{cob.nat}} * 0,1921) + (C_{\text{cob.nat}} * 0,0394) + (DH_{\text{veg}} * 0,1676)$$

Donde: IIESi = Nivel de exposición-sensibilidad de la celda *i*; P_s, T_s, D_s, P = nivel de exposición de la profundidad, textura, drenaje del suelo y pendiente del suelo, en la celda *i*; A_{cob.nat}, C_{cob.nat}, DH_{veg} = nivel de sensibilidad del área ocupada por, y la conectividad de, la cobertura vegetal natural, y demanda hídrica de la cobertura vegetal, en la celda *i*

El índice de exposición biofísica, resultante de la sumatoria ponderada de los factores biofísicos del AHP, se expresa en la ecuación Ec. 2.6, donde la pendiente del terreno representa el factor de mayor peso. Para el caso del índice de sensibilidad socio-ecológica, el área ocupada por vegetación natural y la demanda hídrica de la vegetación tienen un peso predominante frente a la conectividad de los parches remanentes de cobertura vegetal natural, que tiene un peso próximo al 10% del índice de sensibilidad (Ec 2.7).

$$\text{Ec.2.6 } \text{IExp}i = \Sigma (P_s * 0,2246) + (T_s * 0,1929) + (D_s * 0,2673) + (P * 0,3122)$$

$$\text{Ec.2.7 } \text{ISens}i = (A_{\text{cob.nat}} * 0,4813) + (C_{\text{cob.nat}} * 0,0987) + (DH_{\text{cob.veg}} 0,42)$$

Donde: IExp*i* = Nivel de exposición en la celda *i*; P_s, T_s, D_s, P = nivel de exposición de la profundidad, textura, drenaje del suelo y pendiente del suelo, en la celda *i*; ISens*i* = Nivel de exposición en la celda *i*; A_{cob.nat}, C_{cob.nat}, DH_{veg} = nivel de sensibilidad del área ocupada por, y la conectividad de, la cobertura vegetal natural, y demanda hídrica de la cobertura vegetal, en la celda *i*

Los resultados permitieron abordar de manera integrada y diferenciada el peso de los factores vinculados a la exposición y sensibilidad, lo cual constituye el primer paso para avanzar hacia un análisis espacial de estos dos componentes de la vulnerabilidad. Se destaca que las diferencias de relevancia entre los factores biofísicos son menores que la de los factores socio-ecológicos. Dado que la conectividad de la vegetación natural ocupó un peso marginal como factor determinante de la sensibilidad de la vegetación ante las sequías, debería reconsiderarse su pertinencia en futuras investigaciones.

En cuanto a la principal herramienta utilizada en esta etapa, el AHP, se comprueba su gran potencial para la construcción de índices de vulnerabilidad a escala departamental (o regional) espacialmente explícitos, dado que permite trabajar con criterios claros y consensuados a la hora de realizar diagnósticos. El AHP permitió avanzar en la identificación de zonas con mayor exposición estructural a sufrir daños materiales y sensibilidad dada por relación sociedad-naturaleza. El conjunto de factores a considerar deberá acoplarse en cada caso a las características de la amenaza de referencia, para definir los atributos vinculados a la exposición y sensibilidad.

2.3.3 Características y dinámicas espacio-temporales de la exposición biofísica y sensibilidad socio-ecológica en el espacio agrario de Canelones

Los valores más altos de exposición se registraron en la zona este-sureste con un patrón decreciente hacia el resto del departamento (Figura 2.1). En la zona sur también se localiza una zona con niveles de exposición biofísica a la sequía relativamente medio-altos.

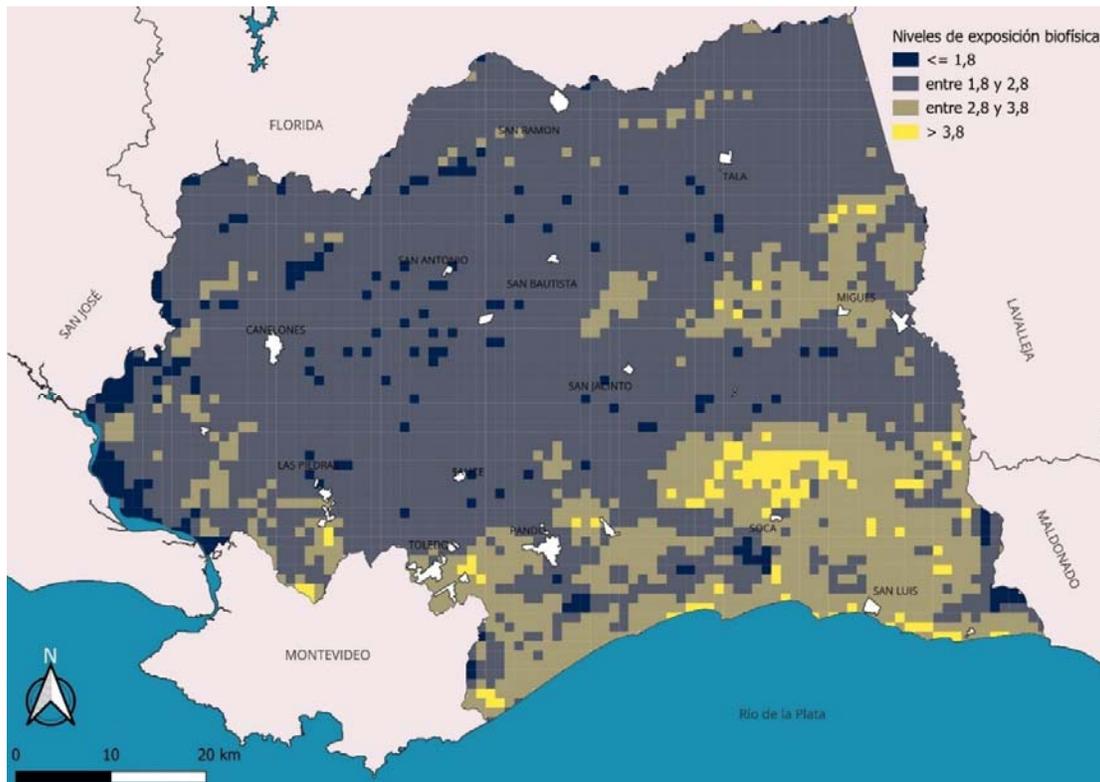


Figura 2.1 Distribución espacial de la exposición biofísica a las sequías en Canelones.

Los niveles de sensibilidad socio-ecológica muestran patrones diversos en cada evento de sequía (Figura 2.2) y, en términos generales, tiende a aumentar en el período analizado con valores máximos en el cuarto evento (iv). Los niveles más altos se registran en las zonas sureste y suroeste del departamento. Durante los eventos de sequía de 2020 (iii y iv) y 2021 (v) aumenta la superficie del departamento con valores de sensibilidad mayores a 3, con mayor énfasis en la sequía ocurrida durante los últimos meses de 2020 (evento iv).

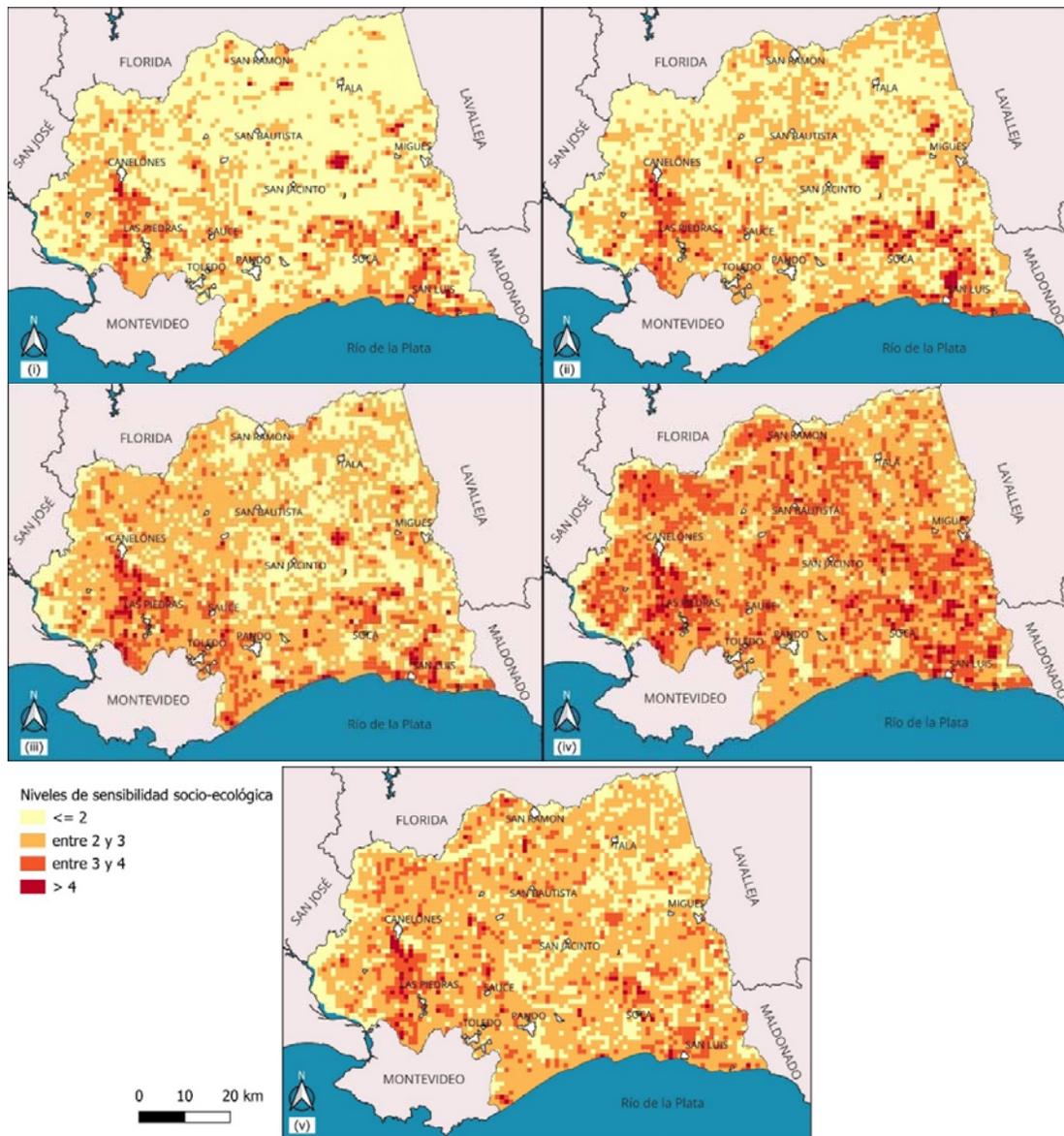


Figura 2.2 Distribución espacial de los niveles de sensibilidad socio-ecológica a la sequía en Canelones para cada uno de los cinco eventos de sequía identificados entre enero de 2015 y mayo de 2022. Evento (i): de abril a julio de 2015; Evento (ii) en setiembre de 2015; evento (iii) de febrero a mayo de 2020; evento (iv) de noviembre a diciembre de 2020; evento (v) en octubre de 2021.

Se detectó la existencia de autocorrelación espacial de los valores de exposición a la sequía (p -valor $< 0,01$) que, de acuerdo al análisis de Getis-Ord General G, refiere a la concentración de UE con alta exposición (p -valor $< 0,01$; z -score=45,6). A su vez, el análisis de puntos calientes/fríos constata la predominancia de UE con alta exposición biofísica en la zona suroeste-oeste, sureste y este de Canelones, y de baja exposición en el margen oeste y la zona centro-oeste del departamento (Figura 2.3). En el análisis espacial de la sensibilidad se comprueba la existencia de autocorrelación espacial en los cinco períodos analizados (p -valor $< 0,01$), vinculado al fuerte agrupamiento de UE con alta sensibilidad (p -valor $< 0,01$; $38,2 > z$ -score $< 43,7$). El análisis de puntos caliente/fríos, pese a las variaciones entre períodos, refleja

una persistencia de UE asociados a altos niveles de sensibilidad socio-ecológica en la zona suroeste, este y sureste del espacio agrario de Canelones (Figura 2.4).

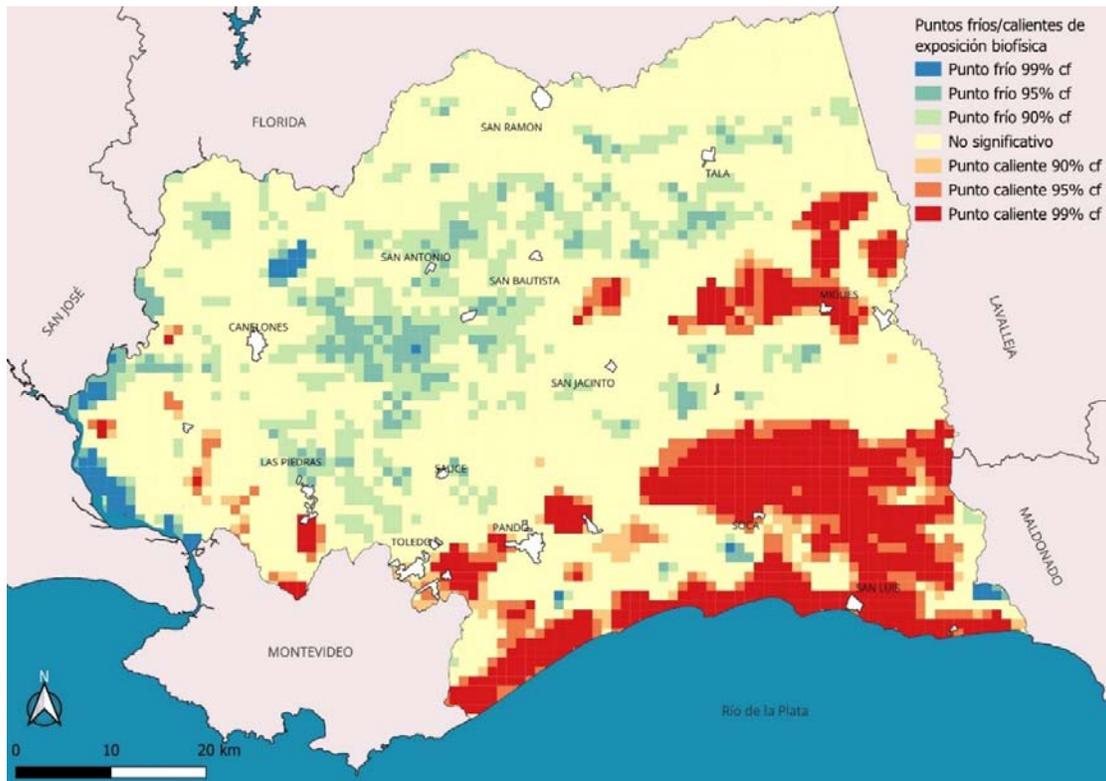


Figura 2.3 Puntos calientes/fríos de exposición biofísica a la sequía en Canelones con confianza (cf) estadística.

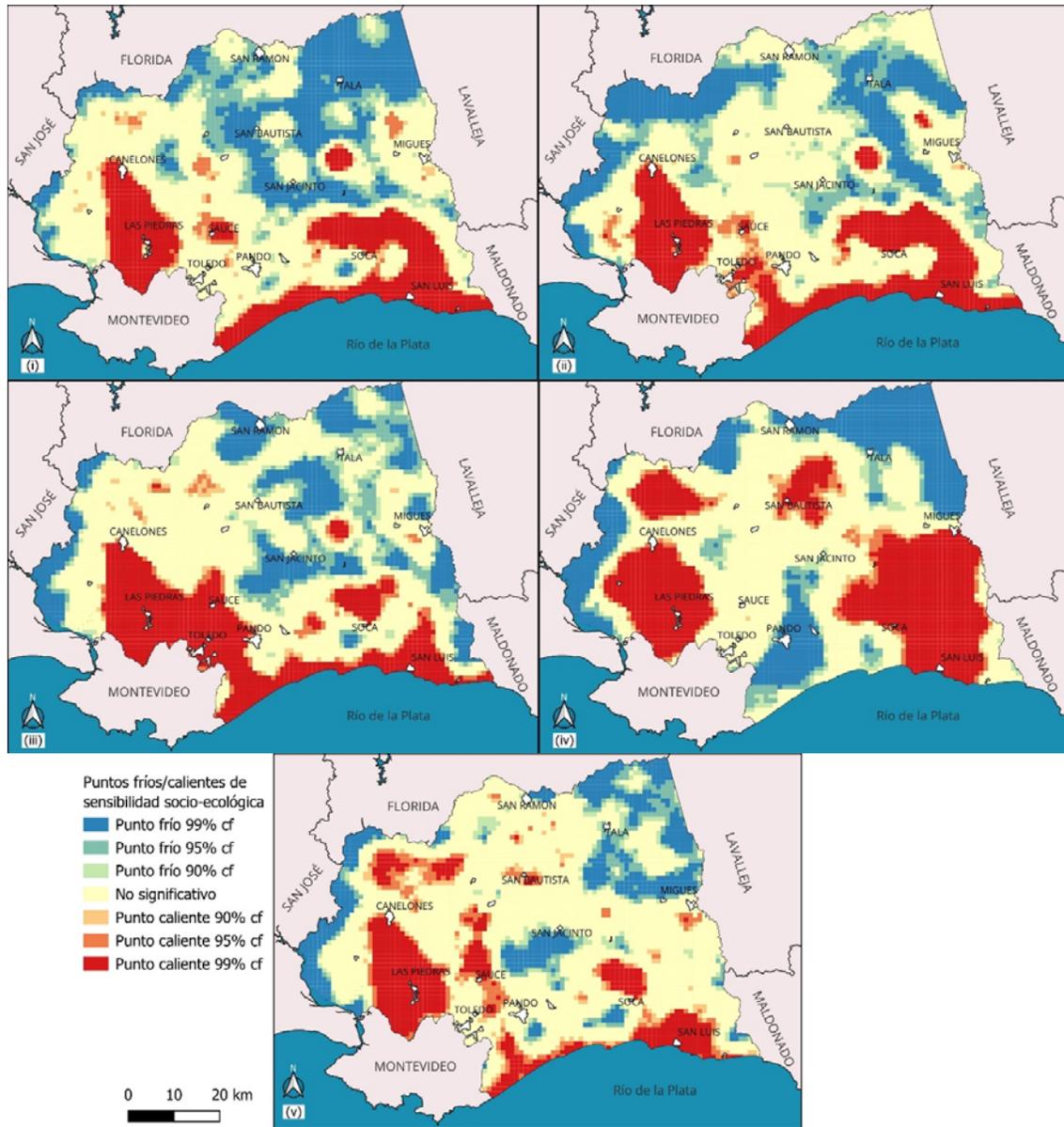


Figura 2.4 Puntos calientes/fríos de sensibilidad socio-ecológica a la sequía en Canelones con confianza estadística (cf) durante los cinco eventos de sequía (i-v) registrados entre enero de 2015 y mayo de 2022. Evento (i): de abril a julio de 2015; Evento (ii) en setiembre de 2015; evento (iii) de febrero a mayo de 2020; evento (iv) de noviembre a diciembre de 2020; evento (v) en octubre de 2021.

Se generaron cuatro grupos de celdas que permiten diferenciar el comportamiento de los valores de sensibilidad socio-ecológica durante los cinco eventos de sequía. El Grupo A concentra el 20% del total de celdas y se vincula a niveles de baja sensibilidad (Figura 2.5), principalmente zonas de humedales/bañados y bosque ribereño. El Grupo B, abarca el 45% del total de celdas, registra valores de sensibilidad bajos-medios y se encuentra disperso en todo el departamento. El Grupo C presenta valores de sensibilidad medios-altos que abarcan

el 27% de las celdas, y se asocia principalmente a zonas suburbanas. Finalmente, el Grupo D - 8% del total de celdas - presenta valores de sensibilidad altos (> 3,4), y se restringe a zonas puntuales del suroeste (urbanas), sureste y este del departamento.

Los valores de sensibilidad a la sequía tuvieron un aumento constante durante los eventos de sequía registrados entre enero de 2015 y mayo del 2022 (Figura 2.6). Este patrón general se presenta en los Grupos B y C (sensibilidad intermedia) con un aumento marcado, mientras que el Grupo A (sensibilidad baja) el aumento fue leve. En el caso del Grupo D (sensibilidad alta), finalizó con valores de sensibilidad similares al comienzo del período.

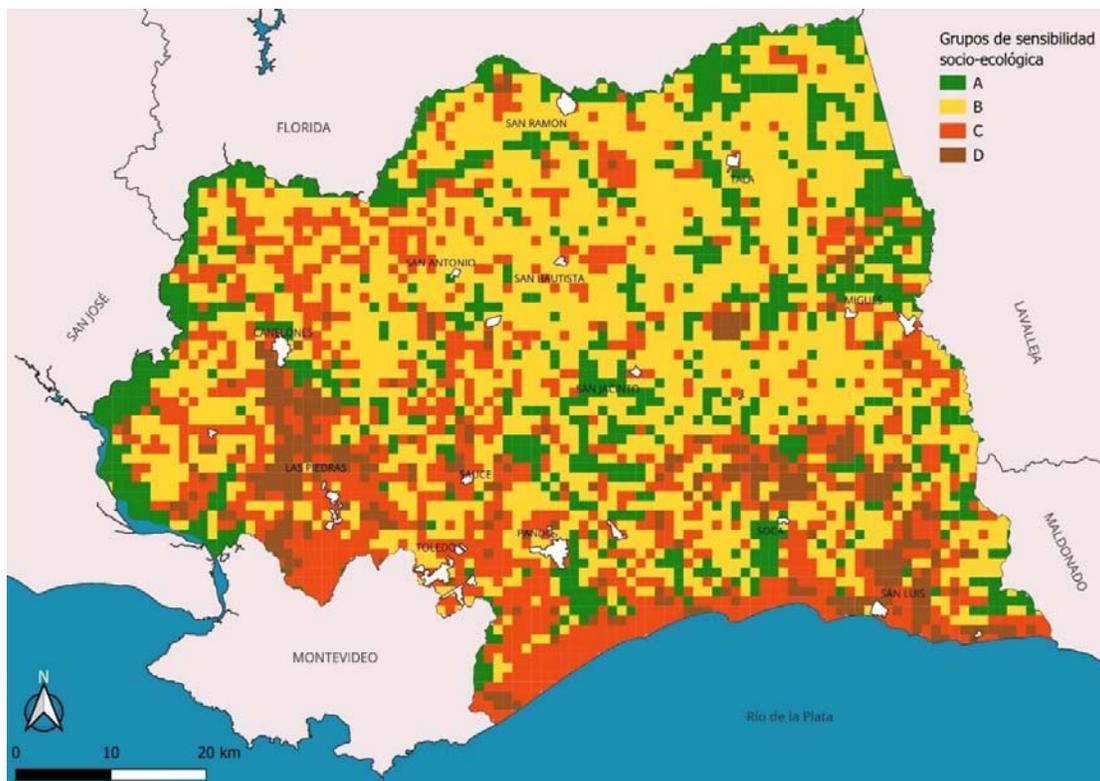


Figura 2.5 Agrupamiento de celdas según niveles de sensibilidad socio-ecológica durante las sequías registradas entre enero de 2015 y mayo de 2022.

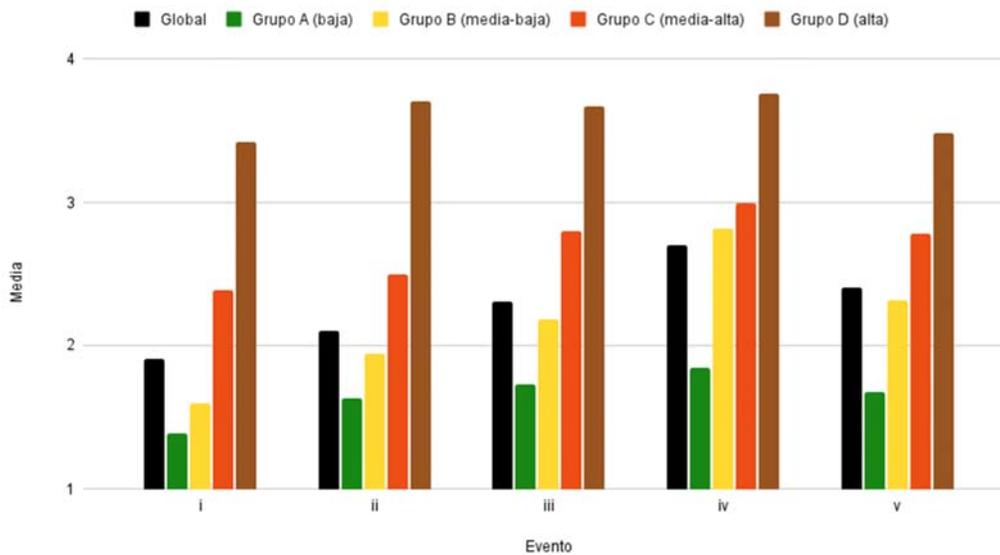


Figura 2.6 Evolución de valores medios de sensibilidad socio-ecológica a la sequía por grupos de sensibilidad para los cinco eventos de sequía registrados entre enero de 2015 y mayo de 2022. Evento (i): de abril a julio de 2015; Evento (ii) en setiembre de 2015; evento (iii) de febrero a mayo de 2020; evento (iv) de noviembre a diciembre de 2020; evento (v) en octubre de 2021.

La distribución espacial del IIES muestra la predominancia de valores altos de exposición-sensibilidad en la zona sureste y sur del departamento (Figura 2.7). En el evento iv (noviembre y diciembre del 2020), los valores medios-altos del IIES se generalizan y aumentan como consecuencia del aumento de los niveles de sensibilidad socio-ecológica. El caso de los valores altos del IIES - mayores a 3,5 - se encuentran acotados a la zona sureste de Canelones.

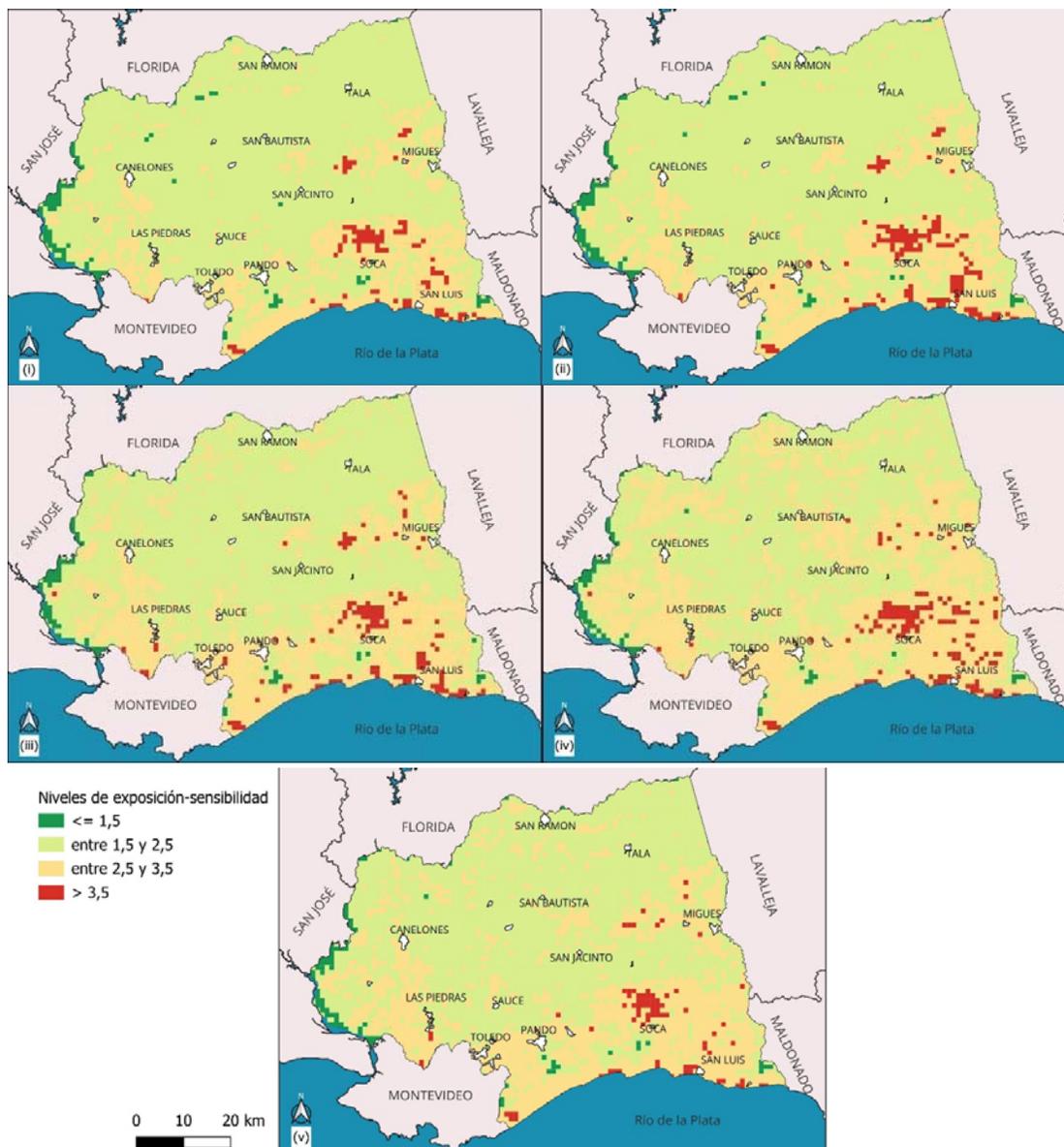


Figura 2.7 Distribución de niveles del índice de exposición-sensibilidad a la sequía durante los cinco eventos de sequía registrados entre enero de 2015 y mayo de 2022. Evento (i): de abril a julio de 2015; Evento (ii) en setiembre de 2015; evento (iii) de febrero a mayo de 2020; evento (iv) de noviembre a diciembre de 2020; evento (v) en octubre de 2021.

En todos los períodos se detecta la existencia de autocorrelación espacial en los valores del IIES (p -valor $< 0,01$). De acuerdo al análisis de Getis-Ord General G, refiere a la concentración de valores altos del IIES (p -valor $< 0,01$; $40 < z$ -score $< 44,7$). El análisis de puntos calientes/fríos ratifica esta concentración espacial al mostrar una amplia distribución y significancia de puntos calientes en el sureste, suroeste y este del espacio agrario de Canelones (Figura 2.8).

El patrón espacio-temporal de los puntos calientes/fríos del IIES presenta una menor oscilación que el observado para los niveles de sensibilidad. Esto puede explicarse por el peso relativamente mayor de los factores vinculados a la exposición, que representan valores

constantes en el tiempo y en conjunto explican el 60% del IIES, lo cual produce un efecto estabilizador de los valores finales del índice integrado de exposición-sensibilidad.

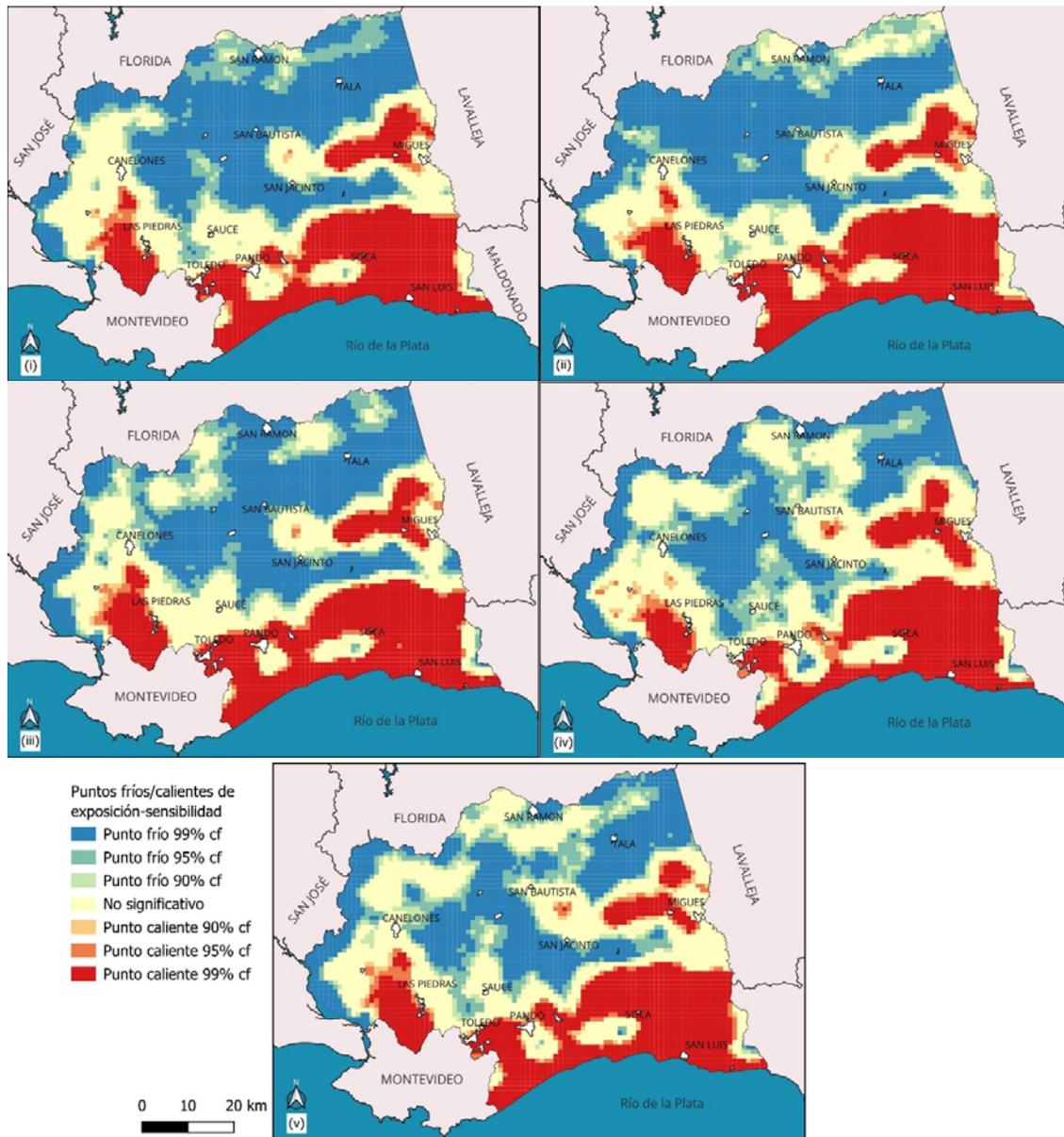


Figura 2.8 Puntos calientes/fríos del IIES en Canelones con confianza (cf) estadística durante los cinco eventos de sequía registrados entre enero de 2015 y mayo de 2022. Evento (i): de abril a julio de 2015; Evento (ii) en setiembre de 2015; evento (iii) de febrero a mayo de 2020; evento (iv) de noviembre a diciembre de 2020; evento (v) en octubre de 2021.

Los grupos de celdas del IIES presentan un patrón espacial similar al de los grupos de sensibilidad socio-ecológica (Figura 2.9). El Grupo A, disperso en todo el área de estudio, comprende valores bajos de sensibilidad (promedian entre 1,7 y 2,1), y representa el 21% de las celdas del departamento; el grupo B, que abarca el 43% del total, comprende a celdas que tuvieron valores relativamente medio-bajos, con promedios entre >2,0 y <2,5 (Figura 2.10);

el grupo C (24% del total de celdas) se ubica en zonas suroeste, sur, sureste y este del departamento, y se caracteriza por valores relativamente medios-altos (entre 2,5 y 2,8); por último, el grupo D, que abarca el 12% del total de celdas y se ubica al sureste del departamento, se asocia a valores altos del IES cuyos promedios se ubican entre 3,0 y 3,2.

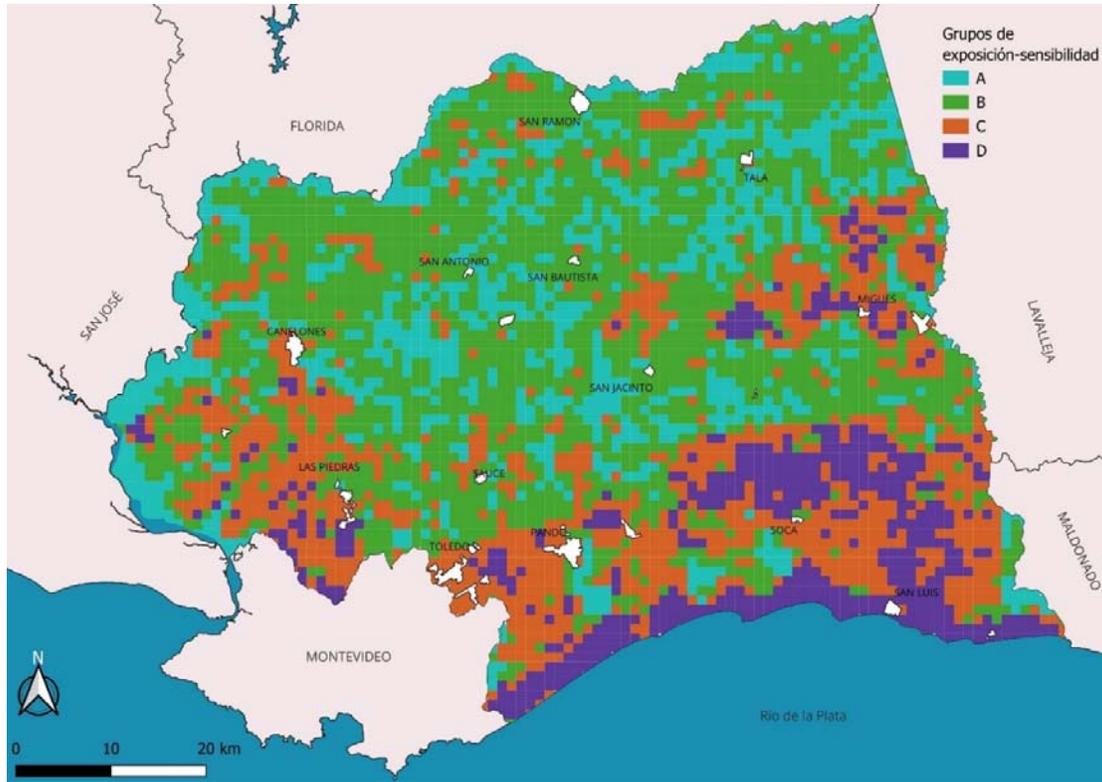


Figura 2.9 Agrupamiento de celdas de 1x1km según similitud en valores del IES.

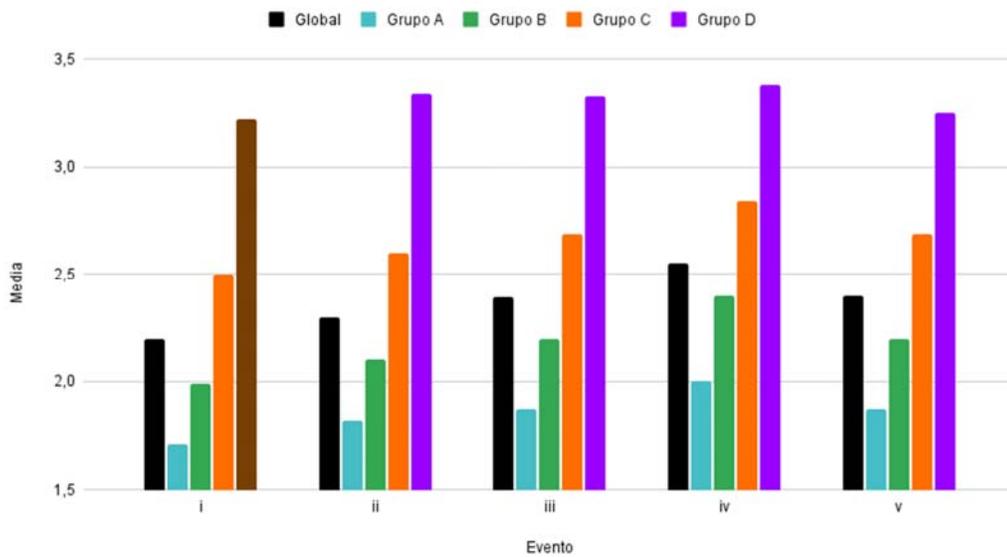


Figura 2.10 Evolución de valores medios del IES por grupos de exposición-sensibilidad a la sequía. Evento (i): de abril a julio de 2015; Evento (ii) en setiembre de 2015; evento (iii) de febrero a mayo de 2020; evento (iv) de noviembre a diciembre de 2020; evento (v) en octubre de 2021.

De acuerdo al modelo propuesto, la zona este-sureste de Canelones presenta la situación más desfavorable ante la ocurrencia de sequías. Esto se asocia a las condiciones biofísicas que limitan estructuralmente la retención de agua en el suelo, y al deterioro del sistema ambiental que se expresa en la consolidación de usos agropecuarios intensivos y la baja representatividad de coberturas vegetales naturales. Desde un punto de vista de la sustentabilidad, la presión sobre los bienes naturales en el este-sureste de Canelones, dado por el deterioro de la cobertura vegetal natural ante la intensificación agraria, restringe el acceso a servicios ecosistémicos para el conjunto de la población que habita ese territorio.

La estrategia implementada establece criterios claros y explícitos para generar un diagnóstico del espacio agrario y aporta información para avanzar en la planificación económica-productiva del sector agropecuario de Canelones ante la ocurrencia de sequías. La estrategia consiste en identificar las variables biofísicas y socio-ecológicas determinantes, evaluar la relevancia de cada variable y analizar sus dinámicas espacio-temporales. Los resultados obtenidos permitieron identificar condiciones biofísicas y socio-ecológicas más desfavorables ante las sequías en la región este-sureste del espacio agrario de Canelones, zona clave para generar acciones de ordenamiento y planificación territorial.

2.3.4 Comportamiento de índices de vegetación durante eventos de sequía

En el primer evento de sequía (abril a julio del año 2015), se identificaron correlaciones positivas más fuertes entre el nivel del índice de sensibilidad (ISens) y el NDVI durante los meses previos al comienzo de la sequía (Tabla 2.6). Mientras que, con el comienzo de la sequía disminuyen los niveles de correlación. Dentro de los distintos grupos con correlación de signo positivo entre el NDVI e ISens, durante los meses previos al comienzo de la sequía la correlación más fuerte la presenta el grupo de sensibilidad media-alta (Grupo C) (Figura 2.11). La correlación general para el conjunto de celdas entre el ISens y NDWI alcanza niveles mínimos al segundo mes de la sequía (mes de mayo). Al igual que con el NDVI, el grupo de menor sensibilidad (Grupo A) mantiene una correlación negativa entre el NDWI y el ISens (Tabla 2.7). La correlación entre el ISens y los IV, si bien se mantiene estable para los grupos de mayor y menor sensibilidad, muestran un patrón opuesto entre sí, dado que el grupo de menor sensibilidad presenta una correlación negativa y el de mayor sensibilidad positiva.

Tabla 2.6 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad (ISens) y el NDVI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (i) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	01/2015	02/2015	03/2015	04/2015	05/2015	06/2015	07/2015
General	0,203***	0,385***	0,385***	0,117***	-0,036*	0,062***	0,204***
Grupo A	-0,406***	-0,295***	-0,242***	-0,385***	-0,442***	-0,400***	-0,371***
Grupo B	0,305***	0,510***	0,492***	0,191***	0,005	0,081***	0,180***
Grupo C	0,390***	0,581***	0,539***	0,006	-0,180***	-0,123***	0,021
Grupo D	0,331***	0,321***	0,341***	0,320***	0,309***	0,332***	0,354***

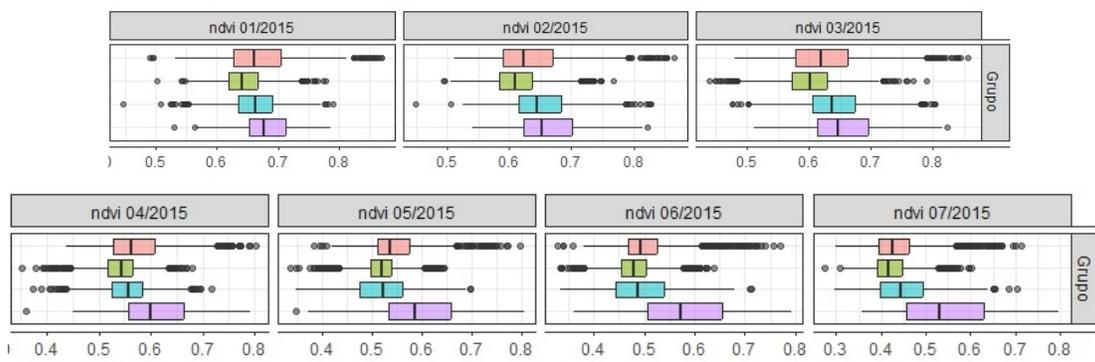


Figura 2.11 Diagrama de cajas del NDVI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (i). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

Tabla 2.7 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad (ISens) y el NDWI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (i) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0.01: **; < 0.05: *.

Mes/año	01/2015	02/2015	03/2015	04/2015	05/2015	06/2015	07/2015
General	0,328***	0,423***	0,427***	0,254***	0,036*	0,079***	0,196***
Grupo A	-0,388***	-0,317***	-0,257***	-0,364***	-0,434***	-0,419***	-0,391***
Grupo B	0,329***	0,507***	0,489***	0,293***	0,066**	0,079***	0,157***
Grupo C	0,320***	0,560***	0,539***	0,184***	-0,140***	-0,121***	-0,012
Grupo D	0,245***	0,344***	0,367***	0,346***	0,311***	0,318***	0,336***

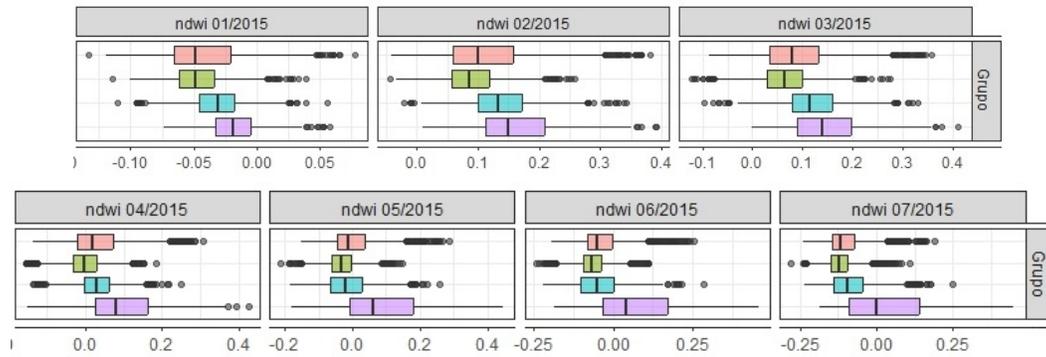


Figura 2.12 Diagrama de cajas del NDWI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (i). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

En el segundo evento de sequía (setiembre de 2015) el ISens registra una fuerte disminución del nivel de correlación con el NDVI con el comienzo del evento (Tabla 2.8), mientras que la relación con el NDWI se mantiene relativamente estable (Tabla 2.9). Durante el mes de setiembre (SPEI = -1,1) se empareja el comportamiento de los valores medios y el desvío del NDVI entre los grupos de sensibilidad (Figura 2.13). A nivel de la correlación dentro de los grupos, el de menor sensibilidad muestra un patrón opuesto al resto, ya que mantiene una correlación negativa. Los valores medios de NDVI y NDWI (Figura 2.14) son más altos en el grupo de mayor sensibilidad.

Tabla 2.8 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad y el NDVI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (ii) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	06/2015	07/2015	08/2015	09/2015
General	0,348***	0,443***	0,336***	0,050*
Grupo A	-0,390***	-0,378***	-0,306***	-0,289***
Grupo B	0,521***	0,544***	0,242***	-0,014
Grupo C	0,642***	0,675***	0,363***	0,087*
Grupo D	0,535***	0,537***	0,491***	0,378***

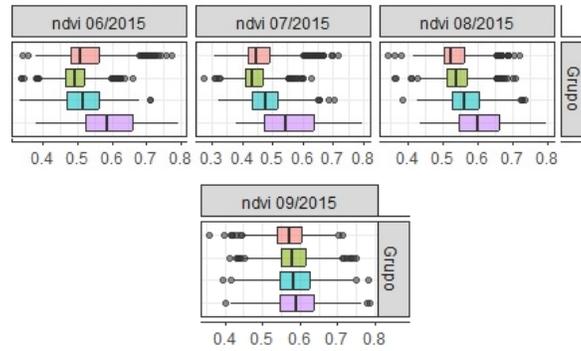


Figura 2.13 Diagrama de cajas del NDVI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (ii). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

Tabla 2.9 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad (ISens) y el NDWI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (ii) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	06/2015	07/2015	08/2015	09/2015
General	0,357***	0,462***	0,343***	0,213***
Grupo A	-0,380***	-0,325***	-0,213***	-0,303***
Grupo B	0,510***	0,585***	0,214***	0,079**
Grupo C	0,614***	0,658***	0,359***	0,151***
Grupo D	0,521***	0,532***	0,489***	0,398***

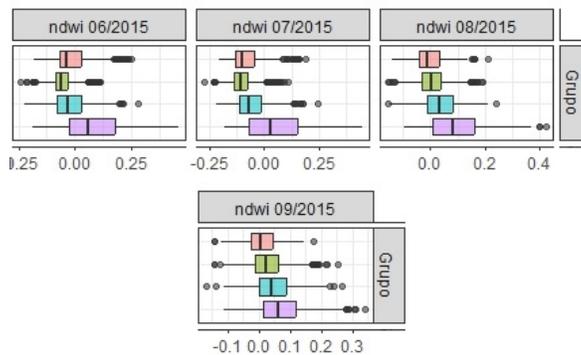


Figura 2.14 Diagrama de cajas del NDWI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (ii). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

Durante el tercer período analizado, vinculado a la sequía registrada entre febrero y mayo de 2020, los niveles de correlación general entre el ISens y los IV son más débiles respecto a los eventos anteriores, con rS máximo de 0,285, y no muestran un patrón diferenciado entre meses con y sin sequía (Tabla 2.10 y Tabla 2.11). Se registran menores niveles de correlación y un mayor desvío dentro del grupo de menor sensibilidad (Figura 2.15 y Figura 2.16). La baja

correlación general que presenta el ISens y ambos IV puede vincularse a la amplia dispersión de los valores del grupo de baja sensibilidad y al registro de valores “outliers”, en este caso generalizado en todos los grupos. A la interna de los grupos, se registran niveles de correlación relativamente estables durante los meses analizados en los dos grupos dispares (Grupo A y D). En el grupo de menor sensibilidad la correlación entre el ISens y los IV es negativa, mientras que en el de mayor sensibilidad es positiva.

Tabla 2.10 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad y el NDVI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (iii) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	11/2019	12/2019	01/2020	02/2020	03/2020	04/2020	05/2020
General	-0,211***	0,071***	0,254***	0,178***	0,199***	0,061***	-0,033
Grupo A	-0,386***	-0,349***	-0,277***	-0,232***	-0,283***	-0,329***	-0,308***
Grupo B	-0,091***	0,229***	0,451***	0,383***	0,327***	0,107***	-0,126***
Grupo C	0,049	0,342***	0,405***	0,245***	0,218***	0,085*	-0,008
Grupo D	0,273***	0,394***	0,369***	0,298***	0,331***	0,345***	0,228***

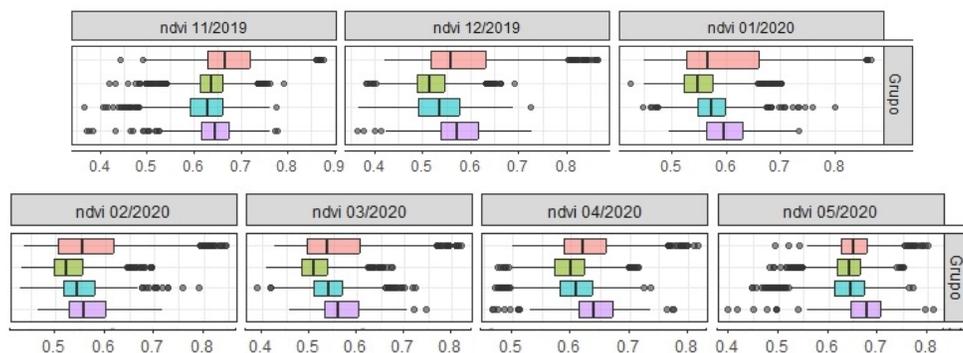


Figura 2.15 Diagrama de cajas del NDVI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (iii). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

Tabla 2.11 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad (ISens) y el NDWI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (iii) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	11/2019	12/2019	01/2020	02/2020	03/2020	04/2020	05/2020
General	-0,070***	0,092***	0,285***	0,260***	0,278***	0,187***	0,084***
Grupo A	-0,377***	-0,349***	-0,281***	-0,221***	-0,254***	-0,310***	-0,307***
Grupo B	-0,056*	0,202***	0,472***	0,429***	0,369***	0,192***	-0,044

Grupo C	0,056	0,305***	0,439***	0,339***	0,317***	0,205***	0,101**
Grupo D	0,263***	0,438***	0,428***	0,364***	0,367***	0,422***	0,331***

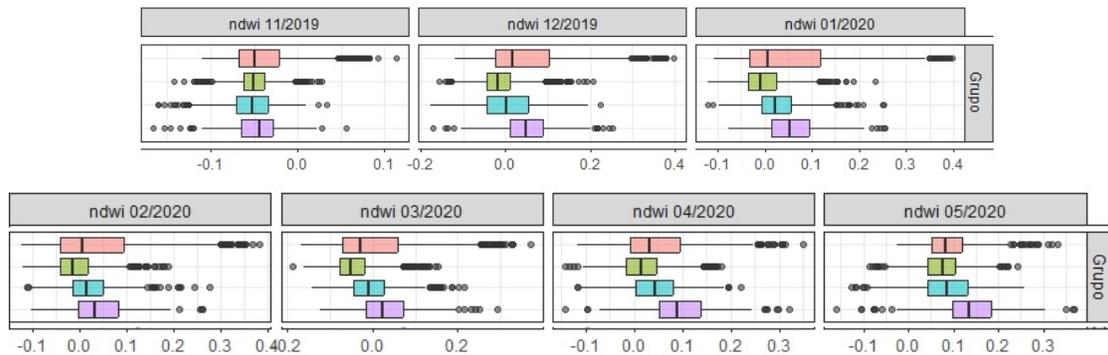


Figura 2.16 Diagrama de cajas del NDWI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (iii). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

Durante el cuarto evento (fines del 2020), el comienzo de la sequía en noviembre permite demarcar un patrón de comportamiento. Los niveles de correlación general entre el ISens y los IV para el conjunto de las grillas tienden a decrecer desde los meses previos, con correlaciones más fuertes en el caso del NDWI (Tabla 2.12 y 2.13). El comienzo de la sequía, en noviembre, trae distintos resultados: (i) disminuye fuertemente la correlación general del ISens con ambos IV, e incluso cambian de signo hacia una débil correlación negativa; (ii) el grupo de baja sensibilidad (Grupo A) aumenta notoriamente la dispersión de los valores de ambos IV (Figura 2.17 y 2.18); (iii) los grupos de sensibilidad “intermedia” (en verde y celeste) se posicionan como los grupos con valores medios más bajos; y (iv) se registra una mayor similitud en los valores medios del NDWI entre grupos.

Tabla 2.12 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad y el NDVI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (iv) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	08/2020	09/2020	10/2020	11/2020	12/2020
General	0,433***	0,417***	0,209***	-0,184***	-0,235***
Grupo A	0,078*	0,139***	-0,159***	-0,418***	-0,543***
Grupo B	0,601***	0,656***	0,521***	-0,023	-0,318***
Grupo C	0,551***	0,605***	0,531***	-0,034	-0,340***
Grupo D	0,274***	0,278***	0,181**	-0,046	-0,034

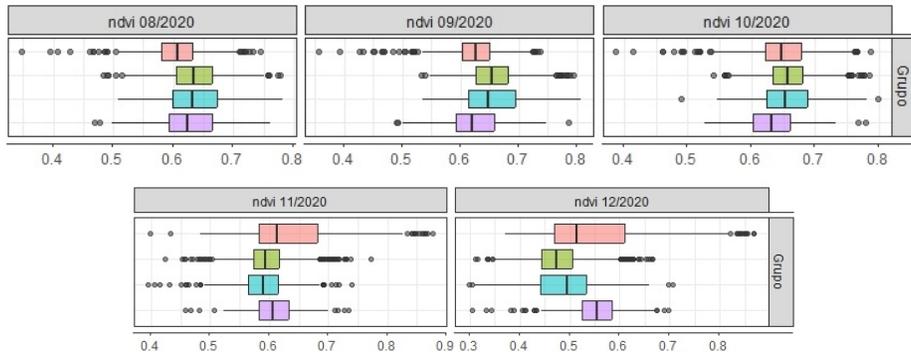


Figura 2.17 Diagrama de cajas del NDVI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (iv). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

Tabla 2.13 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad (ISens) y el NDWI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (iv) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	08/2020	09/2020	10/2020	11/2020	12/2020
General	0,607***	0,510***	0,341***	-0,030	-0,140***
Grupo A	0,184***	0,062	-0,180***	-0,410***	-0,522***
Grupo B	0,600***	0,667***	0,574***	0,103***	-0,235***
Grupo C	0,499***	0,570***	0,504***	0,086*	-0,277***
Grupo D	0,296***	0,269***	0,191***	0,026	-0,020

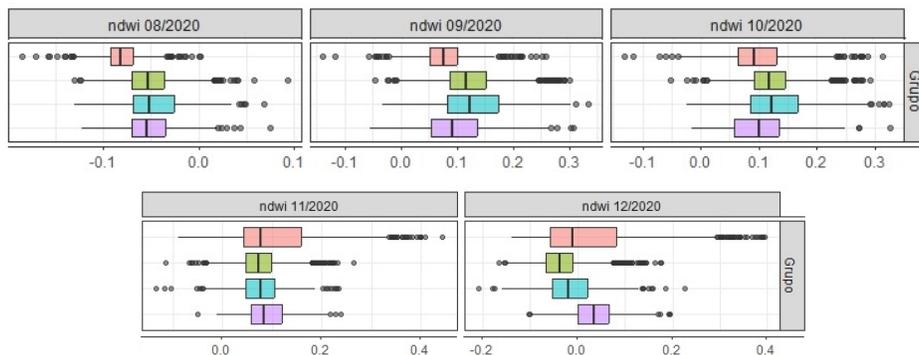


Figura 2.18 Diagrama de cajas del NDWI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (iv). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

En el quinto evento de sequía se registran niveles de correlación muy débiles entre el ISens y los valores del NDVI (Tabla 2.14), en comparación al NDWI (Tabla 2.15). A su vez, se identifica que los valores medios de ambos IV tienden al emparejamiento entre los grupos de sensibilidad, e incluso lleva a que el grupo de mayor sensibilidad presente ocasionalmente los

valores más bajos en el mes de sequía (octubre), cuando se registra SPEI -1,48 (Figura 2.19 y 2.20). Sin embargo, este patrón no se expresa en el nivel de correlación general.

Tabla 2.14 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad (ISens) y el NDVI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (v) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	07/2021	08/2021	09/2021	10/2021
General	0,099***	0,164***	0,094***	0,014
Grupo A	-0,204***	-0,147***	-0,084*	-0,234***
Grupo B	0,095***	0,167***	0,268***	0,369***
Grupo C	-0,051	0,181***	0,295***	0,339***
Grupo D	-0,107	-0,051	-0,030	-0,018

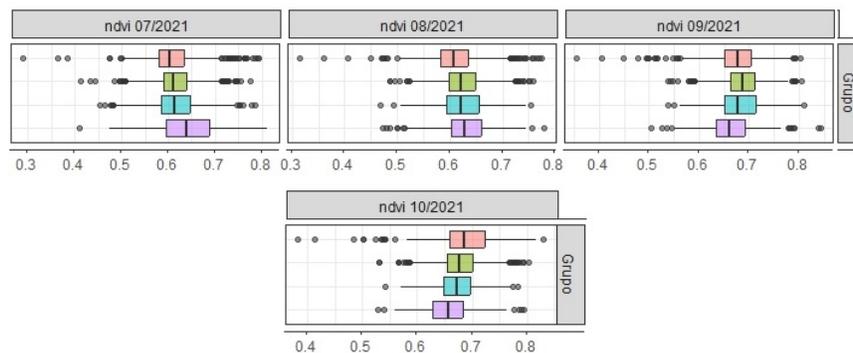


Figura 2.19 Diagrama de cajas del NDVI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (v). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

Tabla 2.15 Correlación Spearman entre el Índice Sensibilidad (ISens) y el NDWI, para el conjunto de datos y por grupos de sensibilidad, durante el evento de sequía (v) y los tres meses previos al comienzo del evento. Cuando p-valor < 0,001: ***; < 0,01: **; < 0,05: *.

Mes/año	07/2021	08/2021	09/2021	10/2021
General	0,282***	0,243***	0,225***	0,151***
Grupo A	-0,048	-0,056	-0,055	-0,206***
Grupo B	0,087***	0,178***	0,304***	0,434***
Grupo C	-0,043	0,126***	0,322***	0,408***
Grupo D	-0,035	-0,045	0,010	0,018

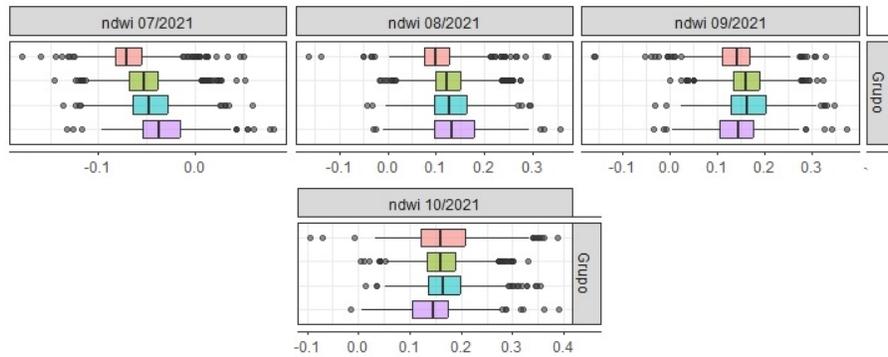


Figura 2.20 Diagrama de cajas del NDWI por grupos de sensibilidad socio-ecológica para los tres meses previos (arriba) y durante el evento (abajo) de sequía (v). En color rosado: Grupo A; en verde: Grupo B; en celeste: Grupo C; y en violeta: Grupo D.

El análisis espacio-temporal de puntos calientes/fríos del NDVI durante los eventos de sequía registra puntos calientes persistentes (es decir, que se mantienen en los cinco eventos) en una zona acotada al sureste de Canelones (Figura 2.16). La respuesta de esta zona donde predomina la forestación exótica, pese a caracterizarse por suelos con alta exposición a la sequía, logra mantener niveles de capacidad fotosintética altos en relación al contexto departamental. En el margen oeste del departamento, zona caracterizada por suelos de menor exposición ante la sequía y cobertura vegetal vinculada a los humedales del Santa Lucía, se registran puntos calientes que tienden a intensificarse. Así, en esta zona de baja exposición y sensibilidad a la sequía se registra un aumento de la capacidad fotosintética. En la zona sur del departamento, vinculada a áreas con urbanización y costa, se registran puntos fríos persistentes de NDVI, situación esperable debido a que las áreas con cobertura vegetal son limitadas. En la mayor parte del departamento se encuentran puntos calientes oscilantes o esporádicos. Múltiples factores pueden incidir en este resultado, principalmente la diversidad de actividades productivas presentes en el espacio agrario de Canelones.

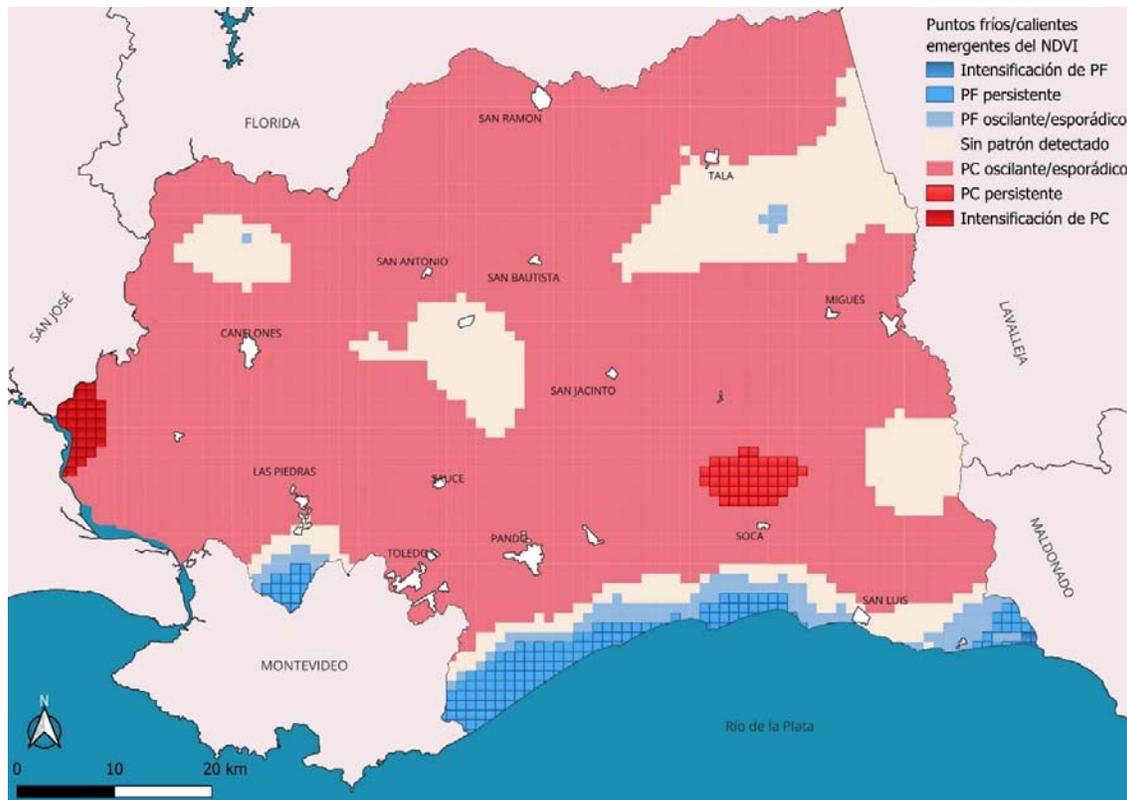


Figura 2.16 Comportamiento espacio-temporal de puntos fríos (PC) y calientes (PF) del NDVI durante las sequías registradas entre enero de 2015 y mayo de 2022.

En el caso del NDWI, el patrón espacio-temporal de los puntos calientes que se intensifican es similar al NDVI, localizándose en la zona los humedales del Santa Lucía, a los cuales se añade los bañados de Carrasco al sur del departamento (Figura 2.17). Esto señala la capacidad de los humedales de resistir al impacto de la sequía, en este caso a través del contenido de agua de la vegetación. Lo mismo ocurre con los puntos calientes persistentes, asociados principalmente a zonas con mayor densidad de forestación de especies exóticas. La región centro-oeste registra un aumento de los valores de NDWI en los últimos eventos de sequía (nuevos puntos calientes), lo cual refiere a una tendencia creciente del contenido de agua en la vegetación. Esto puede vincularse a que la creciente intensificación agraria en esta zona, particularmente durante los últimos dos eventos de sequía, mantuvo niveles de contenido de agua en la vegetación relativamente superiores a la media departamental pese al contexto de sequía, posiblemente asociado a estrategias de adaptación de productores con posibilidades de inversión en estrategias de adaptación. Los puntos calientes oscilantes del NDWI cubren un área mayor que el NDVI, lo cual señala una alta variabilidad temporal de zonas con alto contenido de agua en la vegetación.

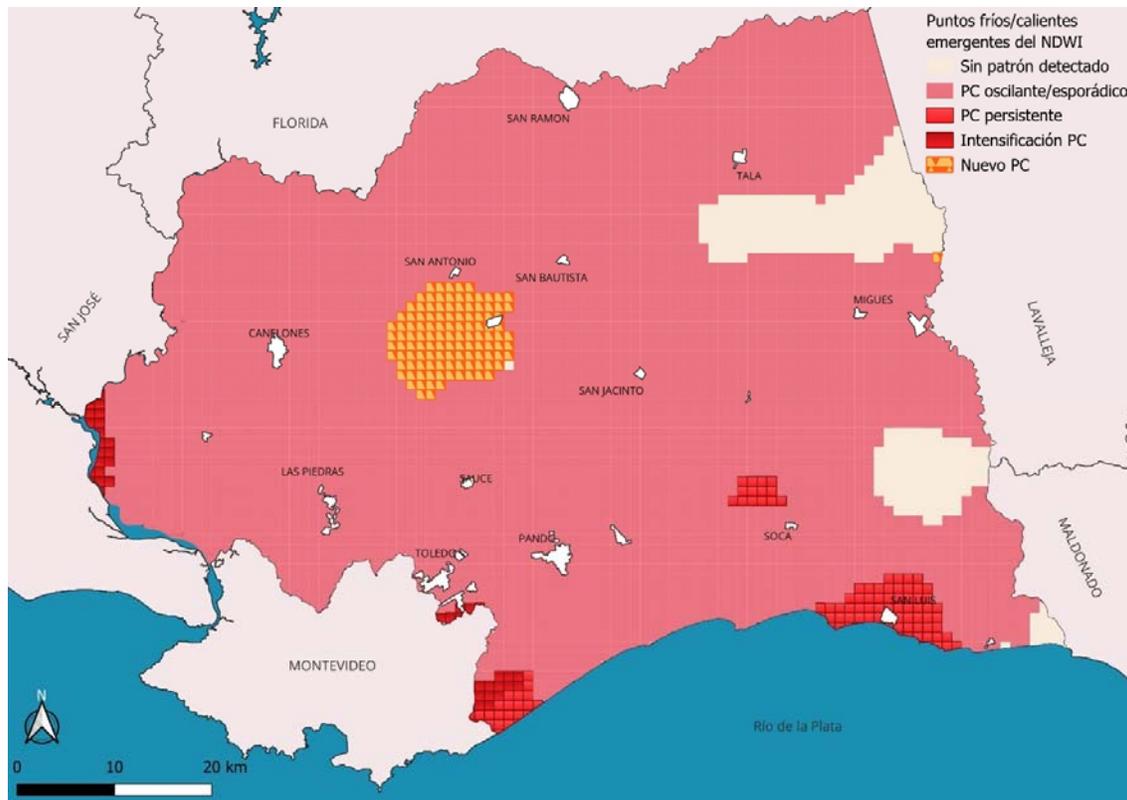


Figura 2.17 Comportamiento espacio-temporal de puntos fríos (PC) y calientes (PF) del NDWI durante las sequías registradas entre enero de 2015 y mayo de 2022.

Los resultados muestran que, a excepción del cuarto evento de sequía, se registró una correlación positiva estable entre el índice de sensibilidad (ISens) y los índices de vegetación (IV: NDVI y NDWI) durante los meses previos al comienzo de la sequía. Durante los meses con sequía, la respuesta del sistema ambiental es heterogénea. Esto indica que, en los meses previos al comienzo de la sequía, a menor representatividad de vegetación natural y mayor demanda hídrica de la vegetación (o intensidad agraria) se registran mejores condiciones de producción y contenido de agua vegetal; mientras que, con el comienzo de la sequía se debilita, e incluso invierte durante un evento, este patrón. El cuarto evento analizado muestra una particularidad, ya que al comenzar la sequía se invierte el signo de la correlación general, registrándose una correlación negativa débil entre los IV y el ISens. En este caso, durante la sequía, las zonas menos sensibles a la sequía son las que mantienen mejores condiciones relativas de producción y contenido de agua vegetal, por lo tanto, las zonas donde predominan parches con vegetación natural presentaron una mayor resistencia a la sequía.

El vínculo entre el comportamiento de los índices de vegetación y el estado de la cobertura vegetal difiere de acuerdo a los ciclos de la vegetación y cultivos predominantes (Gu et al., 2007; Liu et al., 2010), lo cual puede explicar las diferencias de los niveles de correlación entre el ISens y los IV para los distintos eventos. Esta dificultad se presenta particularmente en Canelones, debido a la heterogeneidad y diversidad de sus paisajes agrarios (Morales, 2024).

El análisis de puntos calientes emergentes permitió identificar zonas con niveles altos y sostenidos de agua en la vegetación y capacidad fotosintética al este y sureste de Canelones, donde predomina la forestación exótica, y en los humedales del oeste del departamento. En el caso de la zona forestada, el desempeño logrado en términos de productividad y estado hídrico durante las sequías puede vincularse a la capacidad de la forestación de explorar capas profundas del suelo y acceder a napas freáticas para mantener su funcionamiento durante contextos de sequía. La consolidación y expansión de la forestación exótica en el este-sureste cumple con la definición política de desarrollo forestal contenida en el Plan de Ordenamiento Rural – Ruralidades Canarias (IC, 2018). Estudios nacionales muestran una reducción de la escorrentía, los flujos máximos de los cursos de agua y una tendencia a la disminución en el caudal en las cuencas forestadas (Navas et al., 2019; Silveira et al., 2006, 2016; Silveira y Alonso, 2009), por lo cual la actual distribución y fuerte concentración de la forestación dentro de Canelones puede repercutir en un acaparamiento del agua en las cuencas hidrográficas. El efecto particular de la forestación exótica sobre el régimen hídrico representa una dimensión crítica debido a la fuerte alteración ecológica que supone el reemplazo de pastizales por cultivos forestales, problemática con un trasfondo socio-económico que requiere abordar el efecto del cambio climático y la acción antrópica de manera simultánea (Cano et al., 2023).

En resumen, en tres de los cinco eventos analizados predomina un patrón de relación positiva entre los niveles de sensibilidad y la respuesta de la vegetación durante las sequías, ya que las zonas más sensibles presentan mayores niveles de capacidad fotosintética y contenido de agua en la vegetación. Por lo tanto, mayores niveles de sensibilidad no se vinculan necesariamente con peores condiciones productivas e hídricas dentro del contexto departamental durante las sequías. El cuarto evento muestra un patrón contrario al registrado durante los tres eventos anteriores, y el quinto evento analizado permite identificar dinámicas no lineales en la respuesta de los tipos de vegetación durante las sequías. Las particularidades de estos últimos dos eventos expresan la complejidad de las respuestas de las coberturas vegetales a la sequía. Esto abre nuevas preguntas acerca de las particularidades de cada evento que requerirán estudios de caso con mayor detalle, para integrar el nexo entre la intensidad y duración de la sequía, momento estacional en el que transcurrió y la complejidad de las respuestas no lineales. El análisis espacio-temporal de los IV permitió identificar dos zonas con valores altos de capacidad fotosintética y contenido de agua en la vegetación. Al oeste de Canelones, la zona comprendida dentro de los humedales del Río Santa Lucía, con una tendencia a intensificar los valores; y parches forestados ubicados al este del departamento, que persisten como puntos calientes durante los eventos de sequía. Esto permite identificar que, tipos de vegetación definidas por el modelo de vulnerabilidad como situaciones opuestas en términos de sensibilidad a la sequía, en este caso humedales por un lado y forestación exótica por otro, muestran una respuesta positiva al sostener su funcionamiento durante las sequías.

2.4 Conclusiones

En el espacio agrario de Canelones se registraron cinco eventos de sequía entre enero de 2015 y mayo de 2022 de distinta magnitud, incluyendo eventos de intensidad moderada a eventos de intensidad extrema, y desde un mes a cuatro de duración. A su vez, no se identificaron tendencias en la intensidad de las sequías. Las características del evento de 2015 concuerdan en su duración e intensidad con investigaciones previas sobre sequías agronómicas en Uruguay, fortaleciendo el argumento de la escala temporal (de cuatro meses) seleccionada para abordar la propagación de condiciones de sequía meteorológica en agronomía sobre agroecosistemas de base ganadera.

En el espacio agrario de Canelones, a partir de un análisis a escala de celda de 1km², la exposición biofísica prevalece sobre la sensibilidad socio-ecológica como condicionante de la vulnerabilidad. De acuerdo a las valoraciones realizadas por los investigadores consultados, el área ocupada por cobertura vegetal natural y la pendiente del terreno son los factores de mayor incidencia en la vulnerabilidad a la sequía.

Las zonas con mayores niveles de exposición biofísica a la sequía se ubican y concentran en la zona este-sureste de Canelones, mientras que el comportamiento espacio-temporal de la sensibilidad socio-ecológica muestran patrones diversos, con una concentración principal al este-sureste y centro-oeste del departamento, y una tendencia a aumentar los niveles medios en los últimos eventos de sequía. La intersección de ambos atributos permitió identificar zonas con alta exposición-sensibilidad al este-sureste de Canelones.

Los resultados evidencian una situación de mayor exposición a la sequía para los productores agropecuarios ubicados al este-sureste de Canelones, debido a las condiciones biofísicas de los suelos. Mientras que los niveles de sensibilidad complementan esta situación desfavorable debido al estado de la vegetación natural y la intensidad agraria, principalmente ligados a la forestación, proceso que coloca de manifiesto la necesidad de rever la fundamentación contenida en el Plan de Ordenamiento Rural – Ruralidades Canarias (IC, 2018) respecto a la prioridad al avance de la forestación en el este-sureste de Canelones.

El uso de los índices de vegetación permitió capturar dos atributos del estado vegetación antes y durante la sequía, la capacidad fotosintética y el contenido de agua en la vegetación. En términos generales, el NDWI resultó más robusto que el NDVI para diferenciar la relación entre el desarrollo de las sequías y los distintos contextos de coberturas vegetales/ usos del suelo. Analizar la respuesta a la sequía dentro del espacio agrario de Canelones se muestra como un desafío complejo debido a la diversidad de sus paisajes y estructuras agrarias.

La asociación positiva entre los índices de vegetación y el índice de sensibilidad a la sequía durante la mayoría de los eventos analizados, permite interpretar una mayor capacidad fotosintética y contenido de agua en la vegetación en áreas con alta intensidad agraria, principalmente ligadas a la forestación. Esta capacidad de mantener niveles altos de

productividad y contenido hídrico, sustentado en el consumo de mayores volúmenes de agua durante la sequía, es un factor que condiciona el acceso potencial al agua dentro de las cuencas con mayores niveles de intensidad agraria.

El análisis implementado en este capítulo permitió evaluar las características y el estado de situación del espacio agrario de Canelones en relación a las sequías. Desde un abordaje multiescalar, se requiere complementar los resultados obtenidos a nivel de espacio agrario con un análisis intrarregional para evaluar la vulnerabilidad que presentan los productores agropecuarios en concreto.

3 CAPÍTULO III – VULNERABILIDAD A LA SEQUÍA DE PRODUCTORES DE BASE GANADERA EN LAS CUENCAS DE LOS ARROYOS SARANDÍ, EL BAGRE Y MOSQUITOS

3.1 Introducción

Existe un amplio consenso científico acerca del rol determinante de la acción humana como forzante del cambio climático (Lynas et al., 2021), lo cual supone una situación de “riesgo del Antropoceno” (Keys et al., 2019). De no revertir la tendencia al calentamiento global se transita hacia un escenario de sequías más intensas y duraderas (Dai, 2011; Douville et al., 2022; Lehner et al., 2017), que amenaza gravemente a las sociedades dependientes de actividades agropecuarias (Vicente-Serrano et al., 2015) e incide en la migración de la población rural (Cattaneo et al., 2019; Hunter et al., 2015). Dentro de la diversidad de rubros agropecuarios, las actividades de base ganadera representan el principal uso del suelo a nivel global, siendo el sustento de 600 millones de pequeños agricultores y empleando a 1.300 millones de personas (Herrero et al., 2009; Thornton, 2010). Las sequías impactan negativamente en el sector ganadero mediante la reducción de la productividad primaria neta (Zhao y Running, 2010) y la pérdida de pasturas (Zhao et al., 2018). Por lo tanto, las sequías representan una amenaza meteorológica sobre economías de base ganadera. Comprender las condicionantes y potencialidades de cada territorio es clave para afrontar, con acciones locales, las sequías en el actual contexto de cambio ambiental global.

Ante los escenarios futuros de cambio climático e intensificación agraria, se presenta el desafío de adoptar prácticas que aseguren la viabilidad ecológica y económica de las actividades de base ganadera (De Faccio Carvalho et al., 2021; Havlík et al., 2014; Rojas-Downing et al., 2017). Los estudios de la vulnerabilidad con enfoque ambiental tienen el desafío de evaluar la sinergia entre las condicionantes biofísicas y socioeconómicas (Panda, 2017; Serkendiz et al., 2023; Vieira et al., 2023). Dentro de los factores biofísicos que definen la exposición a las sequías (primer componente de la vulnerabilidad), el suelo es determinante como reservorio de agua para la vegetación. A su vez, la vulnerabilidad de los productores agropecuarios ante eventos de sequía guarda relación con la historia de las relaciones sociales, económicas y políticas consolidadas en un proceso de largo plazo (de Souza, 2003), donde el control de la propiedad de la tierra cumple un papel determinante (Cruz et al., 2018). A diferencia de la exposición¹⁶, definida como un componente histórico-estructural, la sensibilidad¹⁷ y capacidad de respuesta¹⁸ se encuentran ligadas a la intencionalidad de los sujetos (Díaz et al., 2017). En este sentido, la sensibilidad y capacidad de respuesta se vinculan a la (auto)transformación de la naturaleza por el trabajo humano, pero se diferencian en la

¹⁶ Ver definición en página 7.

¹⁷ Ver definición en página 8.

¹⁸ Ver definición en página 8.

temporalidad de cada acción. La sensibilidad abarca estrategias de manejo del agroecosistema de mediano-largo plazo (por ejemplo, la orientación productiva e infraestructuras de apoyo), mientras que la capacidad de respuesta corresponde a acciones acotadas a una coyuntura, en este caso a las sequías.

La creciente preocupación acerca de la apropiación desigual (o acaparamiento) del agua como proceso subyacente al acaparamiento de tierras (Dell'Angelo et al., 2018; Rulli et al., 2013), amplía el marco de factores socioeconómicos que pueden incidir en la vulnerabilidad. Este proceso, por el cual determinados actores asumen el control de “valiosos recursos y cuencas de agua para su propio beneficio” (Kay y Franco, 2019), en un contexto como el uruguayo, que aparenta haber saldado el debate en torno a la legitimidad de la propiedad privada de la tierra con un amplio consenso (Piñeiro, 2014), implica ampliar el debate académico y político sobre la apropiación y uso de los bienes naturales. Desde un enfoque económico-político, Riera (2021) vincula la teoría de la renta de la tierra al agua considerando las inversiones de capital en infraestructuras que aseguran el uso del agua con el objetivo de aumentar la productividad agropecuaria. En este marco, considerar el nexo entre el control de la tierra, agua y capital en el estudio de las sequías permite evaluar la vulnerabilidad en función de las desigualdades históricas existentes en cada sociedad.

La cuenca del Río de la Plata es una de las zonas con mayores probabilidades de sufrir sequías ante cambios en el transporte de humedad de origen terrestre (Gimeno-Sotelo et al., 2024). En la región se proyecta el aumento de las precipitaciones y evapotranspiración potencial en las próximas décadas (Sordo-Ward et al., 2018), como parte de las dinámicas globales de cambio climático e “intensificación del ciclo hidrológico” (Huntington, 2006, 2010). El bioma de pastizales del Río de la Plata presenta la posibilidad de conciliar la producción de carne, leche y lana con la conservación de los pastizales (Sala y Paruelo, 1997). Sin embargo, está en marcha una intensificación ganadera, o “modernización ecológicamente débil” (Duru y Therond, 2015), determinada por el reemplazo del pastizal natural por mejoramientos forrajeros y el aumento de la carga ganadera (Modernel et al., 2016). Este cambio cualitativo en el funcionamiento de los agroecosistemas ganaderos compromete seriamente su capacidad de proveer servicios ecosistémicos. En esta línea, se entiende que la intensificación agraria opera como “amenaza sinérgica” junto a eventos climáticos extremos (Gazzano, 2018) sobre la vulnerabilidad a la sequía de productores ganaderos.

Uruguay tiene grandes potencialidades para lograr articular la producción de base ganadera con la conservación de los pastizales (Resare Sahlin et al., 2024). La relevancia económico-cultural de la ganadería en Uruguay resulta de condiciones agroecológicas favorables y el rol histórico asignado al país en la división internacional del trabajo (Barrán y Nahum, 1984). Las sequías han condicionado históricamente los rendimientos agropecuarios (Bartaburu et al., 2009; Moraes, 2001), llevando a una transición en las políticas orientadas a mitigar los efectos de las sequías, desde un enfoque reactivo hacia uno proactivo (Cruz et al 2018).

Considerando la diversidad de estructuras agrarias que componen el sector ganadero uruguayo, resulta clave integrar las condicionantes económico-productivas de los productores para implementar políticas focalizadas en reducir la vulnerabilidad a la sequía (Díaz et al., 2020). Se estima que las sequías ocurridas entre 2022 y 2023 en Uruguay generaron pérdidas en el entorno de U\$S 540 millones para las actividades de base ganadera¹⁹ (MEF, 2023). A nivel económico-productivo, Cruz et al (2018) identifican la pérdida de animales y venta de ganado a precios bajos como principales consecuencias negativas de las sequías, lo cual deriva en la descapitalización de las explotaciones agropecuarias y compromete su capacidad de recuperación luego de finalizar la sequía.

Estudios para determinadas regiones de Uruguay brindan información respecto a condiciones biofísicas y sistemas ganaderos concretos. En la Cuesta Basáltica, Gutiérrez et al (2020) sugieren que el efecto de las precipitaciones en la productividad vegetal del pastizal repercute en la productividad animal dos años después. Para la misma región, Bartaburu et al (2009) hallaron diferentes estrategias de respuesta según la intensidad del sistema y la superficie manejada, así como “lógicas” de insustentabilidad ecológica y económica en sistemas familiares. En la región centro-sur del país, Tommasino et al (2023) registraron un vínculo positivo entre la diversidad vegetal y baja intensidad productiva con la resistencia a la sequía. En las Sierras del Este, Díaz et al (2019) hallaron un fuerte vínculo entre la productividad de los pastizales naturales y la precipitación acumulada de los 4 meses anteriores, que, junto a características socio-económicas y culturales, integran componentes estructurales y la capacidad de respuesta a la sequía (Díaz et al 2018a; Díaz et al., 2020). En resumen, los antecedentes señalan distintos elementos vinculados con la vulnerabilidad a la sequía: características socio-económicas y culturales, tiempo de respuesta de la vegetación y el ganado, intensidad agraria, y decisiones y prácticas de manejo productivo. Esta diversidad de factores e interacciones conduce a impactos diferenciales según particularidades del agroecosistema. Como el impacto de las sequías varía según las condiciones biofísicas y sociales concretas de cada región y productor, resulta clave ampliar el estudio de la vulnerabilidad a la sequía en regiones que no fueron abordadas previamente.

El objetivo de este capítulo fue evaluar la vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera ubicados en zonas de alta exposición y sensibilidad a la sequía en el departamento de Canelones. La estrategia de trabajo se basó en la construcción de un modelo de vulnerabilidad que integró información biofísica, socio-económica, prácticas productivas y estrategias de respuesta a la sequía de productores de base ganadera. En este capítulo se abordan los objetivos específicos iii y iv de la tesis: analizar las estrategias de respuesta implementadas por productores de base ganadera ante las sequías, y evaluar los factores que determinan su vulnerabilidad a la sequía. Las preguntas que orientaron este capítulo fueron: ¿cuáles son las principales estrategias de respuesta de los productores ante la sequía? ¿las

¹⁹ Comprende U\$S 136 millones por costos adicionales de suplementación y caída de la remisión en la lechería, U\$S 258 millones por concepto de terneros no nacidos y menor volumen de la faena en ganadería, y U\$S 145 millones por praderas perdidas.

estrategias de respuesta presentan algún vínculo con las estructuras agrarias de los productores de base ganadera? ¿qué variables determinan la vulnerabilidad a la sequía de los productores de base ganadera ubicados en la región este-sureste de Canelones?

3.2 Metodología

La estrategia metodológica de este capítulo combinó el manejo de información primaria y secundaria con la aplicación de técnicas de análisis multivariados para evaluar la vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera (Figura 3.3) ubicados, de acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo II, en zonas de alta exposición y sensibilidad a la sequía. En primer lugar, se realizó una selección de productores de base ganadera del área de estudio (n= 17), de los cuales se caracterizó su contexto biofísico, la estructura agraria y estrategias empleadas para afrontar las sequías, mediante información geo-espacial y entrevistas realizadas en trabajo de campo. Luego, se emplearon técnicas de análisis multivariado para identificar las variables de mayor relevancia dentro del modelo explicativo de vulnerabilidad a la sequía y se generaron grupos de productores según sus niveles de vulnerabilidad. Por último, se discutieron las estrategias de respuesta y los impactos de la sequía de acuerdo a la situación de vulnerabilidad de cada grupo de productores. De esta forma, se logró identificar las variables determinantes de la vulnerabilidad a las sequías, agrupar a los productores de acuerdo a su situación de vulnerabilidad y evaluar las estrategias de respuesta ante las sequías.

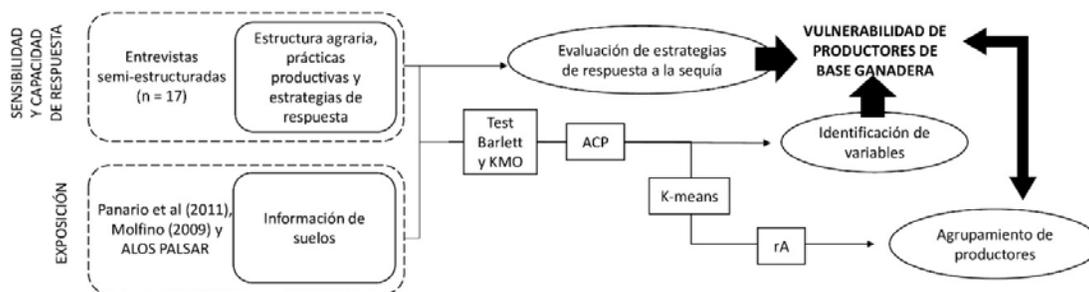


Figura 3.3 Estrategia de investigación del capítulo III. Criterio Kaiser-Meyer-Olkin: KMO, Análisis de Componentes Principales: ACP, análisis clúster método K-means: K-means, test ANOSIM: rA.

3.2.1 Área de estudio

Se relevó información de 17 productores de base ganadera ubicados en las cuencas de los arroyos El Bagre, Sarandí y Mosquitos, ubicados al este-sureste de Canelones (Figura 3.4). Se definieron estas cuencas debido a su localización en zonas que, de acuerdo a los resultados del capítulo II, presentan una alta exposición y sensibilidad a la sequía. Estas cuencas se caracterizan por contar con suelos predominantes profundos, de textura media-liviana y drenaje moderado-rápido, con geoformas de tipo plana suave, seguida de plana fuerte y

ondulado suave (Panario et al., 2011). A su vez, la región registra dinámicas de intensificación agraria ligadas a la consolidación de la forestación (IC, 2018) y en menor medida a la expansión agrícola. Otro componente a destacar es el efecto de la erosión del suelo por la agricultura intensiva, como el cultivo de remolacha azucarera, que marcaron la historia agraria de la región (Ponzo, 2022). A diferencia de los atributos biofísicos (suelos) y socio-ecológicos (usos), la amenaza meteorológica – relevada mediante el SPEI – no mostró diferencias dentro del departamento²⁰, por lo cual no se consideró a la amenaza meteorológica como variable para definir la región de estudio en Canelones.

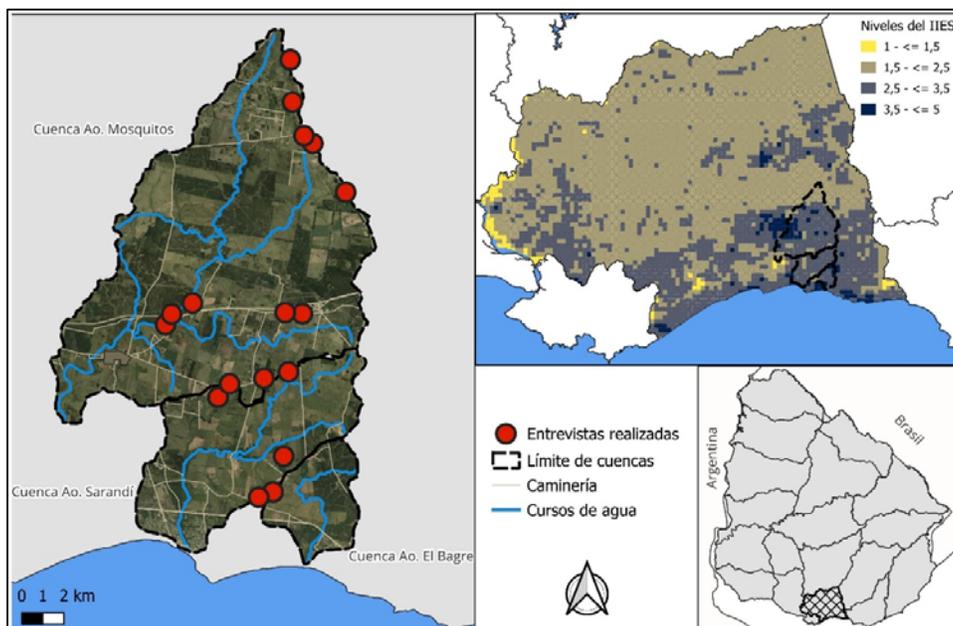


Figura 3.4 Localización de los productores entrevistados (izquierda), localización del área de estudio y valores del índice de exposición-sensibilidad (IES) promedio (arriba derecha).

3.2.2 Relevamiento de productores y procesamiento de información biofísica

En una primera etapa se definieron las variables a relevar en campo mediante una revisión bibliográfica sobre la vulnerabilidad a la sequía de productores de base ganadera²¹. Luego, se realizaron entrevistas semi-estructuradas (Anexo 1.1) a 17 productores de base ganadera (vacuna, ovina y/o lechería), en un total de cuatro salidas de campo realizadas en mayo, junio y julio de 2024. En una primera instancia, se utilizaron tres fuentes de información de manera integrada para identificar puntos potencialmente vinculados a predios de base ganadera: la clasificación de usos del suelo generada en el primer capítulo de la tesis, padrones rurales y puntos con infraestructura de viviendas obtenidos a partir de IDE. Luego, en la primera salida se relevaron dichos puntos, y mediante la recorrida y el contacto con productores se

²⁰ Ver punto 2.3.1 donde se desarrolla este resultado.

²¹ A nivel nacional se consultaron los trabajos de Cruz et al (2018), Díaz et al (2017, 2018, 2019), Tommasino et al (2023), Bartaburu et al (2009); y a nivel internacional destacan los trabajos de Bahta y Lombard (2023); Deléglise et al (2023); Gbetibouo y Ringler (2009); González Tánago et al (2016); Karimi et al (2018); Knutson et al (1998).

identificaron nuevos predios para relevar. Se recopiló información primaria sobre las estructuras agrarias (superficie, intensidad agraria, cantidad de trabajadores)²², las estrategias de corto y largo plazo para afrontar la sequía, la percepción del impacto sobre el funcionamiento del sistema y los resultados de las estrategias implementadas. En paralelo, se resumió información edáfica generada por Panario et al (2011) y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo definida por Molfino (2009) a escala de productor. Esto permitió trabajar con atributos biofísicos que, en su conjunto, definen la calidad del suelo (Magdoff, 1999). La información obtenida fue georreferenciada y sirvió de base para los análisis posteriores. La información relevada en campo y la proveniente de fuentes secundarias se procesó con el software QGIS v3.32.3.

3.2.3 Identificación de variables determinantes de la vulnerabilidad

A partir de las 32 variables preliminares identificadas en los antecedentes y en las entrevistas, de las cuales 25 se generaron en base a las entrevistas (Tabla 3.1), se procedió a identificar aquellas variables con mayor incidencia en la vulnerabilidad a la sequía. Primeramente, se empleó el test de Bartlett y el criterio Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) para verificar la viabilidad de emplear un análisis factorial. Se considera viable la aplicación de un análisis factorial con un p-valor menor a 0,05 en el test de Barlett y un resultado global del KMO mayor a 0,6. Luego de verificar la validez de emplear un análisis factorial, se aplicó el Análisis de Componentes Principales (ACP) para resumir la información de las variables seleccionadas en nuevas variables, llamadas componentes principales (CP). El ACP reduce la dimensionalidad de los datos y conserva la mayor parte de la variación del conjunto de datos, al sintetizar la información manejada en CP que son combinaciones lineales de las variables originales (Ringnér, 2008). Se tomó como criterio que la varianza explicada por cada CP sea mayor al 12%. Esto permitió construir un modelo de vulnerabilidad, mediante CP vinculados a las variables explicativas de la vulnerabilidad.

Tabla 3.1 Lista de variables explicativas relevadas para la construcción del modelo de vulnerabilidad a la sequía.

Grupo de variables	Variables
Biofísicas (suelo)	drenaje; profundidad; textura; materia orgánica; capacidad de almacenar agua en el suelo; pendiente; productividad
Socio-económicas	propiedad de la tierra; superficie total; dependencia económica; inserción en el mercado; trabajo familiar, asalariado y total.
Animal	cantidad de: vacunos, vacas lecheras, ovinos y bueyes; diversidad animal; carga animal
Vegetal	área con mejoramientos forrajeros; proporción de superficie con mejoramientos forrajeros; disponibilidad de tierra para producción vegetal; producción vegetal
Hídrico	disponibilidad hídrica en ausencia de sequías; disponibilidad durante sequías
Estrategias de respuesta	momento respuesta; tipos de acciones; capacidad de implementar alternativas; pronóstico
Usos previos y contexto productivo	intensidad de usos del suelo previos; intensidad agraria de predios colindantes

²² Refiere al conjunto de componentes relativamente estables que organizan los sistemas agropecuarios, como la superficie, el uso del suelo, las prácticas productivas y las relaciones de producción (Fernández Nion, 2021).

3.2.4 Agrupamiento de productores según vulnerabilidad a la sequía

Las técnicas de agrupamiento, ampliamente utilizadas en diversos estudios y para diversas regiones geográficas, presentan elevado potencial para evaluar la diversidad de situaciones de vulnerabilidad de los sujetos sociales y el diseño de políticas orientadas a cada situación (Karimi et al., 2018; Marshall et al., 2014). Con el objetivo de diferenciar grupos de productores en función de las variables que determinan la vulnerabilidad, se empleó el análisis clúster con el método k-means a partir de los CP. Este método no-jerárquico permite identificar un número de clústeres, especificado por el usuario, representados por sus centroides (Tan et al., 2006; Wu, 2012), que maximiza la similitud de casos dentro del grupo y minimiza la similitud con los casos de otros grupos. Posteriormente, a los efectos de evaluar la significancia de la diferencia entre los grupos generados, se recurrió al test no paramétrico ANOSIM (rA) (Clarke, 1993), el cual evalúa la significancia de la diferencia entre dos o más grupos, en base a la medición de la distancia de los valores de sus matrices de (dis)similitud. El test ANOSIM arroja un estadístico rA máximo igual a 1, lo cual indica que todos los casos de los grupos son más similares entre sí que cualquier otro caso de otro grupo. Tanto el ACP como el clúster, propuestos en el presente análisis, han sido implementados en distintos estudios previos para caracterizar y diferenciar sistemas ganaderos (por ejemplo, Díaz, 2018 y Guzmán et al., 2017). Los análisis estadísticos se realizaron en el software Rstudio version 4.3.1 (RStudio Team, 2020) con los paquetes FactoMineR (Lê et al., 2008), factoextra (Kassambara y Mundt, 2020), cluster (Maechler et al., s. f.) y NbClust (Charrad et al., 2014).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Variables explicativas de la vulnerabilidad

Las pruebas preliminares al uso del ACP permitieron reducir las variables explicativas de la vulnerabilidad a la sequía, de 32 a 10 variables (Tabla 3.2). Las variables no incorporadas dan cuenta de factores que explican de manera marginal, o no logran explicar, la variabilidad de la vulnerabilidad a la sequía para los productores relevados. Por ejemplo, la propiedad de la tierra no mostró diferencias, siendo todos propietarios. Las 10 variables incluidas en el modelo de vulnerabilidad corresponden a los grupos de variables asociadas a atributos biofísicos (n = 2), socio-económicos (n = 2), vegetales (n = 1), animales (n = 1) e hídricos (n = 2) del agroecosistema, las estrategias de respuesta a la sequía (n = 1) y los usos previos/contexto productivo (n = 1). A su vez, estos resultados indican que la intensidad agraria de los predios colindantes, variable propuesta como indicador de la presión externa sobre el funcionamiento de los predios ganaderos, presenta una participación marginal sobre la vulnerabilidad a la sequía. También presentan una participación marginal gran parte de las estrategias productivas de mediano (por ejemplo, la superficie con mejoramientos) y corto plazo (momento de respuesta, revisión de proyecciones meteorológicas).

El conjunto de variables incluidas arrojó un KMO de 0.63 y un p-valor <0.05 en el test de Barlett. Los dos primeros CP lograron capturar el 70% de la varianza del sistema (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Correlación entre Componentes Principales y variables explicativas de la vulnerabilidad.

Grupo de variable	Variable	CP1	CP2
Socio-económicas	inserción en el mercado	0.85	0.33
	dependencia económica	0.78	0.34
Vegetal	disponibilidad de tierra para producción vegetal	0.82	0.20
Hídrica	disponibilidad hídrica normal	0.82	-0.14
	disponibilidad hídrica durante sequías	0.76	-0.35
Animal	diversidad de especies animales	-0.74	0.08
Usos previos y contexto productivo	intensidad de usos del suelo previos	0.67	-0.47
Estrategias de respuesta	capacidad de reducir daño de las sequías	0.57	0.38
Biofísicas (suelo)	capacidad de almacenar agua	0.00	0.91
	Profundidad	-0.21	0.89
Varianza explicada por CP	Simple	46%	24%
	Acumulada	46%	70%

El CP1 explica el 46% de la varianza y presenta coeficientes de correlación positivos, ordenados de mayor a menor, con el grado de inserción en el mercado, la disponibilidad de tierra necesaria para obtener una producción vegetal acorde a la carga animal, la oferta hídrica en condiciones climáticas normales, la dependencia económica de los ingresos de la producción agropecuaria, la oferta hídrica durante sequías (Figura 3.5). En menor grado que las variables anteriores, el CP1 se correlaciona positivamente con la intensidad histórica del uso del suelo y con la capacidad de implementar las estrategias de mitigación a las sequías. La única variable que se correlaciona negativamente con el CP1 es la diversidad de especies animales. El CP1 resume información vinculada al manejo productivo del agroecosistema, que al estar ligado al trabajo humano se vincula a la sensibilidad a la sequía y la capacidad de respuesta de los productores. El CP2 explica el 24% de la varianza del sistema y muestra niveles de correlación positiva muy alta (>0,75) con la profundidad del suelo y su capacidad de almacenar agua (Figura 3.6). De esta forma, el CP2 se vincula a los atributos que definen la exposición biofísica de los productores ante la sequía.

Los resultados permiten interpretar al CP1 como un componente que capta información diversa y con distinta temporalidad, al vincularse a condicionantes histórico-económicas y atributos del agroecosistema. El CP2 guarda relación con las condicionantes biofísicas estructurales, determinadas por un número reducido de variables dependientes de los atributos del suelo. El comportamiento temporal diverso de las variables resumidas por el CP1

representa un desafío para definir estrategias concretas orientadas a reducir la vulnerabilidad a la sequía de los productores, dado que implica atender a condiciones socio-económicas e históricas (largo plazo), readecuar el estado y manejo de los factores de producción (mediano plazo) e implementar acciones de respuesta que reduzcan la vulnerabilidad (corto plazo). En cambio, las variables correlacionadas con el CP2 son estructurales, rígidas a sufrir cambios en el corto-mediano plazo. Por lo tanto, la construcción de estrategias para reducir la vulnerabilidad a la sequía de quienes se vinculen negativamente con el CP2 representa un desafío por el propio carácter de los atributos biofísicos.

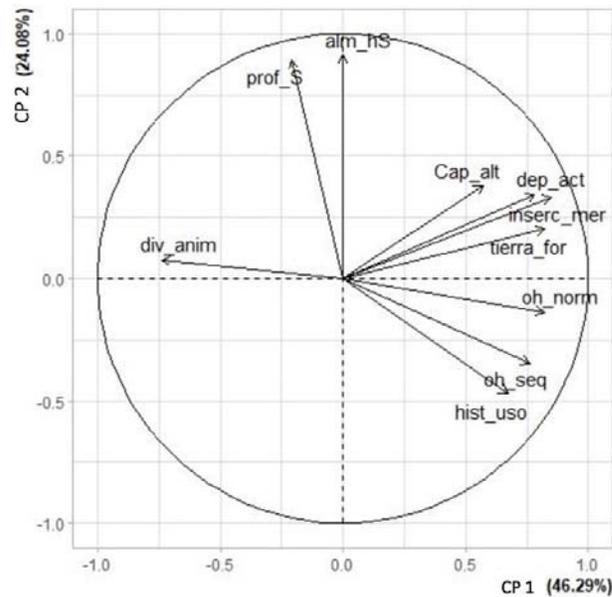


Figura 3.5 Relación entre las variables explicativas de la vulnerabilidad a la sequía y los dos primeros Componentes Principales. Almacenamiento de agua en el suelo: alm_hS; profundidad del suelo: prof_S; inserción en el mercado: inserc_mer; dependencia económica: dep_act; disponibilidad de tierra para producción vegetal: tierra_for; disponibilidad hídrica sin sequía: oh_norm; disponibilidad hídrica durante sequías: oh_seq; diversidad de especies animales: div_anim; intensidad de usos del suelo previos: hist_uso; capacidad de reducir daño de las sequías: Cap_alt.

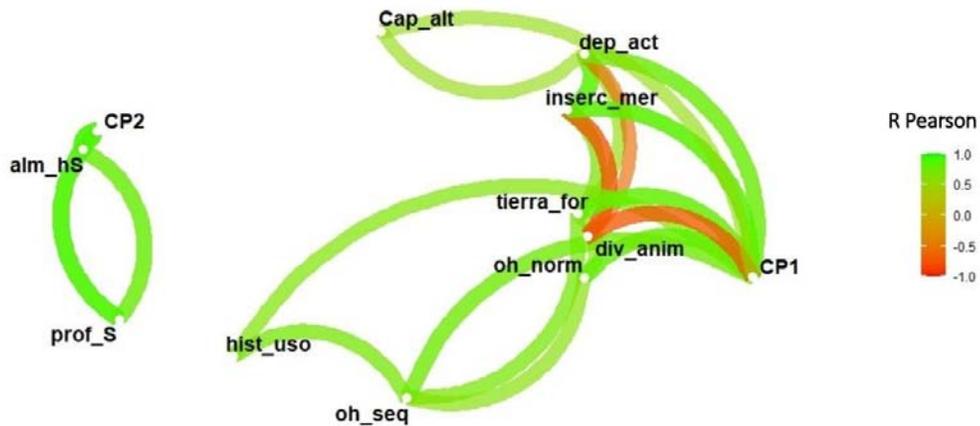


Figura 3.6 Red de correlación Pearson entre las variables explicativas de la vulnerabilidad y los dos primeros Componentes Principales. Almacenamiento de agua en el suelo: alm_hS; profundidad del suelo: prof_S; inserción en el mercado: inserc_mer; dependencia económica: dep_act; disponibilidad de tierra para producción vegetal: tierra_for; disponibilidad hídrica sin sequía: oh_norm; disponibilidad hídrica durante sequías: oh_norm; diversidad de especies animales: div_anim; intensidad de usos del suelo previos: hist_uso; capacidad de reducir daño de las sequías: Cap_alt.

3.3.2 Grupos de productores según situación de vulnerabilidad a la sequía

Se detectó una situación heterogénea entre productores respecto a las variables explicativas de la vulnerabilidad (Anexo 1.2), resumidas en los CP 1 y 2 (Figura 3.7). El vínculo positivo del CP1 con la disponibilidad de factores de producción clave, como la tierra, alimento y agua, y del CP2 con la profundidad y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, supone una posición más favorable a quien se relaciona positivamente con ambos CP (cuadrante superior derecho) y una posición muy desfavorable a quienes se relacionan negativamente con ambos CP (cuadrante inferior izquierdo). En el cuadrante inferior sobre el eje vertical encontramos dos casos (H e I) fuertemente comprometidos por contar con suelos de menor profundidad y capacidad de almacenar agua. En el extremo izquierdo sobre el eje horizontal, se identifican tres casos (A, P y J) de productores con limitantes histórico-económicos, como ser la escasa disponibilidad de factores de producción (tierra, agua, alimento) para la carga ganadera que manejan, y la baja capacidad de implementar durante los eventos de sequía presentan bajas capacidades de implementar estrategias para mitigar el daño.

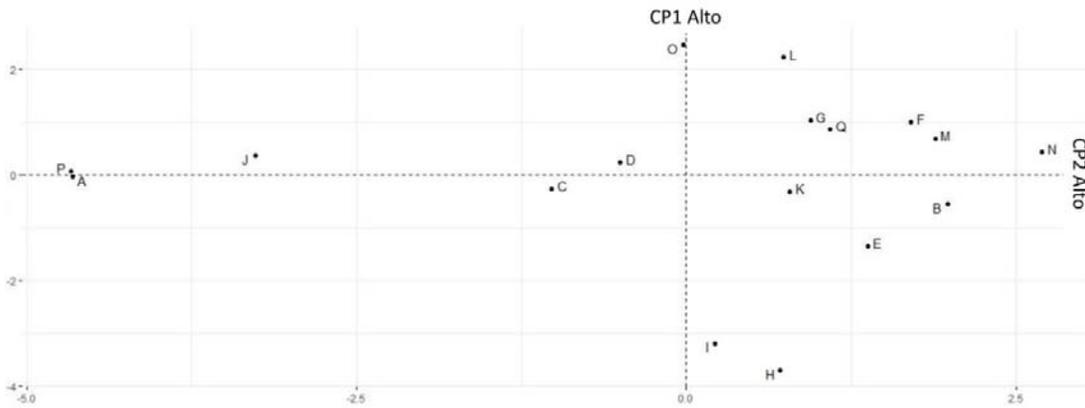


Figura 3.7 Posición de los productores (indicados con letras) de base ganadera respecto a los valores de los Componentes Principales 1 y 2. El cuadrante inferior del eje vertical y el izquierdo del eje horizontal se vinculan a una alta vulnerabilidad biofísica y económico-productiva, respectivamente.

Mediante el análisis clúster se generaron cuatro grupos estadísticamente disimiles ($rA = 0,81$; p -valor $< 0,001$) que se vinculan de manera diversa a los CP (Figura 3.8).

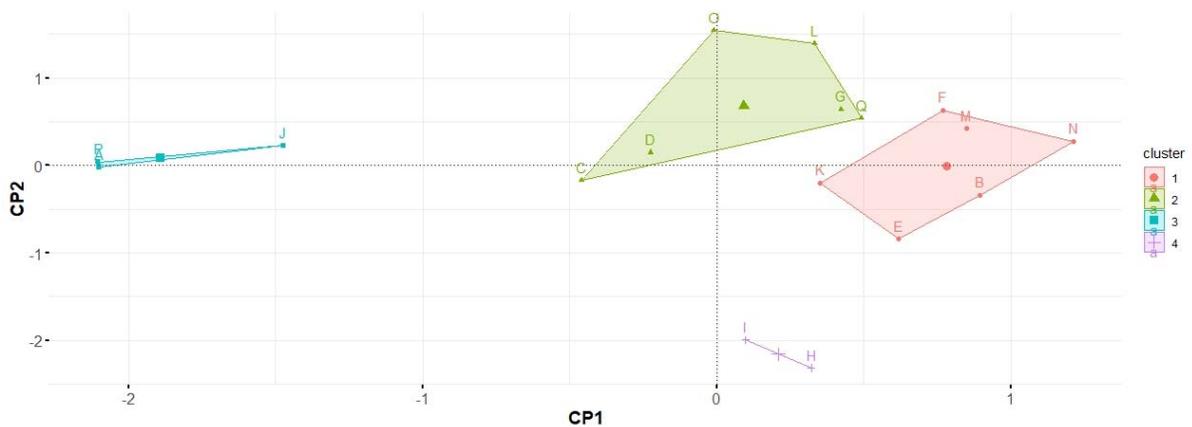


Figura 3.8 Grupos de productores según di/similitud de valores de Componentes Principales.

En un análisis detallado se diferenciar la situación de vulnerabilidad de cada grupo en relación a las estructuras agrarias:

Grupo 1. Los seis productores del grupo cuentan con suelos de profundidad media-alta y una capacidad de almacenar agua en el suelo de 102 mm promedio. Los rasgos comunes de las estructuras agrarias²³ del grupo son la inserción total en el mercado, la especialización en la ganadería vacuna y la historia productiva con usos de intensidad moderada-alta. Sin embargo, existen fuertes contrastes en la superficie total controlada, las relaciones socio-laborales y el uso de mejoramientos forrajeros. Se diferencia un subgrupo *familiar*, compuesto por dos productores de superficie menor a 55 hectáreas, con aproximadamente un 20% de la superficie con mejoramientos forrajeros y sin trabajo asalariado; y otro

²³ Se presentan variables de la estructura agraria, no incorporadas en el ACP, en el Anexo 1.3.

subgrupo, *empresarial*, de cuatro productores que controlan desde 200 a 1.800 hectáreas, con más del 30% de la superficie mejorada²⁴ y predominancia de trabajo asalariado. El conjunto de casos de estos grupos utiliza fuentes de agua superficiales, y dentro del sub-grupo *empresarial* dos casos incorporan el uso de agua subterránea²⁵.

Grupo 2. Este grupo se compone por seis productores. Disponen de suelos profundos y son el grupo con una mayor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (107 mm promedio). En términos socio-económicos, los productores se caracterizan por la inserción total en el mercado y una alta dependencia de los ingresos de la actividad agropecuaria. Se especializan en la ganadería vacuna o lechera, y presentan situaciones distintas en cuanto a las relaciones socio-laborales y el uso de mejoramientos forrajeros. Se diferencian dos sub-grupos, ambos integrados por 3 productores: el primer subgrupo se define como *familiar*, donde predomina el trabajo familiar sobre el asalariado y la superficie mejorada es menor al 20% de la total; y el segundo subgrupo *empresarial*, que abarca a los dos casos orientados a la lechería, con predominancia de trabajo asalariado y un porcentaje de la superficie con mejoramientos superior al 76%.

Grupo 3. Este grupo se compone por tres casos, que presentan una capacidad de almacenamiento de agua en suelo promedio de 101 mm. Los productores de este grupo se encuentran en una situación de vulnerabilidad alta debido a múltiples factores: condicionantes socio-económicas e históricas, disponibilidad de recursos productivos y posibilidad de implementar acciones que mitiguen el daño de las sequías. Sus estructuras agrarias se basan en sistemas de subsistencia-autoabastecimiento. Manejan una superficie total entre 3 y 15 hectáreas, el trabajo es totalmente familiar, su inserción en el mercado es nula (n=2) o marginal (n=1), tienen una diversidad animal mayor a la media y dependen de fuentes de agua superficiales (tajamares). A estas características se suma que dos casos realizan un manejo orgánico, a base de tracción animal y maíz criollo. La principal limitante del grupo respecto al manejo del agua es la relación desfavorable entre los requerimientos del ganado y la disponibilidad hídrica. Se suma como restricción la baja capacidad económico-técnica de los productores de implementar estrategias que consideran necesarias para afrontar las sequías.

Grupo 4. Los dos casos que integran este grupo se encuentran en una posición desfavorable debido al tipo de suelo de sus predios. Ambos casos presentan suelos con una capacidad de almacenamiento de agua muy baja (de 57 mm) y de profundidad media. Sus estructuras agrarias se caracterizan por el manejo de pequeñas superficies (5 y 17 hectáreas), ausencia de trabajo asalariado, especialización ovina, y un nivel de dependencia económica e inserción en el mercado parcial. Los productores de este grupo dependen de fuentes de agua superficiales naturales (arroyos y cañadas) con una disponibilidad hídrica muy alta en relación

²⁴ El promedio es de 67% y con un caso máximo de 100%.

²⁵ Es una estrategia relevante ya que evita la exposición directa a eventos de sequía, en comparación a las fuentes superficiales. A su vez, los pozos cuentan con rendimientos hídricos altos, de 10.000 l/h.

a los requerimientos del ganado, sin sufrir cambios sustanciales durante las sequías. La situación favorable de disponibilidad hídrica se vincula a la localización los predios, que colindan con el arroyo Mosquitos y la cañada Cueva del Tigre (Figura 3.9).

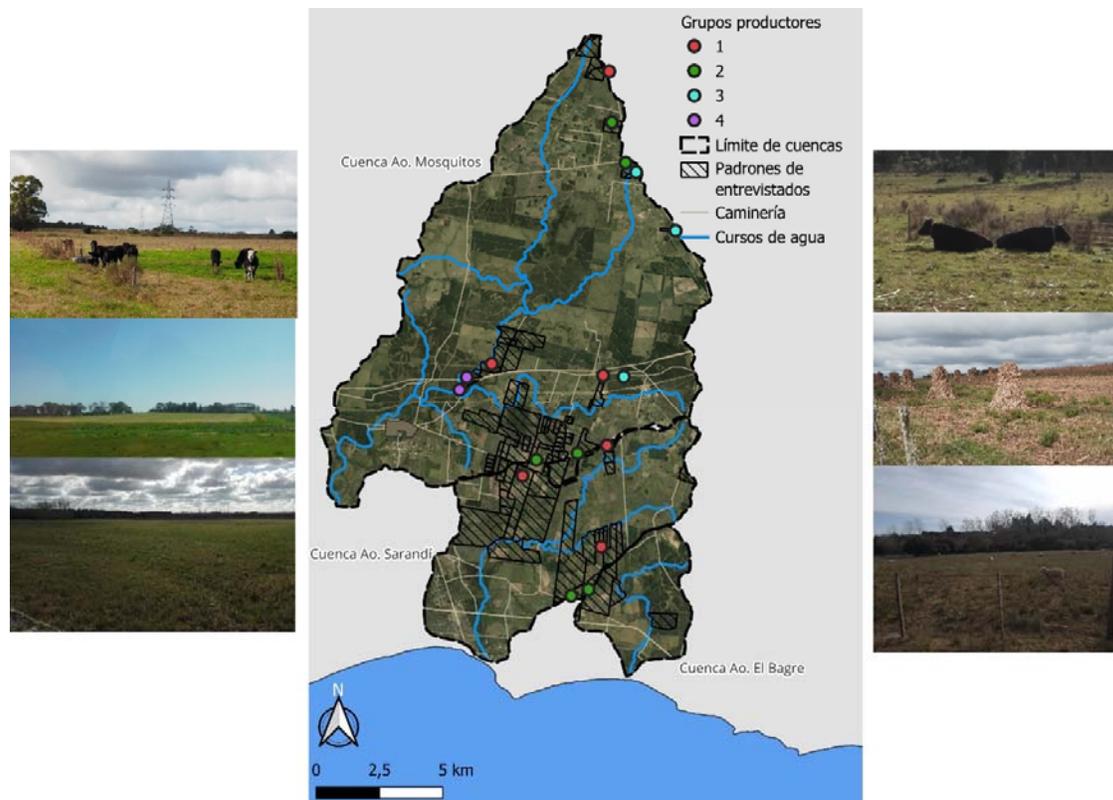


Figura 3.9 Localización de productores entrevistados según grupo de vulnerabilidad a la sequía. A la izquierda, imágenes representativas de los Grupos 1 y 2: ganados vacunos en torno a un bebedero, cosecha de pradera y potrero en período de descanso. A la derecha, imágenes representativas de los Grupos 3 y 4: yunta de bueyes, cosecha de maíz criollo y cría de ovinos.

Los resultados obtenidos exponen las variables que determinan la vulnerabilidad a la sequía de los productores de base ganadera ubicados en las cuencas de los arroyos Sarandí, El Bagre y Mosquitos. Estas variables agrupan atributos biofísicos, sobre los cuales tienen un escaso margen de intervenir, y económicos-productivos, sobre los cuales es posible implementar acciones mediante una planificación del manejo predial acorde a las capacidades productivas instaladas. La situación de los productores es heterogénea en cuanto a dichas variables. Cinco productores se encuentran en una situación de alta vulnerabilidad (Grupo 3 y 4) debido a la superficie que manejan y dos productores (Grupo 4) además se ven fuertemente condicionados debido a las restricciones de la estructura biofísica del suelo. En cambio, doce productores se encuentran con condiciones relativamente favorables, seis respecto a la organización del sistema productivo (Grupo 1) y otros seis debido a los atributos biofísicos de los suelos (Grupo 2). Las diferencias entre grupos de vulnerabilidad presentan un fuerte vínculo con la superficie manejada y la inserción en el mercado, dado que los grupos de menor

superficie e inserción en el mercado presentan mayor vulnerabilidad, mientras que los menos vulnerables controlan mayores superficies y tienen un alto grado de inserción en el mercado.

3.3.3 Estrategias de respuesta a la sequía y resultados alcanzados

Como destaca Bartaburu et al (2009), la diversidad de estrategias empleadas por los productores para afrontar las sequías está ligada a la “formación y acumulación de conocimiento local”. Dentro de estas estrategias pueden diferenciarse prácticas coyunturales, acotadas al transcurso del evento, y acciones que buscan organizar el sistema productivo previamente y reducir su sensibilidad al impacto potencial de las sequías.

En los casos relevados, tanto las acciones proactivas como las reactivas, apuntan al acceso a alimento y agua como ejes centrales. En este sentido, las principales acciones de respuesta coyunturales son la compra de alimento y el uso de agua extra-predial. Dentro de las estrategias que permiten reducir la sensibilidad a las sequías destacan la generación de reservas forrajeras y la ampliación de la oferta hídrica, mediante la perforación de pozos y la construcción y mantenimiento de tajamares (Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Tipos de respuesta ante la sequía y, en paréntesis, cantidad de productores que implementan esta respuesta.

Tipo de respuesta	Descripción
Coyuntural	compra alimento (n=8); uso de agua extra-predial (n=5); baja carga (n=3); pastoreo en camino (n=3)
reducción de sensibilidad	hace reservas de alimento (n=6); amplía fuentes hídricas (n=5); venta de ganado en verano (n=1)

La distinción entre los tipos de acciones frente a las sequías permite abordar de manera específica la situación de vulnerabilidad de cada grupo. Dentro de los grupos de mayor vulnerabilidad (Grupos 3 y 4) predominan las respuestas coyunturales, particularmente los productores del grupo 3 únicamente emplean acciones acotadas al momento de la sequía (Figura 3.10). En los grupos de menor vulnerabilidad (Grupos 1 y 2) se combinan acciones coyunturales y de preparación ante las sequías. En estos grupos de menor vulnerabilidad, dentro de los subgrupos familiares predominan respuestas coyunturales, mientras que en los subgrupos empresariales se combinan acciones coyunturales y estrategias de preparación, que les permite reducir su sensibilidad a la sequía.

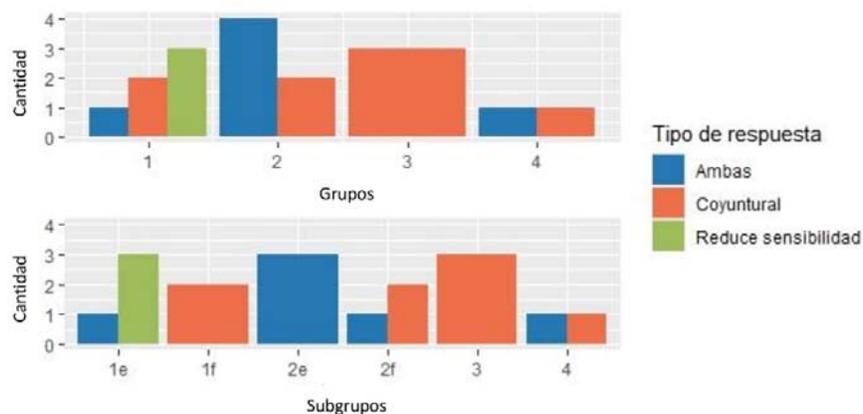


Figura 3.10 Cantidad de productores de cada (sub)grupo que emplean los distintos tipos de respuesta. “e”, empresarial; “f”, familiar.

Las estrategias que permiten reducir la sensibilidad pueden entenderse como un proceso resultante de la acumulación de respuestas coyunturales que se transfieren a un ajuste y mejoramiento de los componentes del sistema. En concreto, las estrategias de reducción de la sensibilidad en los casos estudiados les permiten aumentar la disponibilidad de agua, optimizar el momento de venta del ganado, plantar forrajes con mayor resistencia al déficit hídrico y hacer reservas de forraje independientemente de la época del año.

El caso de la generación de reservas forrajeras, independientemente de la estación, es una estrategia clave al dar estabilidad al sistema productivo ante la variabilidad climática y prolongación de sequías meteorológicas. Esta práctica permite disminuir la sensibilidad de los sistemas de base ganadera a los cambios en el acumulado de las precipitaciones, y sus consecuencias sobre la productividad vegetal (Díaz, 2018) y la producción animal (Gutiérrez et al 2020). Se destaca que cinco de los seis productores que generan reservas forrajeras presentan estructuras agrarias con un perfil empresarial. Esto se puede vincular a que la disponibilidad de tierra y capital condicionan la viabilidad de implementar esta estrategia, que incluye destinar una superficie del predio exclusivamente a plantar y acceder a los insumos agrícolas necesarios.

De los 10 productores caracterizados por estructuras agrarias de tipo familiar²⁶, sólo 3 disminuyen la carga animal (mediante la venta anticipada del ganado) como estrategia de respuesta a la sequía. A su vez, estos 3 productores forman parte de los grupos de menor vulnerabilidad. En este sentido, la gran mayoría de los productores familiares (7) no logra romper con la denominada “lógica perversa” identificada por Bartaburu et al (2009), que supone mantener la carga ganadera y forzar los recursos forrajeros durante eventos de sequía. Los 3 productores que logran romper con ésta “lógica”, a nivel ecológico disminuyen la presión sobre la base forrajera y evitan comprometer su estado ante la prolongación de la

²⁶ Dos del grupo 1, tres del grupo 2, y la totalidad de los grupos 3 y 4. La distinción fundamental entre el carácter familiar o empresarial de la estructura agraria se realizó en base a la predominancia de trabajo asalariado o familiar, y no de la normativa del MGAP.

sequía y, a nivel económico evitan depender de la compra de fardos, la desvalorización del ganado por pérdida de peso o estar sujetos a una venta del ganado con escaso margen de negociación. Romper esta dinámica de insustentabilidad representa un punto clave a trabajar para reducir la vulnerabilidad a la sequía de productores familiares (Díaz et al., 2020). El principal desafío estratégico radica en disminuir la carga mediante la venta de ganado (descapitalización) durante la sequía sin comprometer la recuperación productiva de mediano plazo luego de finalizado el evento, para así asegurar la sustentabilidad ecológica y económica en el largo plazo.

En el caso de las estrategias ligadas al acceso al agua, se diferencian igualmente acciones coyunturales de aquellas que apuntan a una preparación ante las sequías. Se destaca el acceso a fuentes de agua extra-prediales, como acción reactiva, y las mejoras y/o ampliación de las fuentes hídricas, como acción proactiva. Dentro de los productores que acceden a fuentes extra-prediales durante las sequías, el 80% pertenece a grupos y subgrupos familiares. Por el contrario, el 80% de quienes mejoran y/o amplían las fuentes hídricas propias son de subgrupos empresariales. Como plantea Riera (2021), las mejoras resultantes de la inversión de capital en infraestructuras para la extracción de agua, al quedar ligadas a la tierra y derivar en diferencias de productividad con respecto a tierras que no poseen dichas mejoras, dan lugar a una *renta hídrica*. En este caso, dicha renta es concentrada por los productores más capitalizados y les permite disminuir su vulnerabilidad a la sequía.

Ante la pregunta que supone identificar dinámicas de acaparamiento de aguas, evaluando si hay agentes territoriales que controlan “valiosos recursos y cuencas de agua para su propio beneficio” de manera excluyente al resto de los actores, los resultados permitieron identificar un uso desigual del agua entre los distintos perfiles de productores. Dado que cuatro de los cinco productores que ampliaron su base de recursos hídricos se caracterizan por su perfil empresarial, se asume que existe un fuerte vínculo entre la posibilidad de implementar esta estrategia y el grado de capitalización. En este sentido, existe una disminución de la vulnerabilidad, principalmente por parte de productores de mayor capital, mediante el control de recursos hídricos estratégicos. Sin embargo, esta estrategia no se presentó como un factor que desencadene conflictos por la disponibilidad de agua entre los productores de base ganadera, dado que los entrevistados no identificaron que otros productores o usos productivos (como la forestación exótica) hayan condicionado la cantidad o calidad de agua a la cual acceden.

3.3.4 Implicancias prácticas y posibilidades para revertir la situación de vulnerabilidad

Los resultados permitieron identificar que 5 de los 17 productores entrevistados son altamente vulnerables a la sequía debido a condiciones estructurales y de manejo productivo. A continuación, se evaluarán las perspectivas para los distintos grupos en orden decreciente

de vulnerabilidad, y por último se discuten estrategias potenciales para reducir la vulnerabilidad.

Los productores del Grupo 4 se encuentran en la situación más crítica en términos del suelo y la superficie que manejan, debido a las restricciones biofísicas y socio-económicas estructurales, que son independientes al manejo del agroecosistema. Una de las alternativas potenciales para reducir la vulnerabilidad de este grupo de productores es el acceso a predios de apoyo para la producción de reservas de alimento, como las experiencias existentes de predios colectivos del Instituto Nacional de Colonización²⁷. Se destaca como aspecto favorable que, si bien dependen de fuentes de agua superficiales, estos productores perciben que cuentan con una disponibilidad hídrica muy alta tanto en periodos normales como durante las sequías. Por lo tanto, el componente hídrico, vinculado a la ventaja de colindar con arroyos y cañadas de caudales estables, no es un factor determinante de la vulnerabilidad a la sequía del grupo. El principal factor de su vulnerabilidad es la baja capacidad del suelo de retener agua, lo cual aumenta el riesgo de sufrir una sequía agronómica.

El Grupo 3 presenta un conjunto de limitantes que refleja la compleja interacción entre la disponibilidad de tierra, agua y capital, las estructuras agrarias y el nivel de vulnerabilidad. Existen elementos concretos, como el acceso a fuentes de agua alternativas, sobre los cuales avanzar para construir propuestas de corto-mediano plazo. Ante la dependencia exclusiva de tajamares, estos productores tienen una mayor exposición al efecto de las sequías y, por tanto, resulta estratégico acceder a fuentes subterráneas. Debido a las fuertes condicionantes socio-económicas concretas de los productores de este grupo, que restringe su capacidad de implementar estrategias ante las sequías, una política de concesión de subsidios representa el principal medio para reducir su vulnerabilidad. En primer lugar, para relevar la disponibilidad de agua subterránea y, en el caso de contar con fuentes accesibles, para asegurar su extracción.

Dada las condiciones biofísicas favorables de los productores del Grupo 2, se identifica como principal estrategia para asegurar un funcionamiento estable durante eventos de sequía avanzar en la planificación de los factores productivos. Esto implica ajustar la relación entre la carga ganadera y la disponibilidad de tierras para la producción vegetal, y evaluar la viabilidad de acceder a fuentes hídricas alternativas durante las sequías. Dichas medidas tienen el desafío de sustentarse en la disponibilidad de recursos y las prácticas de manejo productivo de cada caso concreto.

Los productores del Grupo 1 se encuentran en una posición favorable al disponer de superficie suficiente para alcanzar la producción vegetal necesaria para su carga ganadera, y alta disponibilidad hídrica incluso durante eventos de sequía. A su interna, el grupo presenta

²⁷ Esta propuesta se enmarca dentro de la Categoría 3 de Campos Colectivos Ganadero, cuyo objetivo es que pequeños productores familiares accedan a campos de apoyo a destinados a la producción de forraje y cría de ganado, para así mejorar el funcionamiento de cada unidad productiva.

estructuras agrarias heterogéneas, pero cuenta con una estrategia general similar de manejo productivo. La situación favorable del sub-grupo familiar, en términos económico-productivos, muestra la existencia de un margen de acción por parte de los productores menos capitalizados para generar estrategias capaces de reducir la vulnerabilidad a la sequía en el mediano-largo plazo. Las estrategias de manejo empleadas por el subgrupo familiar pueden brindar un modelo organizativo para revertir la situación de vulnerabilidad de productores con estructuras agrarias familiares, como el caso del Grupo 3 y 4.

Los productores familiares que presentan una situación de vulnerabilidad baja, cuentan con 42 y 55 hectáreas, de las cuales destinan 10 hectáreas a mejoras forrajeras (aproximadamente un 20% de su superficie). Disponen de fuentes de agua superficiales naturales, con caudales relativamente estables que permiten asegurar el acceso al agua durante la sequía. La estrategia común para afrontar la sequía es disminuir la carga ganadera. A su vez, emplean acciones particulares: un caso de este grupo amplía la zona bajo pastoreo al acceder a zonas marginales, utilizando la paja mansa (*Paspalum quadrifarium*) como forraje alternativo; mientras que el otro caso prioriza la compra de ración frente a la plantación de mejoras forrajeras, al disminuir la superficie plantada ante la ocurrencia de sequías.

Antecedentes académicos nacionales han identificado importantes beneficios del fortalecimiento de los vínculos entre productores y la implementación de estrategias colectivas para reducir su vulnerabilidad a la sequía (Bartaburu et al., 2009; Díaz et al., 2018a; Díaz et al., 2017). En la región están presentes las Sociedades de Fomento Rural (SFR) Picaso (de Soca) y Miguez, en las cuales participan 4 de 10 de los productores familiares (un caso por cada grupo), lo cual indica una baja participación de los productores en redes asociativas formales. Dentro de estas SFR, se identificó que a través de la SFR Miguez se articuló el acceso a forraje para los productores durante la sequía. El desarrollo de instancias de intercambio técnico-productivo puede ser un paso clave para avanzar en acciones colectivas de respuesta.

Una problemática transversal a los grupos, que explicitaron 6 de los 17 entrevistados²⁸, es la erosión de los suelos como consecuencia de la historia de usos agropecuarios intensivos. De acuerdo a los entrevistados, la historia agraria de la región estuvo ligada al cultivo de trigo²⁹, remolacha azucarera³⁰ y papa hasta la década del 1970-80; y luego una transición a actividades de base ganadera, predominantemente vacunos (en las tres cuencas) y lechería (en El Bagre y Sarandí), y plantaciones forestales. Los problemas de erosión, que en los casos relevados se vincula principalmente a predios donde se plantaba remolacha azucarera para el complejo RAUSA, es un factor relevante dado que la productividad animal está ligada a la

²⁸ Cuatro del Grupo 1, uno del Grupo 2 y una del Grupo 4.

²⁹ Se vincula con la tendencia creciente a la pérdida de fertilidad del suelo y la incorporación temprana de insumos propios del modelo industrial, tales como semillas de variedades mejoradas, fertilizantes comerciales, herbicidas, pulverizadores y maquinaria agrícola (Galán, 2002; MGAP, 1969).

³⁰ Se destaca la extracción relativamente grande de nutrientes del suelo (nitrógeno, fósforo y potasio), el consecuente uso de fertilizantes minerales, y los requerimientos de laboreo (MGAP, 1974).

productividad vegetal de las pasturas, los manejos previos de las comunidades vegetales y el suelo (Olmos y Sosa, 2007), y por lo tanto, a la historia de usos del suelo.

3.3.5 Percepción del impacto, estrategias implementadas y relevancia de las sequías

El relevamiento de la percepción del impacto sobre la producción vegetal y la disponibilidad hídrica para el ganado permitió abordar la situación de los productores respecto a dos factores claves de los sistemas de base ganadera, sobre los cuales se centran las acciones de respuesta: el agua y alimento. En términos comparativos, se identifica que los productores del Grupo 1 percibieron que sus establecimientos sufrieron un menor impacto sobre la producción vegetal respecto al resto de los Grupos, situación que se repite en el caso de la percepción del impacto sobre la disponibilidad de agua para consumo animal (Figura 3.10).

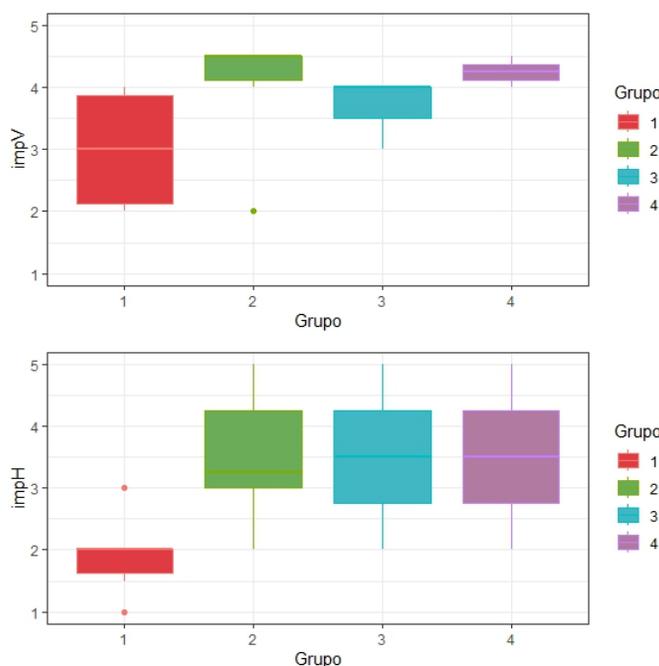


Figura 3.10 Percepción del impacto de las sequías sobre la producción vegetal (arriba) y la disponibilidad hídrica (abajo). Impacto sobre producción vegetal: impV; impacto sobre disponibilidad hídrica: impH.

Como se expuso anteriormente (apartado 3.3.3), existen diversas estrategias de respuesta para afrontar las sequías, que se diferencian entre Grupos de productores y su perfil socio-económico (empresarial o familiar). Los productores ponderaron en distintos grados la efectividad de las estrategias que implementaron durante las sequías. El análisis por Grupos de Vulnerabilidad muestra que los menos vulnerables (Grupo 1 y 2) perciben que sus estrategias de respuesta tuvieron un resultado muy bueno, mientras que en los productores más vulnerables la efectividad de la estrategia empleada fue más moderada (Figura 3.11). Los productores de los cuatro Grupos jerarquizan a las sequías como una problemática muy

relevante para sus sistemas productivos. En el caso del Grupo 3, grupo vinculado a condiciones de alta vulnerabilidad socio-económica, la relevancia asignada a las sequías fue levemente superior.

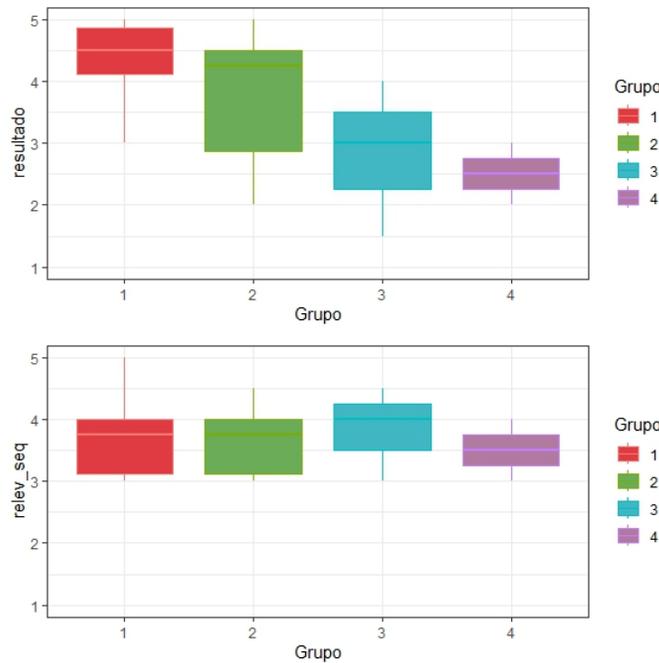


Figura 3.11 Percepción de resultado de las estrategias de respuesta (arriba) y la relevancia de las sequías como problemática (abajo). Relevancia de la sequía: relev_seq.

Estos resultados indican que los Grupos más vulnerables a la sequía (3 y 4) y el Grupo 2, que presenta condiciones biofísicas relativamente favorables, son quienes percibieron un mayor impacto sobre la producción vegetal y disponibilidad hídrica. En una situación más positiva se encuentran los productores del Grupo 1, lo cual indica que quienes cuentan con una mejor organización del sistema productivo son a la vez quienes perciben que el impacto sobre la producción vegetal y disponibilidad de agua para el ganado fue menor. A su vez, los productores menos vulnerables perciben que el resultado de sus estrategias de respuesta tuvo una alta efectividad. Asumiendo que su percepción condice con la realidad del impacto cuantitativo de la sequía, se puede interpretar que los menos vulnerables (de acuerdo al modelo construido) fueron, a la vez, quienes emplearon estrategias de respuesta más efectivas.

3.4 Conclusiones

Los principales grupos de variables que definen la vulnerabilidad a la sequía de los productores de las cuencas de los arroyos El Bagre, Sarandí y Mosquitos, son las estrategias económico-productivas y las condicionantes biofísicas. De los 17 casos relevados 5 se encuentran en una situación de alta vulnerabilidad, en su conjunto debido a la superficie que

manejan, y particularmente 2 por el tipo de suelo de sus predios y 3 por la organización de los factores de producción. En este sentido, se destaca el fuerte peso de las determinantes estructurales sobre la vulnerabilidad a la sequía de los productores de base ganadera ubicados en la región este-sureste de Canelones. La relación encontrada respecto a que los productores de los Grupos de menor vulnerabilidad percibieron un menor impacto ante las sequías, y que sus estrategias de respuesta fueron efectivas, indica que el modelo de vulnerabilidad propuesto logró aproximarse a la complejidad de la realidad económica y biofísica de los productores de base ganadera analizados.

El acceso a predios de cría y/o de apoyo para generar reservas forrajeras y a subsidios económicos, articulados a través de programas de apoyo técnico y económico-financiero a productores familiares, representan medidas concretas para reducir la vulnerabilidad biofísica y económico-productiva, respectivamente. Dado que los productores más vulnerables presentan estructuras agrarias de tipo familiar, pueden beneficiarse de intercambiar conocimientos y prácticas productivas con productores familiares de los grupos de menor vulnerabilidad. Una de las estrategias implementadas por los productores familiares de menor vulnerabilidad es la disminución de la carga ganadera durante la sequía. Aplicar esta estrategia concreta presenta diversas potencialidades ya que evita forzar la base forrajera del predio, depender de la compra de fardos y la pérdida de peso del ganado, asegurando mayores grados de autonomía en el manejo de los recursos.

La intensificación agraria y las sequías se entienden como “amenazas sinérgicas” sobre la vulnerabilidad de los productores. En los casos relevados, la intensificación no siempre es una forzante exclusivamente externa, sino que forma parte de la estrategia productiva de productores de perfil empresarial. En estos casos, la baja vulnerabilidad no se enmarca en una gestión ambiental del predio sino en la intensificación basada en el incremento del uso de capital. Por lo tanto, estos productores logran una baja vulnerabilidad a escala predial pero sus estrategias conllevan al aumento de la sensibilidad del conjunto de los predios ganaderos ubicados dentro de las cuencas estudiadas.

Respecto a la continuidad de la línea de investigación, se coloca como punto clave ahondar en la historia de los usos agropecuarios de cada predio para fortalecer la interpretación de los factores histórico-estructurales que determinan la vulnerabilidad actual. En concreto, conocer la incidencia de los problemas de erosión en la capacidad de retención de agua del suelo y del sobrepastoreo sobre la exploración de agua del suelo por las raíces, ya que ambos factores determinan el impacto agronómico de las sequías. A su vez, implementar modelos cuantitativos del consumo hídrico de los usos agropecuarios contiguos permitirá identificar dinámicas de acaparamiento de aguas, y así complementar la interpretación de los entrevistados. Este conjunto de elementos son claves para innovar y potenciar el marco de la vulnerabilidad desde un enfoque ambiental.

Dentro del conjunto de productores entrevistados, las principales estrategias para afrontar la sequía apuntan al acceso a alimento y agua para el ganado. A su vez, existen distintos niveles

de respuesta según el tipo de estructuras agrarias, siendo predominante las acciones coyunturales en los productores familiares y las de preparación a la sequía en los empresariales. Esta última estrategia implica una mayor estabilidad productiva y autonomía en los empresariales, lo cual permite plantear la existencia de un vínculo entre el control de capital-tierra-ganado-agua y la vulnerabilidad a la sequía.

Se identificó que el acceso a predios de apoyo para ampliar la disponibilidad de forraje y a fuentes de agua subterránea para disminuir la dependencia de fuentes superficiales (para quienes dependen de tajamares), son dos acciones concretas para asegurar las capacidades productivas de los predios de base ganadera durante las sequías. Existen políticas públicas que se pueden articular con estas acciones, como el acceso a la tierra mediante el Instituto Nacional de Colonización y planes de asistencia técnicas y apoyo a la producción familiar a través del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, así como la Universidad de la República mediante la extensión universitaria. A su vez, dado que las reservas de agua subterránea son un recurso (potencialmente) monopolizable y (en los hechos) monopolizado por quienes cuentan con tierra y capital necesarios para su extracción, el Estado cumple un rol fundamental para administrar y regular el aprovechamiento de las fuentes subterráneas y así evitar que sea un bien sujeto a la privatización de hecho y un factor de renta.

Se presenta el desafío futuro de generar políticas de apoyo y estrategias productivas que fortalezcan las capacidades instaladas de los productores familiares de base ganadera para funcionar bajo, y dar respuesta a, el escenario de cambio ambiental global. De lo contrario, las sequías persistirán como factor que, en retroalimentación con condiciones socio-económicas estructurales de la sociedad rural, comprometa la sustentabilidad de la producción y los productores de alimentos en Uruguay.

4. Conclusiones generales de la tesis y perspectivas

En la presente tesis se logró implementar el marco teórico-conceptual de la vulnerabilidad desde un enfoque ambiental en Canelones, departamento con mayor población rural, mayor densidad de productores familiares, y con importantes problemas de degradación ambiental debido a la historia y presente del sector agropecuario. Pese a estas características particulares, no existían antecedentes que abordaran el efecto de las sequías en las actividades de base ganadera de este espacio agrario. Así, se contribuyó en la línea de trabajos regionales que estudian la vulnerabilidad de la producción de base ganadera.

En el capítulo 2 de esta tesis, la selección y generación de índices que incorporan datos de precipitación, evapotranspiración potencial, tipos de suelos y usos/coberturas vegetales permitió evaluar la amenaza meteorológica, la exposición biofísica y la sensibilidad socio-ecológica a la sequía en el espacio agrario de Canelones. La aplicación de índices de sequía meteorológica representa una herramienta operativa para identificar y caracterizar cada evento. De los cinco eventos registrados, destaca el de 2015 debido a su duración, y el de fines de 2020 por su intensidad.

El área ocupada por cobertura vegetal natural y la pendiente del terreno representan los factores de mayor relevancia para evaluar la vulnerabilidad en el espacio agrario de Canelones. Se encontraron mayores niveles de exposición a la sequía en la zona este-sureste de Canelones, mientras que las zonas más sensibles se concentran al este-sureste y centro-oeste. A su vez, se registra un aumento de la sensibilidad a la sequía dentro del espacio agrario de Canelones lo cual compromete la sustentabilidad de los agroecosistemas y genera un nuevo desafío, fortalecer el ordenamiento ambiental del territorio y reevaluar la propuesta actual del Plan de Ordenamiento Rural – Ruralidades Canarias.

La asociación positiva entre la sensibilidad a la sequía en Canelones con la capacidad fotosintética (medida con el NDVI) y con el contenido de agua en la vegetación (medido con el NDWI) sugiere que las zonas con menor representatividad de la vegetación natural y mayores niveles de demanda hídrica presentan un mejor desempeño en términos de productividad y contenido hídrico. Dado que este desempeño se sustenta en el consumo de agua por parte de la vegetación, resta conocer los impactos locales de la intensificación agraria dentro de las cuencas hidrográficas. El análisis espacio-temporal de la respuesta de la vegetación permitió identificar que las zonas con mayor capacidad fotosintética y contenido de agua predominan al sureste del Canelones, en áreas con forestación exótica, y en menor proporción al oeste del Canelones, donde predominan ecosistemas de humedales.

El estudio a nivel de espacio agrario y predial difieren en el foco del análisis: uno se centra en las dinámicas del paisaje y otro en el agroecosistema. En este sentido, las variables determinantes de la vulnerabilidad y su peso se vinculan a las diferencias funcionales de cada escala. De acuerdo al modelo implementado, se alcanza una situación de menor

vulnerabilidad a escala de paisaje a mayor representatividad de la vegetación natural y a menor demanda hídrica de la vegetación; mientras que, a escala predial niveles más bajos de vulnerabilidad se identifican cuando el manejo del agroecosistema logra organizar los factores de producción para asegurar su funcionamiento durante eventos de sequías.

Los resultados obtenidos en el capítulo 3, a escala predial, indican que la organización del sistema productivo y el tipo de suelo son las principales variables que determinan la vulnerabilidad a la sequía de los productores de base ganadera. Se diferenciaron cuatro grupos de productores según su situación de vulnerabilidad a la sequía. A su vez, se identificó que las principales estrategias de respuesta ante las sequías consisten en asegurar el acceso al agua y alimento, los cuales representan puntos clave para implementar políticas concretas que reduzcan la vulnerabilidad de los productores.

Dentro de las principales estrategias para afrontar la sequía, se identificaron distintos tipos de respuesta en función de las estructuras agrarias de los productores. En las estructuras de tipo familiar predominaron acciones coyunturales y en las de tipo empresarial las acciones de preparación a la sequía. Las acciones coyunturales y reactivas a la sequía estuvieron ligadas principalmente a la compra de forraje y al acceso a fuentes de agua extra-prediales, mientras que las proactivas consistieron en generar reservas de forraje y acceder/mejorar las fuentes hídricas. Estas estrategias proactivas les brindan una mayor estabilidad productiva y autonomía a los productores empresariales, y permite plantear la existencia de un vínculo entre el control de capital-tierra-ganado-agua y la vulnerabilidad a la sequía.

Los dos grupos de productores de mayor vulnerabilidad presentan estructuras agrarias de tipo familiar y predominan respuestas coyunturales ante las sequías. En los grupos menos vulnerables a la sequía, también predominan acciones coyunturales dentro de los subgrupos familiares, mientras que los empresariales recurren a estrategias de preparación que les permiten reducir su sensibilidad ante las sequías. El intercambio de conocimientos empíricos entre productores familiares de los grupos de menor y mayor vulnerabilidad a la sequía, podría contribuir a la identificación de alternativas y ejecución de acciones que les permita disminuir su vulnerabilidad. Sin embargo, presenta el desafío de articular y ampliar las redes de trabajo colectivo entre los productores familiares, que actualmente cuentan con un alcance limitado. Asimismo, resulta clave considerar los atributos biofísicos de los suelos y las condiciones económico-productivas de acceso a tierra, agua y capital que limitan el margen de acción del conjunto de productores y determinan la situación de alta vulnerabilidad de la mitad (5 de 10) de productores familiares entrevistados.

La intensificación agraria de las cuencas analizadas, proceso clave para entender las dinámicas ambientales del espacio rural uruguayo, presentó un efecto marginal como condicionante de la vulnerabilidad a la sequía de los productores de las cuencas hidrográficas de los arroyos El Bagre, Sarandí y Mosquitos. La vulnerabilidad fue determinada principalmente por condicionantes histórico-estructurales y productivas de los productores. Avanzar en la

estimación del consumo de agua de los predios representa un paso determinante para evaluar el impacto cuantitativo de la intensidad agraria/hídrica y su incidencia en la vulnerabilidad a la sequía de los productores.

Debe advertirse que la estrategia de intensificación (o industrialización) agraria, vinculada a productores menos vulnerables de perfil empresarial, representa un modelo productivo y paradigma ante el cambio climático con contradicciones. Si bien desde un punto de vista individual-predial se consigue asegurar un desempeño productivo rentable, incluso frente a los eventos de sequía, éste se sustenta en un incremento de la presión sobre la base biofísica y el uso de insumos externo al agroecosistema. A su vez, compromete la autonomía del manejo del predio al aumentar la dependencia de insumos externos para subsidiar la degradación de funciones ecológicas perdidas por la simplificación del agroecosistema. Así, bajo esta estrategia de funcionamiento, la disminución de la vulnerabilidad individual genera el efecto adverso de aumentar las condiciones que vuelven más sensible al conjunto del espacio agrario y sus productores ante el escenario de cambio ambiental.

Ante el actual escenario de cambio climático, y el proceso histórico de despoblamiento del medio rural, resulta necesario evaluar el rol de los eventos de sequía como factor ambiental que incide en la diferenciación social entre los productores agropecuarios y alimenta el éxodo rural en Uruguay. El abordaje de vulnerabilidad presenta un amplio potencial para realizar diagnósticos ambientales a escala departamental y predial, paso inicial para avanzar en un ordenamiento ambiental del territorio y en una reconversión productiva apoyada en políticas estructurales de acceso al agua, tierra y capital. Su implementación resulta clave para avanzar en la re-estructuración de los sistemas ambientales desde una perspectiva que asuma el rol de la sociedad como forzante del, y sujeta al, cambio ambiental.

Bibliografía

- Achkar, M. (2017). El bioma pampa: un territorio en disputa. En C. Rejane & E. Foletto (Eds.), *Olhares Sobre o Pampa: Um Território em Disputa* (pp. 126-140). Evanrgraf.
- Achkar, M., Dominguez, A., Díaz, I., & Pesce, F. (2011a). La intensificación del uso agrícola del suelo en el litoral oeste del Uruguay en la última década. *Pampa (Santa Fe)*, 7, 143-157. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-02082011000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Achkar, M., Dominguez, A., Díaz, I., & Pesce, F. (2011b). La intensificación del uso agrícola del suelo en el litoral oeste del Uruguay en la última década. *Pampa (Santa Fe)*, 7, 143-157. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-02082011000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Achkar, M., Domínguez, A., & Pesce, F. (2008). *Agronegocios Ltda. Nuevas modalidades de colonialismo en el Cono Sur de América Latina*. REDES-AT.
- Alharbi, R. S., Nath, S., Faizan, O. M., Hasan, M. S. U., Alam, S., Khan, M. A., Bakshi, S., Sahana, M., & Saif, M. M. (2022). Assessment of Drought vulnerability through an integrated approach using AHP and Geoinformatics in the Kangsabati River Basin. *Journal of King Saud University - Science*, 34(8), 102332. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2022.102332>
- Allan, J. A. ., Keulertz, Martin., Sojamo, Suvi., & Warner, Jeroen. (2014). *Handbook of land and water grabs in Africa : foreign direct investment and food and water security* (1.^a ed.). Routledge. <https://www.routledge.com/Handbook-of-Land-and-Water-Grabs-in-Africa-Foreign-direct-investment-and-food-and-water-security/Allan-Keulertz-Sojamo-Warner/p/book/9781857437461>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje No 56*. FAO.
- Alley, W. M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 21(7), 1100-1109.
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association-LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115.
- Arbeletche, P., Coppola, M., & Paladino, C. (2012). Análisis del agro-negocio como forma de gestión empresarial en América del Sur: el caso uruguayo. *Agrociencia Uruguay*, 16(2), 110-119. <https://doi.org/10.31285/AGRO.17.546>
- Bahta, Y. T., & Lombard, W. A. (2023). Nexus between Social Vulnerability and Resilience to Agricultural Drought amongst South African Smallholder Livestock Households. *Atmosphere*, 14(5), 900. <https://doi.org/10.3390/ATMOS14050900>
- Barrán, J. P., & Nahum, B. (1984). Uruguayan Rural History. *Hispanic American Historical Review*, 64(4), 655-673. <https://doi.org/10.1215/00182168-64.4.655>
- Bartaburu, D., Duarte, E., Montes, E., Morales Grosskopf, E., & Pereira, M. (2009). Las sequías: un evento que afecta la trayectoria de las empresas y su gente. En E. Morales Grosskopf & F. Dieguez (Eds.), *Familias y campo. Rescatando estrategias de adaptación* (IPA, pp. 155-168).
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/JOC.3887>

- Beguéría S, & Vicente-Serrano SM. (2023). SPEI: Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. *R package version 1.8.1*.
- Bianco, M., Díaz, I., Chiappe, M., Figueredo, S., Narbondo, I., & Russi, E. (2021). Dinámicas de la expansión agrícola en territorios uruguayos. *Revista Latinoamericana De Estudios Rurales*, 6(12), 1-35.
- Birkmann, J. (2006). Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions. En *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies* (pp. 9-54). UNU Press.
- BM, & MGAP. (2015). *Estrategia de fomento del desarrollo de la agricultura regada en Uruguay*.
- Bolton, D. K., & Friedl, M. A. (2013). Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 74-84. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2013.01.007>
- Breiman, Leo, Friedman, Jerome H, Olshen, Richard A, Stone, & Charles J. (1984). *Classification And Regression Trees* (1.^a ed.). Taylor & Francis Group.
- Cano, D., Cacciuttolo, C., Custodio, M., & Nosetto, M. (2023). Effects of Grassland Afforestation on Water Yield in Basins of Uruguay: A Spatio-Temporal Analysis of Historical Trends Using Remote Sensing and Field Measurements. *Land*, 12(1), 185. <https://doi.org/10.3390/LAND12010185>
- Carminati, A., & Javaux, M. (2020). Soil Rather Than Xylem Vulnerability Controls Stomatal Response to Drought. *Trends in Plant Science*, 25(9), 868-880. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2020.04.003/ATTACHMENT/79B08994-D4CA-4352-BF52-1F0CD6D6CD9A/MMC1.DOCX>
- Cattaneo, C., Beine, M., Fröhlich, C. J., Kniveton, D., Martinez-Zarzoso, I., Mastrorillo, M., Millock, K., Pigué, E., & Schraven, B. (2019). Human Migration in the Era of Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 13(2), 189-206. <https://doi.org/10.1093/REEP/REZ008>
- Chapin, F. S., Kofinas, G. P., & Folke, C. (2009). Principles of ecosystem stewardship: Resilience-based natural resource management in a changing world. En *Principles of Ecosystem Stewardship: Resilience-Based Natural Resource Management in a Changing World*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73033-2/COVER>
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1-36. <https://doi.org/10.18637/JSS.V061.I06>
- Chavarria, G., & Pessoa, H. (2012). Plant Water Relations: Absorption, Transport and Control Mechanisms. En G. Montanaro & B. Dichio (Eds.), *Advances in Selected Plant Physiology Aspects* (pp. 105-132). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/33478>
- Chen, X., Wang, L., Cao, Q., Sun, J., Niu, Z., Yang, L., & Jiang, W. (2024). Response of global agricultural productivity anomalies to drought stress in irrigated and rainfed agriculture. *Science China Earth Sciences*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/S11430-023-1328-2/METRICS>
- Chen, Z., Li, S., Ren, J., Gong, P., Zhang, M., Wang, L., Xiao, S., Jiang, D., & Liang, S. (2008). Monitoring and Management of Agriculture with Remote Sensing. En S. Liang (Ed.), *Advances in Land Remote Sensing System, Modeling, Inversion and Application* (1.^a ed., pp. 397-421). Springer Dordrecht.

- Chuvieco, E. (2016). Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach. En *Fundamentals of Satellite Remote Sensing* (2.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/B19478>
- Clarke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18(1), 117-143. <https://doi.org/10.1111/J.1442-9993.1993.TB00438.X>
- Collins, M., & Sutherland, M. (2022). Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks. En *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 589-656). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.008>
- CONEAT. (1979). *Grupos de suelos CONEAT. Índices de productividad*. Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra, Ministerio de Agricultura y Pesca.
- Cruz, G., Baethgen, W., Bartaburu, D., Bidegain, M., Giménez, A., Methol, M., Morales, H., Picasso, V., Podestá, G., Taddei, R., Terra, R., Tiscornia, G., & Vinocur, A. M. (2018). Thirty Years of Multilevel Processes for Adaptation of Livestock Production to Droughts in Uruguay. *Weather, Climate, and Society*, 10(1), 59-74. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0133.1>
- Cunha, A. P. M. A., Zeri, M., Leal, K. D., Costa, L., Cuartas, L. A., Marengo, J. A., Tomasella, J., Vieira, R. M., Barbosa, A. A., Cunningham, C., Cal Garcia, J. V., Broedel, E., Alvalá, R., & Ribeiro-Neto, G. (2019). Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10110642>
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65. <https://doi.org/10.1002/WCC.81>
- DDR. (2020). *Soberanía, Ciudadanía e Identidad. Relato de la Gestión de la Agencia de Desarrollo Rural de la Intendencia de Canelones 2015-2020*. Dirección de Desarrollo Rural, Intendencia de Canelones.
- De Faccio Carvalho, P. C., Savian, J. V., Chiesa, T. Della, De Souza Filho, W., Terra, J. A., Pinto, P., Martins, A. P., Villarino, S., Da Trindade, J. K., De Albuquerque Nunes, P. A., & Pineiro, G. (2021). Land-use intensification trends in the Rio de la Plata region of South America: toward specialization or recoupling crop and livestock production. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8(1), 97-110. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020380>
- de Graaff, M. A., Hornslein, N., Throop, H. L., Kardol, P., & van Diepen, L. T. A. (2019). Effects of agricultural intensification on soil biodiversity and implications for ecosystem functioning: A meta-analysis. *Advances in Agronomy*, 155, 1-44. <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2019.01.001>
- de Souza, H. J. (2003). *Como fazer análise de conjuntura* (Vozes, Ed.; 27.^a ed.).
- Deléglise, C., François, H., Loucougaray, G., & Crouzat, E. (2023). Facing drought: exposure, vulnerability and adaptation options of extensive livestock systems in the French Pre-Alps. *Climate Risk Management*, 42, 100568. <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2023.100568>
- Dell'Angelo, J., Rulli, M. C., & D'Odorico, P. (2018). The Global Water Grabbing Syndrome. *Ecological Economics*, 143, 276-285. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2017.06.033>
- Díaz, I. (2018). *Vulnerabilidad y capacidad de respuesta a la sequía de los productores ganaderos de las sierras del este (Lavelleja-Uruguay)* [Doctorado en Ciencias Agrarias]. Universidad de la República.

- Díaz, I., Achkar, M., Crisci, C., & Mazzeo, N. (2019). Natural and land-use drivers of primary production in a highly vulnerable region of livestock production (Sierras del este – Uruguay). *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 120(1), 1-14. <https://doi.org/10.17170/KOBRA-20190219194>
- Díaz, I., Achkar, M., & Mazzeo, N. (2017). External Drivers and Internal Control Factors that Determine the Vulnerability and Response Capacity to Drought of Cattle Producers in the Sierras Del Este Region of Uruguay. *Journal of Agricultural Science*, 10(1), p190. <https://doi.org/10.5539/JAS.V10N1P190>
- Díaz, I., Achkar, M., & Néstor Mazzeo. (2018). Drought vulnerability assessment of cattle producers in the Sierras del Este-Uruguay: Interactions between actors and agents. *Outlook on Agriculture*, 47(4), 315-325. <https://doi.org/10.1177/0030727018808807>
- Díaz, I., Ceroni, M., López, G., & Achkar, M. (2018). Análisis espacio-temporal de la intensificación agraria y su incidencia en la productividad primaria neta. Propuesta metodológica para Uruguay 2000-2011. *M+A Revista Electrónica@ de Medio Ambiente*, 19(1), 24-40.
- Díaz, I., Mazzeo, N., & Achkar, M. (2020). Multiple traps compromise the sustainability of most livestock farmers in Sierras del Este, Uruguay. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/S13593-020-0606-Y/TABLES/2>
- Díaz, I., & Sum, T. (2024). Territorial strategies of forestry and agricultural corporations in Uruguay – the Southern Cone region of Latin America. *Territory, Politics, Governance*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/21622671.2024.2337927>
- Díaz, I., Sum, T., & Achkar, M. (2023). Territorialización de las Sociedades Anónimas (SA) en Uruguay: Acaparamiento y Extranjerización de Tierras. *Iberoamericana - Nordic Journal of Latin American and Caribbean Studies*, 52(1), 88-102. <https://doi.org/10.16993/IBEROAMERICANA.575>
- DIEA. (2003). *Anuario Estadístico 2003*.
- DIEA. (2007). *Anuario Estadístico 2007*.
- DIEA. (2012). *Anuario Estadístico 2012*.
- DIEA. (2017). *Anuario Estadístico 2017*.
- DIEA. (2023). *Anuario Estadístico 2023*.
- DINACEA. (2022). *Mapas anuales de la cobertura del suelo de Uruguay para el período 2016-2022*. <https://www.ambiente.gub.uy/oan/listado-de-capas/>
- Dominguez, A., Achkar, M., Pesce, F., & Díaz, I. (2018). Las transformaciones territoriales del espacio agrario uruguayo: nuevas regionalidades. *Geo UERJ*, 32, e28973-e28973. <https://doi.org/10.12957/GEOUERJ.2018.28973>
- Douville, H., Allanid, R. P., Ariasid, P. A., Betts, R. A., Caretta, M. A., Cherchiid, A., Mukherji, A., Raghavan, K., & Renwickid, J. (2022). Water remains a blind spot in climate change policies. *PLOS Water*, 1(12), e0000058. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PWAT.0000058>
- Duru, M., & Therond, O. (2015). Livestock system sustainability and resilience in intensive production zones: which form of ecological modernization? *Regional Environmental Change*, 15(8), 1651-1665. <https://doi.org/10.1007/S10113-014-0722-9/METRICS>
- Ekrami, M., Marj, A. F., Barkhordari, J., & Dashtakian, K. (2016). Drought vulnerability mapping using AHP method in arid and semiarid areas: a case study for Taft Township, Yazd Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(12), 1-13. <https://doi.org/10.1007/S12665-016-5822-Z/METRICS>
- ESRI. (2021). *How Emerging Hot Spot Analysis Works*.

- Falkenmark, M., & Rockström, Johan. (2004). *Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology* (Routledge, Ed.). Earthscan.
<https://www.routledge.com/Balancing-Water-for-Humans-and-Nature-The-New-Approach-in-Ecohydrology/Falkenmark-Rockstrom/p/book/9781853839276>
- Fernández Nion, C. (2021). *Estructura agraria y transformaciones territoriales: el caso de Río Negro (2000-2020)* [Licenciatura en Geografía]. Universidad de la República.
- Ferreira, T. (2019, junio 7). El brazo largo del mosquito. *Brecha*.
- Figueredo, S., Guibert, M., & Arbeletche, P. (2019). Ciclo sojero y estrategias de los actores de la producción agropecuaria en el litoral uruguayo. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, 16, 99-118. <https://doi.org/10.17141/EUTOPIA.16.2019.4103>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574.
https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1111772/SUPPL_FILE/FOLEY_SOM.PDF
- Galán, L. (2002). El complejo triguero uruguayo: una mirada desde la historia económica (1900-1981). *Boletín de Historia Económica*, 1, 9-17.
- Gamon, J. A., Field, C. B., Goulden, M. L., Griffin, K. L., Hartley, A. E., Joel, G., Penuelas, J., & Valentini, R. (1995). Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. *Ecological Applications*, 5(1), 28-41. <https://doi.org/10.2307/1942049>
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gao, Y., Walker, J. P., Allahmoradi, M., Monerris, A., Ryu, D., & Jackson, T. J. (2015). Optical Sensing of Vegetation Water Content: A Synthesis Study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4), 1456-1464.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2398034>
- Gazzano, I. (2018). *Con el agua al cuello- Ganadería familiar en los Esteros de Farrapos, entre el área protegida y la soja. Aportes desde la Agroecología* (Unidad de Comunicación de la Universidad de la República, Ed.). Ediciones Universitarias.
- Gazzano, I., & Achkar, M. (2014). Transformación territorial: análisis del proceso de intensificación agraria en la cuenca del área protegida Esteros de Farrapos, Uruguay. *Rev. Bras. de Agroecología*, 9(2), 30-43.
- Gazzano, I., Achkar, M., & Díaz, I. (2019). Agricultural Transformations in the Southern Cone of Latin America: Agricultural Intensification and Decrease of the Aboveground Net Primary Production, Uruguay's Case. *Sustainability (Switzerland)*, 11(24).
<https://doi.org/10.3390/su11247011>
- Gbetibouo, G. A., & Ringler, C. (2009). *Mapping South African Farming Sector Vulnerability to Climate Change and Variability. A Subnational Assessment*.
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189-206. <https://doi.org/10.1111/J.1538-4632.1992.TB00261.X>
- Giménez, L., & Petillo, M. G. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15(2), 100-108. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.598>

- Gimeno-Sotelo, L., Sorf, R., Nieto, R., Vicente-Serrano, S. M., & Gimeno, L. (2024). Unravelling the origin of the atmospheric moisture deficit that leads to droughts. *Nature Water* 2:3, 2(3), 242-253. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00192-4>
- González Tánago, I., Urquijo, J., Blauhut, V., Villarroya, F., & De Stefano, L. (2016). Learning from experience: a systematic review of assessments of vulnerability to drought. *Natural Hazards*, 80(2), 951-973. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2006-1>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.06.031>
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., Wardlow, B., Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6). <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- Gupta, A. K., Tyagi, P., & Sehgal, V. K. (2011). Drought disaster challenges and mitigation in India: strategic appraisal. *Current science*, 100(12), 1795-1806.
- Gupta, V., & Jain, M. K. (2018). Investigation of multi-model spatiotemporal mesoscale drought projections over India under climate change scenario. *Journal of Hydrology*, 567, 489-509. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.012>
- Gutiérrez, F., Gallego, F., Paruelo, J. M., & Rodríguez, C. (2020). Damping and lag effects of precipitation variability across trophic levels in Uruguayan rangelands. *Agricultural Systems*, 185, 102956. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2020.102956>
- Guzmán, G., Aguilera, E., Paludo Vargas, L., & Iodice, R. (2017). Energy in Agro-Ecosystems: A Tool for the Sustainable Design of Extensive Livestock Farms. En G. Guzmán Casado & M. González de Molina (Eds.), *Energy in Agroecosystems A Tool for Assessing Sustainability* (pp. 197-226). Taylor & Francis Group.
- Hamed, K. H., & Ramachandra Rao, A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Havlík, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M. C., Mosnier, A., Thornton, P. K., Böttcher, H., Conant, R. T., Frank, S., Fritz, S., Fuss, S., Kraxner, F., & Notenbaert, A. (2014). Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(10), 3709-3714. https://doi.org/10.1073/PNAS.1308044111/SUPPL_FILE/SAPP.PDF
- Herrero, M., Thornton, P. K., Gerber, P., & Reid, R. S. (2009). Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(2), 111-120. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2009.10.003>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/S11676-020-01155-1/FIGURES/2>
- Hunter, L. M., Luna, J. K., & Norton, R. M. (2015). Environmental Dimensions of Migration. *Annual Review of Sociology*, 41, 377-397. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-SOC-073014-112223/CITE/REFWORKS>
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2005.07.003>

- Huntington, T. G. (2010). Climate Warming-Induced Intensification of the Hydrologic Cycle: An Assessment of the Published Record and Potential Impacts on Agriculture. *Advances in Agronomy*, 109(C), 1-53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385040-9.00001-3>
- IC. (2018). *Plan de Ordenamiento Rural de Canelones Ruralidades Canarias*.
- IC. (2024). *Reporte Ambiental Anual*. <https://ecomunidadcanelones.uy/canelones-presenta-report-ambiental-2024/>
- levinsh, G. (2023). Water Content of Plant Tissues: So Simple That Almost Forgotten? *Plants* 2023, Vol. 12, Page 1238, 12(6), 1238. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12061238>
- INE. (2011). *Censo 2011*. <https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/datos-y-estadisticas/estadisticas/censo-2011>
- INIA. (2019, marzo). Control biológico de plagas y enfermedades en horticultura. *Revista INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria)*, 56.
- Ji, L., Zhang, L., & Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(11), 1307-1317. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.11.1307>
- Kamruzzaman, M., Almazroui, M., Salam, M. A., Mondol, M. A. H., Rahman, M. M., Deb, L., Kundu, P. K., Zaman, M. A. U., & Islam, A. R. M. T. (2022). Spatiotemporal drought analysis in Bangladesh using the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24146-0>
- Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Vulnerability and Adaptation of Livestock Producers to Climate Variability and Change. *Rangeland Ecology & Management*, 71(2), 175-184. <https://doi.org/10.1016/J.RAMA.2017.09.006>
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). *Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses [R package factoextra version 1.0.7]*. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- Kay, S., & Franco, J. (2019). The Global Water Grab: A Primer. *Green Planet Blues*, 342-356. <https://doi.org/10.4324/9780429322204-34>
- Kennedy Freeman, K., Kray, H., & Trier, R. (2015). Intensificación sostenible de la agricultura: aumento del acceso a soluciones inteligentes desde el punto de vista del clima. En *Banco Mundial. Notas de Política. Uruguay: desafíos y oportunidades 2015-2020* (pp. 165-179). Banco Mundial.
- Keys, P. W., Galaz, V., Dyer, M., Matthews, N., Folke, C., Nyström, M., & Cornell, S. E. (2019). Anthropocene risk. *Nature Sustainability* 2019 2:8, 2(8), 667-673. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0327-x>
- Khanmohammadi, N., Rezaie, H., & Behmanesh, J. (2022). Investigation of Drought Trend on the Basis of the Best Obtained Drought Index. *Water Resources Management*, 36(4), 1355-1375. <https://doi.org/10.1007/S11269-022-03086-4/METRICS>
- Knutson, C., Hayes, M., & Phillips, T. (1998). *How to Reduce Drought Risk*. Drought Mitigation Center Faculty Publications. <https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpubhttps://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/168>
- La Diaria. (2019, febrero 26). Vecinos de Paso Picón demandaron a productor que los fumigó y al MGAP. *La Diaria*.
- Laliberté, E., Wells, J. A., Declerck, F., Metcalfe, D. J., Catterall, C. P., Queiroz, C., Aubin, I., Bonser, S. P., Ding, Y., Fraterrigo, J. M., McNamara, S., Morgan, J. W., Merlos, D. S.,

- Vesk, P. A., & Mayfield, M. M. (2010). Land-use intensification reduces functional redundancy and response diversity in plant communities. *Ecology Letters*, 13(1), 76-86. <https://doi.org/10.1111/J.1461-0248.2009.01403.X>
- Latterra, P., Barral, P., Carmona, A., & Nahuelhual, L. (2015). *ECOSER. Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial*. <http://eco-ser.com.ar/>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18. <https://doi.org/10.18637/JSS.V025.I01>
- Lehner, F., Coats, S., Stocker, T. F., Pendergrass, A. G., Sanderson, B. M., Raible, C. C., & Smerdon, J. E. (2017). Projected drought risk in 1.5°C and 2°C warmer climates. *Geophysical Research Letters*, 44(14), 7419-7428. <https://doi.org/10.1002/2017GL074117>
- Liu, C., Shi, R., Gao, W., & Gao, Z. (2010). Application of MODIS time series data for drought assessment in East China. *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability*, 137-144. <https://doi.org/10.1117/12.858184>
- Liverman, D. M. (1993). Vulnerability and Adaptation to Drought in Mexico. *NAT. RES. J*, 39, 99-115. <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol39/iss1/7>
- Long, J., Nelson, T., & Wulder, M. (2010). Regionalization of landscape pattern indices using multivariate cluster analysis. *Environmental Management*, 46(1), 134-142. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9510-6>
- Lynas, M., Houlton, B. Z., & Perry, S. (2021). Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2966>
- Maderey, L. E. (2005). *Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., & Hornik, K. (s. f.). *cluster: Cluster analysis basics and extensions, version 2.1. 1 [R package]*.
- Magdoff, F. (1999). Calidad y manejo del suelo. En M. A. Altieri (Ed.), *Agroecología: bases científicas para una agricultura sustentable* (pp. 291-304). Nordan.
- Márquez, M. N. G., Cirillo, M. V., & Santos, C. (2022). El agua y las ciencias: controversias en torno al caso del riego agropecuario en Uruguay. *Encuentros Latinoamericanos (segunda época)*, 6(2), 129-147. <https://doi.org/10.59999/6.2.1774>
- Marshall, N. A., Stokes, C. J., Webb, N. P., Marshall, P. A., & Lankester, A. J. (2014). Social vulnerability to climate change in primary producers: A typology approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186, 86-93. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2014.01.004>
- Martínez Faira, L. (2013). *Estimación del consumo de agua en una plantación adulta de Eucalyptus* [Universidad de la República,]. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/23967>
- Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G., & Swift, M. J. (1997). Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science*, 277(5325), 504-509. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.277.5325.504>
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., & White, K. (2001). *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, 179-184.
- MEF. (2023). *Déficit hídrico en la producción agropecuaria*. Ministerio de Economía y Finanzas. <https://www.gub.uy/ministerio-economia->

- finanzas/comunicacion/publicaciones/exposicion-motivos-rc-2022/4-emergencia-hidrica/42-deficit-hidrico
- Mehta, L., Veldwisch, G. J., & Franco, J. (2012). Introduction to the Special Issue: Water grabbing? Focus on the (re)appropriation of finite water resources. *Water Alternatives*, 5(2), 193-207.
- Meyfroidt, P., Abeygunawardane, D., Baumann, M., Bey, A., Buchadas, A., Chiarella, C., Junquera, V., García, A. K., Kuemmerle, T., Waroux, Y. le P. de, Oliveira, E., Picoli, M., Qin, S., García, V. R., & Rufin, P. (2024). Explaining the emergence of land-use frontiers. *Royal Society Open Science*, 11(7). <https://doi.org/10.1098/RSOS.240295>
- MGAP. (1969, junio). *Trigo*. 36.
- MGAP. (1974, diciembre). *Remolacha azucarera*. 23.
- MGAP. (2014). *Censo General Agropecuario 2011: Resultados Definitivos*.
- MGAP, & FAO. (2013). *Clima de cambios nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Informe en el marco del proyecto TCP-FAO 3302*. <http://www.fao.org/climatechange/84982/es>
- MGAP-RENARE. (2014). *Manual de descripción, muestreo de suelos y análisis de laboratorio. Compilación del Departamento de Estudios Básicos de Suelos*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/manual-descripcion-muestreo-suelos-analisis-laboratorio>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*.
- Modernel, P., Rossing, A. H., Corbeels, M., Dogliotti, S., Picasso, V., & Tiftonell, P. (2016). Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters*, 11(11), 1-21. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/113002>
- Molfino, J. H. (2009). *Estimación del Agua Potencialmente Disponible en los Grupos CONEAT*. <https://www.inia.uy/estimacion-del-agua-potencialmente-disponible-en-los-grupos-coneat>
- Moraes, M. I. (2001). *Las determinantes tecnológicas e institucionales del desempeño ganadero en el largo plazo, 1870-1970* [Tesis de Maestría en Historia Económica]. Universidad de la República, Uruguay.
- Morales, S. (2024). *Diversidad funcional de ecosistemas en el departamento de Canelones: caracterización de Tipos Funcionales de Ecosistemas en un paisaje agroproductivo diverso* [Tesis de grado en Ciencias Biológicas]. Universidad de la República.
- Moran, P. A. P. (1950). Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*, 37(1), 17-23. <https://doi.org/10.2307/2332142>
- Navas, R., Alonso, J., Gorgoglione, A., & Vervoort, R. W. (2019). Identifying Climate and Human Impact Trends in Streamflow: A Case Study in Uruguay. *Water* 2019, Vol. 11, Page 1433, 11(7), 1433. <https://doi.org/10.3390/W11071433>
- Nicholls, C. I., Henao, A., & Altieri, M. A. (2015). Agroecología y el diseño de sistemas agrícolas resilientes al cambio climático. *Agroecología*, 10(1), 7-31. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/300711>
- Oliver, T. H., Heard, M. S., Isaac, N. J. B., Roy, D. B., Procter, D., Eigenbrod, F., Freckleton, R., Hector, A., Orme, C. D. L., Petchey, O. L., Proença, V., Raffaelli, D., Suttle, K. B., Mace, G. M., Martín-López, B., Woodcock, B. A., & Bullock, J. M. (2015). Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(11), 673-684. <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2015.08.009>

- Olmos, F., & Sosa, M. (2007). Sensibilidad de los sistemas de producción extensivos a la variabilidad climática. *Semana de Reflexión sobre Cambio y Variabilidad Climática*.
- Oyhantçabal, G., & Narbondo, I. (2019). Land grabbing in Uruguay: new forms of land concentration. *Canadian Journal of Development Studies*, 40(2), 201-219. <https://doi.org/10.1080/02255189.2018.1524749>
- Palchadhuri, M., & Biswas, S. (2016). Application of AHP with GIS in drought risk assessment for Puruliya district, India. *Natural Hazards*, 84(3), 1905-1920. <https://doi.org/10.1007/S11069-016-2526-3/METRICS>
- Panario, D., Gutiérrez, O., Achkar, M., Bartesaghi, L., & Ceroni, M. (2011). *Clasificación y Mapeo de Ambientes de Uruguay. Informe Técnico*. Convenio MGAP/PPR – Facultad de Ciencias/Vida Silvestre/ Sociedad Zoológica del Uruguay/CIEDUR. <https://doi.org/10.13140/2.1.4899.5525>.
- Panda, A. (2017). Vulnerability to climate variability and drought among small and marginal farmers: a case study in Odisha, India. *Climate and Development*, 9(7), 605-617. <https://doi.org/10.1080/17565529.2016.1184606>
- Paruelo, J. M., & Lauenroth, W. K. (1995). Regional patterns of normalized difference vegetation index in North American shrublands and grasslands. *Ecology*, 76(6), 1888-1898. <https://doi.org/10.2307/1940721>
- Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S., Svoboda, M., Hannaford, J., Tomas-Burguera, M., Martín-Hernández, N., Domínguez-Castro, F., & El Kenawy, A. (2019). Response of crop yield to different time-scales of drought in the United States: Spatio-temporal patterns and climatic and environmental drivers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264, 40-55. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2018.09.019>
- Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2012). Separación o integración para la conservación de biodiversidad: la ideología detrás del debate «land-sharing» frente a «land-sparing». *Ecosistemas*, 21(1-2). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/36>
- Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Viña, A., Hayes, M., & Svoboda, M. D. (2002). Drought monitoring with NDVI-based Standardized Vegetation Index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(1), 71-75. <https://experts.nebraska.edu/en/publications/drought-monitoring-with-ndvi-based-standardized-vegetation-index>
- Philpott, S. M. (2013). Biodiversity and Pest Control Services. En Simon Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity* (Second Edition, Vol. 1, pp. 373-385). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00344-0>
- Picasso, V. D., Modernel, P. D., Becoña, G., Salvo, L., Gutiérrez, L., & Astigarraga, L. (2014). Sustainability of meat production beyond carbon footprint: a synthesis of case studies from grazing systems in Uruguay. *Meat Science*, 98(3), 346-354. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2014.07.005>
- Piñeiro, D. (2014). Asalto a la tierra: el capital financiero descubre el campo uruguayo. En *Capitalismo, Tierra y Poder en América Latina (1982-2012) Argentina, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay* (pp. 215-257). CLACSO.
- Piñeiro, G., Oesterheld, M., & Paruelo, J. M. (2006). Seasonal variation in aboveground production and radiation-use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*, 9(3), 357-373. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0013-x>
- PNUMA – IC. (2011). *Vulnerabilidad y adaptación ante el cambio climático para geo-ciudades: Canelones – Uruguay*.

- Ponzo, J. (2022). Extrativismo e saúde no nordeste de Canelones, Uruguai. *Revista Mutirão. Folhetim de Geografias Agrárias do Sul*, 3(1), 64-91. <https://doi.org/10.51359/2675-3472.2022.253699>
- Presidencia de la República Oriental del Uruguay. (2017). *Productor de Canelones sancionado por contaminación con agrotóxicos en agua y suelos*. <https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/noticias/productor-canelones-sancionado-contaminacion-agrotoxicos-agua-suelos>
- Pyarali, K., Peng, J., Disse, M., & Tuo, Y. (2022). Development and application of high resolution SPEI drought dataset for Central Asia. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/S41597-022-01279-5>
- Raja, A., & Gopikrishnan, T. (2022). Drought Analysis Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) at Different Time Scales in an Arid Region. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(4), 9034-9037. <https://doi.org/10.48084/ETASR.5141>
- Rasmussen, L. V., Coolsaet, B., Martin, A., Mertz, O., Pascual, U., Corbera, E., Dawson, N., Fisher, J. A., Franks, P., & Ryan, C. M. (2018). Social-ecological outcomes of agricultural intensification. *Nature Sustainability* 2018 1:6, 1(6), 275-282. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0070-8>
- Resare Sahlin, K., Gordon, L. J., Lindborg, R., Piipponen, J., Van Rysselberge, P., Rouet-Leduc, J., & Rööös, E. (2024). An exploration of biodiversity limits to grazing ruminant milk and meat production. *Nature Sustainability* 2024, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01398-4>
- Ribeiro, W. C., Silva, C. L., Luis, S., & Batista Da Silva, P. (2019). Conflito pela água, entre a escassez e a abundância: Marcos teóricos. *AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política*, 1(2), 11-37.
- Riera, C. (2021). La renta hídrica en el riego de cultivos extensivos en el norte de Buenos Aires (Argentina). *Revista CS*, 33, 275-299. <https://doi.org/10.18046/RECS.I33.4044>
- Ringnér, M. (2008). What is principal component analysis? *Nature Biotechnology* 2008 26:3, 26(3), 303-304. <https://doi.org/10.1038/nbt0308-303>
- Rockström, J., Falkenmark, M., Allan, T., Folke, C., Gordon, L., Jägerskog, A., Kummu, M., Lannerstad, M., Meybeck, M., Molden, D., Postel, S., Savenije, H. H. G., Svedin, U., Turton, A., & Varis, O. (2014). The unfolding water drama in the Anthropocene: Towards a resilience-based perspective on water for global sustainability. *Ecohydrology*, 7(5), 1249-1261. <https://doi.org/10.1002/eco.1562>
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145-163. <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2017.02.001>
- RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC.
- Rulli, M. C., Savioli, A., & D'Odorico, P. (2013). Global land and water grabbing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(3), 892-897. https://doi.org/10.1073/PNAS.1213163110/SUPPL_FILE/ST03.DOC
- Saaty, T. L. (1980). Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. En *Advanced Optimization and Decision-Making Techniques in Textile Manufacturing* (First Edition). McGraw-Hill, Inc.
- Sala, O. E., & Paruelo, J. M. (1997). Ecosystem services in grasslands. En G.C.Daily (Ed.), *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems* (pp. 237-251). Island Press.

- Sánchez-Ruiz, S., Piles, M., Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., Vall-Ilossera, M., & Camps, A. (2014). Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates. *Journal of Hydrology*, 516(4), 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.047>
- Santos, C. (2020). La frontera hídrica del agronegocio en Uruguay: nuevas dinámicas de acumulación y despojo. *Quid*, 16(13), 12-34.
- Santos, C., González, M. N., & Sanguinetti, M. (2022). El agua como subsidio ambiental del agronegocio en Uruguay. En A. Azamar, J. C. Silva Macher, & F. Zubermaier (Eds.), *Una mirada desde la economía ecológica latinoamericana frente a la crisis socioecológica* (pp. 314-342). Siglo Veintiuno Editoras-Clacso.
- Sarandón, J. (2021). *Biodiversidad, agroecología y agricultura sustentable*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Sassano, K., Iccardi, P., Giordano, G., García, R., Parrilla, G., Reyes, A., García, P., & institucional, F. (2019). *Análisis del conflicto ambiental de la Cuenca de la Laguna del Cisne: territorio en disputa*.
- Sawchik, J. (2012). Necesidades de Riego en Cultivos y Pasturas. En *Riego en cultivos y pasturas*. INIA.
- Schröter, D., Polsky, C., & Patt, A. G. (2005). Assessing vulnerabilities to the effects of global change: An eight step approach. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 10(4), 573-595. <https://doi.org/10.1007/S11027-005-6135-9/METRICS>
- Scott, L. M., & Janikas, M. V. (2010). Spatial Statistics in ArcGIS. *Handbook of Applied Spatial Analysis*, 27-41. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03647-7_2
- Sellers, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1335-1372. <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>
- Sellers, P. J., Berry, J. A., Collatz, G. J., Field, C. B., & Hall, E. G. (1992). Canopy Reflectance, Photosynthesis, and Transpiration. III. A Reanalysis Using Improved Leaf Models and a New Canopy Integration Scheme. *Remote Sensing of Environment*, 42(3), 187-216.
- Serkendiz, H., Tatli, H., Özcan, H., Çetin, M., & Sungur, A. (2023). Multidimensional assessment of agricultural drought vulnerability based on socioeconomic and biophysical indicators. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 98, 104121. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2023.104121>
- Silveira, L., & Alonso, J. (2009). Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay. *Hydrological Processes*, 23(2), 320-329. <https://doi.org/10.1002/HYP.7156>
- Silveira, L., Alonso, J., & Martínez, L. (2006). The effects of afforestation on Uruguay's water resources. *Agrociencia Uruguay*, 10(2), 75-93. <https://doi.org/10.31285/AGRO.10.931>
- Silveira, L., Gamazo, P., Alonso, J., & Martínez, L. (2016). Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in the western region of Uruguay. *Hydrological Processes*, 30(20), 3596-3608. <https://doi.org/10.1002/HYP.10952>
- Smith, M., de Groot, D., & Bergkamp, G. (2006). *Pay. Establishing payments for watershed services*.
- Sordo-Ward, A., Bejarano, M. D., Garrote, L., Asenjo, V., & Bianucci, P. (2018). Drought Vulnerability Under Climate Change: A Case Study in La Plata Basin. *Drought*, 127-145. <https://doi.org/10.1002/9781119017073.CH7>

- Sum, T. (2021). *Conflictos territoriales en Canelones (2008-2020): el agronegocio en territorios de la soberanía alimentaria* [Licenciatura en Geografía]. Universidad de la República.
- Sum, T., & Díaz, I. (2023). El despliegue del agronegocio en territorios de la soberanía alimentaria - Canelones, Uruguay. *Geo UERJ*, 42, 1-24. <https://doi.org/10.12957/GEOUERJ.2023.66700>
- Szymula, J. P. V. (2014). *Análisis de la evolución de las sequías con metodologías de teledetección* [Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos]. Universidad Nacional del Litoral.
- Tan, P., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). Cluster Analysis: Basic Concepts and Algorithms. En *Introduction to Data Mining*. Pearson.
- Thornton, P. K. (2010). Livestock production: recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2853-2867. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2010.0134>
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W. H., Simberloff, D., & Swackhamer, D. (2001). Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science*, 292(5515), 281-284. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1057544>
- Tommasino, A., Lezama, F., Gallego, F., Camba Sans, G., & Paruelo, J. M. (2023). Rangeland resilience to droughts: Changes across an intensification gradient. *Applied Vegetation Science*, 26(2), e12722. <https://doi.org/10.1111/AVSC.12722>
- Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - Ecosystem service management. *Ecology Letters*, 8(8), 857-874. <https://doi.org/10.1111/J.1461-0248.2005.00782.X>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matsone, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8074-8079. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1231335100SET/2E9EB157-660D-4672-985F-EB8D3F7127F5SETS/GRAPHIC/PQ1231335004.JPEG>
- Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I. J. M., Stahl, K., Hannaford, J., Di Baldassarre, G., Teuling, A. J., Tallaksen, L. M., Uijlenhoet, R., Hannah, D. M., Sheffield, J., Svoboda, M., Verbeiren, B., Wagener, T., Rangecroft, S., Wanders, N., & Van Lanen, H. A. J. (2016). Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience* 2016 9:2, 9(2), 89-91. <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>
- Vandermeer, J. H. (2011). *The Ecology of Agroecosystems*. Jones and Bartlett .
- Vargas, J., & Paneque, P. (2017). Methodology for the analysis of causes of drought vulnerability on the River Basin scale. *Natural Hazards*, 89(2), 609-621. <https://doi.org/10.1007/S11069-017-2982-4/METRICS>
- Vera Rodríguez, J. M., & Albarracín Calderón, A. P. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109-136. <https://doi.org/10.18359/RCIN.2309>

- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & Sanchez-Lorenzo, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(1), 52-57. https://doi.org/10.1073/PNAS.1207068110/SUPPL_FILE/SAPP.PDF
- Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., & Domínguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Science Reviews*, 201, 102953. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2019.102953>
- Vicente-Serrano, S. M., Van der Schrier, G., Beguería, S., Azorin-Molina, C., & Lopez-Moreno, J. I. (2015). Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology*, 526, 42-54. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.11.025>
- Vieira, R. M. da S. P., Tomasella, J., Cunha, A. P. M. do A., Barbosa, A. A., Pompeu, J., Ferreira, Y., Santos, F. C., Alves, L. M., & Ometto, J. (2023). Socio-Environmental Vulnerability to Drought Conditions and Land Degradation: An Assessment in Two Northeastern Brazilian River Basins. *Sustainability (Switzerland)*, 15(10), 8029. <https://doi.org/10.3390/SU15108029/S1>
- Vitousek, P. M. (1994). Beyond Global Warming: Ecology and Global Change. *Ecology*, 75(7), 1861-1876. <https://doi.org/10.2307/1941591>
- Vogelmann, J. E. (1995). Assessment of Forest Fragmentation in Southern New England Using Remote Sensing and Geographic Information Systems Technology. *Conservation Biology*, 9(2), 439-449. <https://doi.org/10.1046/J.1523-1739.1995.9020439.X/FULLPDF>
- Wang, Q., Wu, J., Lei, T., He, B., Wu, Z., Liu, M., Mo, X., Geng, G., Li, X., Zhou, H., & Liu, D. (2014). Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. *Quaternary International*, 349, 10-21. <https://doi.org/10.1016/J.QUAINT.2014.06.021>
- Weil, R., & Brady, N. C. (2017). Soil Water: Characteristics and Behaviour. En *The Nature and Properties of Soils* (15.^a ed., pp. 207-582). Pearson.
- Wilhelmi, O. V., & Wilhite, D. A. (2002). Assessing vulnerability to agricultural drought: A Nebraska case study. *Natural Hazards*, 25(1), 37-58. <https://doi.org/10.1023/A:1013388814894/METRICS>
- Wilhite, D. A. (2000). *Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions* (Vol. 1). Drought Mitigation Center Faculty Publications. <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpubhttp://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69>
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328SET//CMSSET/3A885BBA-E084-4503-8037-C1D6D846E5EC/02508068508686328.FP.PNG>
- Wilhite, D. A., & Pulwarty, R. S. (2017). Drought as Hazard: Understanding the Natural and Social Context. En *Drought and Water Crises* (pp. 3-20). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/B22009-2>

- Wilhite, D. A., Sivakumar, M. V. K., & Pulwarty, R. (2014). Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes*, 3, 4-13. <https://doi.org/10.1016/J.WACE.2014.01.002>
- Wu, J. (2012). Cluster Analysis and K-means Clustering: An Introduction. En *Advances in K-means Clustering* (pp. 1-16). Springer.
- Yao, N., Li, Y., Liu, Q., Zhang, S., Chen, X., Ji, Y., Liu, F., Pulatov, A., & Feng, P. (2022). Response of wheat and maize growth-yields to meteorological and agricultural droughts based on standardized precipitation evapotranspiration indexes and soil moisture deficit indexes. *Agricultural Water Management*, 266, 107566. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107566>
- Zarafshani, K., Sharafi, L., Azadi, H., Hosseininia, G., De Maeyer, P., & Witlox, F. (2012). Drought vulnerability assessment: The case of wheat farmers in Western Iran. *Global and Planetary Change*, 98-99, 122-130. <https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2012.08.012>
- Zhao, A., Zhang, A., Cao, S., Liu, X., Liu, J., & Cheng, D. (2018). Responses of vegetation productivity to multi-scale drought in Loess Plateau, China. *CATENA*, 163, 165-171. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2017.12.016>
- Zhao, M., A, G., Liu, Y., & Konings, A. G. (2022). Evapotranspiration frequently increases during droughts. *Nature Climate Change* 2022 12:11, 12(11), 1024-1030. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01505-3>
- Zhao, M., & Running, S. W. (2010). Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 329(5994), 940-943. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1192666/SUPPL_FILE/ZHAO.SOM.REVISION.1.PDF
- Zikos, D., & Hagedorn, K. (2017). Competition for Water Resources From the European Perspective. *Competition for Water Resources: Experiences and Management Approaches in the US and Europe*, 19-35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803237-4.00002-1>

Anexo 1.1

Referencia: “...” refiere al valor original de la base de datos, sin asignación de un orden propio.

	Variable	Rango	Referencias
Suelo	<i>Capacidad de almacenar agua</i>	...	En mm; Reclasificado de Molfino (2009)
	<i>Materia orgánica del suelo</i>	...	Valor reclasificado de Panario et al (2011)
	<i>Pendiente</i>	...	% a partir MDE ALOS PALSAR
	<i>Productividad</i>	...	Valor reclasificado de Panario et al (2011)
	<i>Drenaje</i>	1-5	De menor a mayor (5); Reclasificado de Panario et al (2011)
	<i>Profundidad</i>	1-5	De menor a mayor (5); Reclasificado de Panario et al (2011)
	<i>Textura</i>	1-5	De liviana a pesada (5); Reclasificado de Panario et al (2011)
Socio-económica	<i>Propiedad de la tierra</i>	1-3	Propietario/a (1), arrendatario/a (2), colono/a (3)
	<i>Superficie total</i>	...	Superficie total. Hectáreas controladas.
	<i>Dependencia económica</i>	1-5	Respecto a ingresos. Nula (1), parcial (3), total (5)
	<i>Inserción mercado</i>	0-100	% nulo (0), marginal (30), parcial (50), principal (75), total (100)
	<i>Trabajo familiar</i>	...	Cantidad de personas
	<i>Trabajo asalariado</i>	...	
Vegetal	<i>Superficie plantada</i>	...	Hectáreas con pradera, forraje y/o cultivo
	<i>Proporción de superficie plantada</i>	...	% Porcentaje de área mejorada respecto al total.
	<i>Suficiencia de tierra para producción vegetal necesaria</i>	1-5	Insuficiente (1), equilibrada (3), excede ampliamente lo necesario (5). No aborda la producción vegetal.
	<i>Producción vegetal</i>	1-5	Insuficiente (1), equilibrada (3), excede ampliamente lo necesario (5). Aborda específicamente la producción vegetal.
Animal	<i>Cantidad vacunos</i>	...	Cabezas de ganado.
	<i>Cantidad vacas lecheras</i>	...	Cabezas de ganado.
	<i>Cantidad ovinos</i>	...	Cabezas de ganado.
	<i>Cantidad bueyes</i>	...	Cabezas de ganado.
	<i>Diversidad animal</i>	1-4	De especies animales. Máximo 4.
	<i>Carga animal</i>	1-5	Muy baja (1), moderada (3), muy alta (5)
Hídrico	<i>Disponibilidad normal</i>	1-5	Muy justa (1), equilibrada (3), muy alta (5)
	<i>Disponibilidad durante sequías</i>	1-5	Muy justa (1), equilibrada (3), muy alta (5)
Histórico-externo	<i>Uso del suelo previo</i>	1-5	Según intensidad agraria. Por ejemplo, campo natural sin intervención 1 y agricultura continua desde S XX con problemas de erosión (5)

	<i>Intensidad agraria contexto</i>	1-5	Según nivel de intensidad agraria asignado en Tabla 2.3.
<i>Respuesta a la sequía</i>	<i>Pronóstico</i>	1-5	Consulta diversas fuentes y asigna importancia (1), consulta pero no asigna importancia (3), no consulta ni asigna importancia (1).
	<i>Momento respuesta</i>	1-5	Con meses de anticipación (1), cuando se instala el evento (3), cuando observa impactos (5)
	<i>Diversidad de respuestas</i>	1-3	Individual (1), grupal y/o institucional. Individual en combinación con otra (2). Valor máximo de 3.
	<i>Capacidad de implementar estrategias</i>	1-5	Inviabile (1), es posible (3), muy viable/lo hace (5)
<i>Impacto, resultado, relevancia sequías</i>	<i>Impacto producción vegetal</i>	1-5	Nulo (1), moderado (3), muy grave (5)
	<i>Impacto disponibilidad hídrica</i>	1-5	Nulo (1), moderado (3), muy grave (5)
	<i>Resultado estrategia de respuesta</i>	1-5	No logró mitigar el impacto de la sequía (1), tuvo resultados parciales (3), permitió funcionar sin daños productivos (5)
	<i>Relevancia sequía</i>	1-5	Es una problemática marginal (1), es una problemática muy relevante (3), es el principal (5)

Anexo 1.2

caso	alm_hS	prof_S	dep_act	inserc_mer	div_anim	hist_uso	tierra_for	oh_norm	oh_seq	Cap_alt
A	97,00	5,00	1	0	2	1	1	2	1,5	2
B	96,14	4,38	4,5	100	1	3,5	4	5	4,5	2
C	96,95	4,07	3,5	100	1	2	2	2	3	2
D	86,95	5,00	4	100	1	2,5	2	4	1,5	2
E	92,67	3,89	3	100	1	3,5	4	4	5	2
F	126,79	4,93	3	100	1	3,5	4	4,5	4,5	4
G	101,36	5,00	5	100	1	2	2,5	4	4	4
H	57,00	3,00	3	50	1	3	3	5	5	1,5
I	57,00	3,00	3	50	1	4	2	4	3	4
J	96,81	5,00	2	30	2	1	2	3	1,5	2
K	94,61	4,71	3	100	1	3	4	3,5	4,5	2
L	126,00	5,00	5	100	1	1	4	4	3	3
M	94,16	5,01	5	100	2	4	4	4,5	4	5
N	107,67	4,80	4	100	1	4	4	5	5	5
O	126,00	5,00	4	100	1	1	3	4	1,5	4,5
P	111,30	5,00	1	0	3	2	2	2	2	1
Q	105,00	4,58	5	100	1	3	4	3	3	3,5

Anexo 1.3

caso	Grupo	Subgrupo	sup_tot	trab_fam	trabj_asa	sup_plant	pct_sup_pl	n_vac	n_ov	n_lec	n_buey
A	3	3	3	1	0	1	33,33	0	7	0	2
B	1	1f	55	2	0	10	18,18	50	0	0	0
C	2	2f	13	1	0	2,5	19,23	14	0	0	0
D	2	2e	210	1	2	168	80,00	800	0	0	0
E	1	1f	42	1	0	10	23,81	50	0	0	0
F	1	1e	300	0	2	100	33,33	200	0	0	0
G	2	2e	196	1	3,5	196	100,00	0	0	130	0
H	4	4	17	1	0	4	23,53	0	60	0	0
I	4	4	5	2	0	1,5	30,00	0	41	0	0
J	3	3	15	1	0	0	0,00	15	2	0	0
K	1	1e	200	1	4	200	100,00	300	0	0	0
L	2	2f	40	3	0	0	0,00	15	0	0	0
M	1	1e	600	1	1,5	300	50,00	700	7	0	0
N	1	1e	1800	0	4	1520	84,44	290	0	0	0
O	2	2f	150	2	1	15	10,00	210	0	0	0
P	3	3	12	1	0	4	33,33	6	0	1	2
Q	2	2e	395	2	5	300	75,95	0	0	300	0