

CARTOGRAFÍA DE LA PELIGROSIDAD DE DÉFICIT Y EXCESO HÍDRICO EN LA PROVINCIA DE SANTA FE (ARGENTINA)

Lautaro Méndez, Guillermo Tóffoli, Lucía Gariglio, Dianela Costamagna; Mercedes Cardoso

RESUMEN

En los últimos años, ha crecido la relevancia de los estudios que analizan la incidencia de eventos hidrometeorológicos extremos, tanto de exceso como de déficit hídrico, sobre la producción agroganadera en Argentina, debido a su creciente impacto económico y a la necesidad de diseñar estrategias de gestión del riesgo que permitan minimizar pérdidas y mejorar la productividad en el sector. Este sector económico sufrió pérdidas significativas debido a la periodicidad e intensidad de estos fenómenos, lo cual es fundamental comprender el origen y frecuencia como así también su impacto sobre el territorio.

Este trabajo presenta la representación cartográfica de un índice de peligrosidad (I_p) que permite evaluar las condiciones de peligrosidad de los eventos extremos de Santa Fe durante el período 1959–2023. Para su construcción, se utilizaron datos meteorológicos de estaciones meteorológicas distribuidas estratégicamente permitiendo cubrir el territorio provincial.

Los resultados demuestran una mayor tendencia hacia eventos de déficit hídrico, pero con eventos extremos húmedos más intensos que los episodios secos. La alta variabilidad climática y meteorológica explican el actual escenario y contexto en el que, estos tipos de indicadores y de cartografía temática asociada al riesgo, resultan clave para planificar acciones de prevención, mitigación y reducción de desastres.

Palabras clave: peligrosidad; SPEI; sequías; inundaciones.

ABSTRACT

In recent years, the relevance of studies about the incidence of extreme hydrometeorological events, such as excess and hydric deficit, on agricultural and livestock production in Argentina has increased, due to their growing economic impact and the need to design risk-management strategies that minimize losses and improve productivity in the sector. This economic sector has experienced significant losses resulting from the periodicity and intensity of such events, making it essential to understand their origin and frequency, as well as their impact on the territory.

This study presents the cartographic representation of a Hazard Index (I_p) that makes it possible to assess the hazard conditions associated with extreme events in Santa Fe during the period 1959–2023. For its construction, meteorological data from strategically distributed weather stations were used, allowing for comprehensive coverage of the provincial territory.

The results show a stronger tendency toward hydric deficit events, although extreme wet events are more intense than dry episodes. The high climatic and meteorological variability explains the current scenario and context in which these types of indicators, along with thematic cartography associated with risk, become key tools for planning actions aimed at prevention, mitigation, and disaster reduction.

Key words: hazard; SPEI; floods; droughts.

1. INTRODUCCIÓN

La provincia de Santa Fe es reconocida por sus condiciones ambientales propicias para la actividad agrícola-ganadera (SANDOVAL, 2015; MÉNDEZ, 2021). Sin embargo, en las últimas décadas los episodios de déficit y exceso hídrico han impactado en la producción primaria ocasionando serias y millonarias pérdidas de acuerdo a diferentes informes de la Bolsa de Cereales de Rosario (Santa Fe, Argentina).

La problemática de los eventos de sequía e inundaciones son estudiados desde diferentes disciplinas con distintos objetivos. Sin embargo, se concluye que el impacto varía de acuerdo a las condiciones del área geográfica y de las características de la población que la habita. Es difícil definir el inicio de un episodio de déficit. Además, algunos son recurrentes y otros esporádicos, según las regiones geográficas que analicemos (ZANVETTOR, RAVELLO y BOLETTA, 2016). WHILTE, SVOBODA Y HAYES (2007) señalan que no hay una sola definición de sequía o de eventos de excesos hídricos ya que varía de acuerdo al grupo climático, mientras que ALIAGA, FERRELLI Y PÍCCOLO (2017) advierten que tanto los eventos secos como los húmedos, son componentes de la variabilidad climática, es decir, algo que sucede con cierta recurrencia, periodicidad y normalidad. Los eventos de exceso húmedo por su parte, son mediáticamente más visibles e inmediatos en su impacto comparado con un episodio de sequía (ZANVETTOR, RAVELLO y BOLETTA, 2016). En relación a los impactos, se observa una mayor preocupación de los eventos de excesos en los espacios urbanos que en los rurales. Esto es observado por los numerosos planes de gestión del riesgo que disponen muchos gobiernos de grandes ciudades de Argentina, mientras que para los espacios rurales son escasos y poco eficientes. Para ambos eventos, la herramienta con la que cuentan los gobiernos es la de declarar emergencia o desastre agropecuario (MÉNDEZ *et al.*, 2025).

El sector agropecuario es ampliamente condicionado por estos fenómenos. GARCÍA MARITANO (2017) reveló que el clima es el gestor de la política láctea en Argentina ya que, como explicó en una entrevista de un diario, “el otoño de 2016 las lluvias se ensañaron con el corazón de las cuencas lecheras de las provincias de Santa Fe y Córdoba, haciendo caer fuertemente la producción de leche” (2017) mientras que los gobiernos a diferentes escalas, poco hacen en relación a solucionar los problemas complejos de la cadena de producción láctea. En el caso de la agricultura, la situación no difiere. En 2019, una noticia del diario Infobae (2019) mostraba que “en Santa Fe hay más de 200 mil hectáreas afectadas por los excesos hídricos” y que todo ello “paralizó la campaña de algodón, soja y girasol, y derivó en importantes pérdidas productivas” (INFOBAE, 2019). Al mismo tiempo, los excesos hídricos han provocado cambios en las estrategias de los productores del norte de la provincia. Esto se afirma en otra noticia del sitio rural INFOCAMPO, donde se indica que “ante los excesos hídricos y el fin de la ventana de siembra de trigo ciclo largo, los productores del centro y norte de la provincia de Santa Fe comenzaron a optar por variedades de trigos de ciclo intermedio o corto” (INFOCAMPO, 2019). Con el evento de extrema sequía de 2023, la Bolsa de Cereales de Rosario (2023) informó una profunda disminución de la productividad y de los rendimientos, amenazando la exportación de bienes primarios, por ende, al ingreso de dólares a la economía nacional.

Si bien hay un aumento de las precipitaciones medias anuales (TÓFFOLI *et al.*, 2024; LOVINO, MÜLLER y SGROI, 2020), la variabilidad de las mismas provoca serias complicaciones en el sector agropecuario ya que la producción es sensible a los cambios en los patrones de la lluvia y en los períodos críticos de los cultivos. Sin embargo, con el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI) es posible identificar la variabilidad y también los momentos de excesos y déficit aun cuando los montos pluviométricos aumenten. La precipitación es una variable compleja para ser estudiada por su fuerte variabilidad, espacialidad de acción e intensidad. No obstante, se pueden llegar a ciertos análisis aproximados sobre la conducta de la misma.

Estudios como los de ZANVETTOR, RAVELLO y BOLETTA (2016), FERRELLI *et al.* (2020), ZANVETTOR, SANCHEZ, BOLETTA y RAVELO (2021), analizan íntegramente las tendencias y probabilidades de ocurrencia de eventos secos y húmedos para la provincia de Córdoba, sudeste bonaerense y para la Argentina respectivamente. Estos antecedentes nos permiten recuperar parte de las metodologías de estudio de estos autores como también en pensar en la cartografía de la peligrosidad de estos eventos aplicado a la provincia de Santa Fe.

Por lo expuesto, el objetivo de este estudio es confeccionar una cartografía de peligrosidad de los diferentes eventos de déficit y excesos hídricos de la provincia de Santa Fe, con la finalidad de favorecer la implantación de medidas para aliviar las pérdidas y como parte de un eficiente plan de gestión del riesgo en espacios rurales a través del índice de peligrosidad propuesto por MÉNDEZ *et al.* (2025), el cual permite llegar a una aproximación de la peligrosidad de eventos de déficit y excesos en el territorio.

La peligrosidad, también denominada amenaza, es uno de los componentes de la fórmula del riesgo. Es concebida como el “acumulo potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas (...) y daños (...)” (IPCC, 2018, p.193). Para TSAKOUUMAGKOS y NATENZON (2015), “la peligrosidad refiere a las características de los procesos físicos que son potencialmente una amenaza a la seguridad de actividades sociales, económicas y culturales desarrolladas en la normalidad” (p: 30). Para manejar la peligrosidad es necesario conocerla. En este sentido, se entiende por riesgo a todo fenómeno de origen natural o humano que signifique un cambio en el medio ambiente que ocupa una comunidad determinada, que sea vulnerable a ese fenómeno (WILCHES-CHAUX, 1993). El riesgo, comprendido por la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad es un fenómeno complejo, tiene un carácter de incierto, de potencial o probable. Es por ello que requiere de un tratamiento que atienda a las distintas etapas del evento, en este caso de déficit y exceso hídrico: antes, durante y posterior al mismo (LAVELL, 2004). La gestión del riesgo debe comprender la prevención, reacción y reparación, elaborando diferentes respuestas ante fenómenos de diversa índole.

El estudio y diagnóstico territorial de la peligrosidad de carácter hidrometeorológico en la provincia de Santa Fe resulta fundamental para la gestión del riesgo, al igual que el abordaje de los demás componentes, el territorio expuesto y la población vulnerable. Esta contribución representa el punto de partida para la planificación y diseño de estrategias de prevención, mitigación y adaptación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA PROVINCIA DE SANTA FE

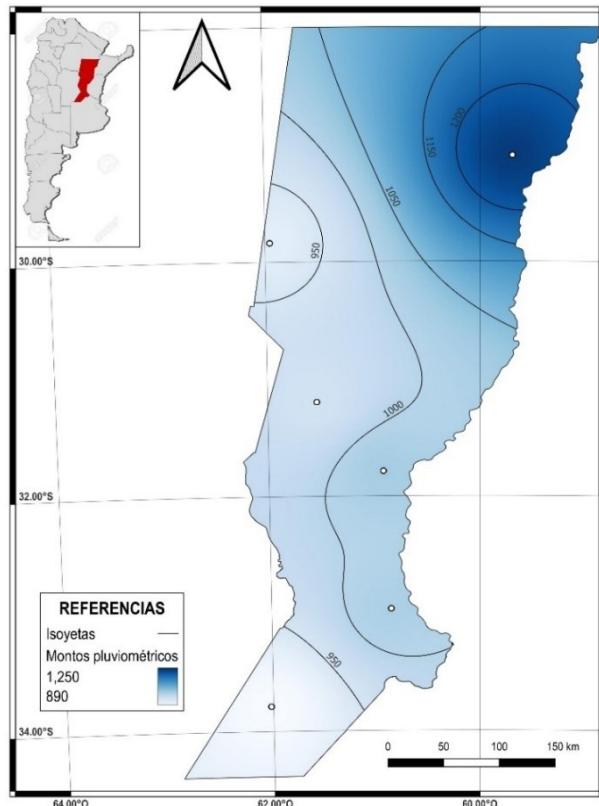
En líneas generales, la provincia de Santa Fe se caracteriza por un clima “templado húmedo de llanura, caracterizado por los cambios repentinos del estado del tiempo y por el aire frío saturado de humedad” (MATTEUCCI, 2012, p. 358), es decir, durante el año existen momentos de variabilidad meteorológica. Esto es importante señalar ya que podría responder a que cuando sucede un evento de exceso o de déficit hidrometeorológico, se comporta dentro de los patrones establecidos como “normal”.

No obstante, los estudios recientes sobre el área geográfica provincial se pueden distinguir tres subtipos climáticos; por un lado, el norte de la provincia con un clima subtropical con y sin estación seca (noreste y noroeste, respectivamente) mientras que, en el centro y sur del territorio, de acuerdo a la clasificación climática de KÖPPEN (1918), un clima templado húmedo con veranos calurosos (Cfa). Sin embargo, en la actualidad tanto en el norte como en el centro provincial, hay una tendencia a evolucionar a un clima subtropical con una leve inclinación a un régimen de precipitaciones de tipo monzónico, es decir, un aumento de temperaturas medias mensuales y anual junto a la intensificación de precipitaciones en la estación estival. No obstante, el sur provincial mantiene su condición de templado húmedo (Cfa). Estos incipientes cambios de los patrones meteorológicos, demuestra un avance de la *subtropicalización* en el territorio de la provincia de Santa Fe. Como es de esperarse, no solo es un incremento de los valores medios de la temperatura mensual y anual, sino también de los montos pluviométricos, con consecuencias sobre la producción agroganadera, acuíferos, las comunidades y ciudades.

A continuación, se presentan dos mapas climáticos de la provincia de Santa Fe. Tal como se demuestra en la figura 1, el comportamiento de las precipitaciones medias anuales tiene un centro de mayores valores en el noreste de la provincia (con 1200 mm anuales) y una distribución decreciente hacia el suroeste, siguiendo una disposición mayormente longitudinal. La figura 2, por su parte, indica que la distribución de las temperaturas medias anuales tiene una disposición mayormente latitudinal, excepto para el noreste. La información que nos proporcionan ambos mapas es que los indicadores utilizados para la cartografía de peligrosidad de eventos toman en

cuenta ambas variables, por lo que debe analizarse en su conjunto.

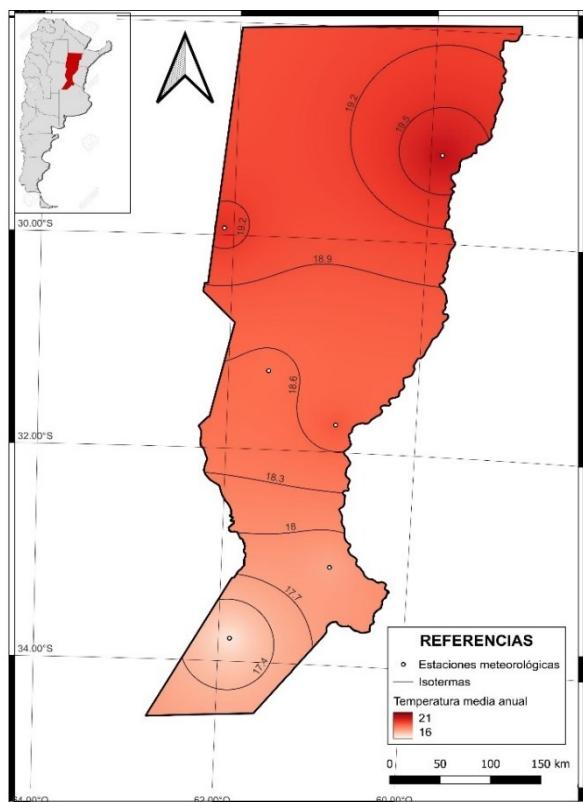
FIGURA 1
Mapa de distribución de precipitaciones medias anuales



Elaboración

propia.

FIGURA 2
Mapa de distribución de las temperaturas medias anuales



Elaboración

propia.

2.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA E INDICADORES

Se tomaron datos de precipitación mensual y de temperatura media mensual del período 1959-2023 (65 años) de cinco estaciones meteorológicas y de una estación para un período de 35 años, ubicadas estratégicamente para cubrir el área provincial. Cabe destacar que las cinco estaciones son las únicas con datos que superan los años que se requieren para analizar y manipular datos de precipitación (esperable más de 50 años) y que estén completos. En las seis estaciones, la información disponible supera el 96-98%. Esto permite un mejor análisis estadístico ya que, de acuerdo a WILKS (2011) y AGUILAR et al. (2003), los datos meteorológicos para los cuales poder manipular, analizar y obtener tendencias y valores medios, deben ser superiores al 90% de la serie completa; en caso contrario, puede que no sea una estadística sesgada y se sugiere aplicar métodos de reconstrucción basados en estaciones cercanas. El control de calidad y así evitar distorsiones, se realizó mediante el método de regresión lineal, donde los datos faltantes se obtienen mediante la determinación de series simples de mayor correlación (LOVINO, 2015).

Para un mejor análisis, se decidió subdividir la provincia en subregiones de acuerdo a la ubicación de las estaciones (Tabla N°1, TÓFFOLI *et al.*, 2024).

Tabla N°1. Información de las estaciones meteorológicas de la provincia de Santa Fe.

Ubicación de la estación	Región	Dependiente	Período	Lat	Long	Altitud (msnm)	Variables meteorológicas
Reconquista	Noreste	SMN	1959-2023	-29.14	-59.65	21	Pp, tx, tn
Ceres	Noroeste	SMN	1959-2023	-29.88	-61.94	84	Pp, tx, tn
Rafaela	Centro-oeste	INTA	1959-2023	-31.25	-61.48	90	Pp, tx, tn
Sauce Viejo	Centro-este	SMN	1959-2023	-31.76	-60.83	10	Pp, tx, tn
Rosario	Sureste	SMN	1959-2023	-32.94	-60.63	24	Pp, tx, tn
Venado Tuerto	Suroeste	SMN	1984-2023	-33.74	-61.96	111	Pp, tx, tn

Donde SMN: Servicio Meteorológico Nacional; INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; Pp: precipitación; tx: temperatura máxima; tn: temperatura mínima.

Fuente: TÓFFOLI *et al.*, 2024.

Con estos datos se obtuvo el Índice de Peligrosidad (Ip) (MÉNDEZ *et al.*, 2025). El Ip es una combinación del SPEI y de un análisis de frecuencia de probabilidades. El SPEI es un índice desarrollado por VICENTE SERRANO, BEGUERÍA y LÓPEZ MORENO (2012) que mide íntegramente las condiciones hídricas y climáticas de una región. Esto lo realiza mediante la diferencia entre la evapotranspiración y precipitación (VICENTE SERRANO *et al.*, 2012). De acuerdo a los autores del SPEI, se calcula de acuerdo a diferentes intervalos de tiempo. En MÉNDEZ *et al.* (2025) se toma el SPEI de 3 meses (SPEI₃) ya que es recomendado para las regiones agrícolas-ganaderas (SPENNEMANN *et al.*, 2015; SVOBODA, HAYES y WOOD, 2012). El SPEI clasifica a los eventos de déficit y exceso hídrico de acuerdo a umbrales. Los mismos son expuestos en la siguiente tabla (tabla N°2)

Tabla N°2. Categorización de eventos de acuerdo al SPEI.

TIPO DE EVENTO	UMBRAL DE VALORES DEL SPEI
Extremadamente húmedo	2 y/o más
Muy húmedos	1,5 a 1,99
Moderadamente húmedo	1 a 1,49
Humedad incipiente	0,50 a 0,99
Condiciones normales	Entre 0,99 y -0,99
Sequía incipiente	-0,50 a -0,99
Moderadamente seco	-1 a -1,49
Severamente seco	-1,5 a -1,99
Extremadamente seco	-2 y/o menos

Fuente: SVOBODA, HAYES Y WOOD, 2012.

El análisis de frecuencia de probabilidades es tomado de los autores ORTEGA GAUCIN, DE LA CRUZ Y CASTELLANO (2018), quienes señalan que la certeza que ocurría un fenómeno es según la cantidad de veces que ocurrió y el número de repeticiones del experimento, obteniéndose una frecuencia relativa la cual se convierte en porcentaje para una mejor comprensión (MÉNDEZ *et al.*, 2025). La expresión de tal metodología es la siguiente:

$$P = (A / N) * 100$$

Donde: P: probabilidad; A: número de meses con déficit o exceso hídrico; N: número total de registros en el período analizado. En porcentaje.

El Ip (MÉNDEZ *et al.*, 2025) por lo tanto, se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Ip = (\Sigma SPEI_3 / N) * 100$$

Donde: Ip: índice de peligrosidad; $\Sigma SPEI_3$: sumatoria del SPEI₃ según tipo de evento (déficit o exceso); N: número total de registros en el período analizado. En porcentaje.

A los resultados obtenidos se los clasifica según un rango de probabilidad de percentiles (ORTEGA GAUCIN, DE LA CRUZ Y CASTELLANO, 2018). Dichos rangos son: entre 0-20% (peligrosidad) muy baja; 20-40%, baja; 40-60% media; 60-80%, alta y entre 80-100%, muy alta. Para ello, esto se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\text{Rango (ubicación del percentil)} = \text{Percentil} / 100 * (\text{número de eventos} + 1)$$

El Ip es un indicador climático que resultó ser útil para analizar las condiciones de peligrosidad de un evento de déficit y exceso hídrico y el mismo fue aplicado para la cuenca lechera central santafesina (MÉNDEZ *et al.*, 2025).

2.3 PRODUCCIÓN CARTOGRÁFICA

La construcción de mapas y la manipulación de datos geoespaciales y cuantitativos se llevaron a cabo mediante el uso del software QGIS, a partir del manejo de capas vectoriales en formato *shapefile* y del análisis de imágenes *ráster*. Estas herramientas constituyeron la base del procesamiento cartográfico y permitieron integrar tanto datos construidos específicamente para la investigación como información proveniente de fuentes oficiales.

En el caso de los *rasters*, se efectuó la extracción de curvas de nivel, entendidas como isolíneas que conectan puntos con idéntico valor de un indicador. Las isolíneas cumplen una doble función: por un lado, representan de manera continua la variación espacial de un fenómeno; por otro, permiten identificar umbrales críticos o momentos de quiebre en la estructura y funcionamiento del mismo. Asimismo, el análisis de la distancia entre isolíneas posibilitó estimar el gradiente de variación, expresado en términos de intensidad, magnitud y dirección del cambio en función de la distancia, el tiempo y la velocidad (MADRID SOTO Y ORTIZ LÓPEZ, 2005).

Para la generación de superficies continuas a partir de datos puntuales, se aplicó el método de interpolación por distancia inversa (IDW). Este procedimiento permitió estimar valores intermedios entre los distintos valores asignados a las estaciones meteorológicas según el Ip de

cada evento. Con el fin de evaluar la precisión del modelo interpolado, se efectuó una validación cruzada calculando indicadores de error como la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo. Esto fue calculado en el *software* y paquete estadístico R-Studio. Esta evaluación permitió estimar la calidad del ajuste y cuantificar la incertidumbre espacial del resultado. Dado el número limitado de estaciones disponibles, se reconoce una mayor incertidumbre en áreas alejadas de los puntos de observación, lo que fue considerado en la interpretación y análisis de los mapas obtenidos.

La construcción de mapas de peligrosidad de eventos permitió identificar áreas de mayor y menor peligro; una representación visual en donde se debería tomar decisiones urgentes para prevenir un futuro desastre. En este sentido, el apoyo del SIG es clave para la resolución de conflictos ambientales y de desastre. La versatilidad del mismo permite incorporar nueva información mientras se genera y actualiza. (RENDÁ, 2017) mientras que también permite pronosticar y realizar modelos de simulación frente un posible desastre.

En cuanto a los archivos vectoriales, se elaboraron de manera propia a través de procesos de digitalización manual y geoprocесamiento, aunque también se descargaron capas oficiales del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con el fin de garantizar la validez y confiabilidad de los datos. Los vectores fueron empleados para representar entidades discretas, tales como límites político-administrativos, hidrografía, infraestructura vial y localidades, mientras que los *rasters* se utilizaron para variables de carácter continuo, como altimetría, pendientes o densidades.

Se adoptó el sistema de referencia EPSG:5347, correspondiente a la proyección Gauss-Krüger (Faja 5) con el marco geodésico POSGAR 2007, en concordancia con la cartografía oficial de la República Argentina. El uso de este sistema garantizó la compatibilidad con otras bases geoespaciales, la precisión en los cálculos métricos y la correcta superposición entre capas.

Adicionalmente, se aplicaron técnicas de geoprocесamiento que incluyeron recortes espaciales para delimitar áreas de estudio específicas, reprojecções, con el fin de homogeneizar la cartografía proveniente de distintas fuentes, superposición espacial de capas para identificar relaciones e interacciones entre variables. Este conjunto de procedimientos permitió obtener un producto cartográfico coherente, en el que la información cuantitativa se integró para representar y analizar de manera precisa la distribución, intensidad y dinámica espacial de los fenómenos bajo estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla N°3, se sintetiza el Ip de cada localidad/región. A la vez, se lo categoriza de acuerdo a los umbrales de peligrosidad según percentiles (muy bajo-MB; bajo-B; medio-M; alto-A; muy alto-MA).

Tabla N°3. Ip de cada localidad-región de acuerdo a tipo de evento.

Localidad y región	Reconquista Noroeste	Ceres Noreste	Rafaela Centro- oeste	Sauce Viejo Centro-este	Rosario Sureste	Venado Tuerto Suroeste
Ip según tipo de evento						
Extremadamente húmedo	2.70 - MB	1.62 - MB	1.7 - MB	1.42 - MB	2.70 - MB	2.26 - MB
Severamente húmedo	4.50 - B	6.34 - B	5.7 - B	7.35 - B	3.60 - B	4.76 - B
Moderadamente húmedo	11.18 - A	8.77 - A	10.1 - A	8.89 - M	10.28 - A	9.27 - M
Humedad incipiente	13.50 - A	13.77 - A	12.4 - A	13.14 - A	14.91 - MA	15.79 - A
Condiciones normales	36.63	39.68	39.2	37.76	37.92	34.34
Sequía incipiente	14.52 - MA	16.46 - MA	16.1 - MA	15.72 - MA	13.50 - A	17.54 -MA
Moderadamente seco	10.41 - M	7.56 - M	9.2 - M	10.44 - A	10.15 - M	10.03 - A

Severamente seco	4.63 - B	3.24 - B	3.6 -B	3.74 - B	5.40 - B	4.51 - B
Extremadamente seco	1.93 - MB	2.56 - MB	2.1 - MB	1.55 - MB	1.54 - MB	1.25 - MB

Elaboración propia.

Estos números nos dan un indicio de los eventos de déficit y excesos que se presentaron en cada una de las localidades y regiones. Si analizamos los valores acumulados, cada localidad y región estuvo entre el 60-65% del período 1959-2023 bajo condiciones adversas, tanto de sequía como exceso hídrico mientras que apenas un 30-40% bajo condiciones normales. Esto nos sugiere, quizás, realizar una lectura más profunda y analizar qué respuestas se dieron y se darán en un futuro donde las condiciones de riesgo aumentarían y los eventos peligrosos serían mucho más adversos e intensos que los actuales (LOVINO, MÜLLER Y SGROI, 2020).

Se observa que los eventos de sequía incipiente son mayores frente a los episodios de humedad incipiente en 4 de las 5 localidades y regiones. Sin embargo, los eventos húmedos moderados, severos y extremos son superiores a los equivalentes de déficit, demostrando que los episodios de excesos son de una mayor intensidad y ocurrencia. Esto indicaría que hay un cambio en el patrón de distribución de las precipitaciones, lo que podría agravar la situación actual ya que hay una tendencia a un incremento de los montos pluviométricos (TÓFFOLI *et al.*, 2024; LOVINO, MÜLLER Y SGROI, 2020).

Si bien el Ip de sequía incipiente es de peligrosidad muy alta, el impacto puede ser mínimo. Esto puede materializarse en áreas donde la agricultura no es la principal actividad económica o donde se cuenta con riego tecnificado que reduce la dependencia directa de las lluvias o cuando ocurre en una etapa del ciclo reproductivo en la que la demanda hídrica no es crítica; para el sector ganadero, por su parte, no podría llegar a comprometer de manera significativa la oferta forrajera ni la disponibilidad de agua para los animales. Sin embargo, los de peligrosidad alta, como los eventos de moderadamente húmedo y seco, la intensidad es mayor por lo que el impacto será visible y comprometería a los sistemas productivos. La de peligrosidad media, baja y muy baja, son de impacto mayor, por ejemplo, en pérdidas millonarias por daños en la producción agropecuaria, miles de hectáreas anegadas por el agua y verse afectada la disponibilidad de agua para el ganado. Por lo tanto, no se debería confiar ciegamente en la tendencia general, ya que se trata de valores estadísticos promedio. Es necesario, en cambio, implementar estrategias para mitigar el riesgo y reducir el impacto de estos eventos. Un evento extremo de sequía afecta gravemente la producción agroganadera y pone en riesgo tanto el suministro de agua para el ganado como el consumo humano.

Al analizar a escala provincial el Ip promedio por tipo de evento de acuerdo al SPEI, da como resultado lo plasmado en la tabla N°4:

Tabla N°4. Ip de la provincia de Santa Fe de acuerdo a tipo de evento

Ip según tipo de evento	Provincia de Santa Fe
Extremadamente húmedo	2.07 - MB
Severamente húmedo	5.37 - B
Moderadamente húmedo	9.75 - A
Humedad incipiente	13.92 - A
Condiciones normales	37.59
Sequía incipiente	15.64 - MA
Moderadamente seco	9.63 - M
Severamente seco	4.19 - B
Extremadamente seco	1.82 - MB

Elaboración propia.

De acuerdo a lo indicado en esta tabla, las condiciones de peligrosidad de exceso y déficit hídrico son de un Ip promedio muy similares entre la provincia y el de las localidades-regiones. La sequía incipiente sigue siendo de peligrosidad muy alta, mientras que los eventos de humedad incipiente y moderada, con un grado alto.

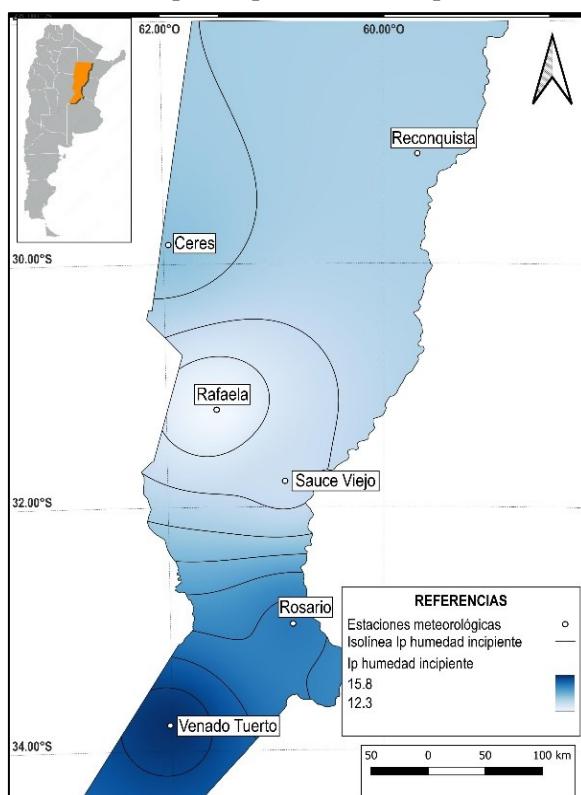
Con la información por localidad-región, se procede a realizar una cartografía de la peligrosidad de eventos de excesos y déficit a escala provincial.

3.1 CARTOGRAFÍA DEL ÍNDICE DE PELIGROSIDAD DE EVENTOS REFERIDOS A EXCESOS HÍDRICOS

Tal como se infiere en las siguientes figuras, se observan situaciones totalmente distintas entre los eventos de exceso hídrico de acuerdo a las regiones y localidades. Cabe indicar que los colores más oscuros significan un mayor valor de indicador y a la vez se visualizan las isolíneas, las cuales advierten las diferencias del Ip y su gradiente.

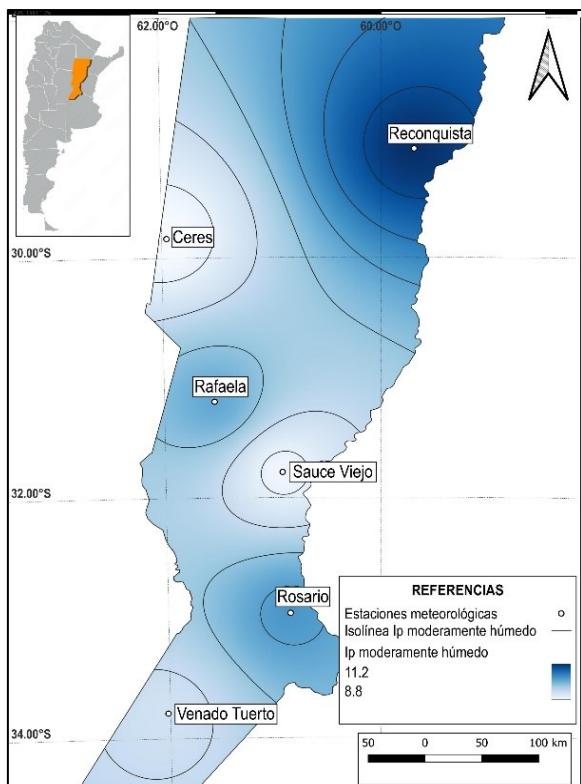
La figura N°3 del Ip de humedad incipiente demuestra que el sur de la provincia es más proclive a tales eventos mientras que en moderadamente húmedo (figura N°4, más severo que el anterior), se localiza en el noreste, en la región de Reconquista. Al observar las isolíneas de la figura N°3, la tendencia es de cambiar hacia el suroeste mientras que en la N°4, el gradiente es hacia el noreste. Por su parte, la validación estadística según RMSE, MAE y el sesgo fueron de 1.20, 1.14 y -0.13 respectivamente para los eventos modernamente húmedos, con errores y subestimación leve. Para los eventos de humedad incipiente, los valores fueron 1.00, 0.81 y -0.31 con una buena precisión y leve subestimación.

FIGURA 3
Mapa de Ip humedad incipiente.



Elaboración propia.

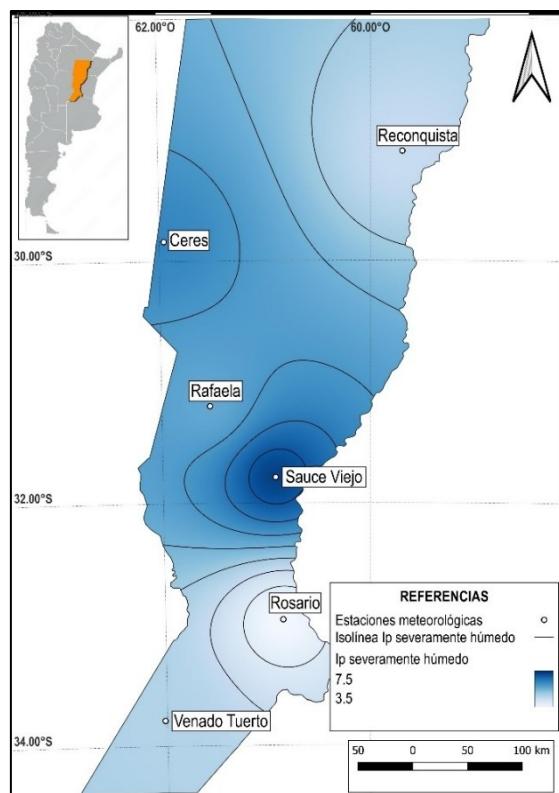
FIGURA 4
Mapa de Ip moderadamente húmedo.



Elaboración propia.

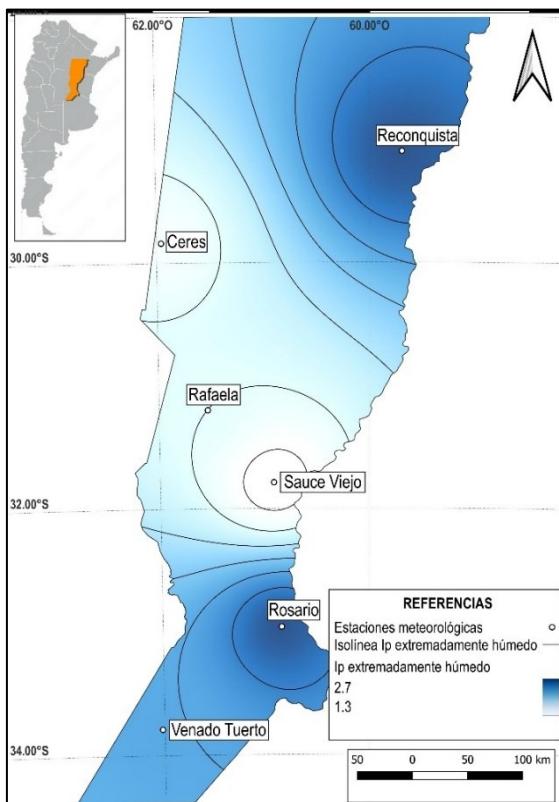
En las figuras (5 y 6), los mapas demuestran que la distribución del Ip vuelve a ser diferente. Por un lado, en la figura N°5 se observa que el gradiente es hacia el centro-este (Sauce Viejo) mientras que, en la 6, la peligrosidad está localizada en el sureste (Rosario) y noreste (Reconquista). Para el Ip de eventos húmedos severos, el RMSE, MAE y el sesgo fueron de 1.55, 1.32 y +0.32 respectivamente, dando lugar a un error algo mayor y una leve sobreestimación. Para los eventos extremos húmedos, la validación dio una buena precisión con una leve subestimación (0.60, 0.47 y -0.16).

FIGURA 5
Mapa de Ip severamente húmedo.



Elaboración propia.

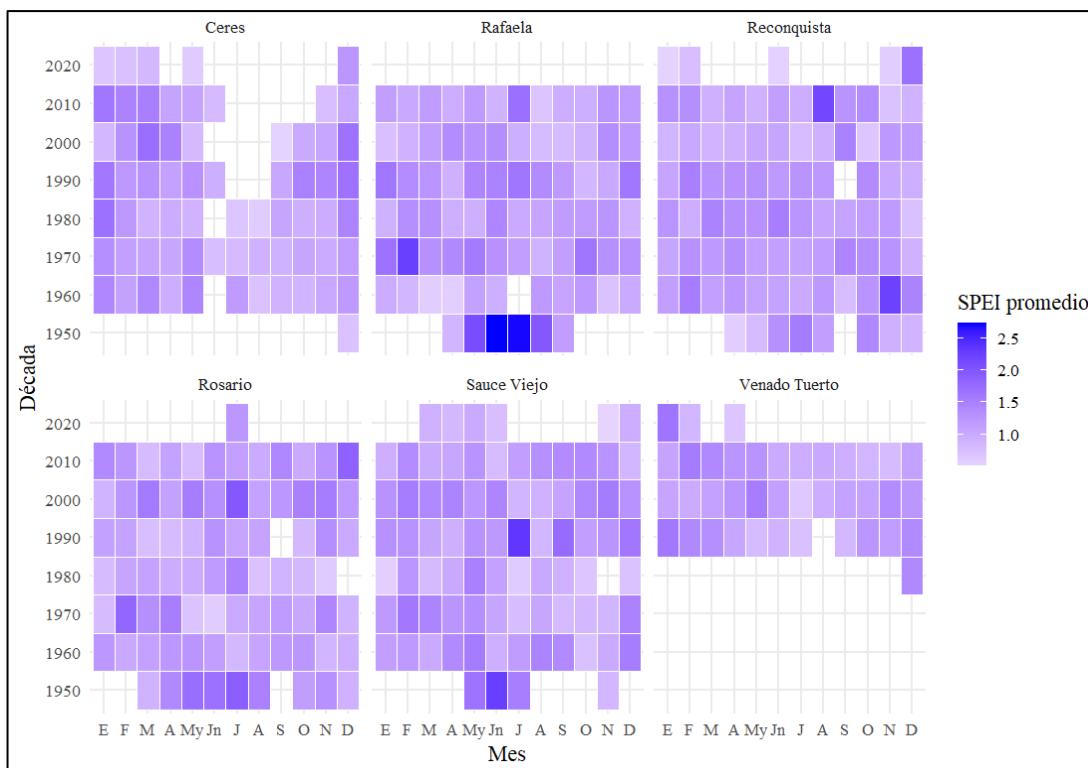
FIGURA 6
Mapa de Ip extremadamente húmedo.



Elaboración propia.

Los mapas representan una cartografía climática del Ip. Sin embargo, esconden situaciones y eventos que han marcado a las poblaciones rurales y urbanas, como fue la 1983, 2003 y 2007 en el entorno de Santa Fe. La de 1983 se debió a una inundación de origen fluvial por el río Paraná mientras que los otros dos, de origen pluvial. En estos dos años, la ciudad de Santa Fe se vio afectada por un evento húmedo severo, ambos en los meses de marzo y abril. En los espacios rurales, por su parte, vieron su producción afectada por la saturación del suelo, mientras que la infraestructura de protección hídrica o para mitigar el impacto de estos eventos, fue profundamente dañada o superada. Ante esto, la figura 7 representa el promedio mensual del SPEI₃ por localidad y década; los colores más oscuros representan los valores que corresponden a eventos húmedos más severos. Esto es crucial para la correlación de los mapas, el Ip y SPEI.

FIGURA 7
Mapa de calor mensual del SPEI₃ (exceso hídrico) por década y localidad



Elaboración propia mediante R-Studio.

En el período 1950-1990 se concentran los valores promedio de SPEI más elevados. La década de 1950 se destaca como la de mayor intensidad de superávit hídrico para la subregión central (Rafaela y Sauce Viejo), asociada a los meses de otoño (específicamente marzo y abril, meses donde se presentan los mayores montos de precipitaciones medias). Las décadas siguientes, entre 2000 y 2010, hay una tendencia general a que se atenúen los eventos severos, sugiriendo que la magnitud de los eventos de exceso fue, en promedio, menor en comparación con la segunda mitad del siglo XX. Entre 2010 y 2023, se acentúa lo que se venía dando desde principios del siglo XXI. Hay una merma en los episodios húmedos extremos o severos.

Sin embargo, aun cuando no sea de peligrosidad muy alta el Ip o el valor SPEI₃ promedio de los eventos extremadamente húmedos en el centro-este, se destaca su impacto tanto en abril de 2003 o en marzo de 2007, años marcados por las inundaciones de origen multicausal en la ciudad de Santa Fe, afectando no solo a la población urbana sino también a las actividades productivas de los espacios rurales. En la figura 7 se observa que en la década de 2010 correspondiente a la estación Sauce Viejo (a una distancia menor de 30 kilómetros), los valores del SPEI de los meses de otoño (marzo, abril y mayo), tienen un valor mayor a +1,5, demostrando que fue una década

húmeda.

Esto desnudó a una ciudad y región totalmente desprovista de infraestructura de riesgo hídrico, ausencia o ineeficacia en los planes de contingencia y una población muy vulnerable (CARDOSO, 2019; BELTRAMINO, 2018 y 2017; CALVI *et al.*, 2017). Vale preguntarse cuáles serían las causas que los mapas arrojan resultados dispares y diferentes. Quizás se responda con la variabilidad de las precipitaciones, que es observable no solo con los registros de las mismas sino también por el SPEI.

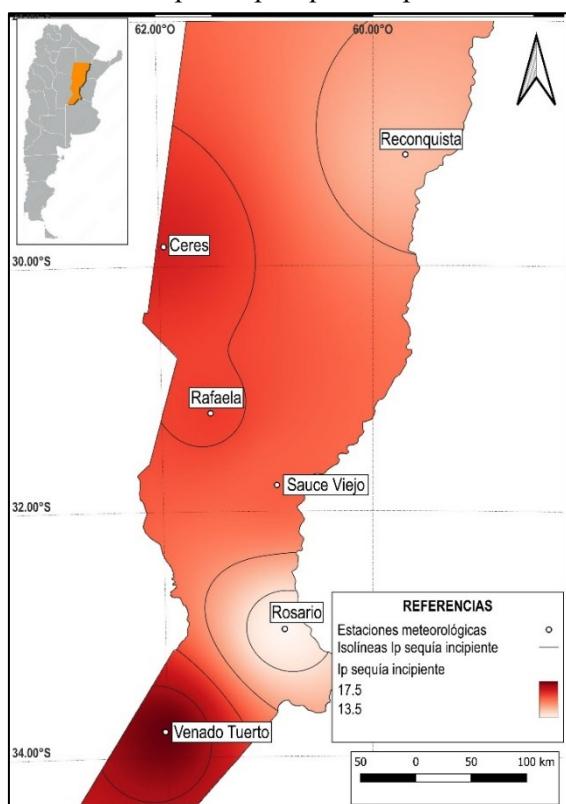
3.2 Cartografía del índice de peligrosidad de eventos referidos a déficits hídricos

En esta cartografía referida a los eventos relacionados al déficit hídrico, las situaciones son dispares al igual que la de excesos. En la figura 8, se observa que hay una mayor tendencia de los eventos de sequía incipiente en el suroeste provincial (Venado Tuerto) y un menor índice en Rosario y Reconquista. Al mismo tiempo, el Ip de humedad incipiente también arroja un mayor índice en Venado Tuerto. Por lo tanto, se infiere que esta región mantiene indicadores altos de peligrosidad de eventos no rigurosos o severos y una alta variabilidad en su régimen de precipitaciones. El RMSE, MAE y el sesgo del Ip de sequía incipiente fueron 1.82, 1.46 y -0.02 respectivamente, indicando errores moderados, pero sin un sesgo importante.

La figura 9 infiere que el noreste, centro-este y el sur son las regiones de un Ip elevado de eventos moderadamente seco, es decir, gran parte de la provincia se encuentra en un color intenso. En este caso, la validación resultó con errores medio-bajo, sin sesgo (RMSE, 1.20; MAE, 0.95 y el sesgo, +0.03).

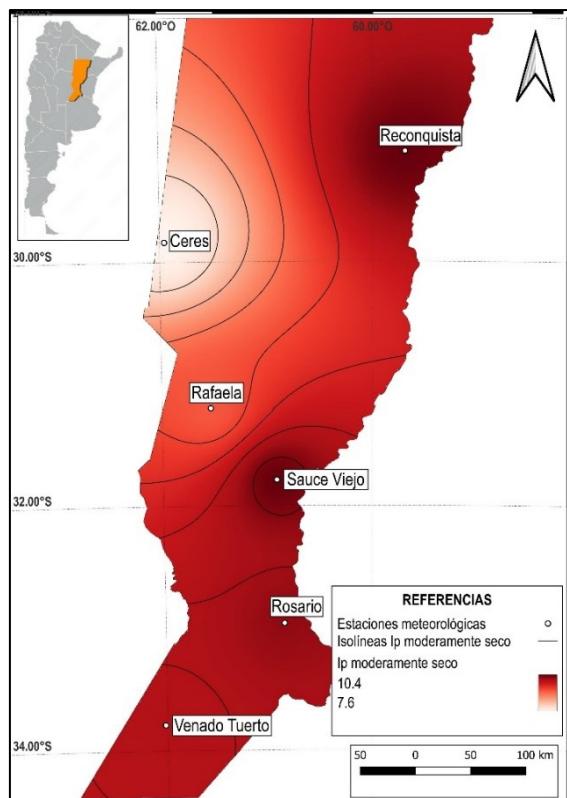
FIGURA 8

Mapa de Ip sequía incipiente.



Elaboración propia.

FIGURA 9
Mapa de Ip moderadamente seco.

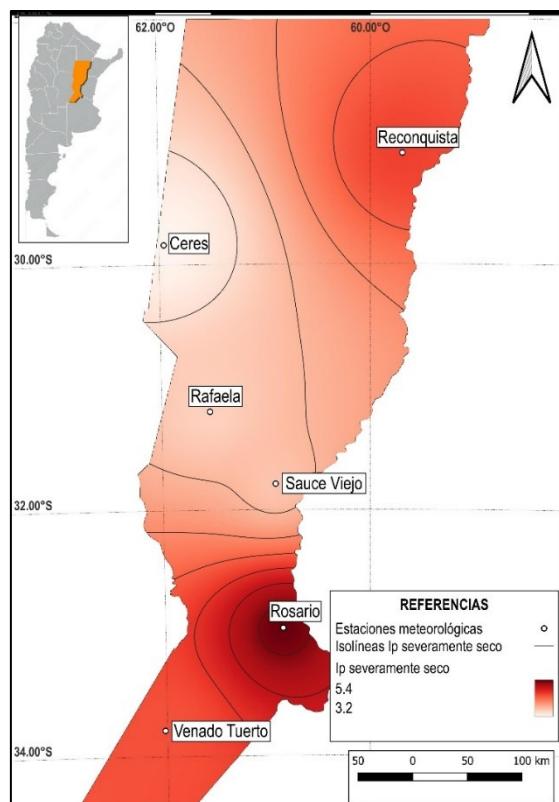


Elaboración propia.

En las figuras 10 y 11, se visualizan el Ip de severamente y extremadamente seco, respectivamente. La figura 9 demuestra su mayor intensidad en el sureste (Rosario) mientras que la 9 se da en el norte (Ceres) y norte en general. Las validaciones correspondientes dieron muy buenos resultados; para los eventos severos los valores de RMSE, MAE y el sesgo fueron de 0.79, 0.64 y -0.12 respectivamente, siendo preciso, aunque con una leve subestimación. Para el caso de los extremos, hubo una excelente precisión casi sin sesgo, con valores de 0.41 para RMSE, 0.35 de MAE y -0.007 para el sesgo.

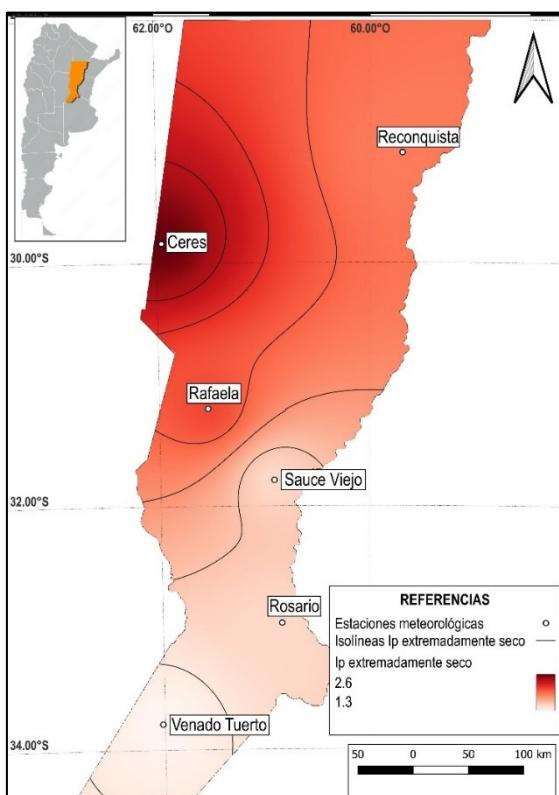
La tendencia demuestra que las regiones del norte (Reconquista y Ceres) y sur (Venado Tuerto, Rosario) suelen presentar los niveles más altos de sequía. Los factores climáticos como la variabilidad de precipitaciones y la incidencia de eventos Niño-Niña pueden explicar la distribución del Ip.

FIGURA 10
Mapa de Ip severamente seco.



Elaboración propia.

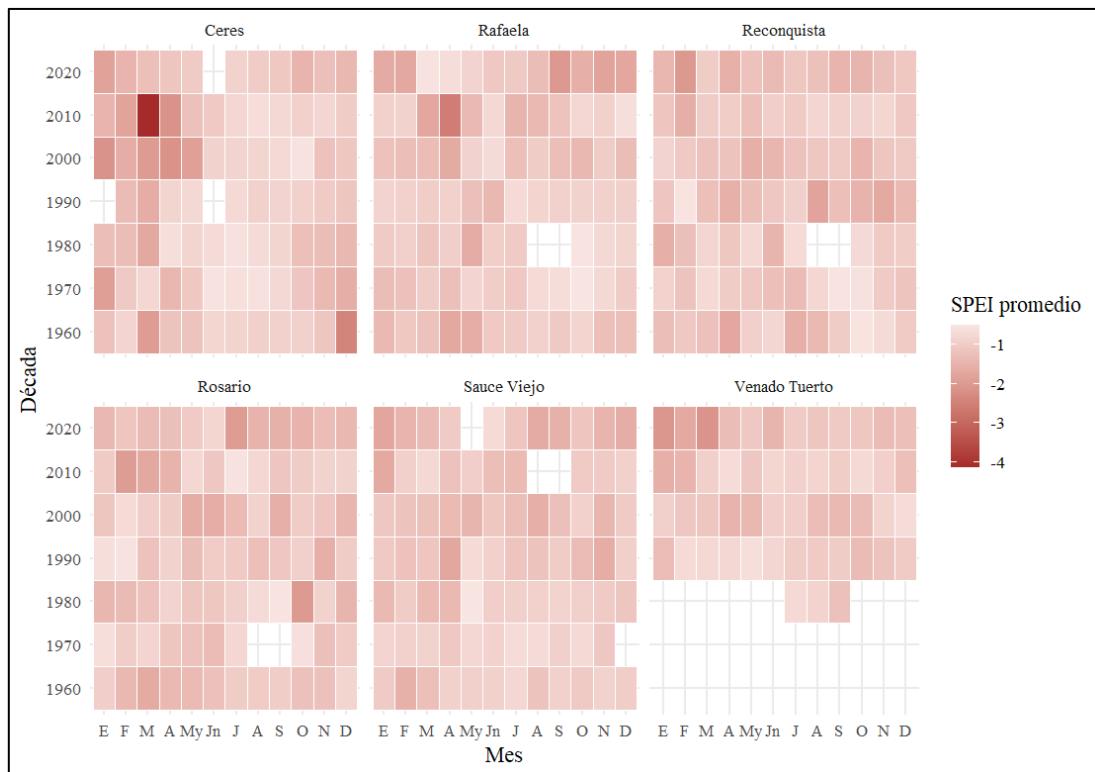
FIGURA 11
Mapa de Ip extremadamente seco.



Elaboración propia.

Los mapas tienen su correlato en el SPEI₃ por lo que, en la siguiente figura (12), al igual que la 7, se presenta el promedio mensual del SPEI₃ por localidad y década de los eventos de déficit. Los colores más oscuros representan los valores que corresponden a eventos secos más severos o extremos.

FIGURA 12
Mapa de calor mensual del SPEI₃ (déficit hídrico) por década y localidad

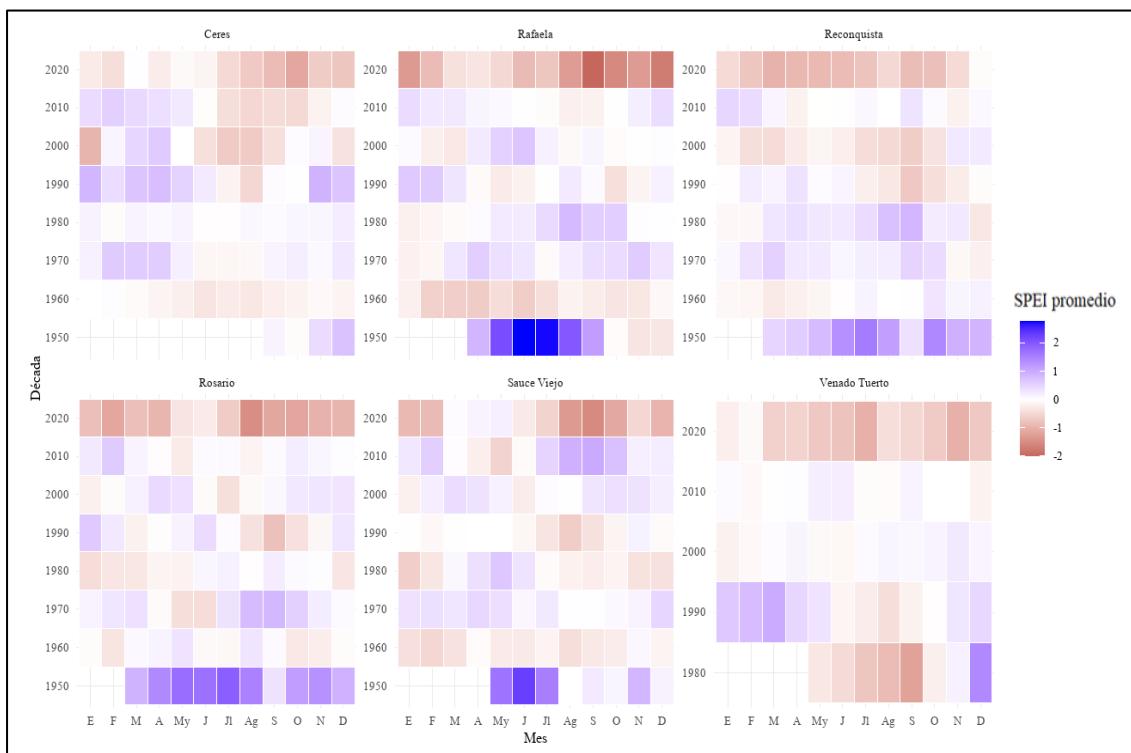


Elaboración propia mediante R-Studio.

Los eventos de déficit más intensos se observan focalizados geográficamente y temporalmente. La región que ocupa la localidad de Ceres es la que más eventos severos y extremos registró. Las décadas de 2010 y 2020, se observan colores más intensos, advirtiendo la severidad del déficit no solo para Ceres, sino que para Rafaela también. Esto es advertido tanto en la figura 11 y por SERIO Y VICH (2010) quienes señalan que en 2008, se registró la sequía más intensa de los últimos 50 años en Ceres y Rafaela. De los eventos de sequía incipiente (figura 8) con su máxima peligrosidad en la región del suroeste (Venado Tuerto), se correlaciona con el mapa de calor del SPEI₃ (figura 12), mientras que los Sauce Viejo, Rosario y Reconquista, tienen su peligrosidad en la ocurrencia de fenómenos moderadamente secos, también observados en el mapa de calor. Se destaca que en los meses correspondientes a la estación invernal (junio a agosto), los eventos son insignificantes o el SPEI₃ promedio de sequía es menor o inexistente, lo que es coherente con una menor evapotranspiración.

Por último, la figura 13 sintetiza los eventos de déficit y exceso hídrico de las localidades (representando las regiones) en Santa Fe. La misma nos muestra una posible aproximación a las probabilidades y la peligrosidad de tales fenómenos.

FIGURA 13
Mapa de calor mensual del SPEI₃ (déficit y excesos hídricos) por mes, década y localidad



Elaboración propia mediante R-Studio.

Para el caso de los déficits, todas las localidades muestran una clara tendencia a condiciones de sequía en los últimos años, especialmente en los meses de verano/otoño (enero a mayo). En las últimas décadas se han experimentado condiciones de déficit hídrico más frecuentes y severas sugiriendo un aumento de la vulnerabilidad y exposición a las sequías en la provincia. Ceres y Reconquista tendrían una mayor probabilidad de ocurrencia de estos tipos de eventos, tal como se puede observar. Por su parte, Rosario y Sauce Viejo muestran la coexistencia de ambos extremos. Estos resultados evidencian señales del cambio en los patrones climáticos de la provincia de Santa Fe al igual que TÓFFOLI et al. (2024).

4. CONCLUSIONES

El índice de peligrosidad de eventos hidrometeorológicos (Ip) demostró ser una herramienta sólida y versátil para evaluar la tendencia del riesgo y la distribución espacial de los eventos extremos vinculados al exceso y déficit hídrico. Su aplicación permitió integrar información climática y territorial, ofreciendo una visión integral de la peligrosidad hidrometeorológica en la provincia de Santa Fe. En este sentido, la cartografía derivada del Ip constituye un insumo de alto valor para la planificación territorial, la gestión ambiental y la formulación de políticas públicas orientadas a la prevención de desastres.

Los resultados obtenidos reflejan patrones espaciales consistentes, donde las zonas norte y sudoeste de la provincia se presentan como las más afectadas, evidenciando una mayor severidad de los fenómenos en dichas regiones. Al analizar el SPEI, se demostró que la segunda mitad del siglo XX se caracterizó por eventos húmedos de mayor magnitud promedio, mientras que el inicio del siglo XXI ha sido dominado por la aparición e intensificación de eventos de déficit severos a extremos. Este patrón sugiere un desplazamiento de la variabilidad hídrica hacia condiciones de mayor estrés por déficit. Esta información resulta esencial para priorizar áreas críticas y definir estrategias de intervención diferenciadas según el tipo y la magnitud de la amenaza.

El patrón dominante es una clara transición desde un período con alternancia de eventos extremos y predominio de excesos hídricos localizados en 1950-1960 hacia un marcado y generalizado predominio de déficits hídricos en las últimas tres décadas, manifestado por un incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos de sequía, lo cual eleva la vulnerabilidad hídrica de la provincia de Santa Fe, siendo el norte y sur los sectores más comprometidos en las

décadas más recientes.

Asimismo, tanto el Ip como la cartografía de peligrosidad pueden incorporarse eficazmente en sistemas de alerta temprana, favoreciendo una respuesta anticipada frente a la ocurrencia de eventos extremos. Desde una perspectiva climática, ambiental y agrícola, la posibilidad de planificar acciones de mitigación y adaptación constituye un paso fundamental hacia la reducción de la vulnerabilidad territorial y socioeconómica. Para ello, es necesario que se incluyan el monitoreo y pronóstico de eventos, la gestión sostenible de los recursos naturales y la programación de campañas productivas acordes a la disponibilidad hídrica,

Finalmente, este trabajo resalta la importancia de continuar avanzando en el desarrollo de indicadores y metodologías de evaluación del riesgo, capaces de incorporar la variabilidad climática y los impactos del cambio global. El fortalecimiento de las capacidades institucionales y la integración de la información espacial en los procesos de toma de decisiones son aspectos clave para mejorar la resiliencia de los territorios frente a los desafíos que imponen los eventos hidrometeorológicos extremos en el contexto actual y futuro.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ALIAGA, V.; FERRELLI, F.; PÍCCOLO, C. (2017) Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *Revista International Journal of Climatology*. Doi: 10.1002/joc.5079
- BELTRAMINO, T. (2018): Los desastres y la visibilización de los riesgos. Las inundaciones en Santa Fe, Argentina. *Revista Bitácora Urbano Territorial*, vol. 29, nº 3, pp. 165-173. Universidad Nacional de Colombia.
- BELTRAMINO, T. (2017) Riesgo y conflictividad social: las disputas por el territorio en Playa Norte (Santa Fe). “Identidades y poder. Tatuares desafiantes de un territorio en disputa”. En Kessler, M. E. y Angeloni, M. (Comp.), Ediciones UNL, Santa Fe, pp. 79-102.
- BOLSA DE COMERCIO DE ROSARIO (2023) El costo de la sequía 2022/23 ya asciende a US\$ 10400 millones para los productores de soja, trigo y maíz. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/es/print/pdf/node/97204>
- CALVI, L.; FABRICIUS FLORES, C.; MÉNDEZ, L.; WILKINSON, A. (2017): Redes de gobernanza como factor de la resiliencia urbana en la ciudad de Santa Fe entre 2007 y 2015. Ponencia. VI Congreso Nacional de Geografía de Universidades Públicas y XVI Encuentro de Profesores en Geografía del Nordeste Argentino. Facultad de Humanidades (UNNE).
- CARDOSO, M. (2019): Estudio de la vulnerabilidad y la resiliencia en la ciudad de Santa Fe, Argentina: El rol de los servicios urbanos en general y del transporte de pasajeros en particular. *Revista de Geografía Norte Grande*, nº 73, pp. 133-159.
- FERRELLI, F.; BRENDEL, A. S.; PICCOLO, M. C.; PERILLO, G. M. E. (2020): Evaluación de eventos secos y húmedos en el contexto del cambio climático: el caso del sur de la Región Pampeana (Argentina). *Papeles de Geografía*, nº 66, pp. 27-46. DOI: <https://doi.org/10.6018/geografia.431671>.
- GARCÍA MARITANO, E. (2017) El clima es el principal gestor de la política lechera. Nota gremial. CRA. Disponible en: <https://www.cra.org.ar/nota/19757-el-clima-es-el-principal-gestor-de-la-politica-lechera/>
- INFOBAE (2019) En Santa Fe hay más de 200 mil hectáreas afectadas por los excesos hídricos. Disponible en: <https://www.infobae.com/campo/2019/01/05/en-santa-fe-hay-mas-de-200-mil-hectareas-afectadas-por-los-excesos-hidricos/>
- INFOCAMPO (2019) Los productores de Santa Fe optan por trigos más cortos debido a los excesos hídricos. Disponible en: <https://www.infocampo.com.ar/los-productores-de-santa-fe-optan-por-trigos-mas-cortos-debido-a-los-excesos-hidricos/>
- KÖPPEN, W., (1918). Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf. *Petermanns Geogr. Mitt.*, 64, 193-203, 243-248.
- LOVINO, M. A.; MÜLLER, G.; SGROI, L. (2020): ¿Cómo ha cambiado la precipitación en la provincia de Santa Fe? RIA. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 46, nº 2, pp. 226-239.
- MADRID SOTO, A.; ORTIZ LÓPEZ, L. (2005): Análisis y síntesis en cartografía: algunos procedimientos. Universidad Nacional de Colombia.

- MATEUCCI, S. (2012) Ecorregión Espinal. "Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos". En Morello, J., Mautecchi, S.; Rodríguez, A. Orientación gráfica editora. Buenos Aires. Pp. 349-390.
- MÉNDEZ, L.; TÓFFOLI, G.; COSTAMAGNA, D.; CARDOSO, M. (2025): Condiciones de peligrosidad de eventos de déficits y excesos hídricos en la cuenca lechera santafesina, período 1959-2023. Revista FAVE, Universidad Nacional del Litoral. DOI: <https://doi.org/10.14409/fa.2025.24.e0036>
- MÉNDEZ, L. (2021): El clúster lechero regional como estrategia de desarrollo territorial rural. Reconfiguración de la actividad tambera del departamento San Cristóbal (provincia de Santa Fe), período 2008-2018. Tesina de grado. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe.
- ORTEGA GAUCIN, D.; DE LA CRUZ, J.; CASTELLANO, V. (2018): Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México. En: LOBATO SÁNCHEZ, R. y PÉREZ, A. (coord.), Agua y cambio climático, cap. 5. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- RENDÁ, E. (2017) Manual para la elaboración de mapas de riesgo. Programa Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. Ministerio de Seguridad de la Nación, Argentina.
- SANDOVAL, S. (2015): El modelo productivo agrícola dominante del siglo XXI. Transformaciones institucionales y funcionales en la cuenca lechera santafesina. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral.
- SERIO, L.; VICH, H. (2010): Algunas características e impactos de las sequías que afectaron a la región pampeana entre 2007 y 2009. Revista de la Facultad de Agronomía (UBA), vol. 30, nº 3, pp. 187-195.
- SPENNEMANN, P.; RIVERA, J.; SAULO, C.; PENALBA, O. (2015): Comparison of GLDAS Soil Moisture anomalies against the Standardized Precipitation Index over South America. Journal of Hydrometeorology.
- SVOBODA, M.; HAYES, M.; WOOD, D. (2012): Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario. Organización Meteorológica Mundial (OMM), nº 1090. Recuperado de: https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf.
- TSAKOUMAGKOS, P; NATENZON, C. (2015) Riesgo ambiental y emergencia agropecuaria. Catástrofes por inundaciones en el partido de San Pedro. En Natenzon, C., y Ríos, D. "Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades: aportes desde la geografía y otras ciencias sociales para casos argentinos". Imago Mundi. Pp: 29-52.
- TOFFOLI, G. D.; ACETTA, P.; MÉNDEZ, L.; COSTAMAGNA, D.; LEVA, P. (2024): Señales de cambio climático en la provincia de Santa Fe. Tendencias del período 1960-2019. Papeles de Geografía, nº 70, pp. 53-73. DOI: <https://doi.org/10.6018/geografia.609991>.
- VICENTE SERRANO, S.; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; CAMARERO, J.; LÓPEZ MORENO, J.; AZORÍN MOLINA, C.; REVUELTO, J.; MORÁN TEJEDA, E.; SÁNCHEZ LORENZO, A. (2012): Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. Ponencia presentada en el VIII Congreso de la Asociación Española de Climatología, Salamanca, España. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8332>.
- WILHITE, D.; SVOBODA, M.; HAYES, M. (2007): Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. Water Resources Management, vol. 21, pp. 763-774.
- ZANVETTOR, R.; RAVELLO, A.; BOLETTA, P. (2016): Monitoreo y evaluación de las condiciones hídricas extremas (sequías y excesos de humedad) en Argentina. Revista RADA, vol. VII, pp. 15-25.
- ZANVETTOR, R.; SÁNCHEZ, S.; BOLETTA, P.; RAVELLO, A. (2021): Determinación de extremos hídricos en Argentina. Revista RADA, vol. XII, pp. 21-35.
- LAVEL, A. (2004) Antecedentes, formación y contribución al desarrollo de los conceptos, estudios y práctica en el tema de los riesgos y desastres en América Latina: 1980-2004. La Red- Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2018). Global warming of 1.5°C. Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>

WILCHES-CHAUX, G. (1993) La vulnerabilidad global. In A. (Comp. Maskrey (Ed.), “Los desastres no son naturales”. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Tercer Mundo Editores. Pp. 1141.